

Efecto de la presión del agua en el interior de los pernos de roca inflables sobre su capacidad de anclaje

WATER PRESSURE EFFECT ON SUPPORT CAPACITY OF INFLATABLE ROCK BOLTS

Emiliano M. Giraldo P.¹

RECIBIDO: 14/05/2013 – APROBADO: 22/07/2013

RESUMEN

De acuerdo a los resultados del estudio realizado en el mes de Marzo del 2011, en la Unidad Minera Reliquias de la Cía. Castrovirreyna sobre la capacidad de anclaje de 4 tipos de pernos de roca (Swelllex, Barras Helicoidales, Hydrabolt y Split se). Los pernos que mostraron tener mayor capacidad y uniformidad de anclaje, fueron los pernos inflables; pero con mayor capacidad de anclaje el Hydrabolt. Esta ventaja comparativa de los Hydrabolts, motivó realizar el presente estudio, para analizar las causas de esas ventajas comparativas.

Para el presente estudio, se hicieron pruebas de compresión en el Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) a 36 pernos Hydrabolts, 18 cargados (con agua a presión retenida en su interior) y 18 descargados (sin agua en su interior) y 1 Swellex. Tanto para los Hydrabolts, cargados y descargados; se tomó como referencia dos posiciones de la línea de soldadura de su fabricación, horizontal (0°) y vertical (90°), y 3 pruebas de cada caso, a lo largo del perno, es decir, 6 posiciones de pruebas sobre el Hydrabolt y una sobre el Swellex. Las cargas máximas aplicadas a los pernos en el laboratorio, fueron 400 kN (cargados), 50 kN (descargados) y 59 kN (Swelllex). Con los datos reportados por la PUCP y los registrados adicionalmente, se demuestra que las cargas promedio en el límite elástico son 120 kN (cargados), 36,8 kN (descargados) y 39 kN (Swelllex). Del análisis de la deformación diametral bajo la prensa, y fuera de ella, se concluye que los Hydrabolts cargados tienen 373 % mayor capacidad que los Hydrabolts descargados y los Swellex para recuperar su forma. Analizando las deformaciones diferenciales debido a las cargas pico aplicadas sobre los Hydrabolts descargados y cargados, los primeros recuperan su forma tan solo en 5,4 mm y los segundos en 12 mm (222 % mayor).

Palabras clave: Pernos de roca; Hydrabolt; Swellex; compresión; límite elástico; sostenimiento del macizo rocoso

ABSTRACT

In a previous study undertaken in march 2011 at Reliquias mine owned by Cía. Minera Castrovirreyna, it was demonstrated that hydrabolts in underground rock support, can bear greater load capacity than any of the three other rock bolts tested (Swelllex, threaded rebar and split set). This advantage of the hydrabolt motivated us to continue analyzing reasons for this and other variables.

This study included compression tests on 18 high pressure water loaded hydrabolts, 18 water unloaded hydrabolts and one swellex. These tests were carried out at the material laboratory of the Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Maximum load on water loaded hydrabolt was 400 KN, on the unloaded 50 KN and on the swellex bolts 59 KN. By analyzing the information gathered on these tests and in the previous trials, it is shown that limit elastic loads for hydrabolts are: 120 KN for water loaded, 36.8 for non loaded and 30 KN for swellex bolt. It is also concluded from the diametric deformation under load and non load that hydra bolts loaded are 375 % higher in load capacity than the unloaded and swellex bolts. Analyzing the differential deformation due to peak applied load, the un loaded hydrabolts recovers an average of only 5.4 millimeters of its original length and the loaded hydrabolt 12 millimeter.

Key words: Rock bolt, hydrabolt, swellex, compression, elastic limit, rock support

1 Docente de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. E-mail: egiral dop@hotmail.com.

I. INTRODUCCIÓN

En 2011, se realizó un trabajo de investigación respecto a la capacidad de anclaje de 4 tipos de pernos de roca: Split Sets, Barras Helicoidales, Hydrabolts y Swellex, siendo el área de pruebas la Unidad Minera Reliquias de la Cía. Minera Castrovirreyna (Huancavelica). De los 4 tipos de pernos estudiados, los que demostraron tener mayor capacidad y uniformidad de anclaje fueron los pernos inflables (Hydrabolt y Swellex) (Giraldo, 2011). Además de ello, particularmente los pernos Hydrabolt mostraron mayor capacidad de anclaje, situación que indujo para realizar el presente estudio con la finalidad de averiguar las causas de esa cualidad.

Para materializar los propósitos de este estudio, se gestionó a New Concept Mining la donación de 36 pernos adicionales a los 12 con los que ya habíamos desarrollado ensayos preliminares, compañía que puso a nuestra disposición lo solicitado. Los 36 pernos se inflaron a la presión habitual de 25 MPa, de los cuales, a 18 de ellos se les descargó la presión y se extrajo el agua de su interior, retirando la válvula check, quedando por consiguiente, 18 cargados a la presión de inflado.

Se estableció que las pruebas de compresión sobre los pernos se llevarían a cabo en 6 posiciones sobre los pernos, tomando como referencia la línea de soldadura (2 posiciones) y 3 posiciones de las mordazas de la prensa a lo largo de los pernos (cabeza, centro y cola). Por cada posición de ensayo, se hicieron 3 pruebas, para establecer una base de datos. En ningún caso, se hizo más de una prueba sobre un mismo perno.

Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), con la prensa hidráulica marca Zwick / Roell modelo SP 600, que tiene una capacidad de carga de 600 kN (60 TM). La carga máxima sobre los Hydrabolts cargados, se limitó a 400 kN y 50 KN sobre los descargados, cuyos resultados fueron reportados y plasmados en una curva fuerza-deformación.

En base a los datos reportados por la PUCP y los registrados, adicionalmente, se hicieron los cálculos y análisis para determinar las causas por las cuales, dichos pernos tienen mejores cualidades de sostenimiento. Entre otros parámetros, se analizaron las deformaciones diametrales (horizontal y vertical), las cargas en el límite elástico y las máximas aplicadas, capacidad de recuperación y deformaciones diferenciales.

Los resultados indican que los pernos Hydrabolts cargados tienen mejores cualidades de sostenimiento que los descargados (incluyendo al Swellex), como se detalla en los capítulos II, III, IV y V, sobre cuya base se establecen las conclusiones que se exponen en el capítulo VI.

II. ASPECTOS GENERALES

2.1 Objetivos del estudio

- **Objetivo general:** Demostrar que la presión del agua en el interior de los pernos de roca inflables influye sobre su capacidad de anclaje.

- **Objetivos específicos**

1. Determinar la deformación diametral de los pernos de roca inflables al aplicar compresión.
2. Analizar el comportamiento de los pernos de roca inflables cargados y descargados.
3. Comparar la capacidad de sostenimiento de los pernos de roca inflables cargados y descargados.

2.2 Hipótesis

La capacidad de anclaje de los pernos de roca inflables, se debe al agua a presión retenida en su interior.

2.3 Características de los pernos de roca inflables estudiados

Los 48 pernos de roca inflables utilizados en el presente estudio fueron Hydrabolts, modelo HYDRABOLT 29 (New Concept Mining, URL 2010), 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. Adicionalmente, Swellex de Atlas Copco de 7 pies.

2.4 Condiciones y posiciones de los ensayos de compresión sobre los pernos hydrabolts

2.4.1 Definición de términos utilizados

Antes de proseguir con el desarrollo del presente informe, es conveniente definir los términos que se emplean a lo largo del mismo:

- a) **Cabeza del hydrabolt:** Se refiere al extremo del Hydrabolt que porta la válvula anti retorno (check), ensamblado en uno de los manguitos; es la parte que queda fuera del taladro después de su instalación.
- b) **Cola del hydrabolt:** Es el extremo que porta el otro manguito como sello para retener el agua, es la parte que va al fondo del taladro.
- c) **Hydrabolt cargado:** Este término indica que el Hydrabolt inflado está con agua retenida en su interior a la presión de 25 MPa, con la válvula antirretorno activado.
- d) **Hydrabolt descargado:** Significa que luego de inflar el Hydrabolt a 25 MPa de presión, se retiró la válvula antirretorno, extrayendo todo el agua de su interior, quedando únicamente lleno de aire a la presión atmosférica.
- e) **Posición de la soldadura horizontal (0°),** esto indica que la línea de la soldadura de fabricación del Hydrabolt, se posicionó haciendo 90° con eje vertical de la prensa como ilustra la lámina N.º 1 (anexo A).
- F) **Posición de la soldadura vertical (90°),** este caso es cuando la línea de soldadura se posicionó coincidente con el eje vertical de la prensa, es decir haciendo 90° con la posición horizontal.

Para las dos condiciones de los pernos, cargados y descargados; se tomó como referencia la soldadura, en base a ello, se hicieron las pruebas en 2 posiciones

de ésta, horizontal (0°) y vertical (90°). Asimismo, por cada posición de la soldadura se hicieron 3 pruebas a lo largo del perno: una a 16 cm del extremo de la cabeza, otra en el centro y una tercera a 16 cm del extremo de la cola como explicita la lámina N.º 1 (Anexo A); es decir, 6 puntos de pruebas sobre el perno por cada condición y por cada punto se hizo 3 pruebas a fin de establecer una base de datos confiable. Tal es así que se llevaron a cabo 18 pruebas de pernos cargados y 18 descargados.

2.5 Preparación de los pernos hydrabolts para las pruebas

Luego de seleccionar los 36 pernos Hydrabolts de 6 pies para las pruebas, se procedió inflarlos, hasta una presión de 25 MPa c/u, verificando en cada caso la correcta posición de la válvula antirretorno. Seguidamente, se separaron 18 pernos para descargar el agua de su interior, retirando las válvulas anti retorno, a fin que queden completamente sin agua, únicamente lleno de aire a la presión atmosférica. Luego se procedió marcar anillos en la superficie del perno con plumón de tinta indeleble y/o corrector como ilustra la Figura N.º 1, acorde con las posiciones establecidas en el acápite anterior (2.4), como se detalla en la Lámina N.º 1 (anexo A) y el acápite 3.4. También se marcaron las líneas de soldadura para su fácil identificación durante las pruebas de compresión. Cabe destacar que, sobre cada perno se hizo únicamente una sola prueba de compresión, para evitar alguna interferencia o probabilidad de introducir algún error en los ensayos y los valores correspondientes.

2.6 Preparación de formatos para la toma de datos

A fin de facilitar el registro de los datos en el laboratorio, además de los reportes que entregaría la Pontificia Universidad Católica, se diseñaron una serie de formatos para recopilar los datos de interés y su procesamiento, incluyendo los datos que no reporta la PUCP.



Figura N.º 1. Marcado de los pernos Hydrabolts cargados y descargados en su cabeza.

2.7 Equipos y materiales utilizados

- 36 pernos Hydrabolt de 6 pies (1,8 m).
- Bomba hidroneumática de alta presión y accesorios para inflar los Hydrabolts.
- Vernier digital
- Prensa Zwick / Roell, modelo SP 600, de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Otros (llaves, plumones, corrector, etc.).

III. REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE COMPRESIÓN Y RESULTADOS

3.1 Laboratorio para los ensayos

Las pruebas se hicieron en el Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), en la prensa ZWICK/ROELL modelo SP 600, que tiene una capacidad de 600 kN de carga, la Figura N.º 2 muestra esta prensa en plena compresión a un perno Hydrabolt en su centro. Las dimensiones de las mordazas de la prensa usadas en las pruebas compresión son 31 x 23 x 5,5 cm, para más detalles ver la lámina N.º 1 (Anexo A).

3.2 Codificación de las muestras

Para llevar un control adecuado de las pruebas, se concertó con el personal de laboratorio, para asignar un código o nomenclatura a cada perno. Primero, los Hydrabolts se agruparon en 2 grupos: CARGADOS y DESCARGADOS, luego se acordó que se antepondría las siglas CB (cabeza), CE (centro) y CO (cola), para designar la posición de la compresión sobre el perno; seguido por la posición de la soldadura 0° (horizontal) y 90° (vertical), y finalmente consignar los números 1, 2 y 3 para representar el número de muestra del ensayo en la misma posición, como ilustra el Tabla N.º 1 del anexo B; por ejemplo, muestra la compresión en la cola del Hydrabolt (a 16 cm del extremo) con posición de la soldadura horizontal (0°).



Figura N.º 2. Prensa Hidráulica Swick / Roell en el laboratorio de materiales de la PUCP.

3.3 Pruebas de compresión lateral de los pernos

El personal de apoyo del laboratorio iba colocando los pernos Hydrabolt en las mordazas de la prensa en la posición y orden establecidas, el operador de la prensa iba controlando la compresión en el monitor del equipo de cómputo conectado a la prensa, donde se ve claramente el progreso de la deformación conforme se incrementa la carga. Estos valores se iban graficando simultáneamente en el monitor antes indicado, los que luego serían plasmados en los reportes emanados por la PUCP, tales como se presentan en el **Anexo C** como ejemplos. Cada prueba de compresión demandó en promedio 6 minutos.

Los ensayos sobre los Hydrabolts descargados se llevó a cabo con total normalidad; pero en caso de los cargados, el personal del laboratorio se limitó hacer la compresión hasta un límite de 400 kN de carga (en un solo caso se alcanzó 403 kN de carga, sin que el Hydrabolt se destruya), por temor a que el perno estalle por la presión de agua (ver Anexo C). De las 18 pruebas realizadas bajo esta condición (cargada) sólo un Hydrabolt llegó a estallar a 384 kN de carga, cuando se hacía la compresión a 16 cm del extremo de la cabeza.

3.4 Registro de datos durante las pruebas

La PUCP únicamente registraba, los valores que automáticamente iban apareciendo en el monitor del equipo de cómputo de la prensa, que son carga y deformación, los que después fueron plasmados en reportes que se presentan como ejemplos en el anexo C, los que en resumen se presenta en la Tabla N.º 1 (Anexo B). Como puede apreciarse en este cuadro, la PUCP reporta únicamente la carga aplicada sobre el perno en todos los casos, adicionalmente el límite elástico para los Hydrabolts descargados.

Otros datos adicionales como, el tiempo que demandó cada prueba, dimensiones de los pernos antes y después de su sometimiento a las pruebas compresivas, características de los daños producidos por las mordazas de la prensa y la deformación final de los Hydrabolts, así como su longitud inicial y final, se registraron en formatos diseñados para este fin. Adicionalmente, se pidió autorización a la PUCP para tomar fotografías durante las pruebas de ensayo, ya que estarían prohibidos filmar y tomar fotografías dentro del laboratorio.

IV. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Dado que los reportes de la PUCP tienen una escala muy grande, caso de los Hydrabolts cargados la curva está graficada para cada 100 kN de carga y la deformación cada 10 mm; mientras que para los Hydrabolts vacíos, lo hace para cada 20 kN de carga y 5 mm de deformación. Por lo cual, fue necesario interpolar puntos en el eje de las cargas, escaneando las curvas y usando AUTOCAD 2011 para tener puntos cercanos que permitieran hacer los análisis pertinentes. Tal es así que, en caso de los pernos cargados se reticuló cada 20 kN para determinar sus respectivas deformaciones, mientras que para los pernos descargados, se hizo lo propio cada 5 kN de carga. Asimismo, como la información de la PUCP respecto a la deformación es

únicamente más coloquial, es decir, no tipifica el tipo de deformación y siendo el objetivo del estudio entre otros analizar la deformación diametral, se tuvo que traducir en ese sentido y otras interpretaciones que se detalla en este capítulo.

4.1 Caso de los pernos Hydrabolts cargados

4.1.1 Deformación diametral

La deformación diametral de los Hydrabolts cargados cuando se hace la compresión a 16 cm del extremo de la cabeza como ilustra la Figura N.º 3, tanto con la línea de soldadura en posición horizontal como vertical, se mantiene uniforme como muestra la Figura N.º 4 y no se distingue el límite elástico, aun cuando la carga alcanzó 400 kN y el diámetro a 17,63 mm (plena deformación plástica).



Figura N.º 3. Hydrabolt cargado después de la compresión en su cabeza con soldadura horizontal (0°).

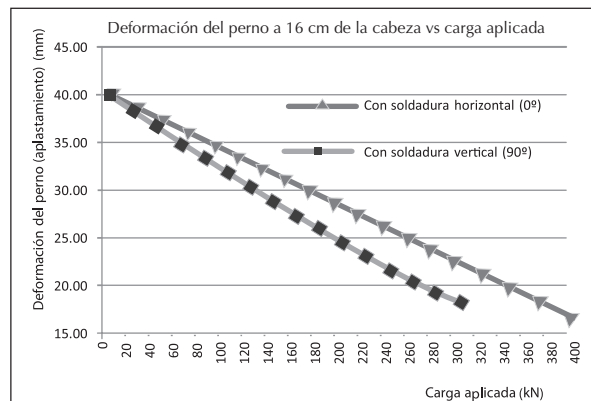


Figura N.º 4. Deformación vertical del Hydrabolt cargado vs. carga aplicada a 16 cm del extremo de su cabeza.

Cuando el ensayo se llevó a cabo en el centro del Hydrabolt, el comportamiento del perno fue aún más uniforme y con una mínima diferencia con la posición de la línea de soldadura, como muestra la Figura N.º 5.

El ensayo en este punto también reitera que no se distingue el límite elástico, a pesar de haber alcanzado 400 kN de carga aplastando el diámetro de 40 mm a 17,47 mm.

Los ensayos a 16 cm del extremo de la cola, reiteran los resultados anteriores tanto en uniformidad de su deformación como en la presencia del límite elástico, como corrobora la Figura N.º 6. Alcanzado los 400 kN de carga, el diámetro del perno se redujo a 18,19 mm.

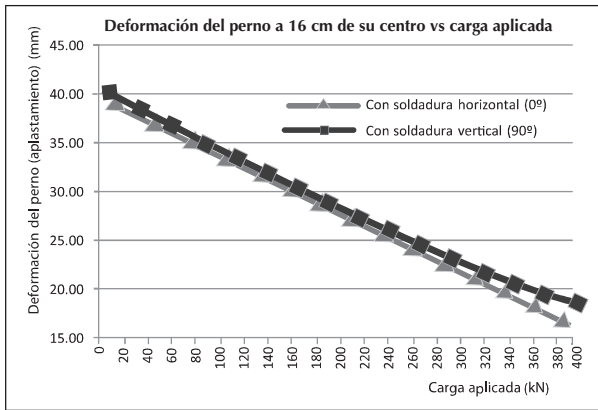


Figura N.º 5. Deformación vertical del Hydrabolt cargado vs carga aplicada en su centro.

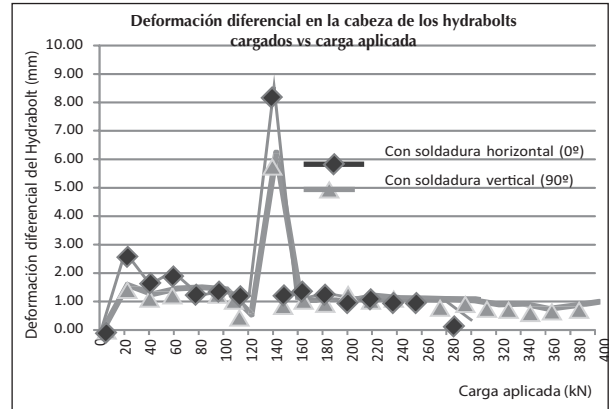


Figura N.º 7. Límite elástico a 16 cm del extremo de la cabeza de los Hydrabolts y su deformación plástica.

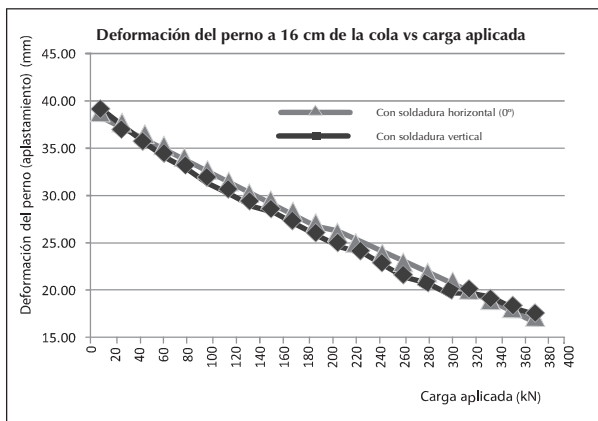


Figura N.º 6. Deformación vertical del Hydrabolt cargado vs carga aplicada a 16 cm del extremo de su cola.

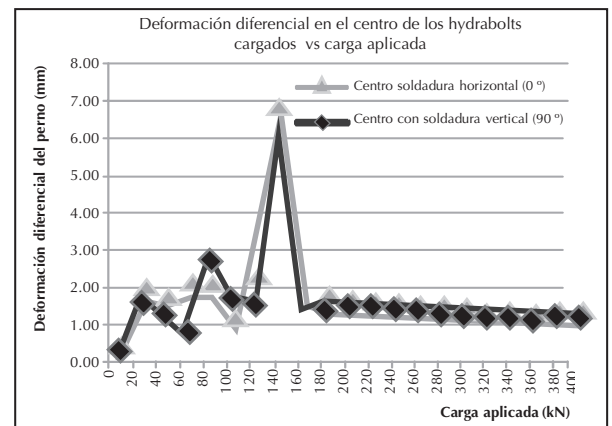


Figura N.º 8. Límite elástico en el centro de los Hydrabolts y su deformación plástica..

4.1.2 Límite elástico

A fin de determinar el límite elástico (Smith & Hashemi, 2006) de los hydrabolts cargados, se procedió a hacer un análisis diferencial de las deformaciones para las diferentes cargas y en las diferentes posiciones llevadas a cabo los ensayos. Estos resultados se muestran en las Figuras N.º 7, 8 y 9, de los que se concluye que el límite elástico en cada caso corresponde a una carga de 120 kN, puesto que, a partir de dicha carga, el Hydrabolt sufre una deformación vertiginosa hasta un valor pico correspondiente a 140 kN, luego del cual, reacciona rápidamente y trata de restablecer su forma original, gracias a la presión del agua retenida en su interior a 25 MPa, hasta que a partir de 160 kN, se estabiliza su deformación plástica. Como ilustran los gráficos antes indicados, para cargas incrementales de 20 kN, su deformación plástica es de tendencia decreciente, manteniéndose en valores cercanos a 1 mm en las 6 posiciones ensayadas.

4.1.3 Recuperación diametral del hydrabolt desde la deformación plástica:

Los valores picos de las cargas aplicadas a los hydrabolts, según los reportes de la PUCP, prácticamente son 400 kN (Véase Anexo B). Los análisis de las deformaciones bajo esta carga y, las correspondientes una vez liberados de la prensa, se presentan en la Figuras N.º 10 y 11, del

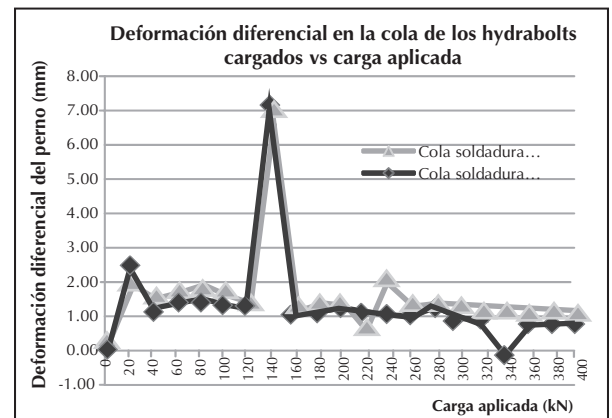


Figura N.º 9. Límite elástico a 16 cm del extremo de la cola de los Hydrabolts cargados y su deformación plástica.

que se puede concluir que los pernos Hydrbolts cargados estando en deformación plástica, tratan de recuperar su forma original en toda su longitud, pero con mayor valor en su cola. Así, en la cabeza de los Hydrabolts, estando bajo una deformación de 16,45 mm, se recupera a 26,9, es decir 10,45 mm de recuperación, mientras que en la cabeza pasa de 17,12 mm a 32,6 mm, lo cual significa que los Hydrabolts en su cola se recupera en 15,48 mm.

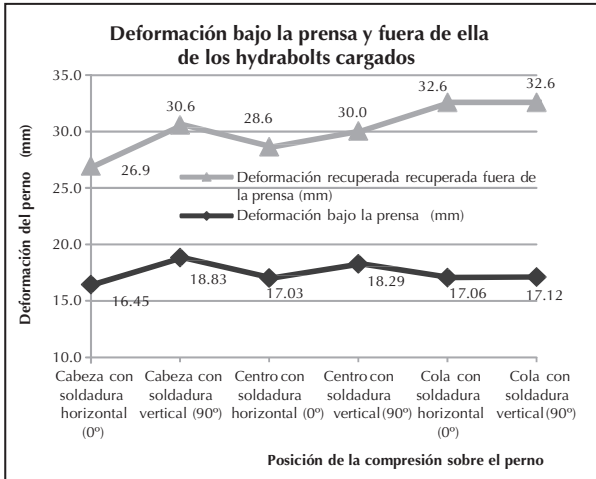


Figura N.º 10. Deformaciones de los Hydrabolts cargados bajo una carga pico de más de 400 kN y recuperación de su forma.

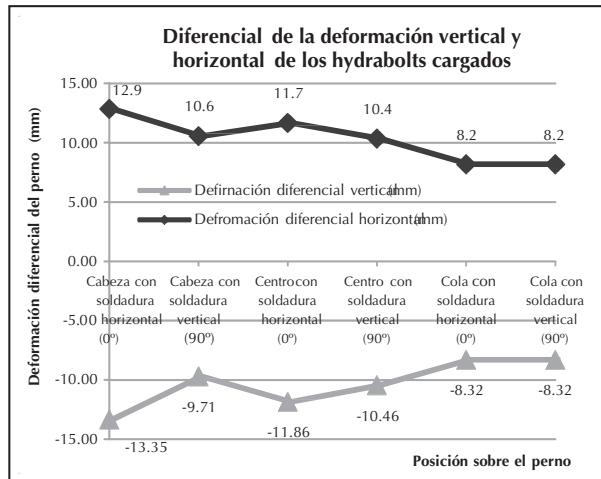


Figura N.º 12. Diferencial de las deformaciones del Hydrabolt bajo una carga pico de más de 400 kN vertical y horizontal.

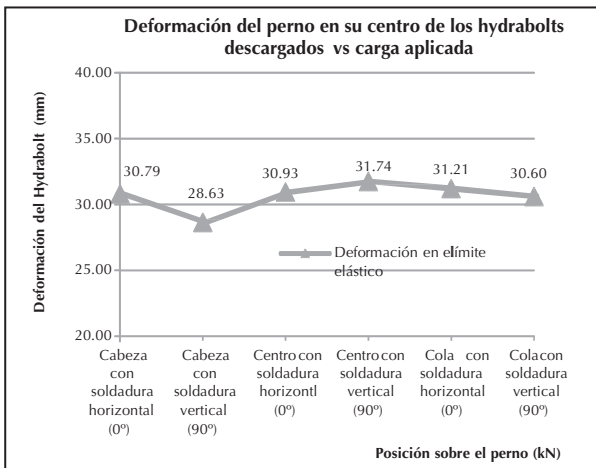


Figura N.º 11. Deformación de los Hydrabolts cargado en el límite elástico.

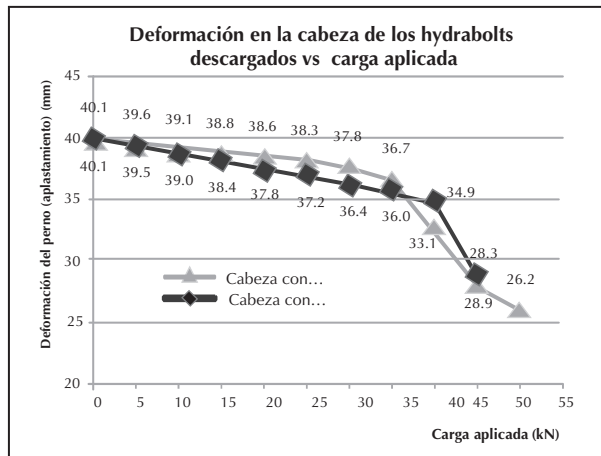


Figura N.º 13. Deformación vertical de los Hydrabolts descargados vs carga aplicada a 16 cm del extremo de sus cabezas.

4.1.4 Deformación vertical y horizontal vs. carga aplicada

Los análisis de las deformaciones verticales y horizontales de los Hydrabolts bajo las cargas aplicadas en sus distintas partes, demuestran que entre ambos existe una simetría tal como ilustra en la Figura N.º 12. Este gráfico muestra que cuando se comprime (verticalmente) un Hydrabolt, esa deformación se compensa a los costados no comprimidos (horizontalmente) en la misma proporción. Este análisis se hizo para la carga pico aplicada de alrededor de 400 kN en cada posición del perno. Asimismo, los valores negativos indican reducción del diámetro (vertical) y los positivos el ensanchamiento (horizontal).

4.1.5 Deformación de los Hydrabolts en el límite elástico

En base a los valores del límite elástico determinados en 4.1.2, y analizando las correspondientes deformaciones, se obtiene la Figura N.º 13, donde se destaca que las deformaciones de Los Hydrabolts en sus distintas partes y en el límite elástico, se mantienen aproximadamente uniformes, mostrando una reducción en su diámetro de horizontal alrededor de 10 mm.

4.2 Caso de los pernos Hydrabolts descargados

4.2.1 Deformación diametral

La deformación diametral de los Hydrabolts descargados, al aplicar cargas crecientes a 16 cm del extremo de la cabeza, es uniforme hasta que alcance el límite elástico (36,8 kN en promedio) donde el diámetro se reduce en promedio de 40,5 mm a 36,2 mm, a partir del cual sufre una deformación acelerada dentro de la deformación plástica, como ilustra la Figura N.º 13; donde se puede apreciar que para la carga máxima de 50 kN, el diámetro se ha deformado a 26,2 mm.

Cuando la compresión se lleva a cabo en el centro de los Hydrabolts, la Figura N.º 14 ilustra que cuando el ensayo se hace con la línea de la soldadura en posición horizontal, sufre mayor deformación que cuando se hace con dicha línea en posición vertical, es decir, el diámetro se reduce más. El límite elástico se alcanzó bajo una carga de 36,5 kN siendo su deformación 38,3 mm (soldadura horizontal), y para los Hydrabolts con soldadura vertical 38,8 kN y deformación 33,7. Para una carga máxima de 50 kN, el diámetro del perno se deforma a 21,1 mm.

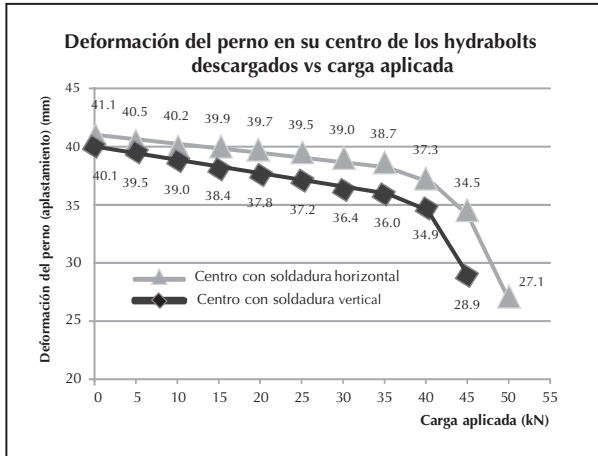


Figura N.º 14. Deformación vertical de los Hydrabolts descargados vs carga aplicada en sus centros.

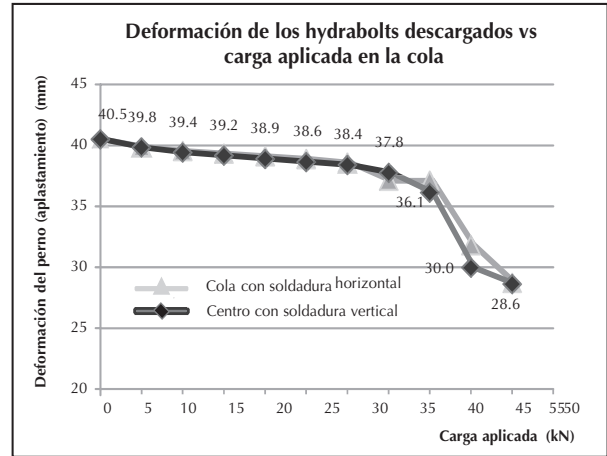


Figura N.º 15. Deformación diametral de los Hydrabolts descargados vs carga aplicada a 16 cm del extremo de sus colas.

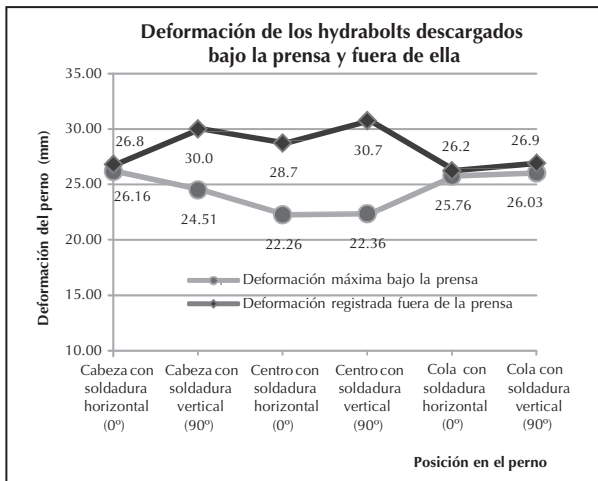


Figura N.º 16. Deformaciones de los Hydrabolts descargados bajo una carga pico y sus recuperaciones de forma de acuerdo a la posición de la compresión.

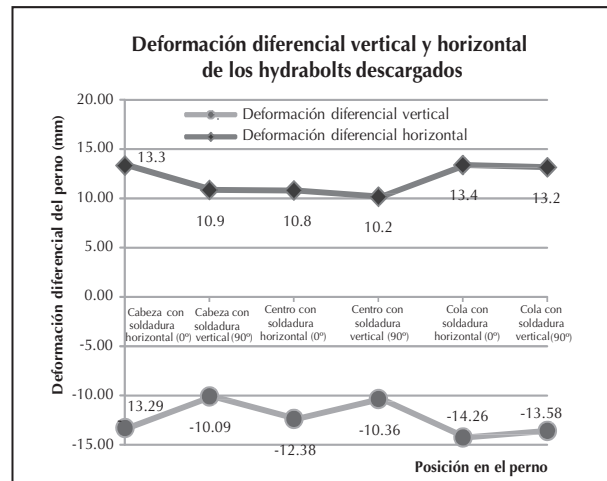


Figura N.º 17. Compensación del aplastamiento vertical con la expansión horizontal de los Hydrabolts descargados durante el ensayo de compresión en sus distintas zonas.

La deformación de los Hydrabolts al aplicar compresión en sus colas es idéntica para ambas posiciones de la soldadura como ilustra la Figura N.º 15, en esta parte del perno el límite elástico se alcanza para una carga promedio de 36,55 kN donde sus diámetros se deforman de 40 mm a 37,75 mm. Para la carga de 50 kN los diámetros de los Hydrabolts se aplastan de 40 mm a 28,6 mm.

4.2.2 Recuperación diametral de los Hydrabolts desde la deformación plástica

Como puede observarse en la Tabla N.º 1 (Anexo B), los valores picos de las cargas aplicadas a los Hydrabolts descargados, según los reportes de la PUCP varían entre 44 y 66 kN, luego haciendo el análisis del comportamiento de estos pernos después de liberarlos de la prensa, una vez alcanzadas las cargas pico y la deformación correspondiente, se obtiene la Figura N.º 16, donde se observa que en zonas cercanas a los extremos de los Hydrabolts la recuperación es mínima, mientras en la parte central es mayor, hasta 8,34 mm.

4.2.3 Deformación vertical y horizontal de los Hydrabolts descargados vs carga aplicada

Análogo al caso de los Hydrabolts cargados, los descargados también tratan de recuperar su forma original, lógicamente aquí la compresión máxima predominante fue de 50 kN únicamente. Como puede observarse en la Figura N.º 17, el aplastamiento vertical del diámetro (reducción, valores negativos) es compensado en el empanza miento horizontal (aumento, valores positivos) bajo la prensa.

4.2.4 Deformación de los Hydrabolts descargados en límite elástico

En base a los valores del límite elástico reportados por la PUCP, resumen presentado en la Tabla N.º 1 (Anexo B), y analizando las correspondientes deformaciones, se obtiene la Figura N.º 18, donde se observa que los Hydrabolts sufren menor deformación en la cola con soldadura horizontal (0°) reduciéndose sus diámetros de 40,5 mm a 38 mm, mientras que la mayor deformación se manifiesta en el centro con soldadura vertical (90°), donde el diámetro pasa de 40,5 mm a 33,7 mm.

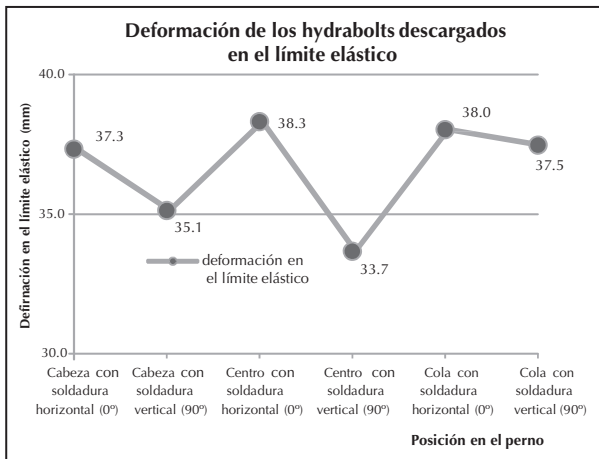


Figura N.º 18. Deformación de los pernos Hydrabolts descargados en el límite elástico en sus diferentes tramos ensayados.

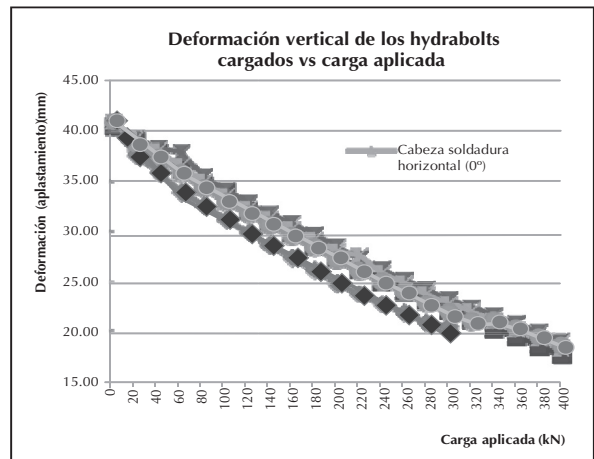


Figura N.º 19. Deformación diametral de los pernos Hydrabolts cargados vs. carga aplicada en sus diferentes tramos ensayados.

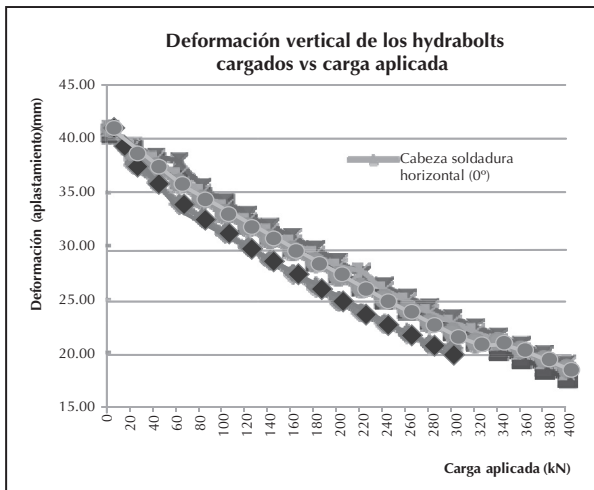


Figura N.º 20. deformación diametral de los pernos hydrabolts descargados vs. carga aplicada en sus diferentes tramos ensayados.

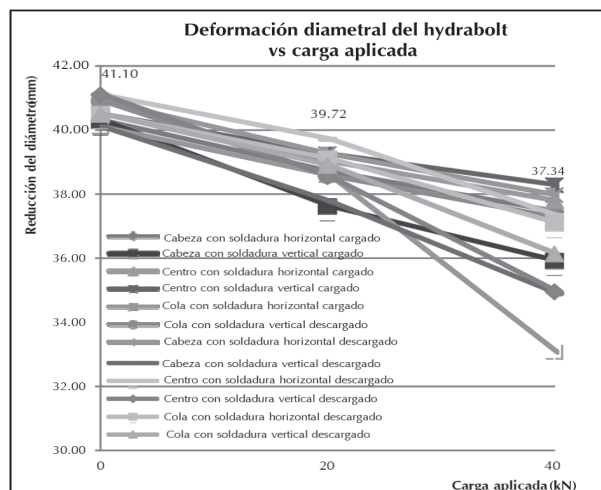


Figura N.º 21. Variación del diámetro en diferentes zonas de los Hydrabolts cargados y descargados para cargas hasta 40 kN

V. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 Aplastamiento de los pernos Hydrabolt bajo las mordazas de la prensa

Consolidando lo tratado en el capítulo anterior, se obtienen las Figuras N.º 19 y 20, que corresponden a la deformación diametral de los pernos Hydrabolts cargados y descargados. Estos gráficos se presentan por separado, dado que al superponerlos no se distingue los valores correspondientes a los Hydrabolts descargados, por la gran diferencia que existe en las cargas aplicadas a los Hydrabolts cargados respecto a los descargados. Como puede observarse en dichos gráficos, la carga pico alcanzado con los Hydrabolts cargados es alrededor de 400 kN y esto por suspensión de las pruebas antes que el perno se destruya, mientras que en los descargados fue alrededor de 50 kN o sea 8 veces menor.

Adicionalmente, haciendo el análisis para cargas comunes de 0, 20 y 40 kN (únicos valores comunes que pueden ser comparados) a ambas condiciones de los Hydrabolts, cargados y descargados, se obtienen los valores que presenta la Tabla N.º 1, destacando que para 40 kN de carga los Hydrabolts cargados se encuentran en estado de deforma-

ción elástica, mientras que los descargados en deformación plástica, graficando los valores mostrados en dicho cuadro se obtiene la Figura N.º 21, donde se visualiza que las reducciones diametrales de los Hydrabolts descargados son más vertiginosas que las de los cargados.

5.2 Fuerza-deformación en el límite elástico de los pernos Hydrabolt cargados y descargados

En vista que la PUCP no reportó los límites elásticos para el caso de los Hydrabolts cargados, indicando que su comportamiento era atípico como puede verificarse en el anexo C y el Figura N.º 22, por lo cual, fue necesario hacer una análisis diferencial de su deformación, cuyo resultado se presenta en la Figura N.º 23, del que se puede deducir que la carga en el límite elástico para los Hydrabolts cargados es 120 kN, casi en todos los casos (salvo con un valor errático de 100 kN para en ensayo en el centro del Hydrabolt con la línea de soldadura en posición horizontal). Las cargas en el límite elástico para los Hydrabolts descargados fueron reportadas por la PUCP, como puede constatarse en el Anexo C, cuyo resumen se presenta en el Anexo B.

En base a la información anterior, se obtiene la Figura N.º 23, donde se observa la gran diferencia que existe entre el comportamiento de los Hydrabolts cargados respecto a los descargados. La carga promedio en el límite elástico sería 120 kN y 36,8 kN, para los Hydrabolts cargados y descargados respectivamente, es decir los Hydrabolts cargados son 326 % más resistentes a la deformación que los descargados. Esto significa que si un Hydrabolt cargado es aplastado por un bloque de roca de hasta 12 TM, no sufrirá deformación, mientras que el descargado quedará completamente aplastado y de estar instalado dentro del taladro, quedará deformado perdiendo su capacidad de anclaje, este caso equivaldría al comportamiento del Swellex.

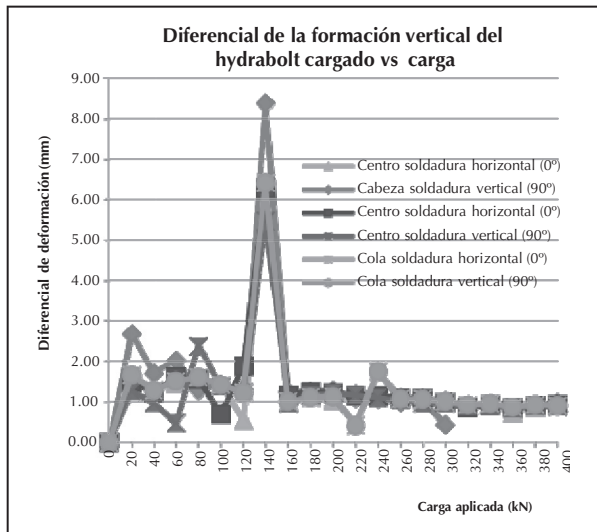


Figura N.º 22. Deformación diferencial de los diámetros de los Hydrabolts vs. carga para visualizar el límite elástico.

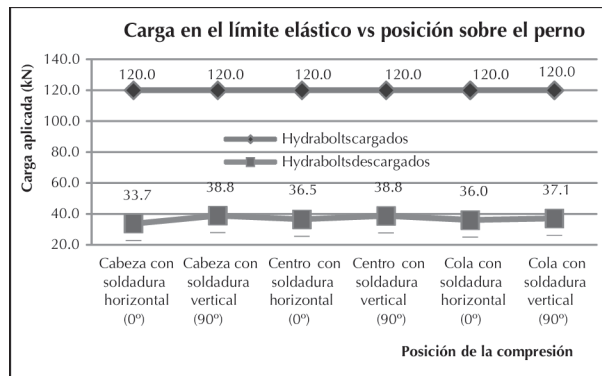


Figura N.º 23. Cargas en el límite elástico de los Hydrabolts cargados y descargados en sus diferentes zonas.

Del mismo modo, la Figura N.º 24 ilustra las deformaciones de los Hydrabolts en su límite elástico, donde se puede destacar que, a pesar de la baja carga (36,8 kN en promedio) a la que los Hydrabolts descargados alcanzan el límite elástico, su deformación ya es muy superior al de los Hydrabolts cargados que alcanzan el límite elástico a 120 kN de carga. Tal es así que, en promedio hay una diferencia de deformación entre los cargados y descargados de 6 mm, es decir, la deformación de los Hydrabolts descargados es 120 % mayor. Esta propiedad de los Hy-

drabolts cargados, garantizarán un anclaje permanente y constante del macizo rocoso, toda vez que generarán un perfecto arco de sostenimiento y los efectos de las ondas vibracionales de las voladuras serán absorbidos y amortiguados convenientemente sin afectar la calidad de anclaje de los Hydrabolts cargados.

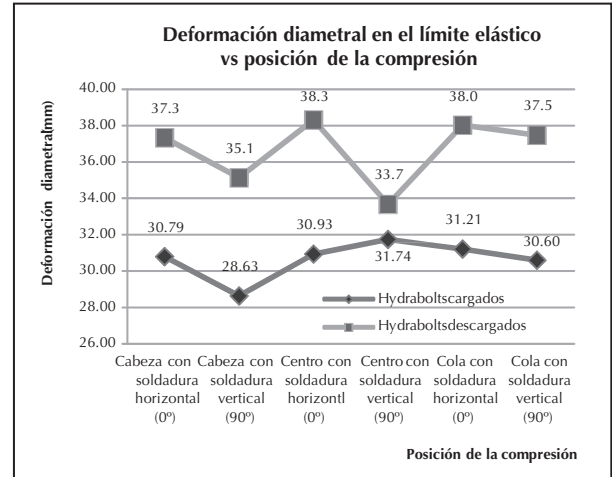


Figura N.º 24. Deformación diametral de los Hydrabolts cargados y descargados en su límite elástico de acuerdo a la posición de la compresión.

Tabla N.º 1. Deformación diametral para cargas de 0, 20 y 40 kN sobre Hydrabolts cargados y descargados en función de la posición de compresión.

Posición de la compresión	Deformación diametral en función de la carga aplicada (mm)		
	0	20	40
Cabeza con soldadura horizontal cargado	40,30	38,71	37,46
Cabeza con soldadura vertical cargado	40,30	37,62	35,91
Centro con soldadura horizontal cargado	40,50	39,02	37,79
Centro con soldadura vertical cargado	40,50	39,25	38,28
Cola con soldadura horizontal cargado	40,90	39,25	37,97
Cola con soldadura vertical cargado	40,90	38,58	37,27
Cabeza con soldadura horizontal descargado	40,10	38,59	33,07
Cabeza con soldadura vertical descargado	40,10	37,78	34,90
Centro con soldadura horizontal descargado	41,10	39,72	37,34
Centro con soldadura vertical descargado	41,10	38,55	34,96
Cola con soldadura horizontal descargado	40,50	39,11	37,09
Cola con soldadura vertical descargado	40,50	38,90	36,13

5.3 Deformación y recuperación diametral de los pernos Hydrabolt cargados y descargados

Este análisis se realizó para las cargas pico aplicadas tanto a los Hydrabolt cargados como descargados. La carga pico aplicada a los Hydrabolt cargados alcanzó un poco más de 400 kN, mientras que en los descargados 50 kN. En la Figura N.º 25, se puede apreciar que, a pesar que la deformación en los Hydrabolt cargados es mayor, su recuperación es superior a la de los Hydrabolt descargados.

Por ejemplo, durante la compresión en la cola de los pernos con la línea de soldadura horizontal: En el caso de los Hydrabolt cargados, en la prensa (400 kN de carga) se registró un aplastamiento equivalente a 18,05 mm, pero luego de retirarlo de ella se registró 32,58 mm, es decir, recuperaron en 14,53 mm su forma inicial; mientras que para los Hydrabolt descargados, en la prensa (50 kN de carga) se registró 23,10 mm y fuera de ella 27 mm (se recuperó en 3,9 mm). Esto significa que el Hydrabolt cargado tiene una capacidad 373 % mayor que el Hydrabolt descargado o Swellex para recuperar su forma. Esta característica ratifica una vez más, las cualidades de sostenimiento de los Hydrabolt cargados, detallados en el punto anterior.

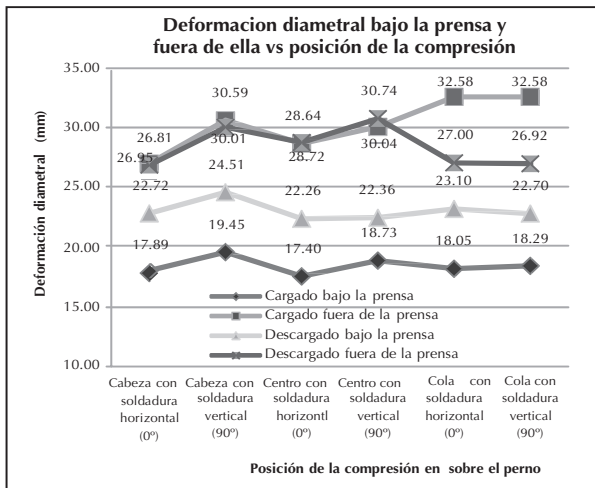


Figura N.º 25. Recuperación de forma por los Hydrabolt cargados y descargados para las cargas pico aplicadas en diferentes zonas del perno.

5.4 Recuperación de forma después de la carga pico

El presente análisis se ha hecho analizando las diferenciales de deformación correspondientes a las carga pico aplicadas en las zonas establecidas sobre los Hydrabolt. Así, para los Hydrabolt cargados a una carga de 400 kN y para los descargados 50 kN, ambos casos en deformación plástica; a pesar de esa diferencia de carga sometida en caso de los cargados (800 % mayor) respecto a los descargados, los Hydrabolt cargados recuperan su forma en promedio 12 mm, mientras que los Hydrabolt descargados lo hacen en 5,4 mm, valor que es menos de la mitad del caso del Hydrabolt cargado, como ilustra la Figuras N.º 25 y 26.

5.5 Discusión final entre los pernos de roca cargados y descargados

Finalmente, todo lo antes expuesto se sintetiza en la Tabla N.º 3, que resume las características más importantes y cualidades de sostenimiento de los pernos Hydrabolt cargados y descargados.

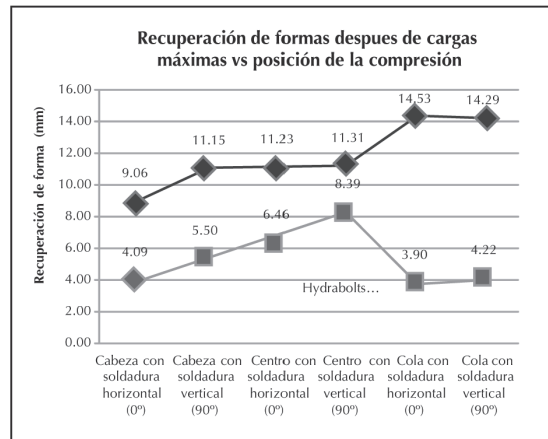


Figura N.º 26. Valores de recuperación de forma después del sometimiento de los Hydrabolt cargados y vacíos a cargas pico bajo la prensa: cargados a 400 kN y Descargados a 50 kN de acuerdo a la posición de la deformación.

Tabla N.º 3: Cuadro comparativo de los pernos Hydrabolt cargados y descargados

Parámetros comparativos	Valores / Apreciación	
	Hydrabolt cargados	Hydrabolt descargados
Presión de inflado (Mpa)	25	25
Presión en el interior del Hydrabolt después del inflado (Mpa)	25	1 atm (0,1013 Mpa)
Carga en el límite elástico (TM)	12	3,68
Diámetro deformado en el límite elástico (mm), (diámetro inicial = 40,5 mm)	39,3	36,2
Carga pico aplicada (TM)	400	50
Diámetro deformado después de la carga pico (mm) aplicada en el centro de los Hydrabolt	18,05	23,1
Recuperación de la forma inicial del diámetro, después de la acción de la carga pico, desde la deformación plástica (mm)	12	5,4
Consecuencia de colocar un Hydrabolt bajo un bloque de roca de 12 TM de peso	Sólo deformación elástica	Completamente aplastado
Consecuencia de colocar un Hydrabolt bajo un bloque de roca hasta 40 TM de peso	Deformación plástica, con capacidad de recuperar su forma en 30 %	Completamente aplastado, con nula capacidad de recuperar su forma
Fuerzas activas a lo largo del taladro como consecuencia de la presión activa en el interior del Hydrabolt cargado.	Sí	No
Capacidad para evitar la formación de fisuras o reducir la separación entre bloques de roca por las ya existentes.	Alta	Baja
Fuerza de rozamiento en el contacto con las paredes de los taladros	Alta	Baja

VI. CONCLUSIONES

1. La capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt (cargados), se debe a la presión del agua retenida en su interior.
2. El comportamiento de los Hydrabolt cargados es muy diferente al de los descargados, en cuanto a resistencia, deformación y evidencia del límite elástico.
3. Los pernos Hydrabolt cargados alcanzan el límite elástico, bajo una carga de 120 kN, mientras que los descargados a 36,8 kN. Es decir, los Hydrabolt cargados son 326 % más resistentes a la deformación plástica. Asimismo, el Swellex alcanza el límite elástico a una carga de 38,97 kN (3,897 TM), lo cual quiere decir que el Hydrabolt cargado es 308 % más resistente a ser deformado que el Swellex.
4. La deformación de los pernos Hydrabolt cargados en el límite elástico, es 6 mm menor que para los descargados. Debido a esta propiedad, los Hydrabolt cargados, garantizan un anclaje permanente y constante del macizo, generando un arco de sostenimiento y no serán afectados por las ondas compresionales de las voladuras.
5. La carga pico que soportan los pernos Hydrabolt cargados es 800 % mayor que en el caso de los descargados, sin llegar a destruirse. Asimismo, tienen 373 % más capacidad para recuperar su forma inicial que los pernos descargados, desde la deformación plástica y 326 % más capacidad para recuperar su forma desde la deformación elástica.
6. Los pernos Hydrabolt cargados muestran una resistencia más uniforme en toda su longitud.
7. Cuando los pernos Hydrabolt cargados alcanzan su límite elástico a 120 kN, se produce una deformación plástica pico para una carga de 140 kN, luego del cual, gracias al agua retenida a presión en su interior,

inmediatamente trata de recuperar su forma inicial, estabilizándose su deformación a partir de 160 kN de carga, deformándose 1 mm por cada 20 kN de incremento de carga, hasta más de 400 kN, fenómeno que no se presenta en los pernos descargados (Hydrabolt o Swellex), que no tienen suficiente capacidad para recuperar su forma inicial.

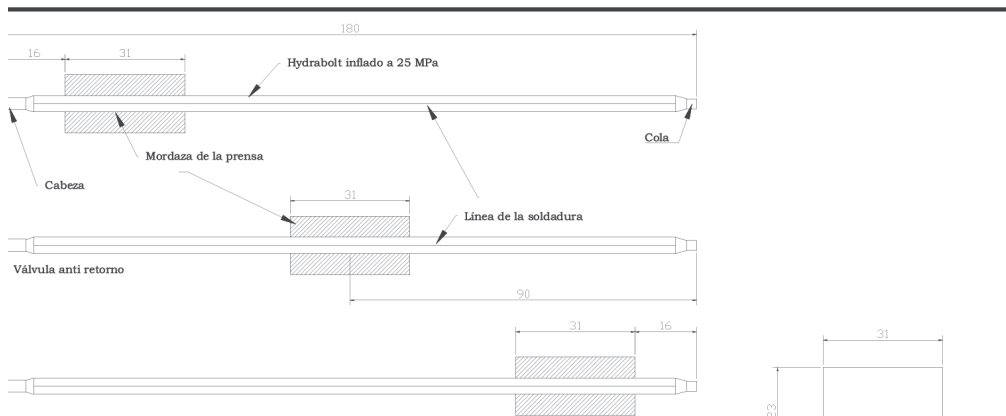
8. Los pernos Hydrabolt cargados tienen mayor capacidad de adherencia a las paredes de los taladros donde se instalan (mayor fuerza de fricción) que los descargados, debido a la fuerza compresiva radial que genera el agua retenida en su interior a la presión de 25 MPa. Asimismo, previene la formación de grietas o fisuras en el macizo rocoso, y sobre las ya existentes, reduce su separación y dependiendo del material de relleno entre ellas, pueden juntar los bloques evitando su caída por el incremento de fricción entre los planos de juntas.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Atlas Copco (2010). Swellex Mn 12. *Atlas Copco Reinforcement*.
2. Giraldo Paredez, Emiliano Mauro (2011). Capacidad de sostenimiento de los pernos de roca en función de sus longitudes. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú.
3. New Concept Mining. Hydrabolt. [En línea] URL<www.ncm.co.za> Consulta, 20 de oct. 2010.
4. Ros Esteban, Antonio (2005). Bulones SWELLEX. Tipos de anclajes (pp. 230-254).
5. Smith, William F, y Hashemi, Javad (2006). Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales (4ta ed.). Editorial Mc Graw- Hill Interamericana, España.

ANEXO A

POSICIÓN DE LAS MORDAZAS DE LA PRENSA SOBRE LOS HYDRABOLTS CARGADOS Y DESCARGADOS



Modelos de posicionamiento de las mordazas de la prensa en Hydrabolts con soldadura horizontal (0°)

Dimensiones de la mordaza de la prensa

RESUMEN DEL NUMERO DE PRUEBAS				
CONDICION DE PERNO	POSICION DE LA SOLDADURA	POSICION SOBRE EL HYDRABOLT	NUM. DE PRUEBAS	NUM. TOTAL DE PRUEBAS
CARGADO	Horizontal (0°)	CABEZA	3	18
		CENTRO	3	
		COLA	3	
	Vertical (90°)	CABEZA	3	
		CENTRO	3	
		COLA	3	
DESCARGADO	Horizontal (0°)	CABEZA	3	18
		CENTRO	3	
		COLA	3	
	Vertical (90°)	CABEZA	3	
		CENTRO	3	
		COLA	3	

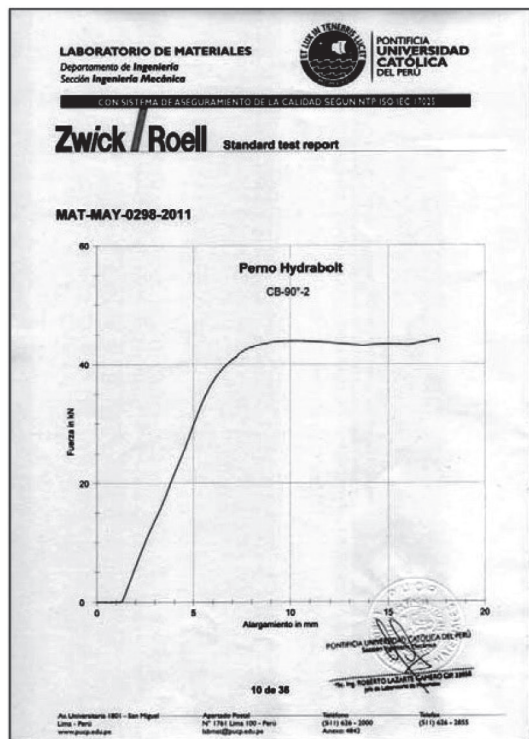
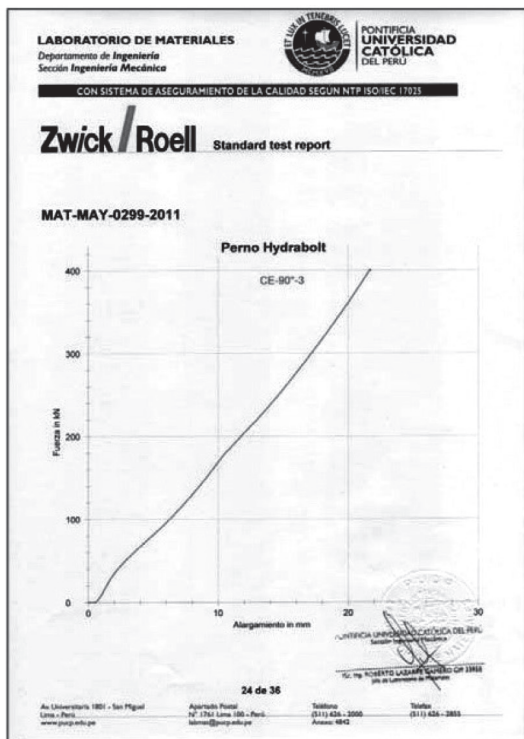
Universidad Nacional Mayor de San Marcos	
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica	
estudio: PROPIEDADES MECANICAS Y DE SOSTENIMIENTO DE LOS PERNOS HYDRABOLTS CARGADOS Y DESCARGADOS	
POSICIONES DE LAS MORDAZAS SOBRE LOS HYDRABOLTS INFLADOS	Lamina N° 1
Responsable:	Fecha:

ANEXO C

MODELO DE REPORTES DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

a) Caso: perno Hydrabolt cargado

b) Caso: Perno Hydrabolt descargado



ANEXO B

Precisión y codificación de las muestras de Hydrabolts para las pruebas de compresión en la PUCP

Condición del Hydrabolt	Posición de la soldadura en la prensa	Posición de la prensa la prensa sobre el perno	Longitud de perno (m)	Número de pruebas	Código asignado a la muestra en la PUC P	Resultados de carga reportados por la PUCP (kN)		Estado final del Hydrabolt bajo la prensa
						Límite elástico	Fin de ensayo	
CARGADO	Vertical	A 16 cm del extremo de la cabeza	6	1	CB - 90° - 1	No reportó	299	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				2	CB - 90° - 2	No reportó	305	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				3	CB - 90 - 3	No reportó	315	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
		Al centro	6	1	CE - 90° - 1	No reportó	403	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				2	CE - 90° - 2	No reportó	402	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				3	CE - 90° - 3	No reportó	401	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
		A 16 cm del extremo de la cola	6	1	CO - 90° - 1	No reportó	402	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				2	CO - 90° - 2	No reportó	353	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				3	CO - 90° - 3	No reportó	402	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
	Horizontal	A 16 cm del extremo de la cabeza	6	1	CB - 0° - 1	No reportó	384	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				2	CB - 0° - 2	No reportó	401	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				3	CB - 0° - 3	No reportó	402	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
		Al centro	6	1	CE - 0° - 1	No reportó	401	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				2	CE - 0° - 2	No reportó	401	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				3	CE - 0° - 3	No reportó	401	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
		A 16 cm del extremo de la cola	6	1	CO - 0° - 1	No reportó	403	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				2	CO - 0° - 2	No reportó	402	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				3	CO - 0° - 3	No reportó	402	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
DESCARGADO	Vertical	A 16 cm del extremo de la cabeza	6	1	CB - 90° - 1	37,63	46	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				2	CB - 90° - 2	40,95	44	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				3	CB - 90 - 3	38,23	47	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
		Al centro	6	1	CE - 90° - 1	31,99	55	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				2	CE - 90° - 2	36,51	45	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				3	CE - 90° - 3	47,77	66	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
		A 16 cm del extremo de la cola	6	1	CO - 90° - 1	37,03	51	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				2	CO - 90° - 2	35,37	49	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				3	CO - 90° - 3	37,88	51	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
	Horizontal	A 16 cm del extremo de la cabeza	6	1	CB - 0° - 1	28,51	47	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				2	CB - 0° - 2	37,02	51	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				3	CB - 0° - 3	35,87	50	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
		Al centro	6	1	CE - 0° - 1	39,33	52	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				2	CE - 0° - 2	33,12	47	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				3	CE - 0° - 3	36,9	52	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
		A 16 cm del extremo de la cola	6	1	CO - 0° - 1	38,67	52	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				2	CO - 0° - 2	35,04	52	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza
				3	CO - 0° - 3	34,32	51	Aplanado con marcas de las esquinas de la mordaza