



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**RESPUESTA SISMICA DEL MACIZO ROCOSO  
EN DESARROLLOS DE TUNELES CON DESTRESS BLASTING  
EN CONDICIONES DE ALTOS ESFUERZOS**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERIA**

**WASHINGTON SEGUNDO RODRIGUEZ ZAMORANO**

**PROFESOR GUIA:**

**JAVIER VALLEJOS MASSA**

**MIEMBROS DE COMISION**

**KIMIE SUZUKI MORALES  
JUAN JARUFE TRONCOSO  
PABLO VASQUEZ VIDAL**

**SANTIAGO DE CHILE**

**2022**

# **RESPUESTA SISMICA DEL MACIZO ROCOSO EN DESARROLLOS DE TUNELES CON DESTRESS BLASTING EN CONDICIONES DE ALTOS ESFUERZOS**

## **RESUMEN**

Los túneles de infraestructura principal del Proyecto Andes Norte, Nuevo Nivel Mina, de División El Teniente, Codelco-Chile, están emplazados en un ambiente complejo desde el punto de vista geológico-geomecánico. La condición geológica estructural y el campo de esfuerzos del entorno juegan un papel importante en la sismicidad inducida por las excavaciones. Esto ha motivado la exploración e implementación de diferentes metodologías para permitir la construcción de los túneles.

Las técnicas de pre-acondicionamiento para el macizo rocoso, son utilizadas en la industria minera con la finalidad de lograr un beneficio de la respuesta sísmica en la construcción de túneles o explotación minas, pueden ser aplicadas tanto a escala masiva, para lograr alterar un volumen significativo del macizo rocoso, y/o a escala local alrededor de la excavación, como es el caso de los túneles de infraestructura del Proyecto Andes Norte. El Destress Blasting, el cual consiste en la incorporación de cargas explosivas confinadas y detonadas de manera simultánea o con tiempo de desfase (retardo) con respecto a las tronaduras de desarrollo de túneles. Esta técnica genera nuevas fracturas en el macizo rocoso alrededor de la excavación, modificando sus propiedades y redistribuyendo la condición de esfuerzos. Esta técnica ha sido utilizada en los desarrollos de túneles en minas profundas con sismicidad inducida como una medida de mitigación del peligro de rupturas violentas desde la frente de las excavaciones, fenómeno conocido como strainburst.

En este artículo, se presenta y discute el diseño y la implementación operacional de la técnica de Destress Blasting en los túneles de Acceso Personal (TAP) y Correa (TC) del Proyecto Andes Norte. Se describe la información geológica, geomecánica y operacional de los túneles y se relaciona con el análisis de la respuesta sísmica del macizo rocoso al desarrollo de los túneles sin y con Destress Blasting.

Finalmente, se establecen conclusiones y recomendaciones relacionadas con el proceso de diseño del Destress Blasting.

# **ROCK MASS SEISMIC RESPONSE TO TUNNEL DEVELOPMENT WITH DESTRESS BLASTING IN HIGH STRESS CONDITION**

## **ABSTRACT**

The main infrastructure tunnels of the North Andes Project, New Mining Level of CODELCO's Chilean mining division "El Teniente", are located in a complex environment from a geological and geomechanical perspective. The geological, structural conditions and the stress field of the surroundings, play an important role in the seismic activity induced by the excavations. This has prompted the exploration and implementation of different methodologies to enable the construction of the tunnels.

Preconditioning techniques applied to rock masses are used in the mining industry with the aim of getting a benefit regarding the seismic response in the building of tunnels or in mining. They can be applied on a massive scale in order to alter a significant volume of rock, and/or on a local scale around the excavation. The latter approach has been implemented in the infrastructure tunnels of the North Andes Project. The Destress Blasting technique incorporate explosive charges that are confined and detonated simultaneously or with a time delay with the tunnel development blasting. This technique generates new fractures on the rock mass around the excavation, redistributing the stress conditions. The main applicability is related to the development of tunnels in deep mines to mitigate the risk of violent ruptures from the face of the excavations (strain burst).

In this paper, the design and operational implementation of the Destress Blasting technique in the Personal Access Tunnel (TAP) and Conveyor Belt Tunnel (TC) are presented and discussed. The geological, geomechanical, design and operational information of the tunnels are described and related to the analysis of the seismic response of the rock mass to the development of the tunnels with and without destress blasting.

Finally, conclusions and recommendations are established for the Destress Blasting design process.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo agradecer a mi querida familia, a mi amada esposa Pabla, a mis hijas Leonor y Elena que son mis tres pilares fundamentales en mi vida, por su apoyo, paciencia y ayuda incondicional en todo momento desde principio a fin, ellas siempre han sido el soporte emocional y motor para cumplir este gran desafío.

Al profesor guía Javier Vallejos por la paciencia y su valiosa colaboración en brindarme lineamientos y recomendaciones para llevar este trabajo de investigación, cada vez que se presentaba un obstáculo o duda conté con su orientación.

Igualmente, este agradecimiento va dirigido a todos los profesionales de la Dirección de Geotecnia y Direcciones de Construcción del Proyecto Andes Norte de División El Teniente que contribuyeron de una u otra manera a esta investigación.

Los autores agradecen el apoyo del proyecto basal CONYCIT AFB180004 del Centro de Tecnología Minera Avanzada (AMTC).

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION.....	1
1.1	PREAMBULO .....	1
1.2	MOTIVACION .....	1
1.3	OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	2
1.4	ALCANCES DE LA INVESTIGACION .....	2
1.5	METODOLOGIA GENERAL DEL ESTUDIO .....	2
1.6	RESUMEN DE LA INVESTIGACION .....	2
2.	RESPUESTA SISMICA DEL MACIZO ROCOSO EN DESARROLLOS DE TUNELES CON DESTRESS BLASTING EN CONDICIONES DE ALTOS ESFUERZOS .....	3
2.1	RESUMEN .....	3
2.2	INTRODUCTION .....	4
2.3	CONCEPTO DE DESTRESS BLASTING .....	7
2.4	ANTECEDENTES DE LOS TUNELES PRINCIPALES .....	9
2.4.1	GEOLOGIA .....	9
2.4.2	CONDICION DE ESFUERZOS .....	12
2.4.3	DISEÑO MINERO Y FORTIFICACION .....	12
2.4.4	SISTEMA DE MONITOREO SISMICO.....	13
2.5	DISEÑO DE DESTRESS BLASTING .....	14
2.6	RESPUESTA SISMICA A LA MINERIA .....	17
2.6.1	MECANISMOS FUENTE .....	19
2.6.2	DECAIMIENTO DE LA SISMICIDAD POST-TRONADURA .....	23
2.6.3	PELIGRO SISMICO .....	27
2.7	DISCUSION Y CONCLUSIONES .....	28
2.8	AGRADECIMIENTOS.....	29
3.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	30
3.1	CONCLUSIONES GENERALES .....	30
3.2	RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	31
4.	BIBLIOGRAFIA.....	32

## INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1: Resumen de estallido de rocas ocurridos en túneles principales del Proyecto Andes Norte. ....	4
Figura 2: Línea de tiempo de estudios relacionados con la técnica de pre-acondicionamiento mediante Destress Blasting.....	6
Figura 3: Modelo de fracturamiento inducido por tronadura confinada. Chitombo, 1994. ....	7
Figura 4: Influencia de la condición de esfuerzos en el fracturamiento de la roca inducido por tronadura confinada. Saharan, 2004; Saharan and Mitri 2011. ....	7
Figura 5: Concepto de destressing en el entorno de una excavación. Roux, 1957.....	8
Figura 6: Perfil litológico de ubicación de los Túneles Principales del Proyecto Andes Norte. El cuadro amarillo corresponde al sector de la ventana de construcción P4600 (TAP Fw y TC Hw). .	10
Figura 7: Estereograma con estructuras mapeadas a partir de fotogrametría ADAM, y en menor medida, presencialmente, entre los avances #1 y #45 desde el reinicio de la construcción del túnel TAP P4600 Fw. ....	12
Figura 8: Resultados mediciones de esfuerzo con técnica emisiones acústicas, sector TAP/TC P4600. ....	12
Figura 9: Diseño de excavación y fortificación Túnel de Acceso de Personal y Túnel Correa. ....	13
Figura 10: Caracterización de fracturas alrededor de pozos de destress blasting. ....	14
Figura 11: Diseño de perforación y tronadura con tiros de Destress Blasting utilizado en Túnel TAP y TC del sector P4600. ....	15
Figura 12: Distintos diseños de Destress Blasting utilizados en los Túneles de Acceso Principal (Túnel Correa y de Acceso de Personal). ....	16
Figura 13: Auscultación Bore Hole Cámara en sondaje a la frente en tronadura con y sin Destressing, registro de daño por esfuerzo y por disparo.....	17
Figura 14: Sismicidad inducida registrada durante la construcción de los túneles TAP Fw y TC Hw ubicados en el sector P4600. En TAP Fw Tunnel, el período 1 y el período 3 no aplican DB, mientras que el período 2 y el período 4 aplican DB. ....	18
Figura 15: Mecanismos Focales Calculados Según Sismicidad inducida en TAP Fw y TC Hw sector P4600, 72 eventos sísmicos en TC Hw y 35 eventos en TAP Fw.....	19
Figura 16: Diagrama Ternario de Mecanismos Fuentes de Eventos con Magnitud (Mw) Mayor a Cero, TAP Fw P4600 Zona. (a) Sin Destress Blasting y (b) Con Aplicación de Destress Blasting. 20	
Figura 17: Diagrama Hudson Mecanismos Fuentes de Eventos Sísmicos con Magnitud (Mw) Mayor a Cero, TAP Fw P4600. (a) Zona Sin Destress Blasting y (b) Con Aplicación de Destress Blasting. ....	21
Figura 18: Cálculo Stress Inversion TAP Fw 4600. (a) Zona Sin Destress Blasting, (b) Con Destress Blasting y (c) Orientación Resultados Mediciones de Esfuerzo Sector P4600.....	21
Figura 19: Mecanismos Fuentes de Eventos con Magnitud (Mw) Mayor a Cero, TC Hw P4600 con Aplicación de Destress Blasting. (a) Diagrama Ternario y (b) Diagrama de Hudson. ....	22
Figura 20: Análisis Soluciones Focales TC Hw P4600. (a) Cálculo Stress Inversion, (b) Orientación Resultados Mediciones de Esfuerzo y (c) Set Planos de las soluciones de los momentos tensores de los eventos sísmicos.....	23
Figura 21: Decaimiento Sísmico Túnel de Acceso Personal (TAP Fw P4600). (a) Periodo 1 sin DB, (b) Periodo 2 con DB, (c) Periodo 3 sin DB y (d) Periodo 4 con DB. ....	24

Figura 22: Tiempo de reingreso en función del número de tronaduras para el túnel TAP. La línea segmentada describe el tiempo de reingreso implementado por la gerencia. La línea continua describe el tiempo de reingreso calculado a partir de la sismicidad registrada después de la tronadura. Se identifican los períodos sin y con Destress Blasting. ....	24
Figura 23: Decaimiento de la Sismicidad para Túnel de Correa (TC Hw 4600), para los tiempos de reingreso definidos durante la construcción de esta obra. (a) 36 horas, (b) 24 horas, (c) 18 horas, (d) 12 horas, (e) 6 horas, y (f) 3 horas .....	25
Figura 24: Tiempo de reingreso en función del número de tronaduras para el túnel TC. La línea segmentada describe el tiempo de reingreso implementado por la gerencia. La línea continua describe el tiempo de reingreso calculado a partir de la sismicidad registrada después de la tronadura. (a) Período 1, y (b) Período 2. ....	26
Figura 25: Probabilidad de Ocurrencia de Sismicidad. (a) TAP Fw 4600 (Túnel de acceso personal), y (b) TC Hw 4600 (Túnel de cinta transportadora). ....	28
Tabla 1: Resumen Propiedades y Parámetros Geotécnicos (Parada and Castro, 2019). ....	11

## **1. INTRODUCCION**

### **1.1 PREAMBULO**

El Proyecto Andes Norte Nuevo Nivel Mina de División El Teniente corresponde a una nueva profundización de los niveles productivos de la mina, el cual se encuentra en construcción a 240 metros bajo los actuales niveles en explotación, a cota 1887 en el nivel de hundimiento. La mayoría de los desarrollos del proyecto están emplazados en un ambiente complejo desde el punto de vista geológico-geomecánico, donde la condición geológica estructural y el campo de esfuerzos del entorno juegan un papel importante en la respuesta sísmica. A medida que los túneles de infraestructura principal para acceder al Proyecto Andes Norte fueron construidos ocurrieron diversos eventos sísmicos relevantes que impactaron la estrategia de ejecución del proyecto, donde algunos de ellos terminan en estallido de rocas.

Como parte de la administración del riesgo sísmico, uno de los puntos que aborda esta estrategia es la implementación de técnicas de pre-acondicionamiento (PA) al macizo rocoso, las cuales pueden aplicarse a escala masiva, para lograr alterar un volumen significativo de roca; o bien a escala local, para modificar el macizo rocoso inmediatamente alrededor de la excavación, en este último ámbito se aborda la aplicación del Destress Blasting (DB) a escala de túneles. Las tronaduras de DB son aplicadas junto con las tronaduras de producción o la tronadura de desarrollo de túneles con el propósito de modificar las propiedades del macizo rocoso y desplazar los esfuerzos al interior del macizo, alejándolos de la frente de avance.

Al realizar una revisión de la bibliografía, la metodología de destress blasting se ha aplicado en minería durante los últimos 60 años, estos estudios abordan temas en lo referente a métodos de diseño, modelamiento numérico, casos históricos, aplicaciones a minería tanto en métodos de explotación como en desarrollos de túneles.

En el Proyecto Andes Norte se ha aplicado ampliamente esta técnica para la construcción de túneles en ambientes complejos desde el punto de vista geomecánico-geológico, como es el caso del Túnel de Acceso Personal (TAP) y Túnel Corre (TC).

### **1.2 MOTIVACION**

En Chile y en el mundo en general, por ejemplo países como Sudáfrica, Canada y Australia se ha tenido que ir profundizando para extraer el mineral de los yacimientos, esto desafía a desarrollar proyectos en ambientes complejos geotécnicamente. Desarrollar minería a tales profundidades conlleva variados riesgos y uno de los más peligrosos es el fenómeno de los Estallidos de Rocas o Rockbursting. Un estallido de roca es básicamente una explosión súbita de la roca la cual muchas veces se da de manera violenta.

El caso particular de mina El Teniente, a medida que la explotación del yacimiento se ha ido profundizando, del mismo modo se ha tenido que profundizar la construcción de túneles de infraestructura principal para acceder a los futuros sectores de explotación, como es el caso del Proyecto Andes Norte Nuevo Nivel Mina. Esto requiere enfrentar ambientes complejos desde el punto de vista geológico-geomecánico, en los cuales los problemas relacionados con la sismicidad inducida, generan un desafío y motivación a explorar nuevas metodologías que puedan aportar un beneficio en la construcción de túneles en ambiente de altos esfuerzos, ya sea para este proyecto u otro que requiera la implementación de una técnica como el Destress Blasting.

Por lo anterior, este trabajo busca demostrar el efecto positivo que pueda generar esta metodología en la sismicidad inducida producto de una excavación subterránea, como es el caso de los túneles de infraestructura principal del Proyecto Andes Norte de División El Teniente.



### 1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los objetivos principales de esta investigación son:

- Implementación de técnica de pre-acondicionamiento a escala local mediante tronadura confinada “Destress Blasting” (DB), en la construcción de túneles en ambiente de altos esfuerzos.
- Analizar la respuesta del macizo rocoso mediante parámetros sísmicos y evaluar el impacto de esta técnica en la construcción de túneles.

### 1.4 ALCANCES DE LA INVESTIGACION

- Aplicación de Destress Blasting en Túneles de infraestructura Principal del Proyecto Andes Norte NNM.
- Túnel de Acceso de Personal (TAP) y Túnel Correa (TC) en Sector Pk 4600.

### 1.5 METOLOGIA GENERAL DEL ESTUDIO

La metodología de esta investigación tiene como objetivo alcanzar los objetivos planteados anteriormente. El procedimiento y tópicos abordados para cumplir las metas planteadas fue el siguiente:

- **Definición de conceptos y diseño de Destress Blasting.**  
En esta etapa se busca entregar un entendimiento del efecto que genera una tronadura confinada, pruebas empíricas de medición del halo de las fracturas y propuesta de diseño para implementar este método.
- **Descripción de Antecedentes donde se desarrolla este estudio,** con la finalidad de contextualizar el ambiente geotécnico, consideraciones de diseño de excavación y soporte definidos para los túneles en análisis, en este caso:
  - .1. Geológicos-geomecánicos,
  - .2. Diseño de excavación y fortificación
  - .3. Sistema de monitoreo sísmico.
- **Análisis de la Respuesta sísmica a la minería** (desarrollo túnel).  
En esta fase de la metodología se tiene como objetivo la captura la información sísmica que se genera producto del desarrollo de túneles, analizar los tipos de mecanismos fuentes y buscar correlaciones que puedan existir, como por ejemplo, verificar la consistencia del campo de esfuerzo con la sismicidad registrada.
- **Análisis del Decaimiento de la sismicidad post-tronadura.**  
En esta última etapa se busca estudiar el beneficio que pueda tener la aplicación de esta técnica en la construcción de túneles, específicamente medir la velocidad del decaimiento de la sismicidad post-tronadura.

### 1.6 RESUMEN DE LA INVESTIGACION

Los resultados de este estudio serán presentados en el siguiente artículo:

Art.1: “Rock Mass Seismic Response to Tunnel Development with Destress Blasting in High Stress Condition”. Rodríguez, W. Vallejos, J. Landeros P, 2021. Documento enviado a la revista *Tunnelling and Underground Space Technology* donde se publican los últimos logros de investigación en mecánica de rocas e ingeniería geotécnica, Elsevier.

## 2. RESPUESTA SISMICA DEL MACIZO ROCOSO EN DESARROLLOS DE TUNELES CON DESTRESS BLASTING EN CONDICIONES DE ALTOS ESFUERZOS

W. Rodríguez<sup>1\*</sup>, J.A. Vallejos<sup>2</sup>, P. Landeros<sup>3</sup>.

- a. Proyecto Andes Norte, Vicepresidencia de Proyectos, Codelco, Chile, Jefe de Geomecánica.
- b. Departamento de Ingeniería de Minas, Advanced Mining Technology Center (AMTC), Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas, Faculty of Physical and Mathematical Sciences, Universidad de Chile.
- c. Proyecto Andes Norte, Vicepresidencia de Proyectos, Codelco, Chile, Director de Geotecnia.

\*Correspondencia autor. Tel.: +56 9 87416185.

E-mail address: [wrodr002@codelco.cl](mailto:wrodr002@codelco.cl) (W. Rodríguez).

### 2.1 RESUMEN

Los túneles de infraestructura principal del Proyecto Andes Norte, Nuevo Nivel Mina, de División El Teniente, Codelco-Chile, están emplazados en un ambiente complejo desde el punto de vista geológico-geomecánico. La condición geológica estructural y el campo de esfuerzos del entorno juegan un papel importante en la sismicidad inducida por las excavaciones. Esto ha motivado la exploración e implementación de diferentes metodologías para permitir la construcción de los túneles.

Las técnicas de pre-acondicionamiento para el macizo rocoso, son utilizadas en la industria minera con la finalidad de lograr un beneficio de la respuesta sísmica en la construcción de túneles o explotación minas, pueden ser aplicadas tanto a escala masiva, para lograr alterar un volumen significativo del macizo rocoso, y/o a escala local alrededor de la excavación, como es el caso de los túneles de infraestructura del Proyecto Andes Norte. El Destress Blasting, el cual consiste en la incorporación de cargas explosivas confinadas y detonadas de manera simultánea o con tiempo de desfase (retardo) con respecto a las tronaduras de desarrollo de túneles. Esta técnica genera nuevas fracturas en el macizo rocoso alrededor de la excavación, modificando sus propiedades y redistribuyendo la condición de esfuerzos. Esta técnica ha sido utilizada en los desarrollos de túneles en minas profundas con sismicidad inducida como una medida de mitigación del peligro de rupturas violentas desde la frente de las excavaciones, fenómeno conocido como strainburst.

En este artículo, se presenta y discute el diseño y la implementación operacional de la técnica de Destress Blasting en los túneles de Acceso Personal (TAP) y Correa (TC) del Proyecto Andes Norte. Se describe la información geológica, geomecánica y operacional de los túneles y se relaciona con el análisis de la respuesta sísmica del macizo rocoso al desarrollo de los túneles sin y con Destress Blasting.

Finalmente, se establecen conclusiones y recomendaciones relacionadas con el proceso de diseño del Destress Blasting.

**Palabras Clave:** Pre-acondicionamiento, destress blasting, destressing, sismicidad, estallido de rocas, altos esfuerzos, minería subterránea.

## 2.2 INTRODUCTION

La mayoría de los desarrollos del Proyecto Andes Norte de División El Teniente están emplazados en un ambiente complejo desde el punto de vista geológico-geomecánico, donde la condición geológica estructural y la anisotropía del campo de tensiones del entorno juegan un papel importante en la respuesta sísmica del macizo rocoso. Durante la construcción de los túneles ocurrieron varios eventos sísmicos relevantes que afectaron la estrategia operativa. La Figura 1 presenta un resumen de los estallidos de rocas que afectaron a los túneles de infraestructura principal. Los eventos incluyeron lo siguiente:

- Zona 1: Diciembre 2013. Estallido de roca con magnitud de momento,  $M_w=2.6$ ; Energía sísmica,  $E=2.1 \times 10^8$  Joule, en Túnel de Acceso Personal desde Interior Mina.
- Zona 2: Noviembre 2014. Estallido de roca con magnitud de momento,  $M_w=1.3$ ; Energía sísmica,  $E=1.5 \times 10^5$  Joule, en Túnel PK 4.600 en zona de conexión con Túnel de Acceso Personal.
- Zona 3: Mayo 2015. Estallido de roca con magnitud de momento,  $M_w=2.0$ ; Energía sísmica,  $E=9.0 \times 10^7$  Joule, en Cruzado de Ventilación 22/23 de Extracción.
- Zona 2: Enero 2018. Estallido de roca con magnitud de momento,  $M_w=1.8$ ; Energía sísmica,  $E=5.5 \times 10^6$  Joule, en Túnel de Acceso Personal sector PK 4600.
- Zona 2: Octubre 2018. Estallido de roca con magnitud de momento,  $M_w=1.8$ ; Energía sísmica,  $E=3.1 \times 10^6$  Joule, en Túnel Correa sector PK 4600.

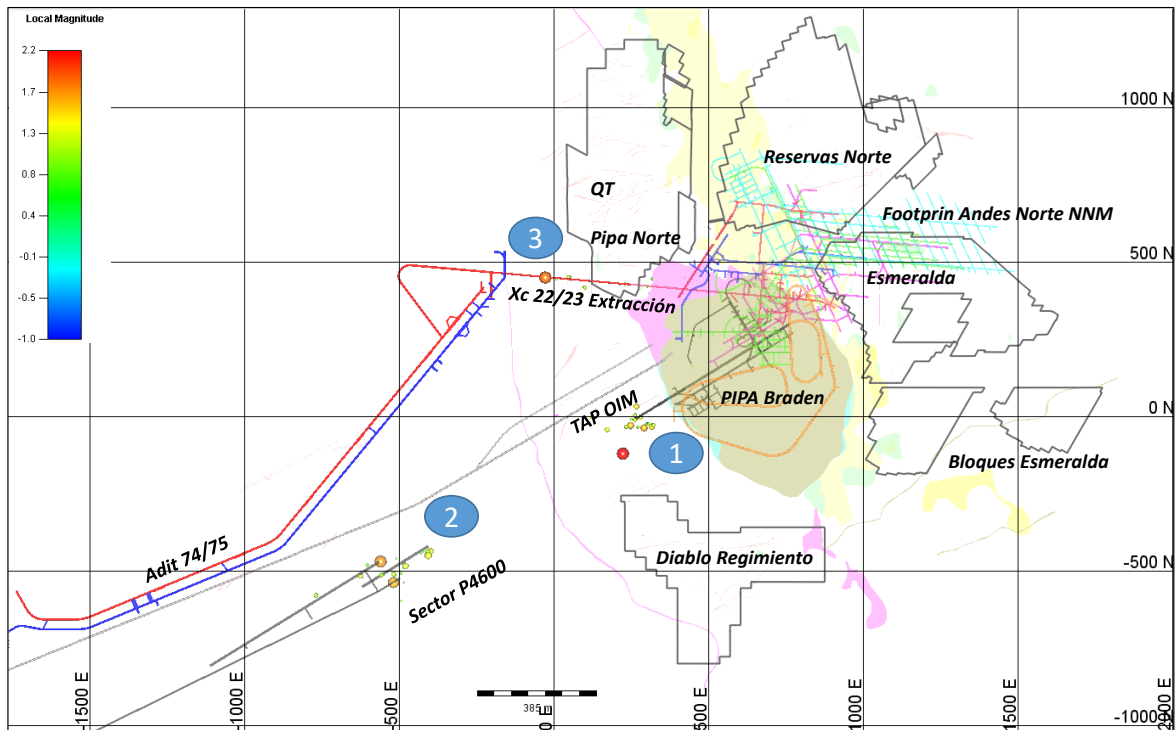


Figura 1: Resumen de estallido de rocas ocurridos en túneles principales del Proyecto Andes Norte.

Como parte del plan de administración del riesgo sísmico, se completó una revisión de la literatura y una evaluación comparativa de la sismicidad y estallidos de rocas durante la construcción de túneles (Ortlepp y Stacey., 1994; Zhou y Hong., 1995; Kaiser et al., 1996; Wang., 1998; Martin et al., 1999; Berggren y Stille., 2006; Shan y Yan., 2010; Tang et al., 2010; Loew et al., 2010; Hen et al., 2011; Panthi., 2012; Saedi et al., 2012; Weng y Tian., 2013; Diederichs et al., 2013; Guo et al. 2013; Kaiser., 2014). Esta revisión se centró en

las causas de la sismicidad observada en otros sitios y las medidas de control/mitigación. Se identificaron las siguientes causas principales de ruptura de rocas durante la construcción del túnel:

- Rocas rígidas y resistentes,  $\sigma_c > 100$  (MPa).
- Alta energía de deformación almacenada producto de los movimientos tectónicos.
- Topografía irregular que produce desequilibrio.
- Presencia de contactos y estructuras geológicas.
- Heterogeneidad del macizo rocoso.
- Alta profundidad (mayor a 500 m).
- Formación de lascas por fracturamiento debido a la condición de altos esfuerzos que presentan inestabilidad por pandeo.

Además, se identificaron las siguientes medidas de control/mitigación:

- Establecer un modelo geológico/estructural detallado establecido a través de exploración geofísica, sondajes y mapeos.
- Instalación de un sistema de monitoreo micro-sísmico.
- Construcción de un túnel piloto para aliviar esfuerzos.
- Pre-acondicionamiento con explosivos (destress blasting).
- Pernos de fricción en la frente de avance con malla.
- Aplicación de spray on-liners.
- Reducir la tasa de avance del túnel.
- Optimización del layout de perforación y tronadura.
- Aplicación de shotcrete en techo y frente después de retirar parte de las marinas.

Sobre la base de los resultados de esta revisión, se establecen las siguientes conclusiones y recomendaciones con respecto a la construcción de túneles que presentan ocurrencia de estallidos de roca:

- En la explotación minera existen alternativas de secuenciamiento que permiten reducir y controlar el peligro de estallidos de roca. En el caso de desarrollo de túneles esta opción no es completamente posible. En el desarrollo de túneles, la falla frágil y violenta del macizo rocoso debe ser aceptada y controlada.
- Los estallidos de roca se deben a la alta capacidad de almacenar energía del medio, alta fragilidad y a una condición de esfuerzos altos. Los estallidos con control geológico-geotécnico (contactos, fallas geológicas altamente trabadas) pueden generar daño severo, siendo difíciles de controlar y prevenir. Debido a esto se recomienda establecer un modelo geológico-geotécnico detallado y en paralelo un modelo numérico que permita describir la interacción entre el estado de esfuerzos tridimensional junto con el control geológico-geotécnico.
- El pre-acondicionamiento del macizo rocoso utilizando explosivos se declara como efectivo para reducir el peligro de estallidos de roca. Una alternativa es aplicar pre-acondicionamiento del macizo rocoso mediante fracturamiento hidráulico previo a la construcción del túnel como en el caso de estudio de la mina Cadia East [Bunger, Jeffrey, 2011]. Al generar fracturas adicionales en el macizo rocoso es posible que los requerimientos de soporte estático aumenten, sin embargo, se logra reducir la capacidad de almacenamiento de energía del macizo rocoso.
- En túneles, la disposición geométrica de un arreglo de sensores sísmicos es limitada. Sin embargo, la instalación de un sistema cerca de la frente (hasta tres diámetros detrás de la frente) permite asistir en la determinación de la respuesta sísmica del macizo y en el desarrollo de criterios de períodos de aislación.

Al realizar una revisión de la bibliografía, la metodología de destress blasting se ha aplicado en minería durante los últimos 60 años (**Figura 2**). Estos estudios abordan temas en lo referente a métodos de diseño, modelamiento numérico, casos históricos, aplicaciones a minería tanto en métodos de explotación como en desarrollos de túneles. La Figura 2 presenta una línea de tiempo con las distintas investigaciones desarrolladas en lo que respecta a la técnica de Destress Blasting.

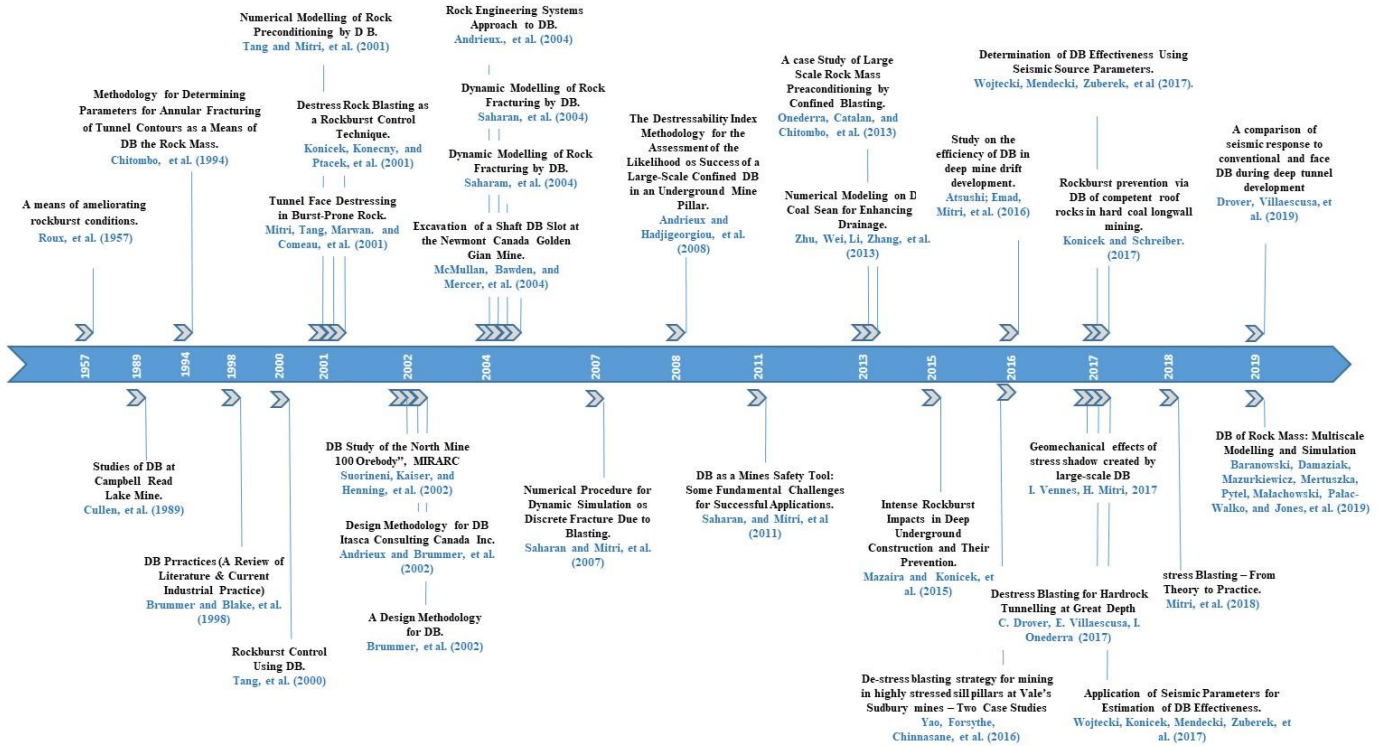


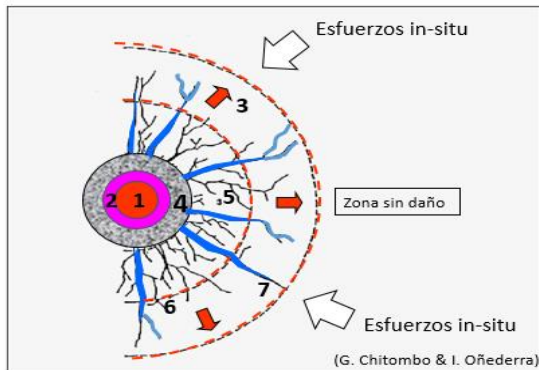
Figura 2: Línea de tiempo de estudios relacionados con la técnica de pre-acondicionamiento mediante Destress Blasting.

A continuación se describe un resumen de los principales hallazgos:

- Para Destress Blasting local se recomienda el uso de ANFO ya que entrega un mayor volumen de gas generado.
- Para tronaduras masivas de destressing se recomienda el uso de emulsiones ya que entregan una mayor onda de choque a la roca.
- El Destress Blasting local se incluye como parte regular del ciclo de avance o desarrollo.
- El aumento en los costos asociados con la perforación y tronadura producto del destressing local en los desarrollos no es significativo. Sin embargo, el tiempo del ciclo se ve afectado. Además, existe un riesgo adicional al perforar en áreas que han sido objeto de tronaduras.
- Diagramas de perforación y tronadura del destressing para generar una zona fracturada alrededor de la excavación. Esto se logra mediante la perforación inclinada.
- La longitud de los pozos locales de destressing y su carga están determinados por la extensión del avance.
- El principal problema del destressing es mantener los agujeros abiertos en condiciones de alto estrés.
- El preacondicionamiento redistribuye el estrés a las áreas circundantes, lo que podría generar áreas locales con altas concentraciones de estrés.

## 2.3 CONCEPTO DE DESTRESS BLASTING

La tronadura de Destressing es esencialmente la generación de fracturas en el macizo rocoso mediante carga dinámica usando explosivos (**Figura 3**). La detonación con explosivos en una perforación genera típicamente una zona de trituración que abarca cuatro veces el diámetro del tiro (Chitombo, 1994). Sin embargo, la red de fracturas crece más allá de esta zona, llegando a afectar hasta 50 veces el diámetro de perforación, lo cual puede variar dependiendo del campo de esfuerzos del sector (**Figura 4**).



1. Detonación de la carga.
2. Rápida expansión del diámetro del tiro.
3. Radiación de ondas sísmicas de esfuerzos.
4. Pulverización de la pared del tiro.
5. Formación y extensión de fracturas radiales.
6. Formación de fracturas circulares por caída de la presión y retractación del diámetro.
7. Extensión de fracturas por penetración de gases.

Figura 3: Modelo de fracturamiento inducido por tronadura confinada. Chitombo, 1994.

En la Figura 3, los pasos 1 a 4 dependen esencialmente del tipo de explosivo (velocidad de detonación, diámetro, densidad). Los pasos 5 a 7 dependen del tipo de explosivo y del confinamiento (esfuerzos in-situ).

La **Figura 4** muestra que la orientación y longitud de las fracturas dependerá considerablemente del estado de esfuerzos del sector, además, las fracturas tienden a alinearse a lo largo de la dirección del esfuerzo principal mayor.

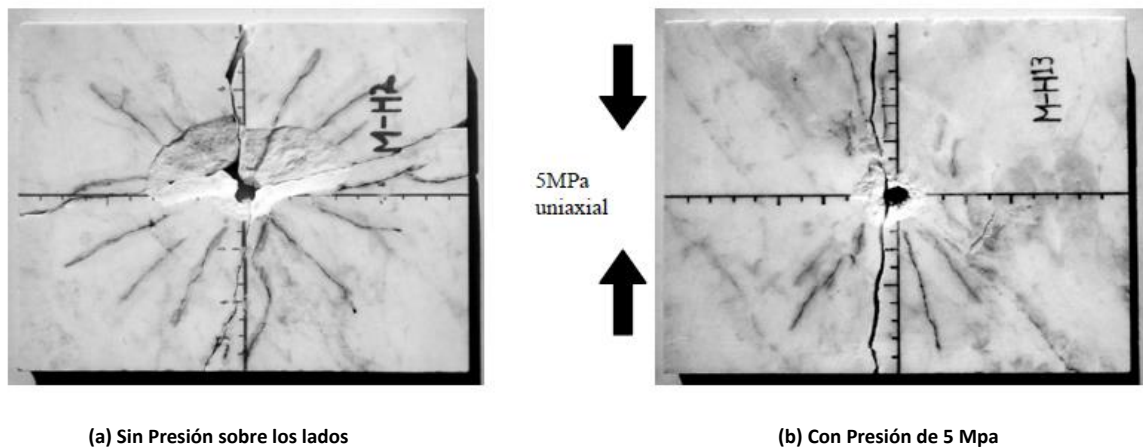


Figura 4: Influencia de la condición de esfuerzos en el fracturamiento de la roca inducido por tronadura confinada. Saharan, 2004; Saharan and Mitri 2011.

Las cargas de Destress Blasting se detonan simultáneamente con la excavación durante la tronadura de desarrollo del túnel. El objetivo es modificar las propiedades del macizo rocoso y desplazar los esfuerzos del frente minero (Roux, et al 1957; Brummer y Blake, 1998; Mitri, Tang y Marwan, 2001). Por definición, el

volumen alterado por el Destress Blasting es local. Este concepto se ilustra en las **Figura 55a y 5b** con un modelo numérico bidimensional de elementos finitos. Se modifica un volumen de roca para ser preconditionado dentro de una distancia de 8 metros desde el frente del túnel considerando una reducción del módulo de deformación por un factor  $\alpha$  de 0.2 y un factor de reducción de esfuerzos  $\beta$  de 0.8. En este ejemplo, el preconditionamiento implica una reducción de la tensión desviatoria en el frente de excavación de 190 MPa a 100 MPa.

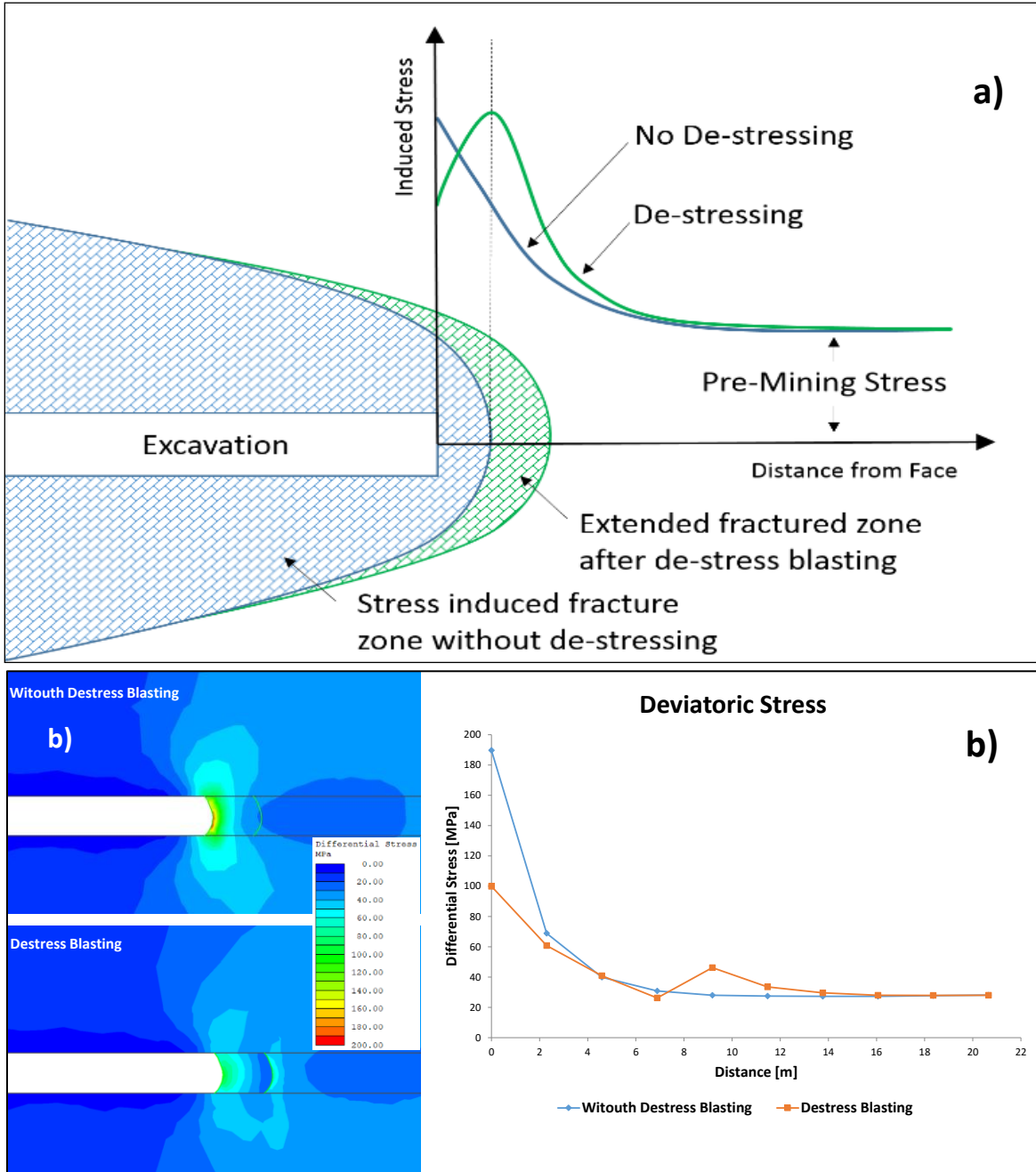


Figura 5: Concepto de destressing en el entorno de una excavación. Roux, 1957.

## **2.4 ANTECEDENTES DE LOS TUNELES PRINCIPALES**

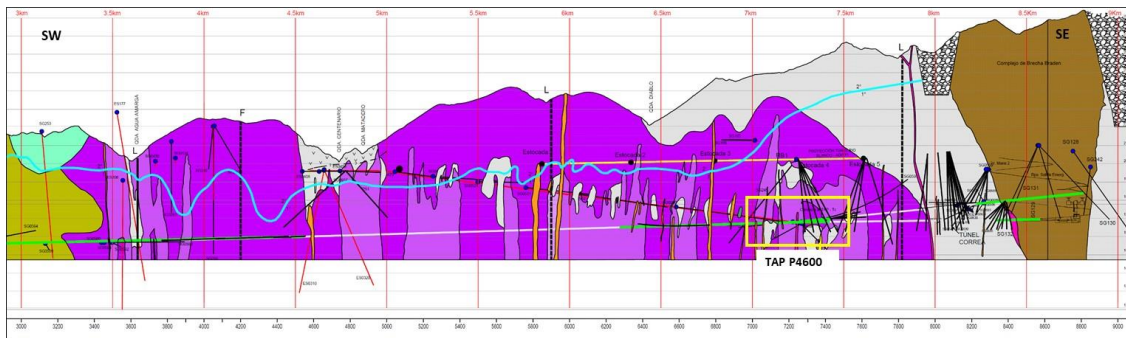
En las siguientes secciones se describen los antecedentes de los túneles principales , Túnel de Acceso Personal y Túnel Correa, relacionados con la información geológica/geotécnica, la condición de esfuerzos y el diseño de las excavaciones.

### **2.4.1 GEOLOGIA**











El sector de estudio donde se emplazan los túneles principales del Proyecto Andes Norte Nuevo Nivel Mina, se emplaza en El Complejo Intrusivo Sewell, que incluye a un conjunto de cuerpos Ígneos intrusivos sub-verticales correspondientes a Dioritas de grano medio a grueso, además de Cuarzodioritas, Dioritas Porfíricas y localmente Tonalitas y Microdioritas de grano fino. Las rocas muestran una alteración hidrotermal propilítica (clorita + epidota), una alteración localmente persistente con sericitación (sericita + arcilla) y stockwork de cuarzo-sericita. El complejo intrusivo Sewell ha sido afectado por la zona de cizalle El Teniente, que es sub-paralela al trazado de los túneles. La geología del sector de interés se indica en planta de la **Figura 6**.

Según lo indicado en la Figura 6, se observa que la mayor parte de los Túneles Principales se encuentran emplazados en la unidad litológica Tonalita. Sin embargo, durante los desarrollos de los túneles, específicamente en el sector P4600, se han identificado distintas unidades litológicas. Estas unidades corresponden principalmente a: Pórfido Andesítico (PAN), Pórfido Diorítico Fino Exploración (PDI Fino Exp) y Pórfido Diorítico Grueso Exploración (PDI Grueso Exp) y Tonalita (TON).





**LEYEND**

	COLON COYA FORMATION		TONALITE
	FARELLONES FORMATION		DIORITIC PORPHYRY EXP
	HYDROTHERMAL BRECCIA AGUA AMARGA		LATITIC PORPHYRY
	CMET - ANDESITIC PORPHYRY		DACITIC PORPHYRY
	BRECCIAS BRADEN COMPLEX (PIPE)		QUARTZ VEINS

**SYMBOLOLOGY**












	Surface projected fault		Window P4600
	Estructural line projected from surface		Adit 71 Tunnel
	Contacto Roca Secundaria (2°)		Tunnel developed to June 2020
	CAVITY		Projected tunnel
			Probing
			Projected probing
			TR Horizontal probing



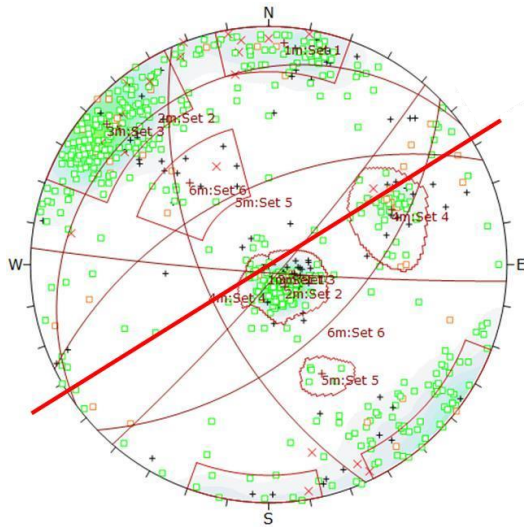
Figura 6: Perfil litológico de ubicación de los Túneles Principales del Proyecto Andes Norte. El cuadro amarillo corresponde al sector de la ventana de construcción P4600 (TAP Fw y TC Hw).

En la **Tabla 1** se muestra un resumen de los parámetros geotécnicos de la roca intacta para cada una de las litologías que se han detectado en la construcción de los túneles principales del Proyecto Andes Norte. Estas rocas en los túneles han presentado un comportamiento rígido y frágil con alta capacidad de almacenar energía, la que es liberada mediante sismicidad. La roca identificada en el área de los túneles tiene un módulo de deformación y resistencia a la compresión mayor en comparación con las otras áreas ubicadas en el sector este de la mina El Teniente (Brecha Braden, Pórfido Dacítico y Diorítico, Complejo Máfico El Teniente “CMET”).

Tabla 1: Resumen Propiedades y Parámetros Geotécnicos (Parada and Castro, 2019).

Parámetros		Litología			
Propiedad Geotécnica	Notación	PAN	PDI	PDI Grueso	TON
Densidad de Masa	$\gamma$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2.75	2.70	2.70	2.72
Velocidad de Onda S	$V_s$ [m/s]	3077	2779	2900	2812
Velocidad de Onda P	$V_p$ [m/s]	5397	4734	5004	4794
Porosidad	$\eta$ [%]	0.40	0.88	0.80	0.91
Resistencia Compresión No Confinada	UCS	176	185	218	158
Resistencia en Tracción Indirecta	$T_i$ [MPa]	-23	-18	-21	-18
Módulo de Elasticidad	$E_i$ [GPa]	61	57	59	53
Razón Módulo Elástico	$E/UCS$	347	308	271	335
Razón de Poisson	$\nu$	0.27	0.24	0.26	0.23
Resistencia en Compresión [a 30 MPa]	$\sigma_{ci}$ [MPa]	228	208	233	199
Parámetro Hoek Brown [a 30 MPa]	$m_i$	14.7	17.7	15.9	16.3
Resistencia en Tracción [a 30 MPa]	$\sigma_t$ [MPa]	-15.6	-11.7	-14.7	-12.2
Cohesión	$c$ [MPa]	35	30	35	30
Ángulo de fricción	$\phi$ [°]	54	56	55	55
Notas:					
1. Los valores indicados corresponden a la mediana de la estadística descriptiva.					
2. Los parámetros de Hoek Brown mostrados corresponden a los obtenidos al considerar un confinamiento máximo de 30 MPa.					

En el sector de interés, y en particular en el Túnel TAP P4600, se han reconocido seis sets estructurales (**Figura 7**). Los principales corresponden a los sets 3 (rumbo NE, subvertical) y 2 (subhorizontal). Los sets 1 y 4 son bastante frecuentes, siendo, al igual que 2 y 3, reconocidos a lo largo de toda la excavación. El set 1 es subvertical y oblicuo al túnel y podría eventualmente formar bloques en la labor, en intersección con los demás sets estructurales; mientras el set 4 es perpendicular al avance y podría eventualmente delimitar bloques inestables en la frente o en el techo, tal como se ha evidenciado en algunos avance de los túneles generando una importante sobre-excavación de hasta 5 m. Los sets 5 y 6 son menos frecuentes, de escaso relleno (<1 mm), no son reconocidos en la mayoría de los avances, sin embargo, son muy relevantes para la estabilidad de la labor, debido a su orientación cercana a la del túnel.



Set	Rumbo/Manteo	Dip/Dip Dir
1	N86°O/86°S	86/184
2	N54°E/13°NO	13/324
3	N41°E/84°NO	84/131
4	N24°O/59°SO	59/246
5	N64°E/54°NO	54/334
6	N46°E/51°SE	51/136

Figura 7: Estereograma con estructuras mapeadas a partir de fotogrametría ADAM, y en menor medida, presencialmente, entre los avances #1 y #45 desde el reinicio de la construcción del túnel TAP P4600 Fw.

### 2.4.2 CONDICION DE ESFUERZOS

Para especificar la condición de esfuerzos del sector del P4600 donde se localiza el TAP y TC, se realizó una campaña de mediciones de esfuerzos utilizando la técnica de emisiones acústicas (AE). La técnica utiliza testigos orientados y permite obtener el tensor de esfuerzo en tres dimensiones, basado en el efecto Kaiser (Villaescusa et al., 2002).

La Figura 8 presenta los valores y orientaciones promedio de los esfuerzos principales de las mediciones realizadas a la fecha en este sector.

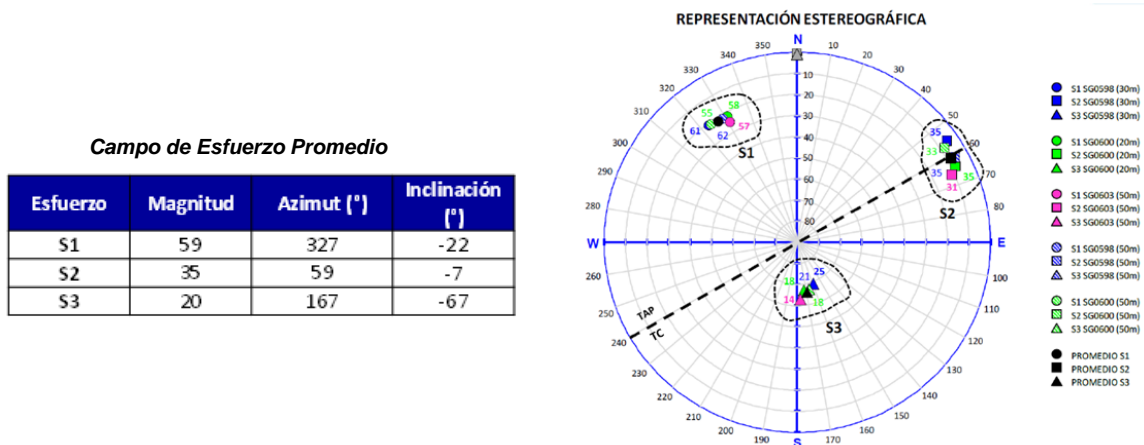


Figura 8: Resultados mediciones de esfuerzo con técnica emisiones acústicas, sector TAP/TC P4600.

### 2.4.3 DISEÑO MINERO Y FORTIFICACION

El trazado del Túnel Correa (TC) se proyecta paralelo al Túnel de Acceso Personal (TAP) separados entre sí por una distancia de 40 m entre ejes (Figura 9a). El diseño de soporte de ambos túneles (Figura 9b) consiste en pernos roscas dispuestos en patrón de 1x1 mxm, con su placa y tuerca, dos mallas del tipo romboidal G-80 (Geobrugg) (diámetro de alambre de 4 mm, resistencia a la tracción mayor a 1770 N/mm<sup>2</sup>), Shotcrete H-30

de 7 cm de espesor.

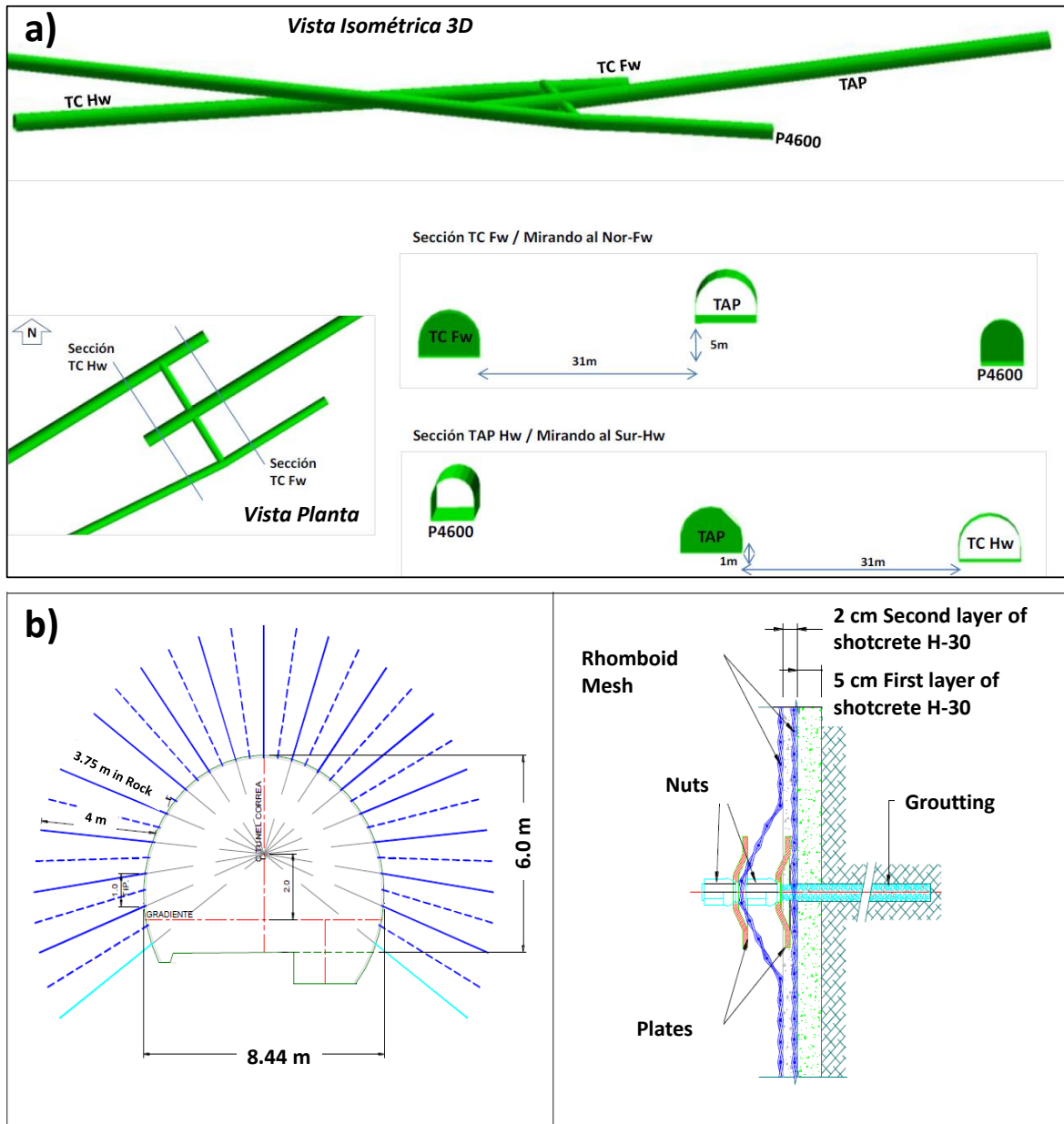


Figura 9: Diseño de excavación y fortificación Túnel de Acceso de Persoanl y Túnel Correa.

#### 2.4.4 SISTEMA DE MONITOREO SISMICO

Durante el inicio de la construcción del Túnel Correa Hw (TC Hw) y Túnel de Acceso Personal (TAP Fw) del sector PK 4600 a Octubre del año 2018 se contaba con 6 sensores sísmicos del tipo geófonos de 14 Hz. Además, de los seis sensores del sector, hay tres sensores ubicados en el túnel del ADIT 71 en cota superior. Para este sector donde se emplaza el TAP Fw y TC Hw 4600, se puede indicar que la sensibilidad en el inicio de estas frentes de trabajo es de Mw: -2.0. Sin embargo, a medida que avanzan estos túneles la sensibilidad decae a niveles de magnitud Mw: -0.7. Esto implica que a medida que avanzaron los túneles se fueron incluyendo nuevos sensores a la red de monitoreo sísmico.

## 2.5 DISEÑO DE DESTRESS BLASTING

Con la finalidad de evaluar la extensión de las fracturas, se realizó prueba de caracterización en una galería del nivel de producción del Proyecto Andes Norte NNM. Se perforaron 6 tiros de 4 pulgadas de diámetro ( $d=102$  mm), separados a 30 cm entre sí, alrededor de un tiro de Destressing más cercano a la gradiente, como se especifica en la **Figura 10a**. Este tipo de medición nos permite determinar el halo de influencia de las fracturas generadas por los tiros de Destress Blasting, considerando que ella dependerá de las propiedades del macizo rocoso y el campo de esfuerzo existente.

De la revisión de los videos de Bore Hole Camara (**Figura 10b**) se puede señalar que las fracturas se propagan hasta los 90 cm. En la **Figura 10b**, se puede ver que los pozos 1 al 5 presentan grietas, en el pozo 6 no se logra evidenciar grietas, esto se puede deber a que el esfuerzo principal es horizontal y las fracturas más extensas se propagarán en esta dirección. Según estos resultados se utiliza una distancia no inferior a 180 cm para diseñar el espaciamiento de los tiros de DB.

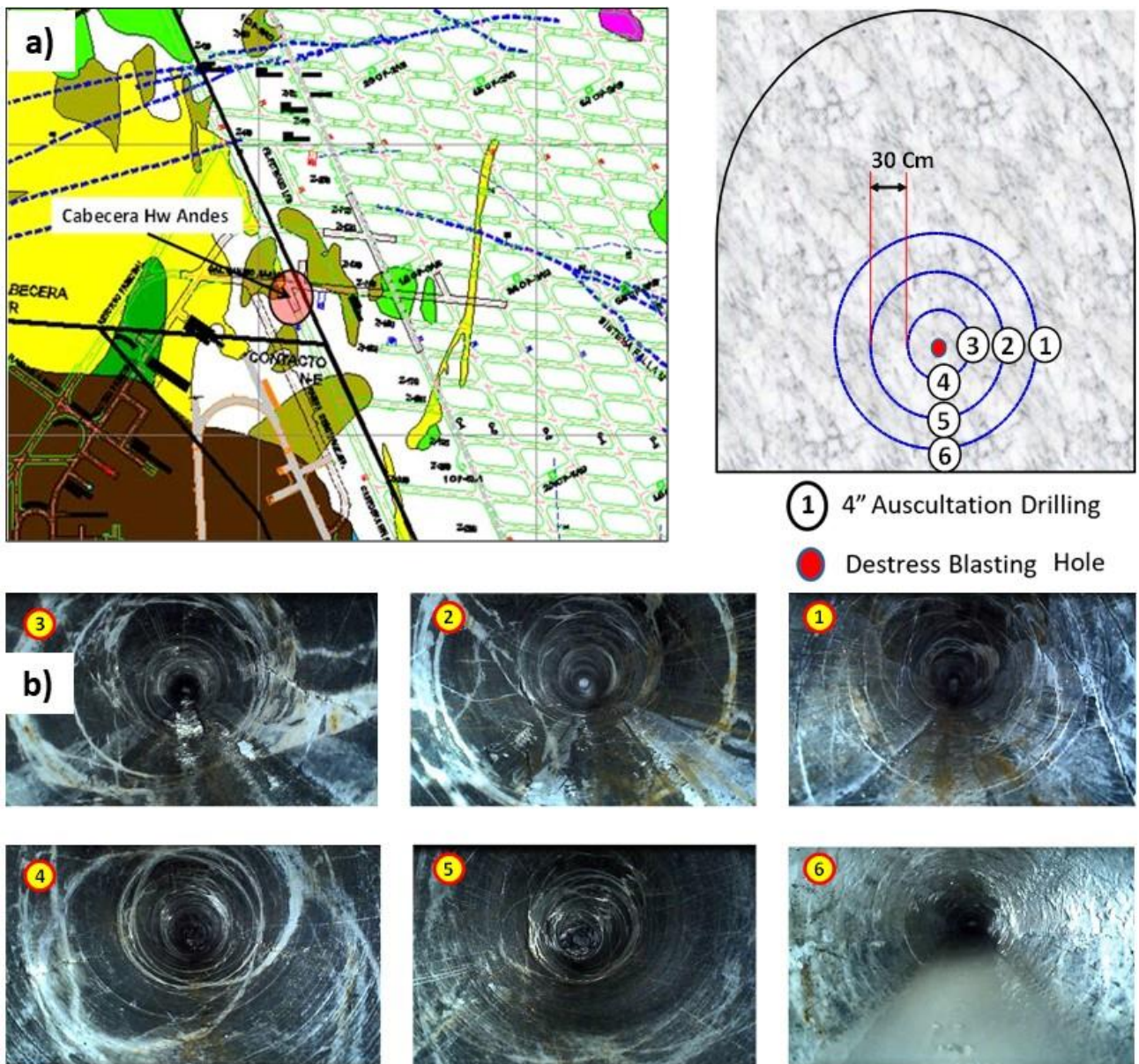


Figura 10: Caracterización de fracturas alrededor de pozos de destress blasting.

Los diseños de Destress Blasting utilizados en los túneles de acceso principal se presentan en la **Figura 11** y **Figura 12**. El primero de los diseños considerados fue desarrollado para el Túnel de Acceso de Personal (TAP) del sector P4600. Este diseño consistió en 5 tiros de 5 metros de largo, cargando los 2 últimos metros con emulsión con un factor de carga de 0.07 (kg/t), y fue aplicado en el avance número 7. La respuesta sísmica post-tronadura a este avance, incluyó un evento sísmico de magnitud Mw 1.0 y un alto nivel de ruido percibido en terreno. Debido a esto, para el avance número 8, se aumenta el número de tiros de Destressing con emulsión a 7 (**Figura 12**), con un factor de carga de 0.20 (kg/t). Lo anterior, provocó que la roca resultara muy fracturada en la frente, por lo cual no fue posible realizar el carguío de los tiros de Destressing para la tronadura número 9, realizando el avance de forma convencional.

Desde el avance número 10 hasta el 20, se retomó la aplicación de la técnica de destressing pero con algunas modificaciones al diseño. El tipo de explosivo fue cambiado a ANFO, la franja entre el carguío de los tiros del avance y del Destressing fue aumentada a 0.5 metros y un factor de carga de 0.13 (kg/t).

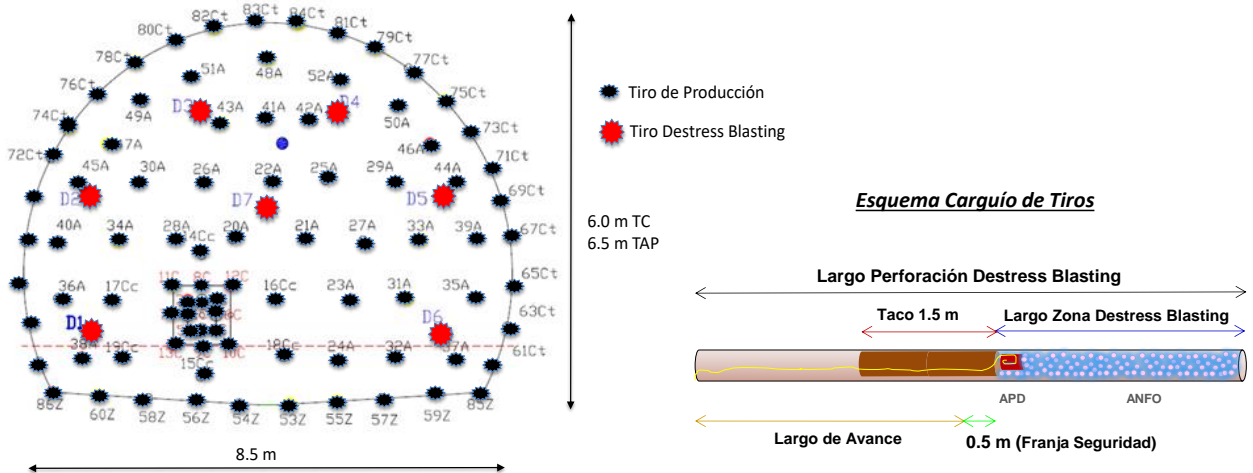


Figura 11: Diseño de perforación y tronadura con tiros de Destress Blasting utilizado en Túnel TAP y TC del sector P4600.

A la fecha se ha mantenido el número de tiros en los diseños de DB aplicados en los túneles principales, siendo 7 perforaciones que se distribuyen en la frente de avance, considerando un largo de perforación del DB el doble del avance convencional (**Figura 12**).

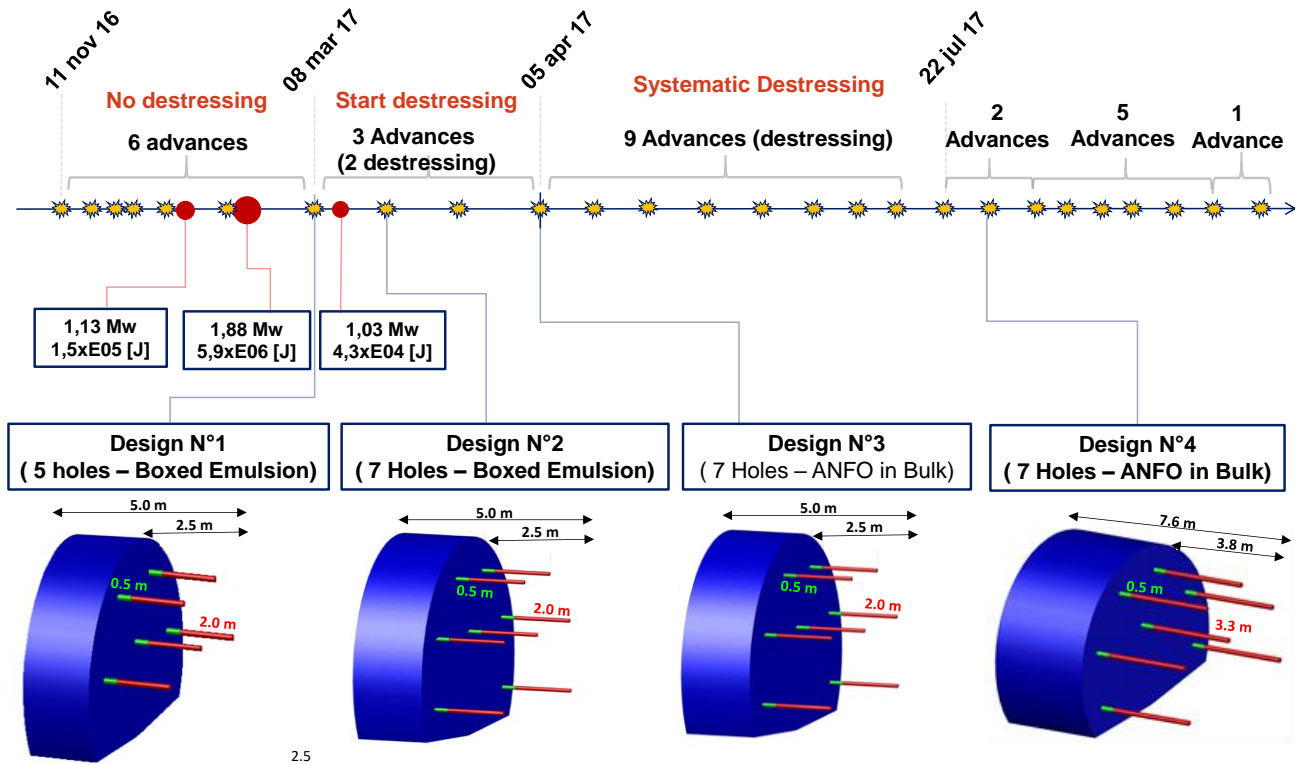


Figura 12: Distintos diseños de Destress Blasting utilizados en los Túneles de Acceso Principal (Túnel Correa y de Acceso de Personal).

Como una manera de ver el efecto que genera esta técnica de pre-acondicionamiento en la condición de esfuerzos de la zona en que se desarrolla el túnel, se realizó una perforación con equipo jumbo en la frente antes de iniciar los avances con Destress Blasting, permitiendo visualizar en la perforación si existe daño y de qué tipo. Posteriormente, una vez aplicada la técnica de Destress Blasting en los avances del túnel se realizó más perforaciones y se auscultaron con la finalidad de constatar si en ellas existía daño por anisotropía de esfuerzo.

En el primer sondaje sin la aplicación de esta técnica se puede apreciar que el tiro presentó daño por esfuerzos (break out) inmediatamente en los primeros metros cercanos al límite de la frente, para luego desaparecer una vez alejado de la influencia de la excavación (**Figura 13**). Posteriormente, en el avance número 7, que fue el primero realizado con un diseño que consideró 5 tiros de Destressing, se puede ver que el daño por esfuerzos desaparece a lo largo de toda la auscultación. En el resto de las auscultaciones que se realizaron, la mayoría de los tiros no muestran daño por esfuerzos, a excepción de dos casos puntuales en los avances número 8 y 9 (**Figura 13 B a la H**).

Por otro lado, se puede señalar que la mayoría de los casos se pudo constatar daño producto de la tronadura, esta zona es inmediatamente en el borde la excavación (franja de color amarillo) en la **Figura 13**.

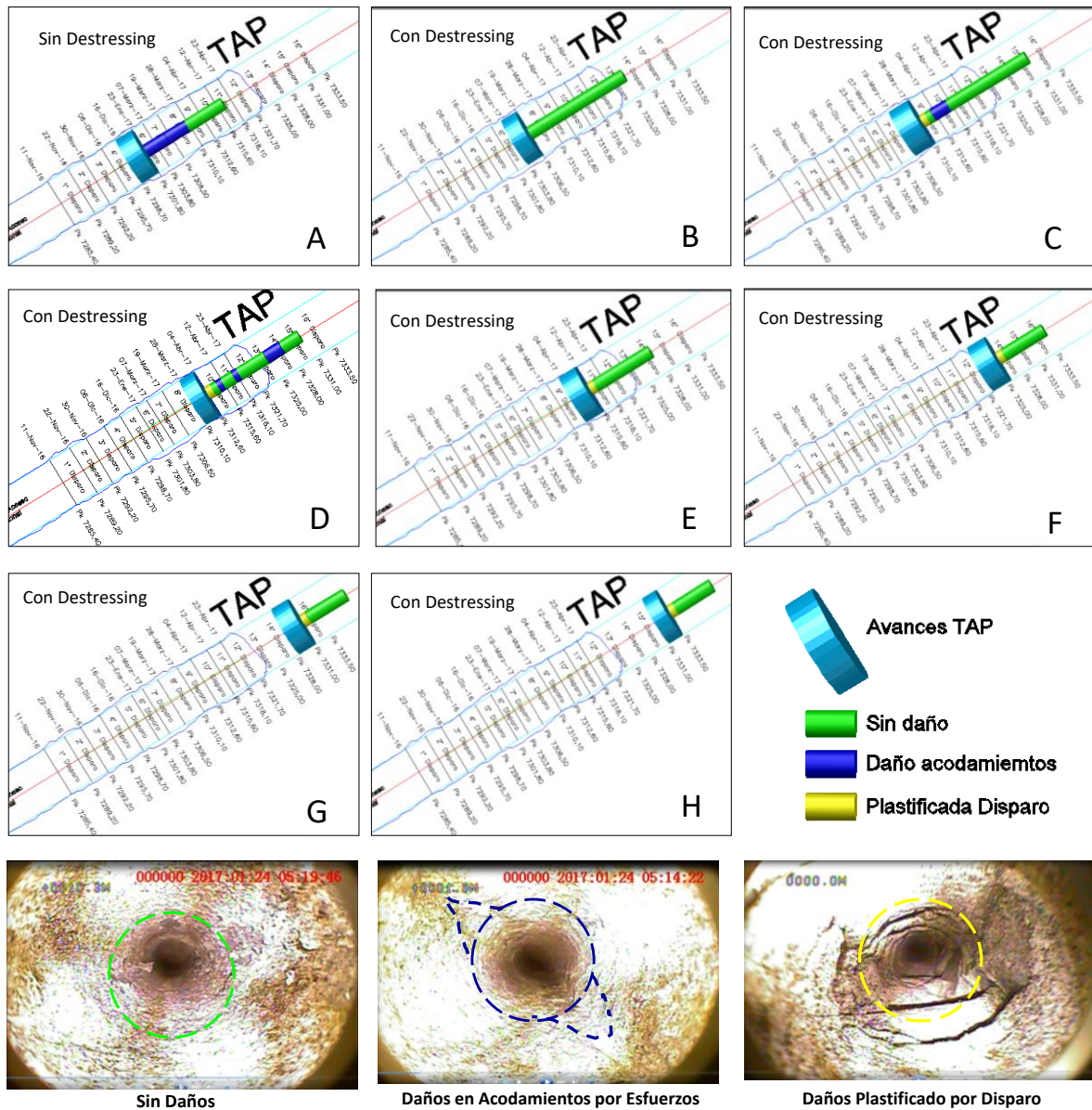


Figura 13: Auscultación Bore Hole Cámara en sondaje a la frente en tronadura con y sin Destressing, registro de daño por esfuerzo y por disparo.

## 2.6 RESPUESTA SISMICA A LA MINERIA

Los túneles que se analizan en este estudio corresponden al TAP y TC que se ubican en el sector de la ventana constructiva P4600 (zona 2), el TAP Fw se construye en dirección hacia la mina (hacia el Este) y el TC Hw en sentido contrario (hacia el Oeste). En una primera etapa se desarrolla el TAP registrándose 2357 eventos sísmicos entre Noviembre 2016 y Diciembre 2017, con magnitudes entre  $M_w$ : -2.4 y  $M_w$ : 1.7. Este último evento con la mayor energía liberada en este catálogo, con un valor de  $3.16 \times 10^6$  [J], generando un estallido de rocas el día 24 de Enero de 2017. Posteriormente, por definiciones estratégicas se detiene el TAP y se inicia la construcción del TC Hw, presentando sismicidad de magnitudes entre  $M_w$ : -3.0 y  $M_w$ : 1.1, este último con una energía de  $1.6 \times 10^5$  [J]. Ver **Figura 14a**.



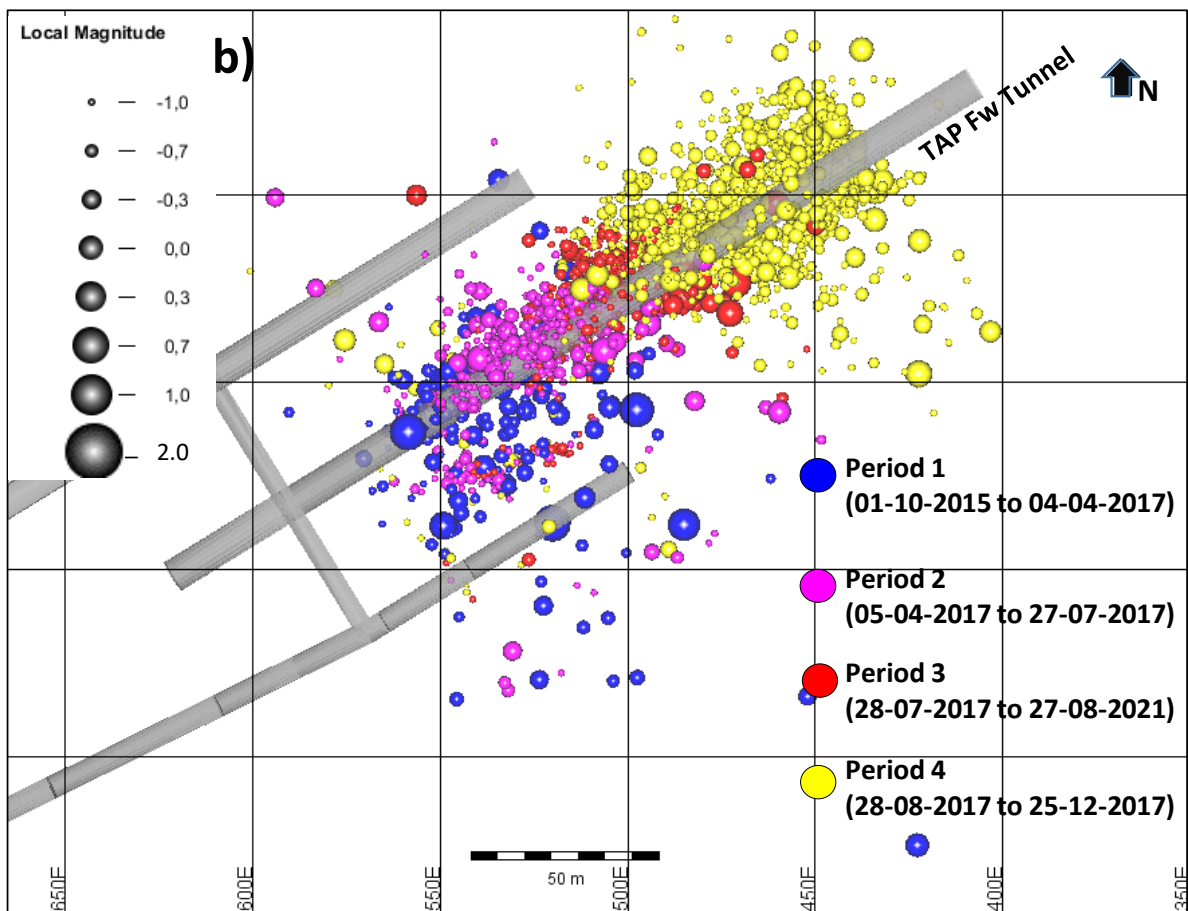
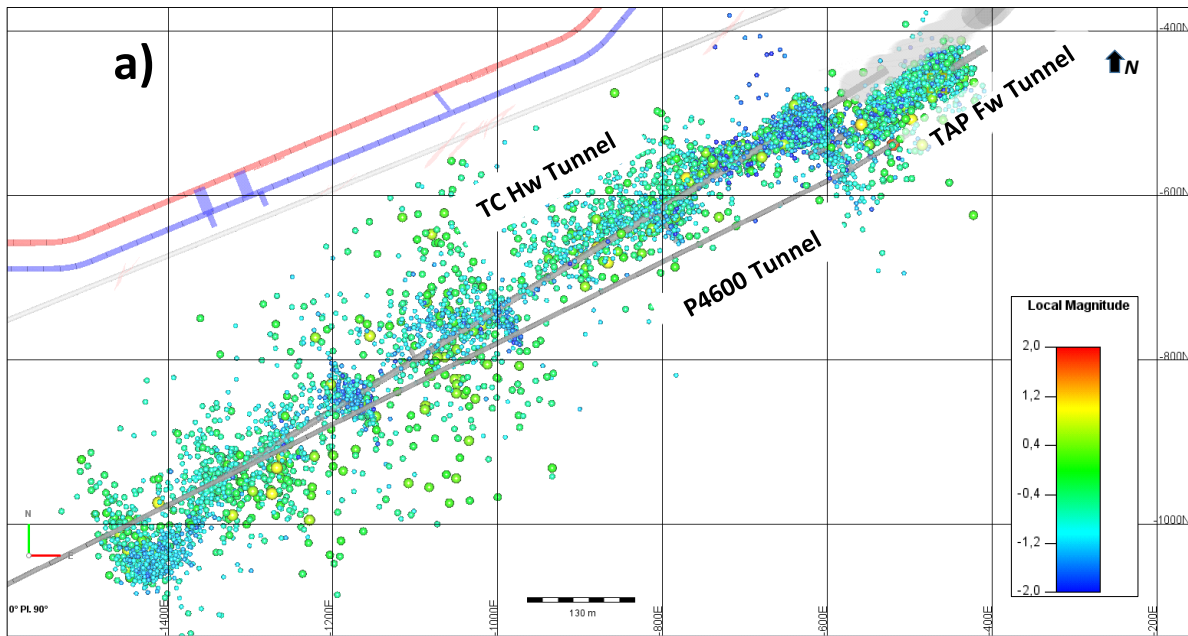


Figura 14: Sismicidad inducida registrada durante la construcción de los túneles TAP Fw y TC Hw ubicados en el sector P4600. En TAP Fw, el período 1 y el período 3 no aplican DB, mientras que el período 2 y el período 4 aplican DB.

En el periodo analizado en túnel TAP Fw P4600 se han registrado más de 2300 eventos sísmicos, donde 24 de éstos corresponden a eventos con una magnitud momento  $M_w \geq 0.3$  en 17 avances. Cabe mencionar que durante la construcción del TAP Fw inicialmente no se aplica la técnica de Destress Blasting, luego en un segundo periodo y posterior al estallido de rocas de enero 2017 se implementa la técnica de DB y así asegurar la constructibilidad de esta labor. En una tercera etapa se realiza una prueba sacando esta técnica avanzando con el túnel en forma convencional, luego de finalizada ésta se retoma el TAP Fw aplicando nuevamente esta metodología. En la **Figura 14b** se muestra la ubicación espacial y temporal de los eventos sísmicos entorno al túnel, destacándose con mayor tamaño los eventos de mayor magnitud.

### 2.6.1 MECANISMOS FUENTE

Para profundizar en el análisis de la sismicidad y poder utilizar parámetros sísmicos más específicos, se requiere utilizar las soluciones de los mecanismos focales ya calculados por el área de geofísica del Proyecto Andes Norte NNM.

Es importante destacar que para un evento sísmico existen dos grupos de parámetros que describen de forma cuantitativa las características del evento. Por una parte tenemos los parámetros de la fuente, que corresponden principalmente a la ubicación Hipocentral del evento (coordenada x, t, z y tiempo de origen del evento), energía liberada y magnitud del evento sísmico, y algunos parámetros como frecuencia esquina, largo de ruptura y deslizamiento durante el fallamiento. Por otra parte, el Tensor de Momento corresponde a una aproximación física del proceso de fallamiento, que para el caso da una aproximación a un fallamiento a lo largo de un plano de falla, se pueden obtener el Strike, Dip y Rake, este último corresponde al ángulo de dirección de fallamiento (Rake), medido con respecto al strike del plano de falla.

Para este estudio se utilizarán las soluciones de los eventos sísmicos cuya magnitud ( $M_w$ ) sea mayor a 0.0, el caso del TAP Fw y TC Hw presentan un catálogo de 35 y 72 eventos respectivamente. Ver **Figura 15**. De esta manera se logra asegurar de mejor manera la calidad de los datos, ya que sobre esta magnitud habrá una mayor cantidad de estaciones sísmicas para el procesamiento de los eventos sísmicos.

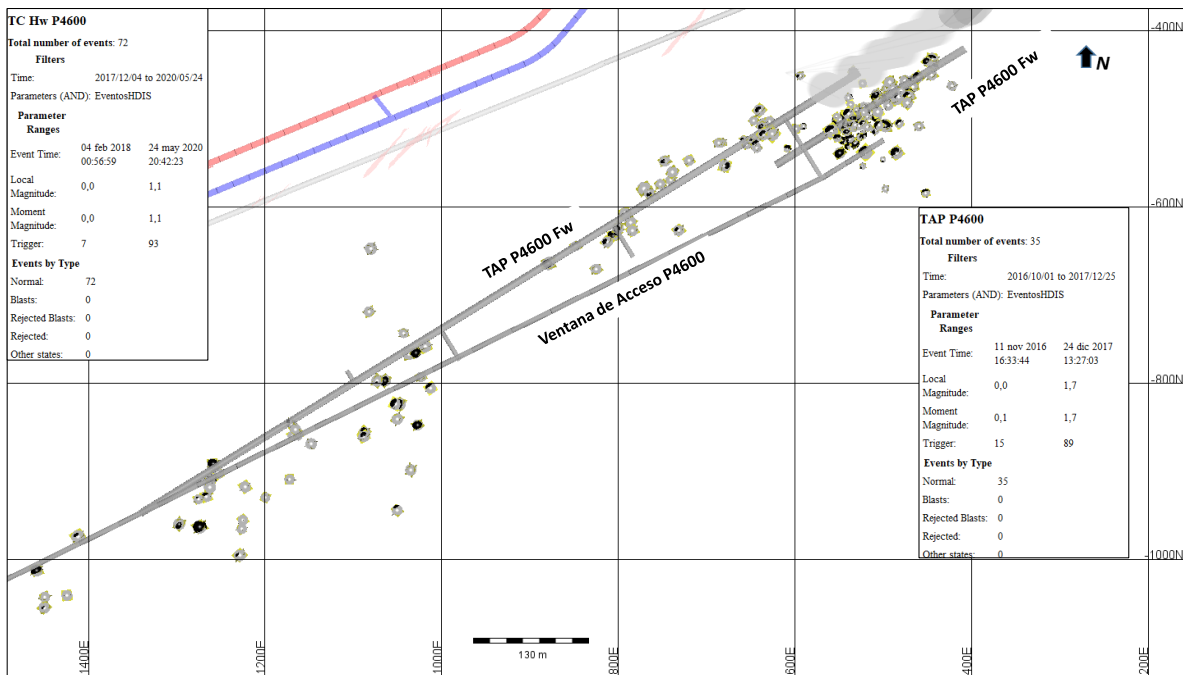


Figura 15: Mecanismos Focales Calculados Según Sismicidad inducida en TAP Fw y TC Hw sector P4600, 72 eventos sísmicos en TC Hw y 35 eventos en TAP Fw.

### 2.6.1.1 TAP Fw 4600

Los diagramas ternarios de los mecanismos fuente de los eventos alrededor del Túnel de Acceso Personal TAP Fw sin y con Destres Blasting se muestran en la **Figura 16 a y b**, respectivamente. El modo de falla que predomina en ambos casos es de tipo inverso, para que pueda ocurrir éste es necesario que el campo de esfuerzo presente un esfuerzo principal menor sub-vertical y un esfuerzo principal mayor e intermedio sub-horizontal, lo que es consistente con los valores medidos en este sector. Sin embargo, se evidencia una mayor dispersión en las zonas donde no se aplica la técnica de DB, presentando algunos casos un mecanismo de falla transcurrente y normal, pero con un porcentaje muy bajo respecto al total de la población de los datos (**Figura 16a**).

Las discontinuidades reconocidas a lo largo del TAP Fw que tienden a fallar dado el campo de esfuerzo reconocido el sector, son las sub-horizontales y oblicuas sub-paralela al túnel. Esto se ha podido constatar con algunos eventos sísmicos que han generado daño en el TAP y TC del sector P4600, donde el daño queda delimitado principalmente por planos oblicuos en la mayoría de los casos. Es probable que al aplicar esta metodología de pre-acondicionamiento (Destress Blasting) no tenga un impacto significativo en el tipo de mecanismo de rotura de las estructuras presentes, según el campo de esfuerzo medido.

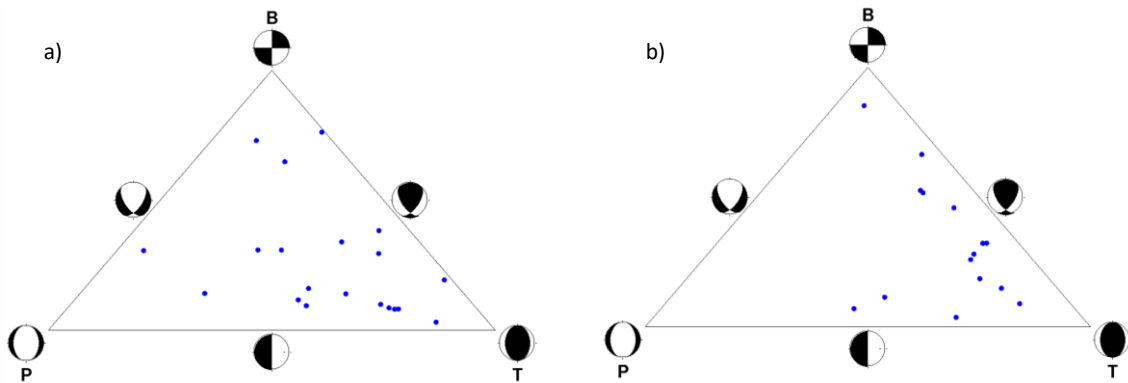


Figura 16: Diagrama Ternario de Mecanismos Fuentes de Eventos con Magnitud ( $M_w$ ) Mayor a Cero, TAP Fw P4600 Zona. (a) Sin Destress Blasting y (b) Con Aplicación de Destress Blasting.

Otra forma de continuar investigando el mecanismo de los eventos sísmicos es a través del diagrama de Hudson (1989), el cual es una herramienta útil para visualizar la descomposición del tensor de momento, ver las proporciones relativas de las fuentes elementales isotrópicas, DC (Double Couple) y CLVD (Compensated Linear Vector Dipolo), este último parámetro corresponde a una aproximación de una compresión uniaxial similar a la compresión que podría experimentar un pilar de roca. El eje vertical es el componente isotrópico, desde -100% (implosión) hasta 100% (explosión). El eje horizontal es la descomposición desviatoria, de +100% a -100% CLVD, con 100% DC en el centro (0% isotrópico, 0% CLVD). El borde exterior es la línea 0% DC. En la **Figura 17 a y b** se representa el diagrama de Hudson para el TAP Fw 4600 para la zona sin DB y con DB.

En ambos casos, ya sea aplicando o no la técnica de Destress Blasting se puede ver que la mayor población de los datos presentan una mayor componente implosiva, con un mecanismo de ruptura compresivo tipo crush, el cual estaría ocurriendo cercano al túnel. Por otro lado, el tramo donde el túnel se desarrolla en forma convencional (sin DB) presenta mayor dispersión en el diagrama, incluso con algunos eventos con una componente explosiva y con valores de doble coupla mayor en comparación al tramo donde se aplica DB. Por lo tanto, sin DB se observan mecanismos con mayor componente DC y no tan cerca del túnel, con DB se ve que los eventos son del tipo crush con componente ISO y CLVD dominante que implica fuente tipo crush. Hay una diferencia al usar DB y sin su uso.

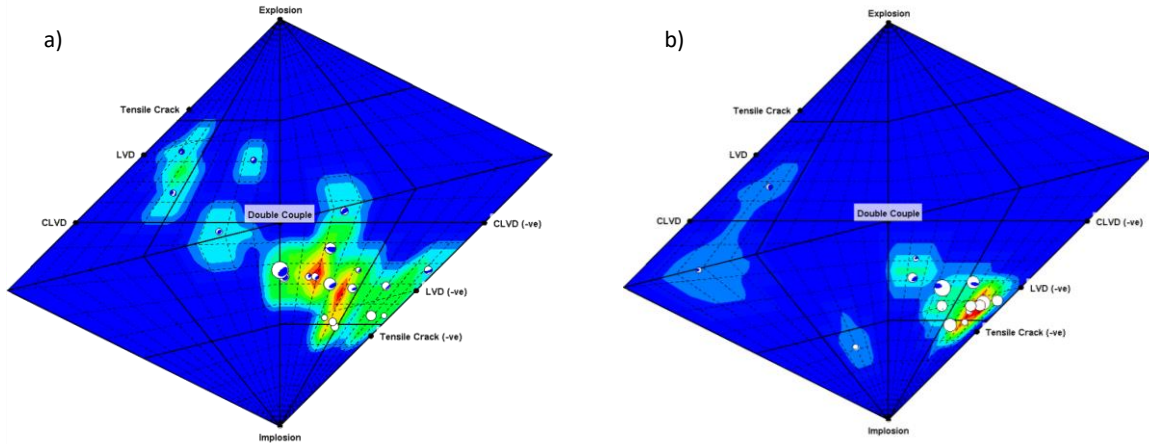


Figura 17: Diagrama Hudson Mecanismos Fuentes de Eventos Sísmicos con Magnitud (Mw) Mayor a Cero, TAP Fw P4600. (a) Zona Sin Destress Blasting y (b) Con Aplicación de Destress Blasting.

De los eventos sísmicos con mecanismos focales calculados tanto en el tramo con aplicación de la técnica de Destress Blasting como sin la aplicación de ella en el Túnel de Acceso Personal Fw 4600, se puede ver que no existe mayor variación en la inversión de esfuerzos en ambos casos. Además, al comparar estos resultados con las mediciones de esfuerzo realizadas con la técnica de Acoustic Emission (AE) en la zona donde se emplaza el TAP Fw, existe buena correlación de las orientaciones de los esfuerzos entre estas dos técnicas. El esfuerzo principal mayor ( $\sigma_1$ ) con una orientación norte-sur sub-horizontal, el esfuerzo intermedio ( $\sigma_2$ ) en dirección Este-Oeste sub-horizontal y el esfuerzo principal menor ( $\sigma_3$ ) sub-vertical. Ver **Figura 18 a, b y c**.

Al comparar la Razón del parámetro R entre los dos casos con y sin Destress Blasting, se refleja una pequeña diferencia en el valor estimado de R, el primer caso Figura 24a presenta mayor variación entre las magnitudes de  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  en comparación cuando se aplica la técnica de DB. En relación a las mediciones de esfuerzo estimadas para la zona existe mayor similitud de parámetro R con el sector donde se aplica Destressing. Ver R en **Figura 18 a, b y c**.

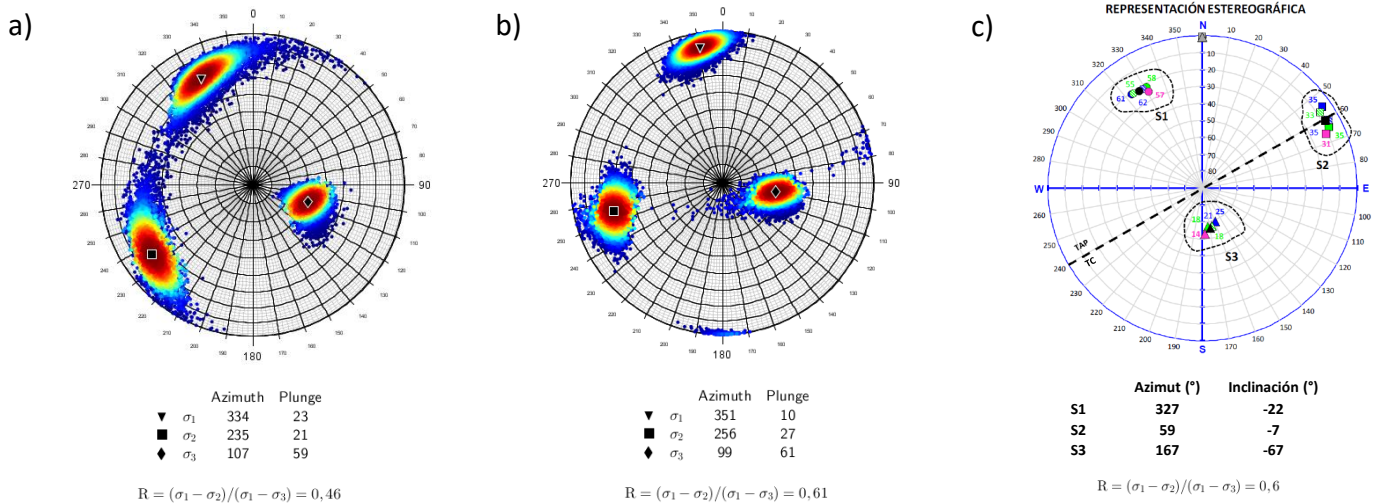


Figura 18: Cálculo Stress Inversion TAP Fw 4600. (a) Zona Sin Destress Blasting, (b) Con Destress Blasting y (c) Orientación Resultados Mediciones de Esfuerzo Sector P4600.

### 2.6.1.2 TC Hw 4600

El túnel TC Hw 4600 el cual va en dirección contraria al TAP P4600 Fw (Az: 238) se construye con la técnica de Destress Blasting sin interrupciones en su aplicación, en este caso los diagramas ternarios de los mecanismos fuente de los eventos alrededor del Túnel Correa Hw se muestran en la Figura 25a. El modo de falla que predomina en su mayoría es de tipo inverso, lo que es concordante con las orientaciones de los esfuerzos principales ( $\sigma_1$ ;  $\sigma_2$ ;  $\sigma_3$ ) donde el fuerza principal menor sub-vertical y un esfuerzo principal mayor e intermedio sub-horizontal (**Figura 19a**).

Al igual que en el caso del túnel TAP Fw 4600, las discontinuidades reconocidas que tienden a fallar dado el campo de esfuerzo estimado en la zona, son las sub-horizontales y oblicuas sub-paralela al túnel.

A través del diagrama de Hudson se puede ver que la mayor población de los datos presenta una mayor componente implosiva con una componente ISO sobre el 30% y un mecanismo de ruptura compresivo tipo crush, el cual estaría ocurriendo cercano al túnel. También, existen algunos pocos eventos sísmicos con una componente Doble Coupla (DC) importante, lo que implica que estas rupturas estarían asociadas a un plano de falla (**Figura 19b**).

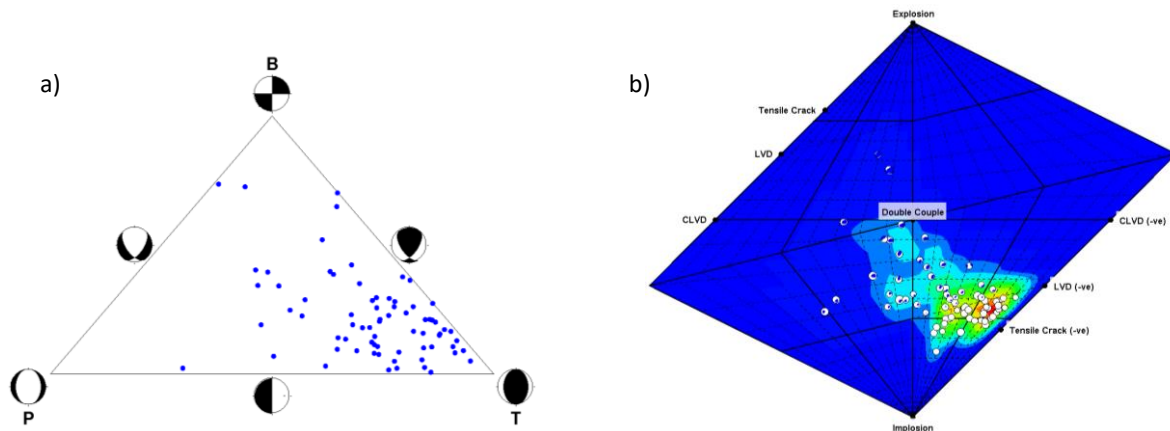


Figura 19: Mecanismos Fuentes de Eventos con Magnitud (Mw) Mayor a Cero, TC Hw P4600 con Aplicación de Destress Blasting. (a) Diagrama Ternario y (b) Diagrama de Hudson.

De los eventos sísmicos con mecanismos focales calculados en el Túnel Correa Hw 4600, se puede ver que existe una muy buena correlación con el campo de esfuerzo del sector estimado con la técnica de Acoustic Emission (AE), al igual que para el TAP Fw 4600. El esfuerzo principal mayor ( $\sigma_1$ ) con una orientación Az: 325° y manteo sub-horizontal (I: 14°), el esfuerzo intermedio ( $\sigma_2$ ) con una dirección Az: 233° e inclinación sub-horizontal (I: 14°), y el esfuerzo principal menor ( $\sigma_3$ ) con una inclinación sub-vertical (75°) y un Az: 112°. **Figura 20 a y b.**

Al comparar la Razón R entre el stress inversión y el campo de esfuerzo estimado, ambos presentan el mismo valor de la razón R (R: 0.6), lo que ratifica también la buena correlación que existe entre este parámetro y las mediciones de esfuerzo. Ver **Figura 20 a y b.**

Otro aspecto interesante que cabe señalar es la orientación de los planos de falla de los eventos con mecanismo focal calculado para este túnel, que se activan y/o fallan de acuerdo al campo de esfuerzo presente en esta zona. Al representar las orientaciones de las dos soluciones que representan los planos del momento tensor determinado en una red estereográfica, se definen dos set, set 1 con un DipDirection: 159° y un Dip: 38°, y set 2 con un DipDirection: 320° y un Dip: 61°. Ver **Figura 20 c.**

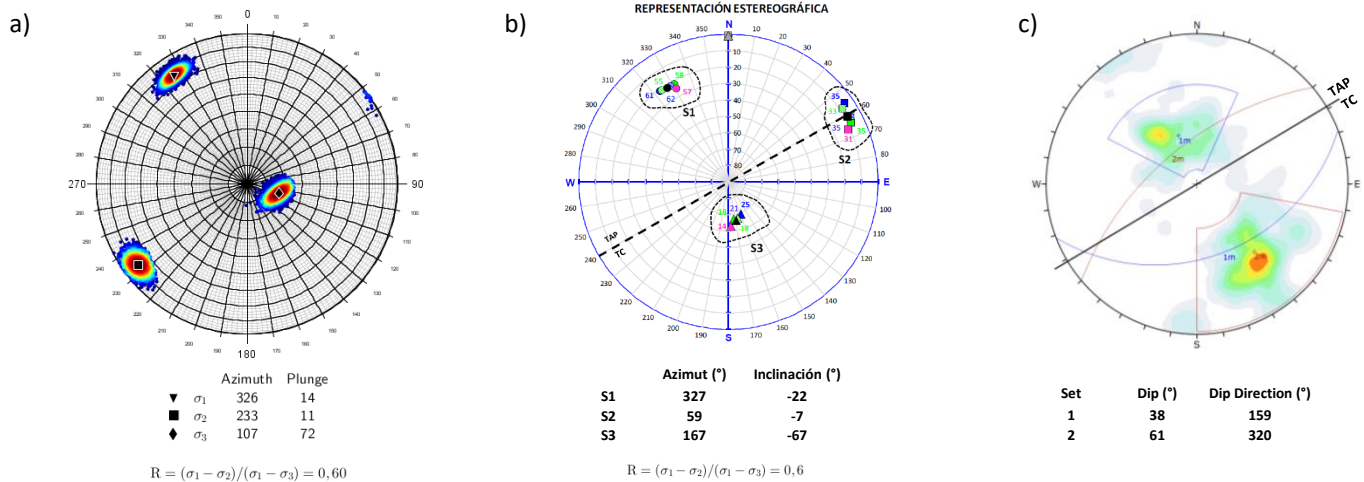


Figura 20: Análisis Soluciones Focales TC Hw P4600. (a) Cálculo Stress Inversion, (b) Orientación Resultados Mediciones de Esfuerzo y (c) Set Planos de las soluciones de los momentos tensores de los eventos sísmicos.

## 2.6.2 DECAIMIENTO DE LA SISMICIDAD POST-TRONADURA

El tiempo de decaimiento de la sismicidad después de la tronadura es un parámetro relevante en la administración del riesgo sísmico en la construcción de túneles. Este aspecto puede tener un impacto significativo en el ciclo de desarrollo, dado que define el tiempo de reingreso para continuar con las actividades posteriores a la tronadura (Vallejos y McKinnon, 2011; Vallejos y Estay, 2018). Con la aplicación de la técnica DB se espera que aumente la velocidad de decaimiento de la sismicidad, reduciendo los tiempos de reingreso y mejorando el ciclo de desarrollo. En nuestro caso se utiliza como criterio de aceptación el 90% de la energía sísmica liberada, valor definido por la administración del riesgo sísmico.

### 2.6.2.1 TAP Fw P4600

La **Figura 21** presenta la superposición de la sismicidad registrada después de la tronadura de desarrollo en el TAP Fw 4600. Para los periodos sin Destress Blasting (Figura 21a) para una ventana de 30 horas, el 90% de los eventos ocurrieron 20 horas después de tronadura. En comparación con los periodos con la implementación de Destress Blasting (Figura 21b), se puede observar que el 90% de los eventos ocurrieron 6 horas después de la tronadura. Estos resultados indican que el diseño Destress Basting implementado en el TAP Fw 4600 generó un aumento significativo en la velocidad de decaimiento de la sismicidad que ocurre después de las tronaduras. Esto contribuyó a reducir los tiempos de reingreso y minimizar la exposición del personal y los equipos.

La **Figura 22** presenta el tiempo de reingreso en función del número de tronadura de desarrollo para el túnel TAP. En esta figura se identifican dos líneas, la línea segmentada describe el tiempo de reingreso implementado por la administración. La línea continua describe el tiempo de reingreso calculado a partir de la sismicidad registrada utilizando el 90% de la energía sísmica liberada en una ventana de tiempo de 48 horas después de la tronadura. Los periodos sin y con Destress Blasting se indican en la Figura 21, mostrando que para el período 1 sin Destress Blasting (tronaduras 1 a 7), el tiempo de reingreso implementado por la gerencia aumentó de 12 a 48 horas. En este período, el tiempo de reingreso calculado a partir de la sismicidad registrada llegó hasta las 36 horas. Para el período 2 (tronaduras 8 a 25) con Destress Blasting, el tiempo de reingreso calculado fue inferior a 12 horas. En el período 3 (tronaduras 26 a 33) sin Destress Blasting, el tiempo de reingreso calculado fue de 24 horas. Para el período 4 (tronaduras 34 a 54) con Destress Blasting, el tiempo de reingreso calculado fue inferior a 10 horas. Por lo tanto, se puede ver que Destress Blasting aumentó la velocidad de descomposición de la sismicidad que ocurre después de las tronaduras.

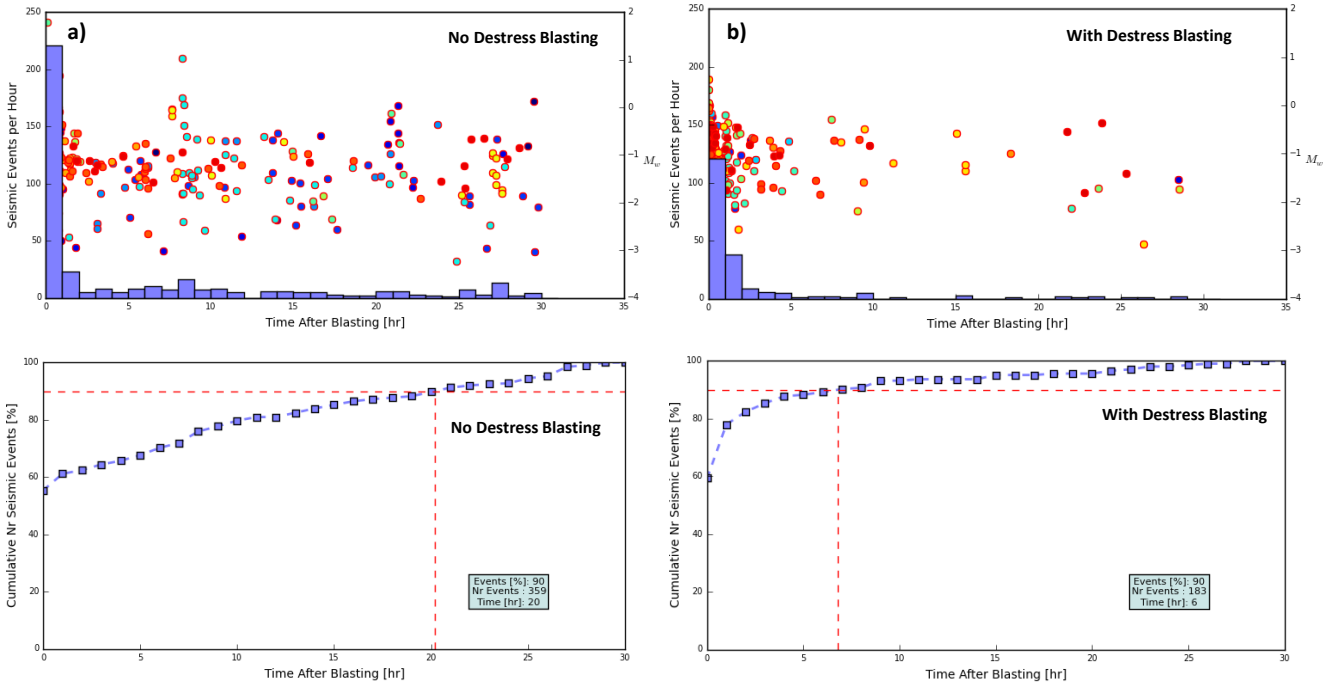


Figura 21: Decaimiento Sísmico Túnel de Acceso Personal (TAP Fw P4600). (a) Periodo 1 sin DB, (b) Periodo 2 con DB, (c) Periodo 3 sin DB y (d) Periodo 4 con DB.

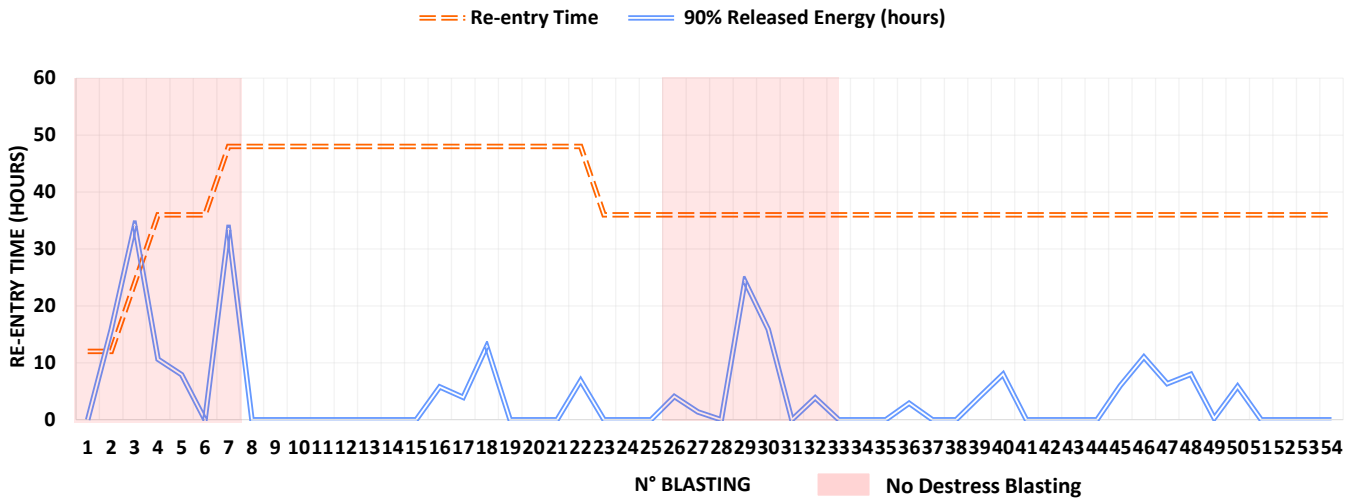


Figura 22: Tiempo de reingreso en función del número de tronaduras para el túnel TAP. La línea segmentada describe el tiempo de reingreso implementado por la gerencia. La línea continua describe el tiempo de reingreso calculado a partir de la sismicidad registrada después de la tronadura. Se identifican los períodos sin y con Destress Blasting.

### 2.6.2.2 TC Hw P4600

La **Figura 23** presenta la sismicidad registrada luego de las tronaduras en el TC Hw 4600, el cual se encuentra completamente desarrollado con la técnica Destress Blasting. La evolución del decaimiento de la sismicidad se puede ver a medida que se construye el túnel. Para los primeros periodos (**Figura 23a**) se puede observar que, para una ventana de 36 horas después de la tronadura. Posteriormente el tiempo de reingreso se reduce a

24 horas desde el avance No. 7 hasta el No. 29 (**Figura 23b**). Luego se modifica el tiempo de reingreso a 18 horas desde el desarrollo N° 30 al N° 46 (**Figura 23c**), para la ventana de 12 horas. Posteriormente, se vuelve a reducir el tiempo de reingreso a 12 horas entre las tronaduras N° 47 y N° 107 (**Figura 23d**). Esta etapa de construcción finaliza debido a la sustitución de la empresa constructora en los túneles principales. Por ello, hubo que planificar una segunda etapa.

Se retoma el Túnel Correa (TC Hw P4600) con la aplicación de la metodología Destress Blasting, sin modificar su diseño. Se ejecutan cuatro avances con un tiempo de reingreso de 12 horas, y luego se reduce a 6 horas en el avance N° 5, hasta el N° 64 (**Figura 23e**). Posteriormente se realiza la última modificación, reduciendo el tiempo de reingreso a 3 horas entre el avance N° 64 y N° 148 (**Figura 23f**), cerrando la ventana de análisis para este túnel en este ciclo.

En general, se puede señalar que el preconditionamiento a escala de túnel nos da una alternativa de cómo manejar la sismicidad después de que se ha realizado un avance por tronadura en un túnel. La aplicación y efectividad de esta técnica debe ser evaluada en cada avance, a fin de determinar el tiempo de reingreso posterior a la tronadura, pudiendo ser reducido o aumentado según sea el caso.

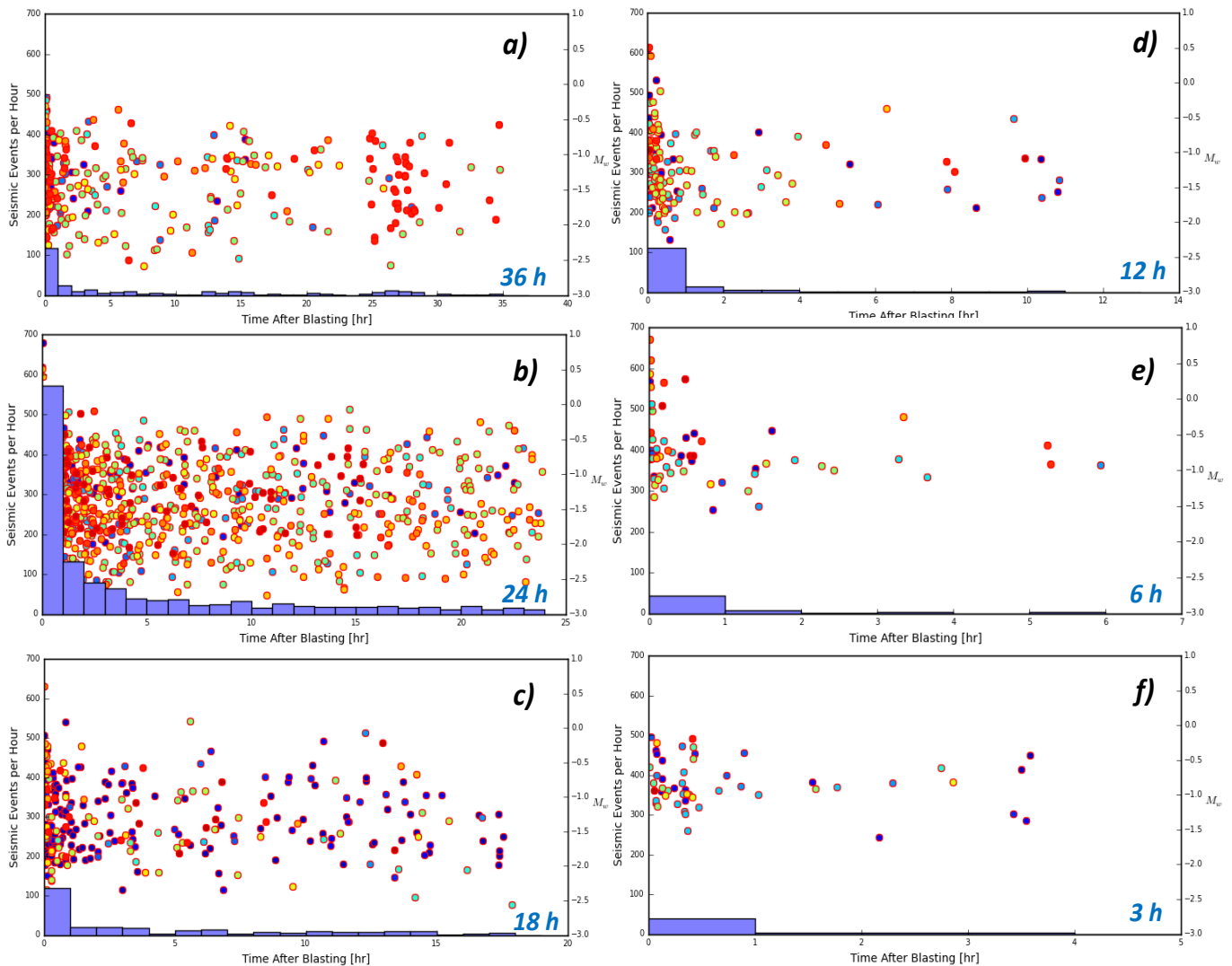


Figura 23: Decaimiento de la Sismicidad para Túnel de Correa (TC Hw 4600), para los tiempos de reingreso definidos durante la construcción de esta obra. (a) 36 horas, (b) 24 horas, (c) 18 horas, (d) 12 horas, (e) 6 horas, y (f) 3 horas



Otro caso de estudio es la construcción del Túnel Correa (TC Hw P4600) que va en sentido contrario al TAP Fw 4600. En este caso, sobre la base de la energía sísmica liberada post tronadura (decaimiento de la sismicidad) a medida que avanza el túnel, se modifica el tiempo de reingreso (línea naranja). El parámetro que se monitorea es el tiempo en que la energía sísmica liberada alcanza el 90 % (línea azul). Este análisis se separa en dos periodos debido a la sustitución de la constructora. El primer periodo considera 107 tronaduras y el segundo 148 avances (Figura 24a y Figura 24b).

El Túnel Correa (TC Hw P4600) inicia su avance con un tiempo de reingreso de 36 horas durante los primeros 6 avances, con un alto cumplimiento en la efectividad del Destress Blasting (Figura 24a, zona A). Posteriormente, el tiempo de reingreso se reduce de 36 a 24 horas. En esta etapa, el decaimiento si bien muestra una variabilidad importante, siempre se mantiene por debajo del tiempo de reingreso determinado (Figura 24a, zona B). En una tercera etapa, se vuelve a cambiar el tiempo de reingreso a 18 horas durante las siguientes 16 tronaduras, mostrando un buen cumplimiento en la efectividad de Destress Blasting, con 4 casos específicos que tienen un decaimiento cercano a las 10 horas (Figura 24a, zona C).

La cuarta modificación que se realiza, de 6 a 12 horas, incluye las tronaduras 47 a 107 del primer contrato de construcción y las primeras 6 tronaduras del segundo contrato. Se puede observar que el tiempo que tarda en liberarse el 90% de la energía sísmica en ningún caso supera el tiempo de reingreso definido (Figura 24a, zona d).

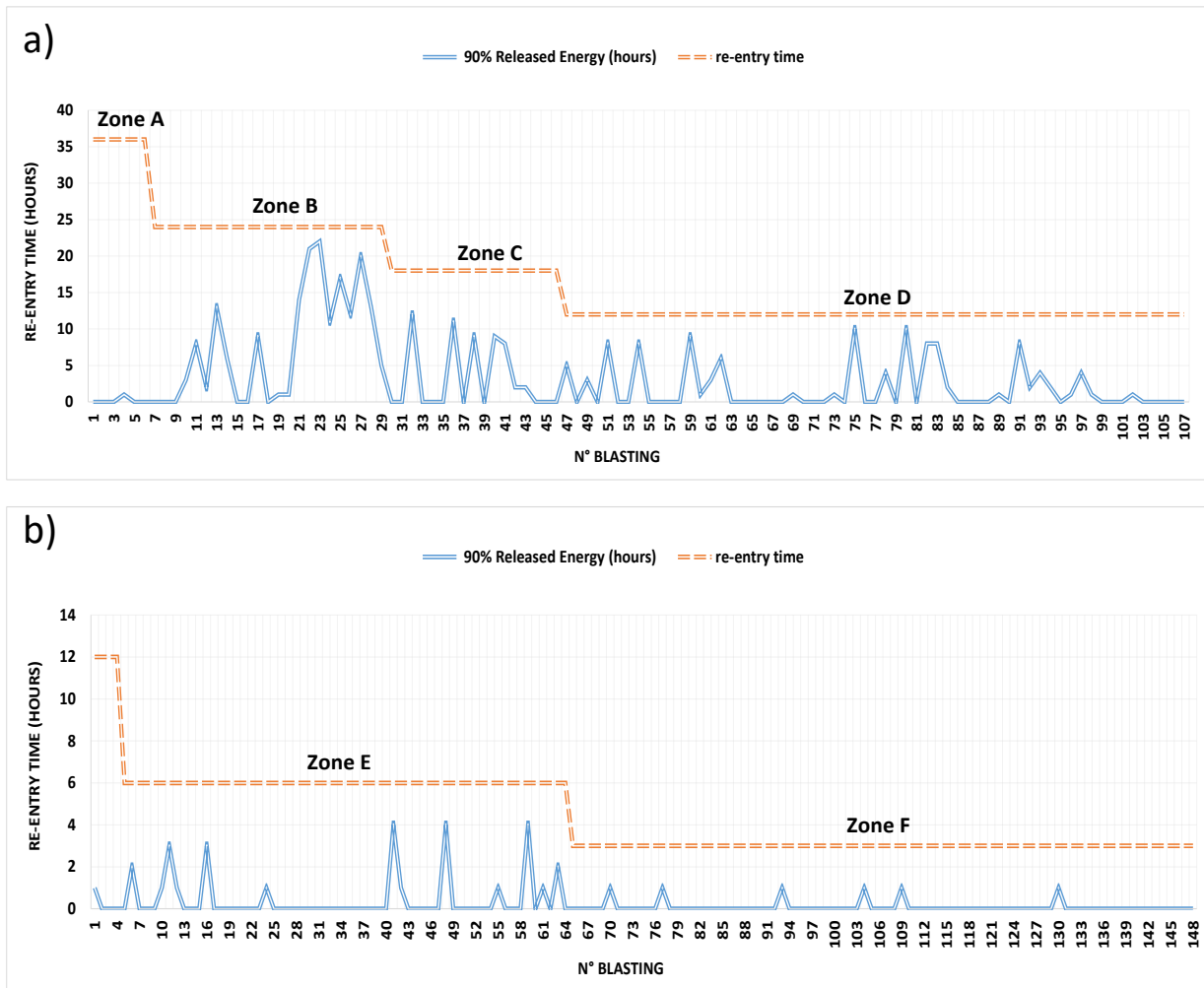


Figura 24: Tiempo de reingreso en función del número de tronaduras para el túnel TC. La línea segmentada describe el tiempo de reingreso implementado por la gerencia. La línea continua describe el tiempo de reingreso calculado a partir de la sismicidad registrada después de la tronadura. (a) Período 1, y (b) Período 2.

La nueva empresa continúa con la construcción del TC Hw P4600. Es el encargado de realizar la quinta reducción del tiempo de reingreso de 12 a 6 horas. En este caso, presentando un buen comportamiento en el tiempo que se libera la energía sísmica post tronadura, no superando en ningún caso las 4 horas (**Figura 24 24b**, zona e). La última y más exigente modificación aplicada a este túnel es la reducción del tiempo de reingreso de 6 a 3 horas. En 7 ocasiones la energía se libera dentro de la primera hora (**Figura 24b**, zona f), registrándose puntualmente, lo que hace que la construcción del túnel sea más competitiva y exitosa.

### 2.6.3 PELIGRO SISMICO

La probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de magnitud mayor a  $M^*$  en un periodo de tiempo futuro  $\Delta t$  en una zona de estudio, puede ser expresada mediante (Benjamín, 1968), ec1:

$$P(M > M^*, \Delta t) = 1 - \left\{ \frac{t_R}{t_R + \Delta t \times P(M > M^*)} \right\}^{n+1} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde  $n$  es el número de eventos con magnitud mayor a  $M_c$  en un periodo de registro  $t_R$ . La probabilidad que ocurra un evento de magnitud mayor a  $M^*$  queda dado por:

$$P(M > M^*) = \begin{cases} 1 & \text{Si } M^* \leq M_c \\ e^{-\beta(M^* - M_c)} & \text{Si } M^* > M_c \end{cases} \quad \text{Ec. 2}$$

Con  $\beta = b \times \ln(10)$ , donde  $b$  es la pendiente de la relación Gutenberg-Richter (1942), dada en su versión acumulativa por:

$$\log N = a - b(M - M_c) \quad \text{Ec. 3}$$

En lo anterior,  $M$  es la magnitud, y  $M_c$  es la magnitud de completitud considerada (Wiemer & Wyss, 2000; Woessner & Wiemer; 2005) a partir de la cual se registran todos los eventos sísmicos de manera consistente en el tiempo y el espacio. Los parámetros  $a$  y  $b$  se determinan a partir del registro sísmico y se calculan con el método de máxima verosimilitud (Aki, 1965).  $N$  es el número total de eventos con magnitud mayor que  $M$ .

La **Figura 25a** presenta la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos en función de la magnitud para un período de tiempo de 15 días para el túnel TAP Fw 4600 para períodos sin y con destressing. Esta figura muestra que el riesgo sísmico es mayor para los períodos sin Destress Blasting (períodos 1 y 3) en comparación con los períodos con Destress Blasting (períodos 2 y 4). Por ejemplo, para una magnitud  $M_w$ : 0,7 la probabilidad de ocurrencia en un periodo de 15 días es Periodo 1: 47%; Período 2: 0%; Periodo 3: 53% y Periodo 4: 21%.

La **Figura 25b** presenta la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico en un período de 15 días para los diferentes tramos según el tiempo de reingreso post tronadura utilizado en este frente, destacando que en este túnel siempre se ha implementado tronaduras con Destress Blasting. En los periodos 1, 4 y 6 con tiempos de reingreso de 36, 12 y 3 horas respectivamente, presentan un evento sísmico máximo registrador menor a 0,7, obteniendo un cero por ciento de probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de esta magnitud. Por otro lado, para los periodos 2, 3 y 5 con tiempo de reingreso de 24, 18 y 6 horas respectivamente, presentan una probabilidad del 10% de generar un evento sísmico de magnitud 0,7 para la zona con 18 horas y 45% para las zonas de 6 y 24 horas

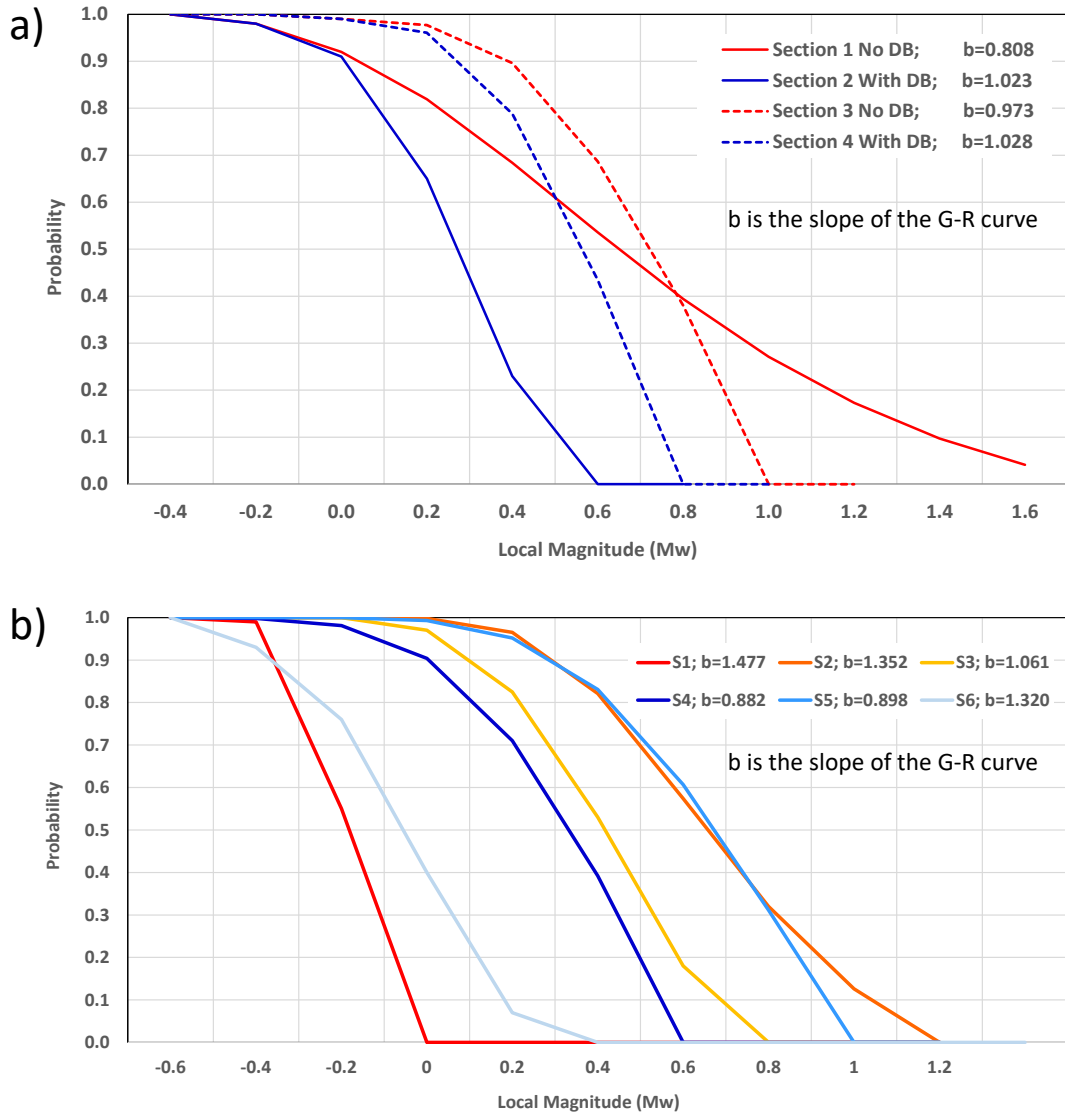


Figura 25: Probabilidad de Ocurrencia de Sismicidad. (a) TAP Fw 4600 (Túnel de acceso personal), y (b) TC Hw 4600 (Túnel de cinta transportadora).

## 2.7 DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los túneles TAP Fw y TC Hw P4600 analizados en este estudio se ubican en un entorno complejo desde el punto de vista geológico geomecánico, donde la condición geológica estructural y el campo de tensiones de su entorno juegan un papel importante en la respuesta a la sismicidad product de las excavaciones.

De las mediciones empíricas realizadas para determinar la distancia desde la cual se propaga una fractura por tronadura confinada, como la técnica Destress Blasting, presentan un rango de 90 cm medidos desde el centro del pozo. Con este resultado, se diseña el espacio de los pozos de DB a una distancia entre ellos no inferior a 180 cm. Es importante señalar que la profundidad y extensión de la fractura dependerá de las propiedades del macizo rocoso, las estructuras y el campo de esfuerzos, donde estos últimos también determinarán la orientación de las fracturas. La longitud de las fracturas se reduce en gran medida bajo la influencia del régimen de tensiones (Brummer y Andrieux, 2002). Además, las fracturas tienden a alinearse con la dirección de tensión principal (Saharam y Mitri, 2011; Andrieux et al., 2004)

En el caso del TAP Fw P4600 para zonas con y sin DB, en el análisis en el diagrama ternario, el tipo de falla predominante en ambos casos es del tipo inverso, con una dispersión ligeramente mayor cuando no se aplica la técnica DB, lo que es consistente con la orientación del campo de tensión medido en el sector. El tipo de mecanismo predominante en ambos casos es de tipo inverso. Sin embargo, existen casos en los que el mecanismo predominante es otro (Drover y Villaescusa, 2019).

Cuando se aplica la técnica de Destress Blasting, los eventos sísmicos se agrupan de una mejor manera en comparación cuando no se aplica Destress Blasting, mostrando en su mayoría eventos de tipo crush en lugar de eventos de tipo slip. Esto se representa muy bien en el diagrama de Hudson.

Las discontinuidades reconocidas a lo largo de los túneles TAP Fw y TC Hw que tienden a fallar, dado el campo de esfuerzos reconocido del sector, son las subparalelas subhorizontales y oblicuas al túnel. Esto se ha confirmado con algunos eventos sísmicos que han generado daños en los TAP y TC del sector P4600, donde el daño está delimitado principalmente por planos oblicuos en la mayoría de los casos. En las orientaciones de las dos soluciones que representan los planos del momento tensor determinados en una red estereográfica, se definen dos conjuntos: el conjunto 1 con dirección de manteo:  $159^\circ$  e inclinación:  $38^\circ$ , y el conjunto 2 con dirección de manteo:  $320^\circ$  y un Dip:  $61^\circ$ .

De los eventos sísmicos con mecanismos focales calculados tanto para el Túnel de Acceso Personal (TAP Fw) como para el Túnel Correa (TC Hw) Pk4600, podemos decir que en ambos casos no existe mayor variación en las inversiones de esfuerzos. Además, al comparar estos resultados con las medidas de tensión realizadas con la técnica de Emisión Acústica (AE) en la zona donde se ubican estos túneles, existe una buena correlación de las orientaciones de tensión entre estas técnicas. La tensión principal mayor ( $\sigma_1$ ) con una orientación subhorizontal norte-sur, la tensión intermedia ( $\sigma_2$ ) en una dirección subhorizontal este-oeste y la tensión principal menor ( $\sigma_3$ ) subvertical. Por lo tanto, el Destress Blasting no genera un cambio en la orientación del campo de esfuerzos con el que se presentan los eventos sísmicos.

Uno de los beneficios que mejor se ha medido al aplicar la metodología Destress Blasting es la respuesta de la sismicidad posterior a la tronadura. Se ha demostrado que los casos con Destress Blasting presentan una mayor velocidad de decaimiento y una oportunidad para la reducción del tiempo de reingreso. Además, el peligro sísmico se reduce también.

## **2.8 AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo agradecer a mi querida familia, a mi amada esposa Pabla, a mis hijas Leonor y Elena que son mis tres pilares fundamentales en mi vida, por su apoyo, paciencia y ayuda incondicional en todo momento desde principio a fin, ellas siempre han sido el soporte emocional y motor para cumplir este gran desafío.

Al profesor guía Javier Vallejos por la paciencia y su valiosa colaboración en brindarme lineamientos y recomendaciones para llevar este trabajo de investigación, cada vez que se presentaba un obstáculo o duda conté con su orientación.

Igualmente, este agradecimiento va dirigido a todos los profesionales de la Dirección de Geotecnia y Direcciones de Construcción del Proyecto Andes Norte de División El Teniente que contribuyeron de una u otra manera a esta investigación.

Los autores agradecen el apoyo del proyecto basal CONY CIT AFB180004 del Centro de Tecnología Minera Avanzada (AMTC).

### 3. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

#### 3.1 CONCLUSIONES GENERALES

Los túneles TAP Fw y TC Hw P4600 analizados en este estudio se encuentran emplazados en un ambiente complejo desde una perspectiva geológico-geomecánico, donde la condición geológica estructural y el campo de tensiones de su entorno juegan un papel importante en la respuesta a la sismicidad inducida por las excavaciones.

A partir de las medidas empíricas realizadas para determinar la distancia que se propaga una nueva fractura por tronadura confinada, como la técnica de distress blasting, presentan un rango de 90 cm medidos desde el centro del pozo. Con este resultado se diseña el espaciamiento de los tiros de DB a una distancia entre ellos no inferior a 180 cm. Es importante señalar que la profundidad y extensión de la fractura dependerá de las propiedades del macizo rocoso, estructuras y campo de esfuerzo, donde este último definirá también la orientación de las fracturas. La longitud de las fracturas se reduce en gran medida bajo la influencia del régimen de tensiones (Brummer y Andrieux, 2002). Además, las fracturas tienden a alinearse con la dirección de la tensión principal (Saharam y Mitri, 2011; Andrieux et al., 2004)

En el caso del TAP Fw P4600 para zonas con y sin DB, en el análisis en el diagrama ternario, el tipo de falla predominante en ambos casos es de tipo inverso, con una dispersión levemente mayor cuando no se aplica la técnica DB, lo que es consistente con la orientación del campo de tensiones medido en el sector. El tipo de mecanismo predominante en ambos casos es el inverso. Sin embargo, hay casos en los que el mecanismo predominante es otro (Drover y Villaescusa, 2019).

Cuando se aplica la técnica de distress blasting, los eventos sísmicos se agrupan de una mejor manera en comparación cuando no se aplica distress blasting, mostrando principalmente eventos de tipo crush en lugar de eventos de tipo slip. Esto está muy bien representado en el diagrama de Hudson.

Las discontinuidades reconocidas a lo largo de los Túneles TAP Fw y TC Hw que tienden a fallar, dado el campo de esfuerzos reconocido del sector, son el sub-horizontal y el sub-paralelo oblicuo al túnel. Esto se ha confirmado con algunos eventos sísmicos que han generado daños en el TAP y TC del sector P4600, donde el daño está delimitado principalmente por planos oblicuos en la mayoría de los casos. En las orientaciones de las dos soluciones que representan los planos del momento tensor determinado y representado en una red estereográfica, se definen dos conjuntos: el set 1 con una dip direction:  $159^\circ$  y un dip:  $38^\circ$ , y el set 2 con una dip direction:  $320^\circ$  y un dip:  $61^\circ$ .

De los eventos sísmicos con mecanismos focales calculados tanto para el Túnel de Acceso Personal TAP Fw como para el Túnel de Correa Pk4600, podemos decir que en ambos casos no existe mayor variación en las inversiones de esfuerzos. Además, al comparar estos resultados con las mediciones de esfuerzos realizadas con la técnica de Emisión Acústica (AE) en la zona donde se encuentra el TC Hw y TAP Fw, existe una buena correlación de las orientaciones de las tensiones entre estas técnicas. El esfuerzo principal mayor ( $\sigma_1$ ) con una orientación subhorizontal norte-sur, el esfuerzo principal intermedio ( $\sigma_2$ ) en una dirección subhorizontal de este a oeste y el esfuerzo principal menor ( $\sigma_3$ ) subvertical. El distress Blasting no genera un cambio en la orientación del campo de esfuerzos con el que ocurren los eventos sísmicos.

Uno de los beneficios que mejor se ha medido aplicando la metodología Destress Blasting es la respuesta de la sismicidad posterior a la tronadura. Se ha demostrado que los casos donde se aplica Destress Blasting presentan una mayor velocidad de decaimiento y una oportunidad para la reducción del tiempo de reingreso. Además, el peligro sísmico se reduce también.

### **3.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO**

La técnica de distress blasting se ha implementado ampliamente en el Túnel Correa de Proyecto Andes Norte, obteniendo beneficios principalmente en el decaimiento de la sismicidad post tronadura, lo que ha permitido ir re-ajustando los tiempos de re-entrada post-tronadura. Sin embargo, se requiere continuar investigando y explorando modificaciones que puedan contribuir a la construcción de túneles en ambientes geotécnicos complejos. Por ejemplo, tipo de explosivo, ubicación, cantidad y largo de las perforaciones, etc.

Por otro lado, se hace necesario indagar con instrumentación geotécnica sobre como la aplicación del distress blasting modifica las propiedades del macizo rocoso y el cambio que esto podría generar en el campo de esfuerzo entorno a una excavación, como así también verificar la extensión de las fracturas inducidas por la tronadura de destressing.

Por último, evaluar la aplicación de esta metodología en otras frentes que presenten sismicidad inducida por la excavación y que requieran pre-acondicionar con distress blasting en busca de algún beneficio para su construcción.

#### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Roux, A., Leeman, E., and Denkhaus, H., 1957. De-Stressing: A Means of Ameliorating Rockburst Conditions. Part 1 - The Concept of De-Stressing and the Results Obtained from its Application. South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 101-119.
- [2] Benjamin J., 1968. "Probabilistic models for seismic force design". In Journal of the Structural Division of the ASCE, Vol 94, pp. 1175-1196, 1968.
- [3] Cullen M., 1989. "Studies of Destress Blasting at Campbell Read Lake Mine". M.Sc. Thesis. McGill University.
- [4] Chitombo G., 1994. "A Methodology for Determining Parameters for Annular Fracturing of Tunnel Contours as a Means of Destressing the Rock Mass", report submitted to Codelco El Teniente Division within Company's sponsorship of JKMRC/AMIRA Project P93E.
- [5] Ortlepp W., and Stacey T., 1994. Rockburst mechanism in tunnels and shafts, Tunnelling and Underground Space Technology; 9(1).
- [6] Zhou D. and Hong K., 1995. The rockburst features of Taipingyi tunnel and the prevention method, Chinese J. Rock Mech. Eng. 14(2), pp. 171-178.
- [7] Kaiser P., McCreath D., and Tannant D., 1996. Canadian Rockburst Support Handbook, Canadian Rockburst Re-search Program, Vol II, Book I. CAMIRO Mining Division, pp. 343.
- [8] Wang Y., Li W., and Lee P., 1998. Method of fuzzy comprehensive evaluation for rockburst prediction, Chinese J. Rock Mech. Eng; 17(5), pp. 493-501
- [9] Brummer R., and Blake W., 1998. "Destress Blasting Practices (A Review of Literature & Current Industrial Practice)". Report to the CAMIRO Mining Division. Richard Brummer Associates and Itasca Consulting Group Inc.
- [10] Martin C., Kaiser P., and Mc Creath D., 1999. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. Canadian Geotechnical Journal, 36(1), pp. 136-151.
- [11] Mitri H., Tang B., Marwan J., and Comeau W., 2001. "Tunnel Face Destressing in Burst-Prone Rock". ed: Canadian Tunnelling Journal, pp. 131-142.
- [12] Tang B., and Mitri H., 2001. "Numerical Modelling of Rock Preconditioning by Destress Blasting". Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, vol. 5, pp. 57-67.
- [13] Brummer R., and Andrieux P., 2002. "A Design Methodology for Destress Blasting," in NARMS-TAC 2002: Mining and Tunnelling Innovation and Opportunity, Vol. 1, pp. 165-172.
- [14] Suorineni F., Kaiser P., and Henning J., 2002. "De-stressing Study of the North Mine 100 Orebody", Technical Report, MIRARCO Mining Innovation.
- [15] Villaescusa E., Seto M., and Baird G., 2002, "Stress measurements from oriented core". International Journal of Rock Mechanic, Vol 39, pp. 603-615.
- [16] Andrieux P., Hadjigeorgiou J., and Brummer R., 2004, "A Rock Engineering Systems Approach to Destress Rockburst", The 2 and International Seminar on Deep and High Stress Mining (Johannesburg, Republic of South Africa), pp. 277-291.
- [17] Saharan M., 2004. "Dynamic Modelling of Rock Fracturing by Destress Blasting". Unpublished PhD thesis, McGill University, Montreal, Canada.
- [18] McMullan J., Bawden W., and Mercer R., 2004. "Excavation of a Shaft Destress Slot at the Newmont Canada Golden Giant Mine".in Gulf Rocks 2004, the 6th North America Rock Mechanics Symposium (NARMS), pp. 04-438.
- [19] Berggren Ma J., and Stille Bo S., 2006. Geological Setting of the rockburst of Qinling Tunnels in central China, ISRM International Symposium, 4th Asian Rock Mechanics Symposium, Rock Mechanics in Underground Construction - C.F. Leug & Y. X. Zhiu Editors.
- [20] Saharan M., and Mitri H., 2007. "Numerical Procedure for Dynamic Simulation os Discrete Fracture Due to Blasting". Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 41, pp. 641-670.

- [21] Andrieux P., and Hadjigeorgiou J., 2008. "The Destressability Index Methodology for the Assessment of the Likelihood of Success of a Large-Scale Confined Destress Blast in an Underground Mine Pillar". *International journal of rock mechanics and mining sciences*, vol. 45, pp. 407-421.
- [22] Shan Z., Yan P., 2010. Management of rock bursts during excavation of the deep tunnels in Jinping II hydropower station, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*; 69(3): 353-363
- [23] Tang C., Wang J., Zhang J., 2010. Preliminary engineering application of microseismic monitoring technique to rockburst prediction in tunneling of Jinping II project. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(3), pp. 193-208.
- [24] Loew S., Barla G., Diederichs M., 2010. Engineering geology of Alpine tunnels: Past, present and future, *Proceedings of the 11th IAEG Congress Geologically Active, Auckland, New Zealand, September*, Taylor and Francis CRC Press, London, pp. 201-253.
- [25] Hen S., Zhang H., Tan X., Chen L., 2011. Key technologies for construction of Jinping traffic tunnel with an extremely deep overburden and a high water pressure, *Journal of Modern Transportation*; 19(2), pp. 94-103.
- [26] Saharan M., and Mitri H., 2011. "Destress Blasting as a Mines Safety Tool: Some Fundamental Challenges for Successful Applications". *Procedia Engineering*, vol. 26, pp. 37-47.
- [27] Konicek P., Konecny P., and Ptacek J., 2011 "Destress Rock Blasting as a Rockburst Control Technique," in 12th ISRM Congress, pp. 1221-1226.
- [28] Panthi K., 2012. Evaluation of rock bursting phenomena in a tunnel in the Himalayas, *Bull Eng Geol Environ*; 71, pp. 761-769.
- [29] Saedi M., Eftekhari A., and Taromi M., 2012. Evaluation of rock burst potential in Sabzkuh water conveyance tunnel, Irán: a case study, 7th Asian Rock Mechanics Symposium, Seoul, Korea, 2012
- [30] Weng Z., and Tian M., 2013. Research on characteristic of rockburst and rules of microseismic monitoring at headrace tunnels in Jinping II hydropower station, *Fourth International Conference on Digital Manufacturing and Automation*.
- [31] Diederichs M., Eberhardt E., and Fisher B., 2013. Consideration of stress and structural influence on high stress response in deep tunnelling – The Olmos Tunnel, Perú. In *World Tunnel Congress*, Geneva, Switzerland, 6 pags.
- [32] Guo C., Zhang Y., Zhang R., Xiong T., Du Y., and Jiang L., 2013. Research on the engineering geology stability of mountain crossing railway construction sites: A case study of the Mt. Gaoligong section of Dali-Ruili railway, *Global view of Engineering Geology and the Environment*, Editors Faquan Wu & Shengwen Qi - Taylor & Francis Group, London.
- [33] Onederra I., Catalan A., and Chitombo G., 2013. "A case Study of Large Scale Rock Mass Preconditioning by Confined Blasting". in *Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment*, pp. 461-471.
- [34] Zhu W., Wei C., Li S., and Wei J., 2013. "Numerical Modeling on Destress Blasting in Coal Sean for Enhancing Gas Drainage" *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 59, pp. 179-190.
- [35] Kaiser P., 2014. Deformation-based support selection for tunnels in strainburst-prone ground, *Deep Mining*, pp. 227-240.
- [36] Mazaira A., and Konicek P., 2015. "Intense Rockburst Impacts in Deep Underground Construction and Their Prevention. In *Canadian Geotechnical Journal* 52, pp. 1426-1439.
- [37] Sainoki A., Zaka M., and Mitri H., 2016. "Study on the efficiency of destress blasting in deep mine drift development". In *Canadian Geotechnical Journal* 54, pp. 518-528.
- [38] Yao M., Forsythe A., and Chinnasane D., 2016. "De-stress Blasting Strategy for Mining in Highly Stressed Sill Pillars at Vale's Sudbury Mines – Two Case Studies". In *Workplace Safety North's Mining Health and Safety Conference*, Sudbury, Canada.
- [39] Vallejos J.A., and McKinnon S.D., 2011. Correlations between mining and seismicity for re-entry protocol development. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 4, pp. 616-625.
- [40] Vallejos J.A., and Estay R., 2018. Seismic Parameters of Mining-Induced Aftershock Sequences for Re-entry Protocol Development. *Pure and Applied Geophysics*, 175, B2.



- [41] Vennes I., and Mitri H., 2017. “Geomechanical effects of stress shadow created by large-scale destress Blasting” In *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 9, pp 1085-1093.
- [42] Wojtecki L., Konicek P., Mendecki M., and Zuberek W., 2017. Application of Seismic Parameters for Estimation of Destress Blasting Effectiveness”. In *Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Procedia Engineering* 191, pp. 750-760.
- [43] Konicek P., and Schreiber., 2017. “Rockburst prevention via destress blasting of competent roof rocks in hard coal longwall mining”. In *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 118, pp. 235-242.
- [44] Wojtecki L., Mendecki M., and Zuberek W., 2017. “Determination of Destress Blasting Effectiveness Using Seismic Source Parameters”. In *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol 50, pp. 3233–3244.
- [45] Drover C., Villaescusa E., and Onderra I., 2017. “Destress Blasting for Hardrock Tunnelling at Great Depth”. In *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol 80, pp. 257-268.
- [46] Mitri H., 2018. “Destress Blasting – From Theory to Practice”. In *4th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'18)*, DOI: 10.11159/mmme18.2.
- [47] Baranowski P., Damaziak K., Mazurkiewicz L., Mertuszka P., Malachowski J., Palac-Walko B., and Jones T., 2019. “Destress Blasting of Rock Mass Multiscale Modelling and Simulation”. In *Shock and Vibration*, Vol 2019, Article ID 2878969, pp. 11.
- [48] Drover C., and Villaescusa E., 2019. “A Comparison of Seismic Response to Conventional and Face Destress Blasting during Deep Tunnel Development”. In *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol 11, pp. 965-978.
- [49] Parada F; and Castro D., 2019. “Intact Rock Geotechnical Properties Report, Main Tunnels Sector P4600. North Andes Project”.
- [50] Aki, K, 1965. Maximum likelihood Estimate of  $b$  in the Formula  $\log N = a - bM$  and its Confidence Limits, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 43, 2, 237-239.