

Variabilidad de la capacidad de sostenimiento de un macizo rocoso Vs longitud de pernos de roca

Variability of rock mass support vs lengths of rockbolts

E. Mauro Giraldo Paredes⁽¹⁾

Resumen

Bajo el postulado: “Universidad = Investigación”, el presente estudio está enfocado en determinar la capacidad de anclaje de los pernos de roca más utilizados en el Perú y la relación existente con su longitud. Inicialmente, se planteó llevar a cabo las pruebas en bloques de granito dentro del campus de la UNMSM, pero por no reflejar las condiciones reales, se realizaron en la mina Reliquias de la Cía. Minera Castrovirreyna (Huancavelica), en el mes de marzo del año en curso.

Los pernos estudiados fueron: Split Set, Barras Helicoidales, Hydrabolt y Swellex, convenientemente acondicionados para tener anclajes efectivos de 1, 2, 3 y 4 pies. Los Split Sets y Barras Helicoidales, fueron cortados y entregados así, por PRODAC y Aceros Arequipa, respectivamente. Los pernos inflables Hydrabolt y Swellex donados por New Concept Mining y Atlas Copco, fueron entubados para que se expandan únicamente en las longitudes efectivas de anclaje establecidas.

Los resultados de las 51 pruebas realizadas (11 Split Set, 17 Barras Helicoidales, 12 Hydrabolts y 11 Swellex), demuestran que la capacidad de anclaje de los pernos no guarda una relación lineal con sus longitudes, es decir, al duplicar la longitud de un perno, su capacidad de anclaje no necesariamente será el doble. Asimismo, La elongación de los pernos, tiende a guardar una relación lineal con la carga aplicada.

Los pernos Split Set, Hydrabolt y Swellex muestran un anclaje uniforme al variar las longitudes efectivas de anclaje; mientras que el comportamiento de las Barras Helicoidales es irregular, sobre todo cuando se instalan con cemento. Los pernos de mayor y menor capacidad son respectivamente, los Hydrabolts y los Split Sets, así, para 2 pies de longitud efectiva de anclaje sus capacidades son 15,75 ton y 3,75 ton, respectivamente. Los pernos que muestran menor y mayor elongación son los Hydrabolts y los Split Sets, respectivamente. Asimismo, el costo por metro cuadrado sostenido del más bajo al más alto son respectivamente: Hydrabolt (10,95 \$/ m²) y la barra Helicoidal con resina (50,67 \$/ m²), según análisis de costos al mes de Abril del 2011, y las condiciones y realidades encontradas en la mina Reliquias.

Abstract

This research is focused on establishing the load capacity of the rockbolts commonly used in Peru based on their length. Initially, we aimed to perform the pull tests on granite blocks at San Marcos University Campus, they were carried out under real operating mining conditions, at Reliquias, Castrovirreyna Mining Company (Huancavelica) during March of the current year.

The rockbolts tested were: Split Set, Threaded Rebars, Hydrabolt and Swellex, which were suitably conditioned to have an effective anchorage of 1 to 4 feet. The Split Set and Threaded Rebars were cut and delivered as per our request by PRODAC and Aceros Arequipa, respectively. Both, Hydrabolt and Swellex rockbolts, supplied by New Concept Mining and Atlas Copco, were piped around to allow the anchorage of the established lengths only.

Fifty one tests were carried (11 Split Set, 17 Threaded Rebars, 12 Hydrabolts and 11 Swellex), and the results showed that the load capacity of the rockbolts does not keep any linear relation with their length, that is to say, for example, when we duplicate the length of a rockbolt, its load capacity not necessarily will be doubled. The elongation of the bolts tends to keep a linear relation with the applied load.

Split Set, Hydrabolt and Swellex rockbolts showed an uniform anchorage changing their lengths, whereas the Threaded Rebars showed an irregular anchorage, especially when they were installed with cement. The rockbolts of major and minor load capacity per length are the Hydrabolts and the Split Set, for a 2 feet bond length of anchorage their capacities were 15,75 ton and 3,75 ton, respectively. The bolt that showed less elongation was the Hydrabolt and the one with the greatest the Split Set. The Rockbolt of lowest cost for m² supported was the Hydrabolt (\$10,95/m²) and the one with the highest cost the Swellex (\$50,67/m²), costs worked out for a 7 foot rockbolt, prices of April, 2011, and according to the operating conditions at Reliquias Mine.

E-mail: egirallop@hotmail.com

(1) Docente, Depto. de Ingeniería de Minas - UNMSM.

I. ASPECTOS GENERALES

1.1 Objetivos del estudio

- Determinar la carga en ton que puede soportar cada pie de anclaje de los distintos pernos.
- Determinar el comportamiento de sostenimiento de un perno al variar su longitud.
- Determinar los tiempos totales para la instalación y actuación de los pernos.
- Determinar los costos de los pernos instalados y por m² sostenido.

1.2 Hipótesis del estudio

La relación entre la capacidad de anclaje de un perno de roca y su longitud, no es lineal.

1.3 Metodología del estudio

Los pernos y conexos fueron donados por Aceros Arequipa, Prodac, New Concept Mining, Castem, Atlas Copco y Pevoex. Asimismo, la Cía. Minera Castrovirreyna aceptó designar como área de pruebas en el Crucero 752 del Nivel 642 (ver foto N° 1-1) de su unidad Reliquias.

Dado que las pruebas de campo se llevarían a cabo con longitudes no estándares de pernos, haciendo longitudes efectivas de anclaje de 1, 2, 3 y 4 pies, previamente se tuvo que prepararlos y acondicionarlos adecuadamente. En el caso de los Split Sets y Barras Helicoidales, a solicitud los respectivos proveedores entregaron cortados. En caso de los pernos inflables Swellex e Hydrabolts, se acondicionaron en un taller y dentro del Campus universitario, utilizando tubos de estrangulamiento y otros materiales, luego de hacer pruebas en vacío para determinar el comportamiento del tubo y los pernos a la presión de 25 MPa.



Foto N° 1-1: Portada del Nv 642, ingreso al crucero 752

Durante en el primer viaje a la mina Reliquias, del 07 al 10 de Marzo del año en curso, se hizo un reconocimiento del terreno y la zona, equipo y personal disponibles, y la existencia de todos los servicios requeridos para realizar las pruebas. Asimismo, en dicha ocasión se

perforaron todos los taladros en el hastial izquierdo y derecho del crucero 752 a una altura de 0,9 a 1,6 m del piso, bajo un estricto control de los diámetros, profundidades y alineación.

En el segundo viaje a la mina antes indicada, del 27 al 30 de Marzo del año en curso, se llevó consigo toda la logística para la instalación y las pruebas de arranque de los distintos tipos de pernos.

Los datos recopilados durante la perforación de taladros, pruebas de arranque (pull test) y la información económica, se procesaron en formatos diseñado para este fin, obteniéndose los resultados que se detalla más adelante, con los cuales se hace una discusión de los resultados y las conclusiones pertinentes.

1.4 Elementos de sostenimiento de un macizo rocoso

Actualmente, existe una diversidad de elementos de sostenimiento de rocas en el mercado, todos ellos orientados en garantizar la seguridad, economía y/o operatividad de una excavación. Dentro de estos se tienen: Roca y madera (los primeros ademes utilizados por el hombre), arcos de acero (cimbras o cerchas), pernos de anclaje (de madera, de ranura y cuña, con concha de expansión, con inyección de lechada de cemento, con resina, pernos de expansión, de fibra de vidrio, autoperforante y de fricción), Cables (liso, minicaged y birdcaged), sostenimiento de acero de frentes largas, sostenimiento de concreto (concreto lanzado, concreto armando y dovelas), relleno (detritico, neumático e hidráulico), mallas (electrosoldadas, tejida galvanizada y poliéster) (Robles, 1994; Ergin, 1987)

1.5 Reseña de la Unidad Minera Reliquias

Las pruebas de campo se desarrollaron en el crucero 752 del nivel 642, zona estéril de la Veta Matacaballo de la unidad minara Reliquias, de la Cía. Minera Castrovirreyna (Huancavelica). Tanto Reliquias como sus alrededores están caracterizadas por una secuencia estrato volcán de tufos, brechas volcánicas, y lavas andesíticas y tufos sub acuosos, emplazadas en capas pseudo estratificadas, falladas y poco deformadas. La mina reliquias, consta de un conjunto de vetas de origen hidrotermal con rumbos ligeramente al E-W a N80E y buzamiento de 65° a 85°, cuyas potencias van de 0,8 a 2,5 m y con una mineralización poli metálico de Ag-Au-Pb-Zn-Cu, predominando la plata. Entre otros, el nivel en producción actual es el 642, por el método de minado de tajeo por sub niveles, aplicando taladros largos en abanico. El mineral extraído se transporta a Caudalosa Grande para su tratamiento, obteniéndose concentrados bulk de plomo y plata (Cía. Minera Castrovirreyna, 2009)

1.5.1 Tipo de roca y propiedades geomecánicas

Los parámetros geomecánicos considerados en la zona de los tajeos que incluyen caja techo, mineral y caja piso en base al análisis de los mapeos geomecánicos se resume que el RMR de la veta Mataballo en general sería 62. Para determinar con mayor certeza la clase de roca del Crucero 752, el Departamento de Geomecánica de Castrovirreyna hizo un mapeo para luego emanar el informe correspondiente, donde se precisa que la roca es andesítica fracturada con RMR = 48, es decir clase III con un tiempo de auto sostenimiento de 3 á 7 días, por lo que se requiere un sostenimiento tipo C: Perno sistemático cada 1,2 m con malla electro soldada (López, 2011).

1.5.2 Tipo de Sostenimiento aplicados en Castrovirreyna

La Cía. Castrovirreyna, utiliza 3 tipos de pernos, como sostenimiento temporal los Split Sets y como definitivos las Barras Helicoidales e Hydrabolts. En zonas fracturadas estos pernos aplican en combinación con mallas de acero electro soldadas y en zonas deleznales se instalan cimbras (López, 2011).

1.6 Equipo utilizado en el desarrollo del proyecto de investigación

La Cía. Castrovirreyna proporcionó las perforadoras Jackleg marca Seco modelos H7226 y E39 3X y las barras cónicas con culata de 4, 6 y 8 pies de longitud. Las brocas de 36, 38 y 41 mm fueron adquiridos por el equipo de investigación, por ser diámetros no estándares en Castrovirreyna.

1.7 Personal participante en las pruebas de campo

Entre las 19 personas que participaron directa o indirectamente en la ejecución de las pruebas de campo, se puede destacar la presencia del Ing. Tito Melo Landeo, Veedor CIP; MSc. Ernesto López Pomareda, Jefe Corporativo de Geomecánica de la Cía. Minera Castrovirreyna, como ilustra la foto N° 1-2.

1.8 Diseño de formatos para la toma de datos de campo.

A fin de facilitar el levantamiento de datos de campo, se elaboraron una serie de formatos para el proceso de perforación de taladros, tiempos de instalación de los pernos, pruebas de arranque y elongación de los pernos.



Foto N° 1-2: Al centro Veedor CIP y el Jefe de Geomecánica de Cía. Minera Castrovirreyna.

1.9 Equipo de arranque utilizado.

Estuvo conformado por una bomba hidráulica manual POWER TEAM, una gata hidráulica POWER TEAM, un manómetro ENERPAQ modelo EN GF – 813P RCH 302. Según el informe de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, respecto a la calibración de la gata hidráulica antes indicada, establece la ecuación de la curva de ajuste (Y), como: $Y = 0,75x$; donde: Y es la lectura patrón (UNI) y x es la lectura en el manómetro.



Foto N° 1-3: Equipo de arranque completo

II. SPLIT SETS

Los Split Sets, son pernos de fricción construidos a partir de un fleje de acero de un espesor mínimo de 2,2 mm. El acero es normalmente ASTM A1011 grado 60 de alta resistencia. Se fabrican mediante un rolado sin unir los costados, obteniéndose un tubo ranurado en toda su longitud. Los diámetros exteriores van de 33 á 46,5 mm y el diámetro del fierro del collarín varía de 6,2 á 8 mm, de acuerdo al diámetro del Split set. En el mercado se encuentran de 2 tipos: Split Set Estándar y Split Set Cementado y en longitudes de 0,6 á 3,0 m (Ros, 2005).

2.1 Características de los Split Sets utilizados

En el presente estudio, se utilizó Split Sets Estándar, donados por la empresa PRODAC. El espesor de la pared del tubo es de 2,3 mm, ranura de 15 mm en toda su longitud. El extremo frontal tiene una conicidad para facilitar su penetración en el taladro durante su instalación. A 8 mm del extremo posterior lleva soldado un anillo de hierro redondo de 8 mm, para facilitar su instalación y colocación de la planchuela.

2.2 Preparación para las pruebas de campo

Dado que las pruebas de anclaje con éste y los otros tipos de pernos se llevarían a cabo con longitudes no estándares, se solicitó a la empresa Prodac que los cortaran y acondicionaran para longitudes efectivas de anclaje de 1, 2, 3 y 4 pies. Recepcionados estos pernos, se procedió a determinar las longitudes efectivas de anclaje, tal como está ilustra la lámina N° 2-1 en el anexo A.

2.3 Perforación de los taladros

De acuerdo al propio proveedor, estos pernos trabajan en forma óptima con taladros de 38 mm de diámetro. Para tener holgura en su instalación, debido a la conicidad en el extremo frontal, se perforaron taladros con profundidades de 1 pie adicional en cada caso.

2.4 Instalación de los Split Sets en los taladros

La instalación de los Split Sets se lleva a cabo por percusión, con la misma perforadora Jackleg, utilizando para ello un adaptador de instalación (ver Foto N° 2-1), que permite ejercer percusión pero no rotación al Split Set.



Foto N° 2-1: Instalación de un Split Set.

2.5 Pruebas de arranque (pull test)

Durante las pruebas al igual que para todos los pernos, se hicieron dos mediciones y registros, la carga aplicada y la elongación del perno. La lectura en el manómetro se registró cada ton de carga y la correspondiente

elongación (con vernier), hasta un valor pico, por encima del cual, el perno empezaba a salirse del taladro y lógicamente la carga en el manómetro dejaba de subir por encima de ese valor.

2.6 Resultados de las pruebas

Con los datos registrados en el campo y ajustando las cargas según la ecuación de ajuste establecida por la Universidad Nacional de Ingeniería, UNI ($Y = 0,75x$), se obtuvieron los resultados presentados en el cuadro del anexo E, con lo cual se obtiene el gráfico N° 2-1, carga Vs la longitud efectiva de anclaje. La curva tiene una pendiente más prominente para las longitudes de 1 y 2 pies, luego se tiene una pendiente más suave, para luego convertirse en asintótica.

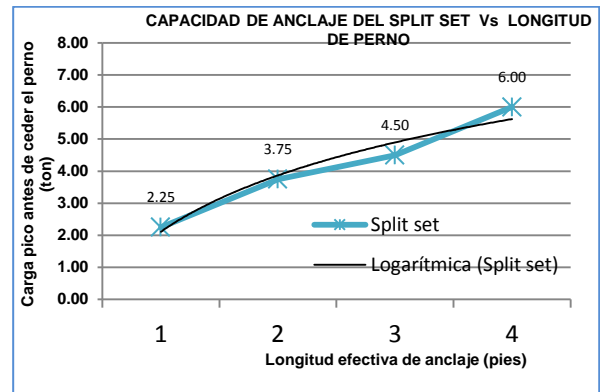


Gráfico N° 2-1: Carga Vs. Longitud efectiva de anclaje para los Split Sets

La elongación varía de acuerdo a la longitud del perno (ver gráfico N° 2-2), es decir, cuanto más largo el perno, mayor elongación. Por ejemplo para 1,5 ton de carga aplicada a longitudes de anclaje de 1 y 4 pies, las elongaciones son 1,25 y 4,47; respectivamente.

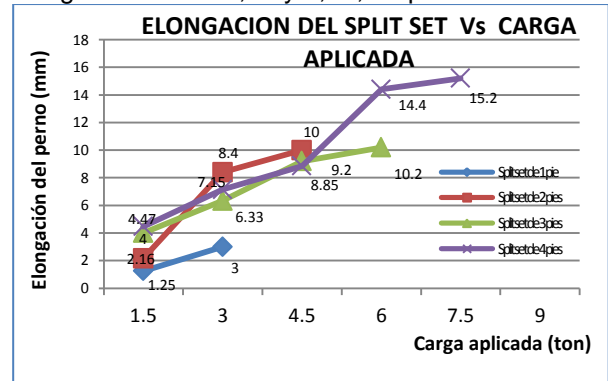


Gráfico N° 2-2: Elongación en función de la carga aplicada y longitud efectiva de anclaje.

III. BARRAS HELICOIDALES

Las Barras Helicoidales son pernos de adhesión, que originalmente aparecen como los "Perfobolt" escandinavos. Trabajan sin tensionar el perno sino por adherencia a las paredes del taladro, en

combinación con un mortero de cemento o resina (Robles, 1994). Este sistema está constituido por 3 elementos: a) Perno, que viene a ser una barra de acero laminado en caliente con una sección transversal ovalada y resaltes en forma de filete helicoidal de paso amplio en toda su longitud. b) una placa de acero perforada o con un diseño piramidal. c) Una tuerca de fundición nodular (DSI, URL; Ros, 2005).

3.1 Morteros para la instalación de las Barras Helicoidales

3.1.1 Mortero de cemento: Los morteros cementicios MEYCO MASTERBOND 1, son cartuchos preparados para una rápida instalación de las barras de anclaje, pernos de rosca continua o para cables de anclaje (BASF, 2009). Vienen cubiertos por un envoltorio de plástico muy fino, conteniendo la mezcla de cemento con los componentes que facilitan su rápido fraguado. Se presentan en cajas de 25 cartuchos de 30 mm de diámetro o cajas de 10 cartuchos para 44 mm de diámetro (Química Suiza, URL).

Los cartuchos de cemento CEM-CON de Castem, diseñados para la instalación de pernos de anclaje, es una mezcla de cemento, arena fina, aditivos y acelerantes. Se presentan en 2 tipos: CEM-COM NORMAL, cuyo tiempo de fraguado es de 24 horas y CEM-COM RAPIDO, con un tiempo de fraguado de 8 horas. Vienen empacados en cajas de 50 cartuchos de 30 x 305 mm, haciendo un peso aproximado de 17,5 Kg. Para su aplicación, los cartuchos deben sumergirse en agua por espacio de 5 a 10 minutos para alcanzar la proporción agua/cemento de 0,3/1. Los cartuchos CEM-CON NORMAL pueden permanecer sumergidos dentro del agua hasta por 1 hora, mientras que los CEM-COM RAPIDO máximo por 30 minutos (Castem, URL).

3.1.2 Mortero de resina: Todos los morteros de resina tienen ciertas características comunes, como: Rápido fraguado, resistencia a los ácidos, poder de fijación en la roca, resistente al agua, protegen de la corrosión al perno, entre otros. Entre otras marcas, se pueden citar las siguientes: Lokset de Geoinyecta, EUCO 9000 Y EMCOR (Geoinyecta, URL; Química Suiza, URL; Emcor, URL).

3.2 Características de las Barras Helicoidales y el mortero encapsulante utilizados en las pruebas

Las Barras Helicoidales utilizadas en las pruebas fueron donados por Aceros Arequipa, siendo sus características: Diámetro nominal 22 mm (7/8"), diámetro exterior 24,5 mm (0,965") y longitudes para hacer anclajes efectivos de 1, 2, 3 y 4 pies. A pedido, estas barras fueron cortadas por Aceros Arequipa, para hacer anclajes antes

indicados. Las tuercas de 22 mm, para hacer las pruebas de arranque fueron donados por la empresa PEVOEX.

Los encapsulantes utilizados para estas pruebas fueron cemento y resina, donados por Castem. El cemento fue el CEM-COM NORMAL, cuyo tiempo de fraguado es de 24 horas y la resina GROUND LOCK de fragua rápida (1 – 3 minutos).

3.3 Preparación para las pruebas de campo

Se marcaron las longitudes efectivas de anclaje de 1, 2, 3 y 4 pies, como se detalla en la lámina N° 3-1 mostrado en el anexo B y la foto N° 3-1, descontando en el extremo frontal el biselado de 22 mm, y en el extremo posterior (cabeza) 135 mm, para instalar la mordaza del equipo de arranque.



Foto N° 3-1: Barras Helicoidales y morteros

A 135 mm del extremo posterior de cada perno, se marco un collar con pintura fosforescente roja, como señal para facilitar el control de la longitud que debería ingresar dentro del taladro.

3.4 Perforación de los taladros

Todos los taladros se perforaron con diámetro de 36 mm en toda su profundidad, diámetro óptimo indicado por Aceros Arequipa y profundidades iguales a la longitud efectiva de anclaje más 2,2 cm. De esa forma se perforaron taladros de 32,2 cm para 1 de anclaje, 62,5 cm para 2 pies, etc.

3.5 Instalación de las Barras Helicoidales en los taladros

Para la instalación de estos pernos, los cartuchos de cemento se mantuvieron remojados en agua, por espacio de entre 10 y 25 minutos como máximo para tener la relación agua /

cemento de 0,3/1 (según recomendación de Castem), antes de su introducción dentro de los taladros. Por cada pie de taladro, se introdujo un cartucho de cemento o resina dentro del taladro.

Las barras se introdujeron dentro de los taladros con la ayuda de la perforadora (Jackleg), utilizando un adaptador. Al final de la instalación, se notaba en cada caso que el mortero llenaba completamente los taladros. En total se instalaron 12 pernos con cemento y 6 pernos con resina.

3.6 Pruebas de arranque (pull test)

Estos pernos trabajan en combinación con un mortero, cuyo tiempo de fraguado es variable, se utilizó el CEM-CON NORMAL (24 horas de fraguado) y resina GROUD LOCK RAPIDA (fraguado de 1 á 3 minutos). Las pruebas de arranque no pudieron llevarse a cabo inmediatamente después de dichos tiempos, sino después de 17,8 á 18,1 horas de las barras las barras instaladas con resina, y de 29,2 á 30,3 horas a las instaladas con cemento.



Foto Nº 3-2: Equipo de arranque en acción

3.7 Resultados de las pruebas

Con los datos registrados en el campo y ajustando las cargas según la ecuación de ajuste establecida por la UNI, se obtienen los valores que muestra el cuadro del anexo E, con lo cual se obtiene el gráfico Nº 3-1, carga Vs la longitud efectiva de anclaje. Cuando la Barra Helicoidal se instala con cemento, su capacidad de anclaje es irregular. El gráfico Nº 3-1, muestra que la pendiente de la curva no siempre es positiva, en caso de la barra instalada con cemento.

Las Barras Helicoidales instaladas con resina, se observa que hacen anclajes más uniformes y siempre ascendente. Los gráficos Nº 3-2 y 3-3, muestran respectivamente las elongaciones de las Barras Helicoidales instaladas con cemento y resina. Se observa que la barra instalada con resina, se elonga casi el doble de la correspondiente instalada con cemento.

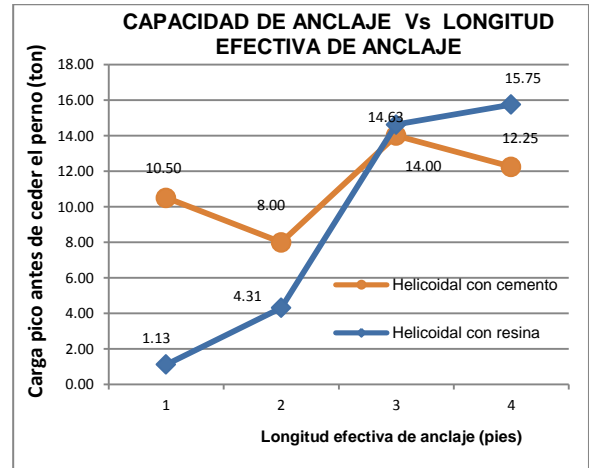


Gráfico 3-1: Carga Vs. Longitud efectiva de anclaje para las barras helicoidales

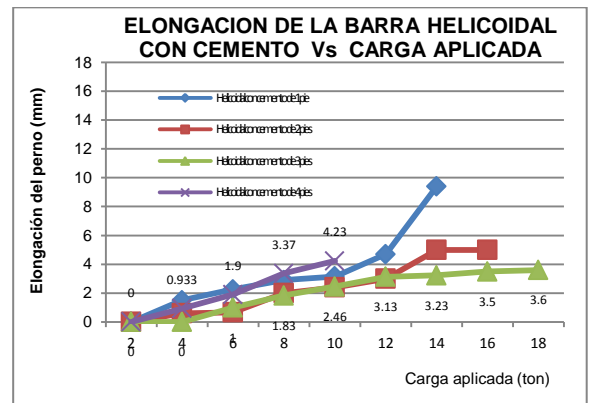


Gráfico Nº 3-2: Elongación de las Barras Helicoidales con cemento Vs Carga aplicada (ton) y la longitud efectiva de anclaje (pies)

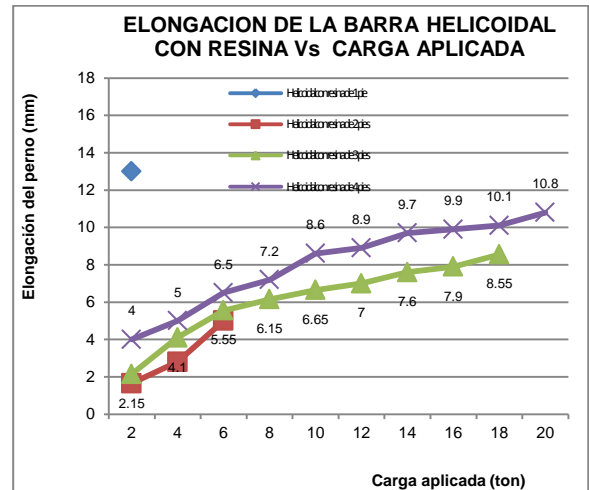


Gráfico Nº 3-3: Elongación de los pernos Helicoidales en función de la carga aplicada y longitud efectiva de anclaje.

IV PERNOS HYDRABOLTS

Los Hydrabolts son pernos construidos de tubos de acero, conformando una sección en "C" de doble pared, similar a su antecesor, el Swellex. Está sellado por ambos extremos con bujes, donde el extremo posterior (cabeza), lleva una válvula anti retorno (check), permite retener el agua después de su inflado con una bomba

hidroneumática de alta presión (New Concept Mining, URL).

Hacen anclaje, inmediatamente después de su instalación. Cuando el inflado ha concluido, una válvula de color sella el niple por donde se alimenta el agua, facilitando además su verificación de la correcta instalación. New Concept Mining ha establecido un código de colores en función de la longitud del perno, agrupados en 3 modelos: Hydrabolt NT, Hydrabolt Normal e Hydrabolt Φ 29.

El diámetro de los taladros para su instalación va de 30 á 36 mm para los dos primeros modelos y de 34 á 40 mm para el tercer modelo (NCM, URL). Asimismo, la instalación puede llevarse en forma manual o mecanizada.

4.1 Características de los pernos hydrabolt utilizados en las pruebas

Los pernos Hydrabolts usados para las pruebas fueron donados por la Cía. New Concept Mining Peru, del modelo HYDRABOLT Φ 29, con 29 mm de diámetro y todos de 6 pies de longitud (1,8 m) y espesor de la pared del tubo de 2 mm.

4.2 Preparación de los pernos para las pruebas de campo

Al igual que los otros pernos, las pruebas de arranque se llevaron a cabo con longitudes efectivas de anclaje de 1, 2, 3 y 4 pies, usando para ello pernos de 6 pies de longitud. Como no era posible cortarlos para tener dichas longitudes de anclaje, se usó tubos de estrangulamiento para que se inflen únicamente en dichas longitudes efectivas de anclaje hacia la cola del perno como ilustra la foto N° 4-1 (anexo C).



Foto N° 4-1: Pernos Hydrabolt entubados

La tubería utilizada con este propósito tiene ciertas características como resistir la

presión de inflado, su diámetro interior (30 mm) debería dejar pasar libremente al perno y su diámetro exterior (34 mm) debería ingresar libremente en un taladro de 38 mm de diámetro.

4.3 Perforación de los taladros

Los taladros se perforaron con dos diámetros, de 41 mm hasta una profundidad igual a la longitud del tubo de estrangulamiento, y la profundidad restante de 38 mm donde se alojaría la parte que haría anclaje (al fondo del taladro).

4.4 Instalación de los pernos en los taladros

Debido a la perforación de los taladros con mayor diámetro (41 mm) en el tramo inicial, los pernos se introdujeron dentro de los taladros con suma facilidad, teniendo como referencia los bordes de los tubos de estrangulamiento (cerca a la cabeza del perno), quedando libre la cabeza del perno que porta la válvula de alimentación del agua y la arandela acoplada para sujetar la mordaza del equipo de arranque, como ilustra la foto N° 4-2

4.5 Pruebas de de arranque (pull test)

Al igual que para los otros pernos, durante las pruebas de arranque, se hizo dos mediciones y registros, la carga aplicada y la elongación del perno. El número de pulsaciones aplicadas en cada caso dependía del momento en que cada perno comenzaba a ceder, tal es así se en el presente caso se alcanzó 12 pulsaciones como máximo.



Foto N° 4-2: Instalación de los Hydrabolts

4.6 Resultados de las pruebas

Aplicando el factor de corrección de la UNI se obtuvieron las cargas corregidas Vs la longitud efectiva de anclaje, presentadas en el cuadro del anexo E, con cuyos resultados se obtuvo el gráfico N° 4-1, donde se observa que la curva tiene una pendiente muy suave y creciente, lo cual significa un anclaje uniforme conforme aumenta la longitud del perno.

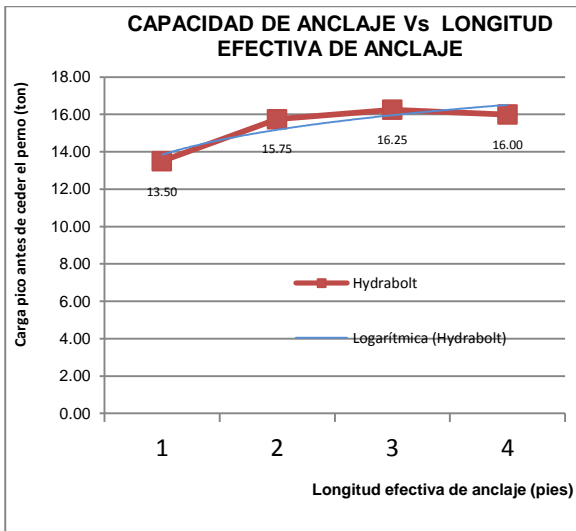


Gráfico N° 4-1: Capacidad de anclaje de los Hydrabolt en función de su longitud efectiva de anclaje

Las elongaciones registradas para estos pernos, se presenta en el gráfico N° 4-2. Así por ejemplo, para una carga de 8 ton carga para las 4 longitudes de anclaje, se mantiene alrededor de 2 mm.

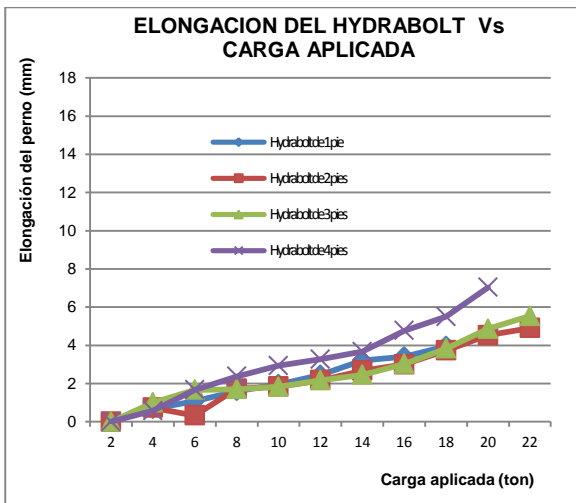


Gráfico N° 4-2: Elongación del Hydrabolt en función de la carga aplicada.

V PERNOS SWELLEX

Introducido por Atlas Copco desde 1982, el Swellex es un perno de acero tubular, que se construye por plegamiento hacia su interior en toda su longitud, con la finalidad de reducir su diámetro, ambos extremos están cerrados por 2 manguitos soldados, donde uno de ellos tiene un agujero muy pequeño para el ingreso del agua a su interior, impulsado por una bomba de alta presión (25 – 30 MPa). Una vez inflado genera una fuerza radial perpendicular a su eje en toda su longitud y una fuerza de rozamiento estático o fricción también en toda su longitud (Esteban, 2005). Sostienen inmediatamente después de su instalación, garantizando la seguridad de equipo y personal (Atlas Copco, 2010).

Atlas Copco, fabrica y comercializa 7 tipos de Swellex: Estándar, MIDI, SUPER, Mn 12, Mn 16, Mn 24 y Swellex híbrido. Los pernos tienen diámetros de 27, 28 y 36 mm con longitudes que van de 0,6 á 6 m, máximo hasta 20 m en caso de los Swellex conectables. Para rocas intermedias el Swellex Mn 16, para rocas blandas Swellex Mn 24 y para rocas con bajo RMR Swellex Mn 24. El diámetro de los taladros para su instalación varía de acuerdo al diámetro del perno de 32 a 51 mm.

5.1 Características de los Swellex utilizados en las pruebas

Los pernos Swellex utilizados en las pruebas, son del tipo estándar Mn 12 de 5 y 7 pies, cuyos datos técnicos son:

6	Diámetro del perno	28 mm
7	Espesor de la pared	2 mm
8	Diámetro del tubo original	41 mm
9	Tipo de acero:	AN10 025- S355JR
10	Mínima carga de rotura	110 KN
11	Elongación mínima, perfil expandido	20 %
12	Presión de inflado	30 MPa
13	Diám. de taladro recomendable:	32 – 39 mm
14	Diámetro de taladro óptimo	35 – 38 mm

5.2 Preparación de las pruebas de campo

Al igual que los Hydrabolts, tampoco estos pernos se podían cortar para tener longitudes de anclaje antes indicados, por lo cual se tuvo que entubarlos, para que se inflen y hagan anclaje en longitudes antes indicadas en el fondo del taladro.

El tubo de estrangulamiento, fue el mismo que se empleó para los Hydrabolts y se hicieron los mismos ensayos para determinar con precisión las longitudes efectivas de anclaje, como se detalla en la lámina N° 5-1 del anexo D.

Para calcular las longitudes a las que se deberían cortar los tubos para ser ensamblados en los pernos, se hizo pruebas de expansión en vacío como muestra la foto N° 5-1, pruebas con las que se determinaron la transición cónica que se forma por el inflado y su longitud como ilustra la lámina N° 5-1 (Anexo D). Se descontaron también las longitudes de los maguitos en los extremos de los pernos de 57 y 59 mm, la longitud para calzar la mordaza durante las pruebas de arranque, equivalente a 40 mm y el espesor de la arandela de 10 mm. Con esos datos se determinó con precisión las longitudes de los tubos, los mismos que fueron cortados en un taller metal mecánico.

5.3 Perforación de los taladros

Los taladros se perforaron en 2 diámetros; 41 mm a lo largo del tubo de estrangulamiento desde la boca del taladro y el resto de 38 mm donde se alojaría la parte que

haría anclaje (al fondo del taladro), como se detalla en la lámina N° 5-1 (Anexo D).



Foto N° 5-1: Ensayo del tubo de estrangulamiento



Foto N° 5-2: Pernos Swellex entubados

5.4 Instalación de los Swellex

Los pernos se introdujeron dentro de los taladros con facilidad, salvo en casos muy puntuales fue necesario ejercer una ligera presión

(empuje) hasta que el borde del tubo de estrangulamiento coincida con la boca del taladro, quedando libre la boquilla del Swellex (57 mm) y 40 mm incluyendo la arandela para enganchar la mordaza del equipo de arranque. Seguidamente, se procedió a inflarlo con agua hasta alcanzar una presión de 25 MPa.

5.5 Pruebas de arranque (pull test)

Prosiguiendo con la rutina, se hizo dos mediciones y registros, la carga aplicada y la elongación del perno.

5.6 Resultados de las pruebas

Haciendo los ajustes a los datos registrados en el campo con el factor de corrección de la carga establecidos por la UNI, se obtienen los valores que se presenta en el anexo E, con lo cual se obtiene la curva Carga Vs longitud efectiva de anclaje que ilustra el gráfico N° 5-1, donde se observa que la curva tiene siempre pendiente positiva, es decir ascendente. Para 3 y 4 pies de longitud efectiva de anclaje las cargas correspondientes son 12,25 y 14,25 ton.

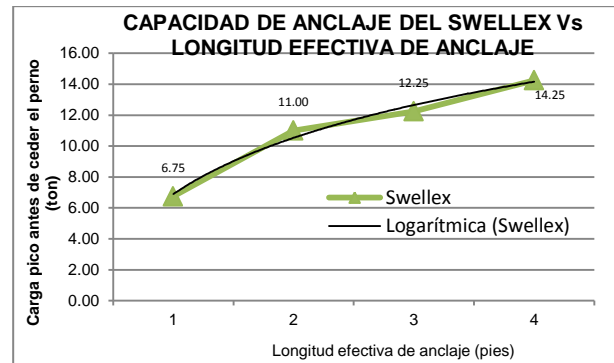


Gráfico N° 5-1: Capacidad de los pernos Swellex de acuerdo a la longitud efectiva de anclaje

El gráfico N° 5-2 ilustra la elongación de estos pernos, donde se observa que los pernos con menor longitud de anclaje tienen mayor elongación, por ejemplo para 10 ton de carga aplicado a 2, 3 y 4 pies de anclaje, las elongaciones son 5,5; 4,13 y 2,63 mm, respectivamente.

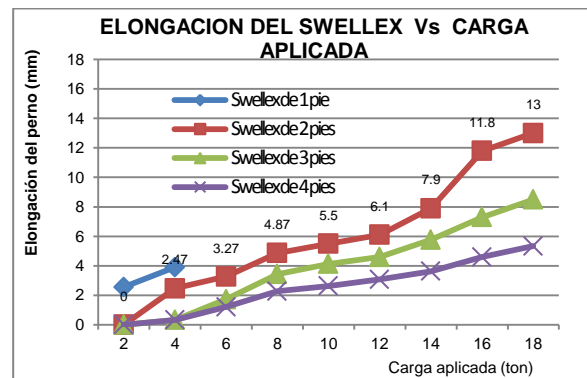


Gráfico N° 5-2: Elongación del perno Swellex en función de la carga aplicada

VI DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Con los resultados obtenidos en los capítulos II, III, IV y V para los 4 tipos de pernos estudiados, complementando con otros datos y costos, se procede a realizar la siguiente discusión técnica y económica. Adicionalmente, se hace una simulación de sostenimiento para visualizar mejor el comportamiento de los pernos estudiados, incluyendo sus costos, acorde con las condiciones de roca, equipo y ambiente encontrados en la Unidad Minera Reliquias. Discusión de resultados técnicos

6.1.1 Capacidad de anclaje de los pernos:

La capacidad de anclaje de los distintos tipos de pernos de roca estudiados, se presenta en el gráfico N° 6-1, donde se explicita y evidencia lo siguiente:

- En ningún caso, las capacidades de anclaje de los pernos guardan una relación lineal con su longitud, así sea uniforme o no la capacidad de sostenimiento del perno.
- Los Split Sets, Hydrabolts y Swellex, muestran anclajes más uniformes y ascendentes como aumenta la longitud efectiva de anclaje. Las Barras Helicoidales, muestran anclajes irregulares y oscilantes sobre todo cuando se instalan con cemento.
- El perno Hydrabolt muestra mayor capacidad de anclaje, incluyendo a la de su similar Swellex, debido al agua de inflado que queda atrapado en su interior a una presión de 25 MPa, propiciando su permanente adherencia en las paredes del taladro, irradiando fuerzas radiales en toda su longitud, lo cual no ocurre con el Swellex, dado que al concluir su inflado, el agua se descarga, descendiendo la presión a la atmosférica; circunstancia en la que el perno se contrae por efecto resorte del acero, aun siendo muy pequeño, resta su capacidad de anclaje.

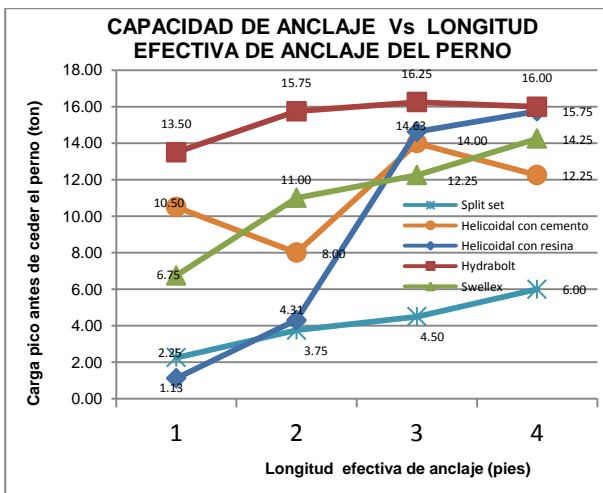


Gráfico N° 6-1: Capacidad de anclaje de distintos pernos en función de la longitud efectiva de anclaje.

- La capacidad de anclaje de la Barra Helicoidal es menor que la de los Hydrabolts y en parte a la del Swellex. Capacidad que no depende únicamente de la misma barra, sino también de los morteros de acoplamiento (cemento, resinas o alternancia entre ambos). Que, habiendo realizado las pruebas de arranque después de más de 29 horas de instaladas las Barras Helicoidales con cartuchos de cemento, el gráfico N° 6-1 muestra que su capacidad de anclaje es irregular, puesto para 1 pie de longitud efectiva de anclaje soporta 10,5 ton; para 2 pies baja a 8 ton, luego sube a 14 ton para 3 pies, finalmente descendiendo a 12,5 ton para 4 pies.

- Las pruebas de arranque de las Barras Helicoidales instaladas con resina, se llevó a cabo después de casi 18 horas de su instalación. El gráfico N° 6-1, muestra que tiene mejor comportamiento que las barras instaladas con cemento, aun cuando para 1 y 2 pies de longitud efectiva de anclaje, su capacidad de anclaje es baja, como 1,13 y 4,31 ton, respectivamente.

- Los Split Sets, tienen menor capacidad de anclaje que los demás pernos, pero demuestran un anclaje uniforme, siendo así, facilitan la planificación de su aplicación. Su capacidad de anclaje va de 2,25 ton para 1 pie de anclaje efectivo a 6,00 ton para 4 pies.

6.1.2 Deducción de ecuaciones para el cálculo de longitudes de pernos en una excavación:

En base a los resultados obtenidos en Reliquias (Castrovirreyna), se puede deducir las ecuaciones para el cálculo de la longitud adecuada de pernos (L), en función de la altura de cuña o bloque y densidad del material.

Definitivamente, en cualquier situación de sostenimiento con pernos, L debe ser igual a:

$$L = LE + h + LM + Lr$$

Donde:

L = Longitud de perno (m).

LE = Longitud efectiva de anclaje (bond length) (m).

h = Altura de la cuña o bloque a sostener (m).

LM = Longitud muerta del perno (m), se presenta en los extremos de los pernos, son las partes que no hacen anclaje. Varía de acuerdo al tipo de perno, así se tiene: Split Sets, es 0,21 m; Barras Helicoidales, 0,16 m; pernos Hydrabolts, 0,15 m y Swellex, 0,196 m.

Lr = Es la parte del perno que queda sin hacer anclaje por las irregularidades del contorno de excavación en la boca del taladro donde se instalan. Esta longitud en promedio se puede considerar 0,15 m.

La longitud efectiva de anclaje (LE), puede determinarse a partir de un análisis regresional, sobre las curvas de tendencia correspondientes a las curvas presentadas en el gráfico 6-1, mediante la ecuación:

$$LE = m e^{(ah\rho - b)}$$

Donde:

m = Factor de conversión de pies a metros = 0,3.

e = Base del logaritmo neperiano = 2.71828182

- a = Es la combinación de la constante del área de influencia de los pernos y el factor de conversión de TM a ton, varía de acuerdo al tipo de perno.
- h = Altura de la cuña o potencia de bloque en a sostener (m).
- ρ = Densidad de la roca (TM/m³).
- b = Constante de regresión, varía de un perno a otro.

Con las consideraciones antes expuestas, se deducen las ecuaciones que se presenta en el cuadro 6-1.

Cuadro Nº 6-1: Ecuaciones para determinar la longitud de pernos (L) en metros

PERNO	ECUACIONES
Split Set	$L = 0,3e^{(0,6h\rho - 0,7)} + h + 0,36$
Helicoidal con cemento	$L = 0,3e^{(0,7h\rho - 4,2)} + h + 0,31$
Helicoidal con resina	$L = 0,3e^{(0,15h\rho)} + h + 0,31$
Hydrabolt	$L = 0,3e^{(0,8h\rho - 7)} + h + 0,30$
Swellex	$L = 0,3e^{(0,3h\rho - 1,3)} + h + 0,35$

Aplicando estas ecuaciones y asumiendo alturas de cuñas o bloques de 1,0 a 1,8 m y considerando la densidad de la roca 2,7 TM/m³, se deducen las longitudes de los pernos que se presenta en el cuadro Nº 6-2, que ilustra además la equivalencia entre los pernos. Por ejemplo, para sostener una cuña de 1,5 m de alto y roca 2,7 TM/m³ de densidad, sería necesario: Split Set de 12 pies, Helicoidal con cemento de 7 pies, Helicoidal con resina de 8 pies, Hydrabolt de 6 pies, o Swellex de 7 pies.

Cuadro Nº 6-2: Longitudes adecuadas de pernos en un macizo de densidad 2,7 TM/m³

Altura de la cuña, h (m)	LONGITUDES DE PERNOS EN (pies)				
	Split Set	Helicoidal con cemento	Helicoidal con resina	Hydrabolt	Swellex
1,0	7	5	6	5	6
1,2	9	6	7	5	6
1,3	9	6	7	6	7
1,4	10	6	7	6	7
1,5	12	7	8	6	7
1,6	13	7	8	7	8
1,7		7	9	7	8
1,8		8	9	7	9

6.1.3 Elongación de los pernos ensayados: La excesiva elongación de un perno, puede tener consecuencias muy adversas para la estabilidad de un macizo rocoso, toda vez que una cuña o un bloque de roca se desplazaría una distancia equivalente a la elongación y la fisura crecería en la misma

proporción, incrementándose por consiguiente, la inestabilidad. Esto implica que la desestabilización del macizo rocoso continuaría, aun después de su sostenimiento debido a la elongación del perno, que finalmente puede traducirse en un colapso.

De acuerdo a lo tratado en los capítulos precedentes, también se registró en el campo las elongaciones de los pernos durante las pruebas de arranque, con cuyos resultados se presenta el gráfico Nº 6-2, que corresponde para pernos de 4 pies de longitud efectiva de anclaje, a partir del cual se puede concluir que:

- La elongación de los pernos, tiende a guardar una relación lineal y creciente con la carga aplicada.
- El perno de mayor elongación es el Split Set, seguido para por la Barra Helicoidal instalada con resina; así para una carga de 10 ton estos pernos se elongan 15,2 y 8,6 mm, respectivamente. Para esta misma carga, la Barra Helicoidal instalada con cemento, Hydrabolt y Swellex, se elongan 4,23; 2,93 y 2,63 mm, respectivamente.

• La elongación del empernado con Barras Helicoidales, no se debe únicamente a la misma barra que es acero sólido, sino al material de acoplamiento, sobre todo cuando se instala en combinación con la resina, como ilustra el gráfico Nº 6-2. Las elongaciones del Hydrabolt y Swellex son muy similares, cuyos valores deben ser menores que los registrados en las pruebas, considerando que parte o gran parte de estos pernos, permanecieron libres sin hacer contacto con las paredes de los taladros durante las pruebas. No obstante de ello, los resultados muestran que estos pernos, son los que tienen menor elongación respecto a los otros, y justamente al aumentar la longitud efectiva de anclaje disminuye, precisamente por la reducción de la longitud libre. Cabe destacar que, los Hydrabolt usados fueron de 6 pies y los Swellex de 5 y 7 pies, siendo así, por ejemplo, para 2 pies de anclaje efectivo, permanecen libres dentro del taladro prácticamente 4 y 5 pies, respectivamente.

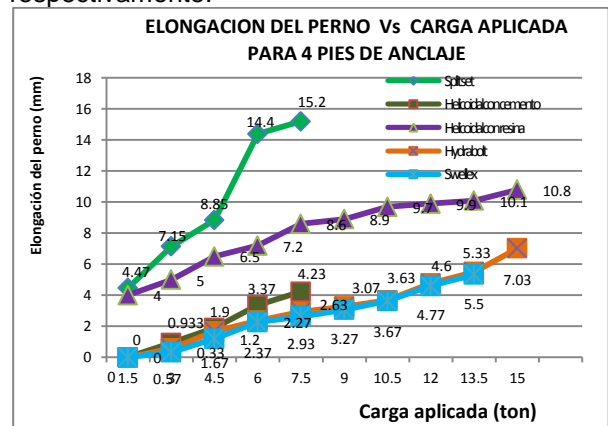


Gráfico Nº 6-2: Elongación de los pernos Vs carga aplicada para 4 pies de longitud efectiva de anclaje

6.1.4 Número equivalente de pernos instalados y soportando respecto al tiempo de instalación y fraguado del cemento de la Barra Helicoidal:

Tomando como base el tiempo de instalación y fraguado del cemento normal que encapsula una Barra Helicoidal, es decir 24,1575 horas, se hace un análisis comparativo del número de pernos que estarían instalados y soportando en dicho tiempo, estos resultados se muestran en el gráfico N° 6-3, donde se puede apreciar que para pernos de 7 pies, estarían instalados y soportando: 1 barra helicoidal con cemento normal, 116 Barras Helicoidales con resina, 124 Split Sets, 140 Hydrabolts y 153 Swellex.

6.2 Discusión de resultados del análisis económico de los pernos estudiados

6.2.1 Costo por perno instalado: Para determinar los costos totales de los pernos instalados de 4 á 8 pies, que ilustra el cuadro N° 6-3, se ha tomado en cuenta los resultados de perforación obtenidos en Reliquias con equipo manual Jackleg (tiempos y costos), tiempo de instalación de los pernos, precios unitarios de los pernos y conexos proporcionados por los proveedores, costo de los equipos y adaptadores utilizados para la instalación de los pernos, entre otros. Cabe destacar que el presente análisis se ha hecho al mes de abril del presente año, del que se concluye lo siguiente:

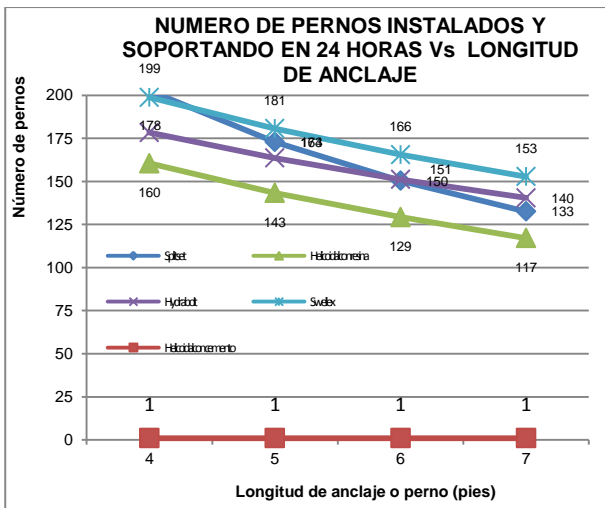


Gráfico N° 6-3: Número de pernos instalados y soportando en el tiempo equivalente a la instalación y fraguado del cemento normal en una barra helicoidal (24,1575 horas).

- El costo total de los pernos instalados (sosteniendo), guarda una relación directa con su longitud.
- El orden de costos por perno instalado del más económico al más caro, es el siguiente: Split set, Hydrabolt, Barra Helicoidal

con cemento, Barra Helicoidal con resina y Swellex.

Cuadro N° 6-3: Costo total por perno instalado en función del tipo y longitud de perno.

LONGITUD DE PERNO (pies)	COSTO TOTAL POR PERNO INSTALDO (\$/perno)				
	Split Set	Helicoidal con cemento	Helicoidal con resina	Hydrabolt	Swellex
4	11,475	16,801	19,467	16,618	28,448
5	12,892	19,291	22,623	19,296	31,335
6	14,757	21,839	25,837	21,890	34,933
7	16,475	24,430	29,095	22,275	38,274
8	19,102	27,012	32,343	25,508	41,817

6.3 Simulación de sostenimiento de un bloque y su costo por metro cuadrado

El presente análisis se realiza suponiendo que, a lo largo de una excavación de 6 x 5 m, se tiene que sostener un bloque de roca de 1,5 m de potencia a lo largo de 10 m en la caja techo, tal como ilustra la figura N° 6-1, considerando además los datos abajo indicados, se desea saber lo siguiente:

- Número de pernos y su espaciamiento entre ellos, para estabilizar el bloque de roca en función de la longitud efectiva de anclaje.
- Costo total para estabilizar el bloque en cuestión.
- Costo de sostenimiento por m² del área expuesta del bloque de roca.

DATOS:

Ancho de la excavación (m):	6
Alto de la excavación (m):	5
Longitud del bloque a sostener (m):	10
Potencia del bloque a sostener, h (m):	1,50
Tipo de roca:	Andesita
Densidad de la roca, ρ (TM/m ³):	2,7
Factor de seguridad (S):	1,5
Área expuesta del bloque de roca (m ²):	60
Peso del bloque de roca (ton):	267,91

6.3.1 Espaciamiento entre pernos (d): El espaciamiento entre pernos, se ha calculado con la siguiente relación:

$$d = \frac{\text{Capacidad de anclaje del perno}}{h \times \rho}$$

Donde: Capacidad de anclaje, depende del tipo de perno, la longitud efectiva de anclaje y el factor de seguridad. h = potencia del bloque de roca = 1,50 m y ρ = Densidad de la roca = 2,7 TM/m³ = 2,9768 ton/ m³.

El cuadro N° 6-4, muestra los espaciamientos entre pernos, deducidos aplicando la relación antes expuesta, donde la capacidad de anclaje es igual a lo presentado en

el gráfico N° 6-1 castigada por el factor de seguridad igual a 1,5. Cabe destacar que la capacidad de anclaje de los pernos mostrados en este gráfico es para longitudes efectivas de anclaje de 1 á 4 pies, por lo cual, para tener valores adicionales para 5 y 6 pies de longitud efectiva de anclaje, se obtuvieron por interpolación.

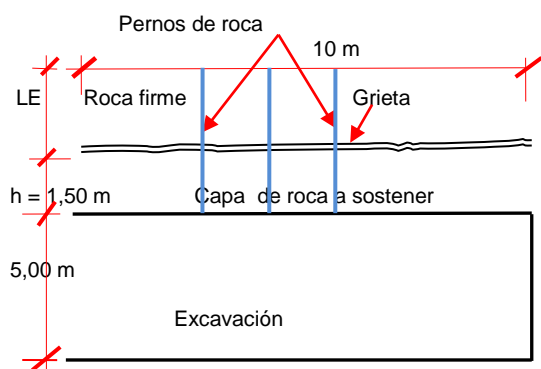


Figura N° 6-1: Representación idealizada de un bloque de roca a sostener con pernos de roca

6.3.2 Costo por metro cuadrado del área expuesta del bloque:

Aplicando las ecuaciones mostradas en el cuadro N° 6-1, se dedujeron las longitudes para diferentes alturas de cuñas o bloques mostradas en el cuadro N° 6-2, donde para la altura de cuña de 1,5 m, las longitudes se replican en la segunda columna del cuadro N° 6-5, siendo las correspondientes longitudes efectivas de anclaje (LE) lo que muestra en su tercera columna.

Cuadro N° 6-4: Espaciamiento entre pernos

Longitud efectiva de anclaje (pies)	ESPACIAMIENTO ENTRE PERNOS (m)				
	Split Set	HELICOIDAL		Hydrabolt	Swellex
		Con cemento	Con resina		
1	0,58	1,25	0,41	1,42	1,00
2	0,75	1,09	0,80	1,53	1,28
3	0,82	1,45	1,48	1,56	1,35
4	0,95	1,35	1,53	1,55	1,46
5*	1,10	1,40	1,58	1,60	1,55
6*	1,20	1,55	1,63	1,70	1,65

*Valores correspondientes, obtenidos por interpolación

Los espaciamientos entre los pernos, se deducen del cuadro N° 6-4, en función de la longitud efectiva de anclaje, del cual para el presente análisis, se presenta en la cuarta columna del cuadro N° 6-5, con lo cual se determinó el área de influencia para cada caso, consecuentemente el número total de pernos necesarios para sostener el bloque, cuyos

resultados se presenta en la sexta columna del mismo cuadro.

Seguidamente, se calculó el costo total de pernos, como el producto del costo por perno instalado mostrado en el cuadro N° 6-3 multiplicado por el número de pernos requeridos presentados en la sexta columna de la tabla 6-5, cuyos resultados se presenta en la séptima columna de este último cuadro.

Finalmente, el costo por m² del área expuesta del bloque se determinó como el cociente del costo total de pernos antes indicado entre el área expuesta, cuyos resultados se presenta en la última columna del cuadro N° 6-5.

De este análisis, se concluye que el perno más económico para sostenimiento del bloque sería el Hydrabolt (10,95 \$/m²) y el de más alto costo la Barra Helicoidal con resina (50,67 \$/m²), seguido por el Swellex (38,27 \$/m²).

Cuadro N° 6-5: Cantidad de pernos y su costo por m²

Tipo de Perno	Long. de pernos, L (pies)	Long. Efectiva de anclaje, LE (pies)	Espac. entre pernos, S (m)	Área de Influen. de los pernos, S ² (m ²)	Cantidad de pernos, NP	Costo total de pernos (USD)	Costo por m ² (\$/m ²)
Split Set	12	6	1,20	1,44	42	1051,27	17,52
Helicoidal con cemento	7	2	1,09	1,19	51	1245,92	20,77
Helicoidal con resina	8	3	0,80	0,64	94	3040,21	50,67
Hydrabolt	6	1	1,42	2,02	30	656,71	10,95
Swellex	7	1	1,00	1,00	60	2296,45	38,27

6.4 Discusión global de los parámetros comparativos

El cuadro N° 6-6 muestra en resumen los parámetros comparativos, elaborado en base a los resultados precedentes, tomando como modelo ciertos datos o condiciones comunes y más relevantes.

VII CONCLUSIONES

1) La capacidad de anclaje de los pernos de roca no guarda una relación lineal con su longitud, con lo cual queda demostrado la hipótesis del presente estudio.

2) Los pernos Hydrabolt, Swellex y el Split Set proporcionan anclajes más uniformes, lo cual facilita la correcta selección de la longitud de penos.

3) La elongación de los pernos tiende a guardar una relación lineal con la carga aplicada. El perno de soporte definitivo que tiene mayor elongación es la Barra Helicoidal con resina y el de menor elongación es el Hydrabolt,

4) Los Hydrabolts, demuestran tener mayor capacidad de anclaje, debido a la presión que ejerce permanentemente el agua atrapada en

su interior en forma radial contra las paredes del taladro y en toda su longitud.

Cuadro Nº 6-6: Cuadro resumen comparativo entre pernos

PARAMETROS COMPARATIVOS	VALORES / APRECIACIÓN				
	Split set	Helicoidal con cemento	Helicoidal con resina	Hydrabolt	Swellex
Capacidad de soporte para 2 pies de longitud efectiva de anclaje (ton)	3,75	8,00	4,31	15,75	11,00
Uniformidad en el anclaje	Uniforme	Muy irregular	Irregular	Uniforme	Uniforme
Presión radial permanente contra las paredes del taladro para mayor adherencia	No	No	No	Sí	No
Requerimiento de mortero para su instalación	No	Sí	Sí	No	No
Requerimiento de bomba para su instalación	No	No	No	Sí	Sí
Elongación del perno para longitud efectiva de anclaje de 4 pies aplicando 7,5 ton de carga (mm)	15,2	4,23	8,6	2,93	2,63
Tiempo mínimo de espera después de su instalación para hacer anclaje (horas)	0	24	0,05	0	0
Número de pernos de 7 pies soportando después de 24 horas, referencia helicoidal con cemento	133	1	117	140	153
Costo de perno de 7 pies instalado (\$/perno)	16,48	24,43	29,09	22,27	38,27
Costo por m ² de fortificado con pernos de 7 pies (\$/m ²)	17,52	20,77	50,67	10,95	38,27

5) Los pernos Split Sets, Hydrabolt y Swellex, soportan inmediatamente después de su instalación, a diferencia de las barras helicoidales, que requieren un tiempo de espera para hacerlo, sobre todo cuando se instalan en combinación con cartuchos de cemento normal (no menos de 24 horas).

6) Pruebas de laboratorio demuestran que la deformación elástica de los pernos Hydrabolt manteniendo el agua a presión en su interior (25 MPa), es en promedio 10 veces mayor que cuando se hace el ensayo descargando el agua a la presión atmosférica de su interior, incluyendo a los Swellex. Esta característica favorece la adherencia permanente del Hydrabolt en las paredes del taladro.

7) El número de pernos instalados y soportando en un período de tiempo igual al fraguado del cemento normal utilizado como acoplamiento de la Barra Helicoidal, está por encima de 116 pernos para el caso de los Hydrabolts, Swellex y Split Sets.

8) La capacidad de anclaje de las Barras Helicoidales, está influenciado en forma determinante por el material de acoplamiento, tal como muestran los resultados del estudio, estos pernos muestran mayor y mejor capacidad de anclaje cuando se instalan con resina.

9) El costo total por perno instalado, está en relación directa con su longitud. El perno de más alto costo es el Swellex y el más económico el Split set por perno instalado.

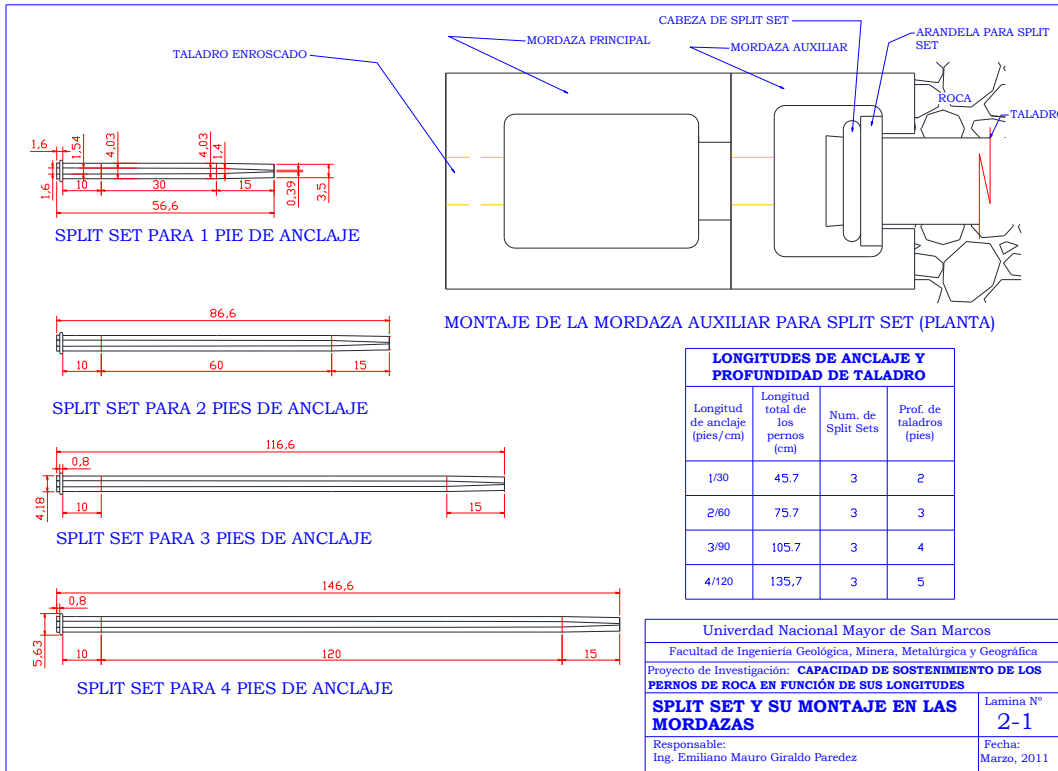
10) El perno de más bajo costo por m² sostenido, es el Hydrabolt (10,95 \$/m²) y el de más alto costo es la Barra Helicoidal instalado con cartuchos de resina (50,67 \$/m²), de acuerdo a las condiciones y realidades encontradas en la mina Reliquias.

REFERENCIAS

- Atlas Copco (2010). *Swellex Mn 12*. Atlas Copco Reinforcement.
- Basf (2009). *Meyco Masterbond 1*. *Basf the Chemical*. Química Suiza.
- Castem. *Cartuchos de Cemento "CEM-CON"*. [En línea] URL<WWW.castem.com.pe> Consulta, 15 de Dic. 2010.
- Castem. *Cartuchos de Resina*. [En línea] URL<www.castem.com.pe> Consulta, 30 de Set. 2009.
- Corporación Aceros Arequipa. *Barras Helicoidales para Fortificación de Rocas*. [En línea] URL<WWW.acerosarequipa.com> Consulta, 20 de Oct. 2010.
- Corporación Minera Castrovirreyna S.A. (2009). *Evaluación Ambiental "Reliquias"*. [En línea] URL<www.castrovirreyna.com> Consulta, 04 de Abr. 2011.
- DSI - Chile. *Sistema de Barra Roscada*. [En línea] URL<WWW.dsi-chile.com> Consulta, 04 de Abr. 2011.
- Ergin Arioglu, Cemal Birön (1987). *Diseño de ademes en Minas*. Editorial Limusa, México.
- López P., Ernesto S. (2011): *Caracterización del Macizo Rocososo del Crucero 752 del Nivel 642 – Unidad Minera Reliquias, Cia. Minera Castrovirreyna – Utilizando el Sistema de Clasificación Geomecánico RMR*. Departamento de Geomecánica, Cia. Minera Castrovirreyna S.A.
- New Concept Mining. *Hydrabolt*. [en línea] URL<WWW.ncm.co.za> Consulta, 20 de Oct. 2010.
- Robles Espinoza, Nerio H. (1994). *Excavación de y Sostenimiento de Túneles en Roca*. CONCYTEC, Lima – Perú.
- Ros Esteban, Antonio (2005). *Bulones Split Sets. Tipos de Anclajes* (pag. 255– 261).
- Ros Esteban, Antonio (2005). *Bulones SWELLEX. Tipos de Anclajes* (pag. 230 – 254).

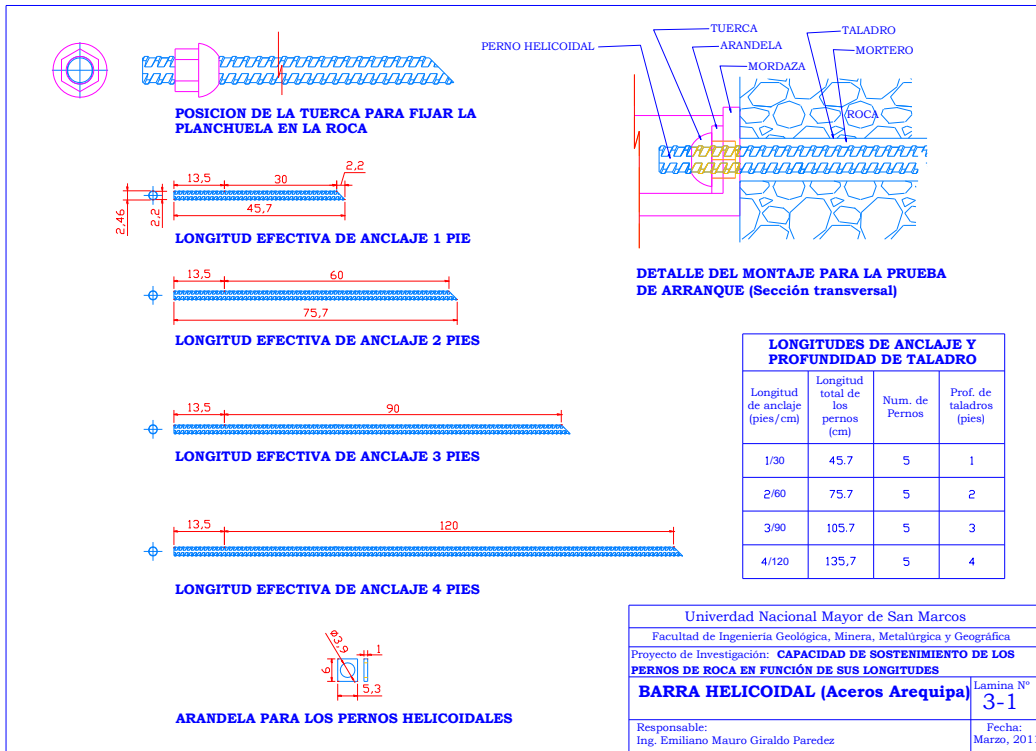
ANEXO A

Dimensionamiento de los Split Sets para determinar la longitud efectiva de anclaje y su montaje



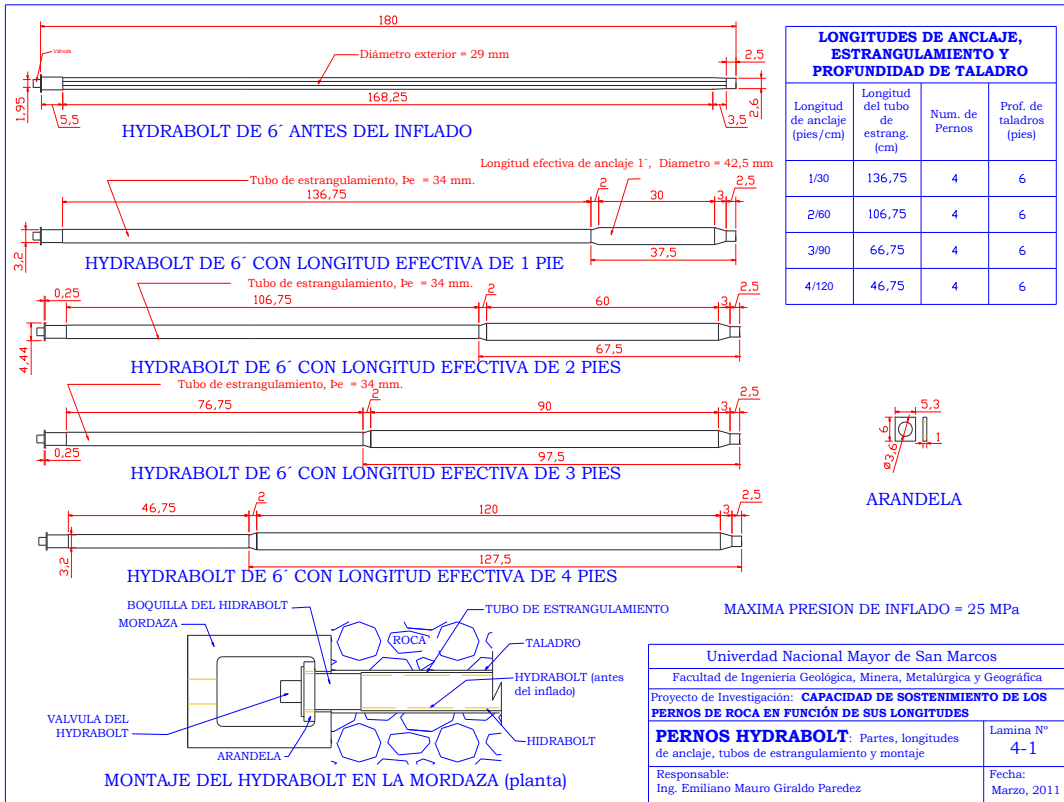
ANEXO B

Dimensionamiento de las Barras Helicoidales para determinar la longitud efectiva de anclaje y su montaje



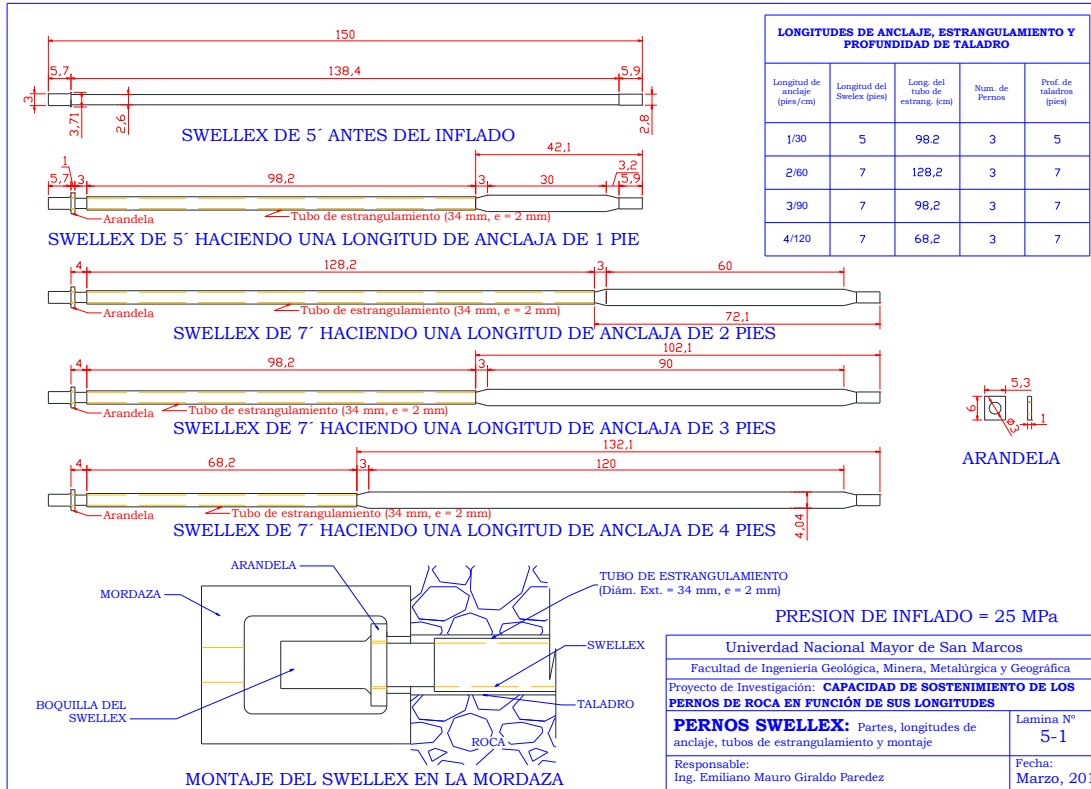
ANEXO C

Dimensionamiento de los Hydrabolts para determinar la longitud efectiva de anclaje mediante entubamiento y su montaje



ANEXO D

Dimensionamiento de los Swellex para determinar la longitud efectiva de anclaje mediante tubos de estrangulamiento y su montaje



ANEXO E

Cargas pico promedio y su ajuste de acuerdo al certificado de calibración de la gata hidráulica por la UNI

Longitud efectiva de anclaje (bond length) (pies)	LECTURA DE CARGA PICO PROMEDIO EN EL MANÓMETRO DURANTE LAS PRUEBAS EN RELIQUIAS (CASTROVIRREYNA) (ton) (x)					Factor de ajuste según certificación UNI	PROMEDIO DE CARGA PICO AJUSTADO AL PATRON UNI (ton) (Y = 0,75x)				
	SPLIT SET	HELICOIDAL		Hydrabolt	Swelllex		SPLIT SET	HELICOIDAL		Hydrabolt	Swelllex
		Con cemento	Con resina					Con cemento	Con resina		
1	3	14	1,5	18	9	0,75	2,25	10,50	1,13	13,50	6,75
2	5	10,67	5,75	21	14,67	0,75	3,75	8,00	4,31	15,75	11,00
3	6	18,67	19,5	21,67	16,33	0,75	4,50	14,00	14,63	16,25	12,25
4	8	16,33	21	21,33	19	0,75	6,00	12,25	15,75	16,00	14,25