



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS CATS
EN LAS TRONADURAS DE ESCONDIDA**

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

SERGIO ENRIQUE NAVARRO RAMOS

PROFESOR GUÍA:
SR. JAIME CHACÓN FERNANDEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Sr. JAVIER VALLEJOS MASSA
SR. BRUNO BEHN THEUNE

SANTIAGO DE CHILE
MARZO 2012

RESUMEN

El trabajo realizado consistió en evaluar el desempeño de los "conos activadores de tacos" (CATs), dispositivo desarrollado por el autor, para mejorar la capacidad de soporte de los "tacos" en una tronadura. Con este propósito, a partir de la información obtenida de pruebas realizadas por Minera Escondida, se compararon estos resultados utilizando como caso base el correspondiente a una tronadura convencional.

En el actual estado de la técnica, la evaluación del desempeño de las tronaduras se realiza comparando las distribuciones granulométricas obtenidas en la operación de fragmentación. Ello resulta insuficiente, ya que sólo considera la información de entrada y de salida, sin tomar en cuenta sus procesos. En el presente trabajo, para superar esta limitación, se desarrolló y aplicó un modelo del comportamiento de las tronaduras basado en el desplazamiento de los tacos durante el tiempo de proceso. Su aplicación permitió correlacionar las distribuciones de fragmentación –medidas en terreno– con los niveles de "energía efectiva" disponible, en función del comportamiento de los "tacos".

El modelo desarrollado requirió para su conceptualización de algunos supuestos, siendo los más relevantes los que se indican a continuación:

Los sistemas explosivo-roca pierden energía al exterior debido, solamente, a la expansión de la cámara que contiene los gases generados por de la detonación del explosivo.

El trabajo de fragmentación de la roca es proporcional a la "energía efectiva total" disponible.

Las pérdidas de energía se van dando a medida que avanza el frente de quiebre.

Los resultados teóricos, en cuanto a la "energía efectiva total" entregada por el modelo, indicaron una buena correlación con los tamaños característicos de las distribuciones de fragmentación medidas en terreno. Esto avala al modelo como una herramienta promisoría para evaluar el desempeño de las tronaduras, pero se requiere contar con mediciones reales del desplazamiento de los tacos, en cada caso, para definir totalmente la situación modelada.

Con las reservas debidas a la calidad, cantidad y confiabilidad de la información disponible para este trabajo, se pudo concluir, a partir de un ejercicio teórico realizado con una de las tronaduras de prueba –suponiendo condiciones de entrada similares– que la "energía efectiva total" disponible en las tronaduras con activadores "CATs" supera en una cifra del orden de un 35 % a la del caso base. Asimismo, se puede inferir un 25 % de menor consumo de explosivo, disponiendo de la misma "energía efectiva total".

Las ventajas técnicas y económicas detectadas en las pruebas con "conos activadores de tacos" (CATs), los convierte en una herramienta eficaz para mejorar el desempeño de las operaciones de tronadura.

ABSTRACT

The aim of this work was to evaluate blasting performance with “stemmings’ activators cones” (CATS), a blasting fitting developed by the author, to improve stemmings’ bearing power in a blasting test. With this purpose, from the information obtained by tests carried out by Minera Escondida, these results were compared using conventional blasting as basis case.

In the current state of the art of blasting, the evaluation of their performance is done comparing the grading obtained by the fragmentation operations. This is insufficient as evaluation, since it only considers the input and output information, ignoring completely their processes. To overcome this limitation, a model of blasting behavior was developed and applied in this work, based in stemmings’ displacement during the processing time. Its application allowed to correlate the distributions of fragmentation, measured in site, with the available levels of effective energy, according to stemmings’ behavior.

The development of this model required some premises for its conceptualization, being the following the most relevant:

The explosive-rock systems lose energy outside, only due to the expansions of chambers containing gases generated by the detonation of the explosive.

The rock fragmentation work is proportional to the “total effective energy” available.

Energy losses are produced as the breaking face in the rock moves on.

The theoretical results of “total effective energy”, provided by the model, gave a fair correlation with the featured dimensions of the fragmentation distributions measured in site. This endorses the model as a promising tool to evaluate blasting performances, even though it requires real measurements of stemmings’ displacement of each case, to completely define the modeled situation.

With reservations, due to the quality, quantity and liability of the information available for this work, it was concluded that, based on a theoretical exercise done with one of the blasting tests, supposing similar input conditions, the “total effective energy” available in blastings with CATS activators, exceeds somehow in a 35% the basis case. In the same way, it can be deduced that there is a 25% less of explosive consumption, disposing of the same “total effective energy”.

The technical and economic advantages identified in blasting tests with “stemmings’ activators cones”, (CATS), make them an effective tool for the improvement of blasting operations.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Origen del estudio.....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.2.1 Objetivo general	1
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcances del trabajo.....	2
1.4 Metodología.....	3
1.5 Supuestos del modelo	4
CAPÍTULO II: ANTECEDENTES.....	6
2.1 Diseño de los “activadores” o “CATs”.....	6
2.2 Pruebas realizadas con “activadores” en Escondida.....	9
2.3 Análisis de los “tacos”.....	10
2.3.1 “Tacos” convencionales.	10
2.3.2 “Tacos” con “activadores”.....	12
2.3.3 Misceláneos “tacos”	15
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO.....	17
3.1 Definiciones.....	17
3.2 Modelamiento del proceso de tronadura	18
3.3 Cámaras de expansión	19
3.4 Determinación de la presión inicial del explosivo	20
3.5 Determinación del desplazamiento inicial de los “tacos”	21
3.6 Desplazamiento de los “tacos” durante el proceso de quiebre.	24
3.7 “Energía efectiva” vs tiempo.....	26
3.8 “Energía efectiva total“ durante el proceso de quiebre.	28
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE LAS TRONADURAS REALIZADAS POR ESCONDIDA.....	29
4.1 Información entregada por Escondida.....	29
4.1.1 Tronadura banco 2990 n1 malla 11	30
4.1.2 Tronadura banco 3050 n3 malla 32.	37
4.1.3 Tronadura banco 3020 n° 3 #5.	44
4.1.4 Tronadura banco 3050_n3_malla 33.....	50
4.1.5 Tronadura banco 3065_n3_malla 45.....	56
4.2 Análisis de la información.....	59

4.2.1 Cálculo del desplazamiento inicial de los “tacos”.....	60
4.2.2 Determinación de la “energía efectiva total”.....	65
4.2.3 Análisis de los resultados.	71
4.2.4 Consideraciones económicas.....	74
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
CAPÍTULO VI: GLOSARIO.....	79
CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA.....	80
ANEXO 1: Memoria de cálculo.	81
ANEXO 2: Planillas de cálculo y gráficos y gráficos de la “energía efectiva”	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de funcionamiento de los “activadores”.....	8
Figura 2. Fotografía de un “activador” de 12 ¼” ϕ	9
Figura 3. Esquema del “taco” convencional.....	11
Figura 4. “Taco” antes de la detonación.....	12
Figura 5. Inmediatamente después de la detonación.....	13
Figura 6. Re-equilibrio de la parte superior de la cavidad del taco.....	13
Figura 7. Corte de la base del taco.....	14
Figura 8. Deformación por cizalle del extremo del “taco” cortado.....	14
Figura 9. Avance del equilibrio al interior del taco.....	15
Figura 10. Termina del proceso de reequilibrio del taco.....	15
Figura 11. Esquema de la distribución de velocidades de avance del quiebre.....	26
Figura 12. Comportamiento “tacos” tronadura convencional según el modelo.....	61
Figura 13. Comportamiento “tacos” tronadura con activador según el modelo.....	62
Figura 14. Gráfico tamaños característicos vs “energías efectivas totales” (EET).....	67
Figura 15. Tamaño característico vs “energía efectiva total”, consolidado.....	68
Figura 16. Distribuciones de fragmentación medidas en la tronaduras de prueba.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Información utilizable entregada por Escondida.....	60
Tabla 2. Variación de “ γ ” con la presión.....	63
Tabla 3. Cálculo por iteración del desplazamiento de los “tacos”. Tronadura 3050 32.....	64
Tabla 4. Cálculo por iteración del desplazamiento de los “tacos”. Tronadura 2990.....	64
Tabla 5. Cálculo por iteración del desplazamiento de los “tacos”. Tronadura 3020.....	65
Tabla 6. Resumen valores obtenidos por las iteraciones.....	65
Tabla 7. Datos de entrada para cálculo de la “energía efectiva total”.....	66
Tabla 8. Resultados obtenidos para las tronaduras con información completa.....	66
Tabla 9. “Energía efectiva total” y tamaño característico consolidado.....	67
Tabla 10. Resumen del cálculo de las “energías efectivas totales”.....	68
Tabla 11. Resumen de los parámetros de entrada y resultados obtenidos.....	69
Tabla 12. Resumen de los parámetros resultantes de las tronaduras convencionales.....	71
Tabla 13. Resumen de los parámetros resultantes de las tronaduras con “activadores”.....	71
Tabla 14. Promedios tronaduras con “activadores”/promedios convencionales.....	72
Tabla 15. Prom. Tron con CATs/ Pron Tron Conv. Tronaduras con “tiempos de proceso”.....	72
Tabla 16. Resultados de las tronaduras de prueba 3050-32 y 2990.....	74

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En la terminología concerniente a la operación de tronadura se denomina “taco” al segmento superior de la perforación o pozo que contienen al explosivo y que se rellena con un material inerte para confinar la carga.

Las tronaduras, desde el punto de vista de la energía, son sistemas conformados por la columna de explosivo rodeada por la roca a ser arrancada y conectada al medio ambiente a través de los “tacos”. Siendo el volumen ocupado por los “tacos” el más débil en torno al explosivo, resulta evidente que el aprovechamiento de la energía aportada por éste está controlado por el comportamiento de los “tacos”.

El presente trabajo consistió en desarrollar un modelo matemático que permite cuantificar el desempeño de las tronaduras a partir del comportamiento de los “tacos” y aplicarlo en la evaluación de los resultados de las tronaduras de prueba realizadas por Minera Escondida con retenedores de “tacos” (CAT). Debido a que en estas tronaduras no se midió el desplazamiento de los “tacos”, fue necesario estimarlos a partir de la información disponible. Para ello se aplicaron conceptos sobre la física de los procesos de tronadura, los que permiten condicionar el comportamiento de los “tacos” y cuantificar su desplazamiento.

1.1 Origen del estudio

El origen de este trabajo se relaciona con los análisis conceptuales previos realizados por el autor para comprender los procesos de tronadura. Estos análisis incluyen la conceptualización de la importancia de los “tacos” en las tronaduras, lo que lo condujo al diseño de los conos “activadores” “CATs”, accesorio creado para mejorar la capacidad de auto soporte de los “tacos”.

Para evaluar el potencial técnico-económico del dispositivo mencionado, fue necesario realizar pruebas y cuantificar sus resultados. La evaluación de los resultados de las tronaduras de prueba realizadas por Minera Escondida, objeto del presente trabajo, corresponde a la última etapa del programa elaborado para introducir el accesorio mencionado en el mercado.

1.2 Objetivos

1.2.1. *Objetivo general*

Cuantificar el desempeño de las tronaduras con los “conos activadores de tacos” (CATs), en adelante “activadores”, con respecto al desempeño de las tronaduras convencionales, tomando como base el desarrollo de sus procesos y las mediciones de la granulometría resultante en las tronaduras de prueba realizadas por Minera Escondida.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Conocer el comportamiento de los “tacos” convencionales y el de los “tacos” con “activadores” durante los procesos de tronadura.
- Cuantificar el desempeño de los procesos de tronadura en base al comportamiento de los “tacos” y de los “tiempos de proceso”.
- Introducir, analíticamente, el comportamiento de los “tacos” convencionales y de los “tacos” con “activadores” en las relaciones desarrolladas para cuantificar el desempeño de las tronadura
- Estimar el desplazamiento de los “tacos” a partir de la información disponible.
- Aplicar las relaciones matemáticas desarrolladas en este estudio para cuantificar el comportamiento de las tronaduras de prueba realizadas por Minera Escondida y evaluar el desempeño de las tronaduras con “activadores” respecto al obtenido por las tronaduras convencionales.
- Correlacionar los desempeños obtenidos en forma teórica, mediante el método desarrollado en este estudio, con las distribuciones de fragmentación medidas en las pruebas, para validar la aplicabilidad de las ecuaciones desarrolladas y completar la evaluación de las tronaduras en estudio respecto al caso base.
- Analizar los resultados para obtener las conclusiones pertinentes.

1.3 Alcances del trabajo

El presente trabajo se limitó a las tronaduras a cielo abierto abarcando los puntos siguientes:

- Analizar conceptualmente el comportamiento de los “tacos” de las tronaduras convencionales y a las con “activadores”, para conocer sus principios de funcionamiento.
- Desarrollar una herramienta de análisis que permita cuantificar el desempeño de las tronaduras en base al comportamiento de sus “tacos” y a las mediciones de sus “tiempos de proceso”. Se entiende por “tiempo de proceso” al tiempo que transcurre desde la iniciación del explosivo de un pozo hasta que el quiebre irrumpe a la zona de su collar.
- Estimar el desplazamiento del “taco” en función de los “tiempos de proceso”, considerando que la aceleración del avance del frente de quiebre de la roca es proporcional a la “energía efectiva total” disponible en cada tronadura.

- Determinar la “energía efectiva” instantánea y la “energía efectiva total” disponibles en las tronaduras de prueba realizadas por Minera Escondida, en función de los parámetros de tronadura empleados en cada caso y de las condiciones impuestas por el tipo de tronadura efectuada.
- Correlacionar en las tronaduras de prueba la “energía efectiva total”, obtenida en forma teórica, con los tamaños característicos de las distribuciones de fragmentación medidos en terreno.
- Evaluar cuantitativamente el desempeño y el costo de las tronaduras de prueba con “activadores” con respecto a la tronadura convencional incluida en cada prueba.
- Analizar los resultados para obtener las conclusiones y recomendaciones.

1.4 Metodología

Para la evaluación del desempeño de las tronaduras realizadas con el dispositivo en estudio, se contó con la información obtenida en las tronaduras de prueba realizadas por Minera Escondida. Ésta que incluyó las distribuciones granulométricas, los “tiempos de proceso” y las capacidades horarias de las palas.

Al inicio de este estudio no se dispuso de métodos o modelos numéricos o matemáticos que permitieran representar los procesos de tronadura y cuantificar su desempeño en base a los parámetros disponibles. La necesidad de contar con esta herramienta, para dar cumplimiento al objetivo planteado, hizo necesaria su creación, constituyéndose en el aporte más importante de este trabajo.

El método de cuantificación del desempeño de las tronaduras consistió en la obtención de una expresión matemática de la “energía efectiva”, en base al comportamiento de los “tacos” y de los “tiempos de proceso”. La distribución de fragmentación de las tronaduras de prueba fueron utilizadas para validar el método desarrollado y para precisar el análisis. La información de las capacidades horarias de las palas no fue afectada por las mejoras obtenidas en la fragmentación, indicando que la fragmentación actual ya es la adecuada para el óptimo rendimiento de las palas y camiones.

La “energía efectiva total” en un proceso de tronadura puede expresarse como el producto de la “energía nominal” aportada por el explosivo multiplicada por un “factor de efectividad”, que cuantifica la forma cómo una tronadura cualquiera utiliza la “energía nominal” entregada por el explosivo. Para las tronaduras realizadas en un mismo tipo de roca el “factor de efectividad” es función de la geometría de la tronadura estudiada, del explosivo empleado, de la longitud y comportamiento de los “tacos”, de la relación entre la longitud de los “tacos” y el tamaño de las cargas y de las condiciones de carga de cada pozo en particular.

Para determinar la “energía efectiva” en cada instante del proceso se utilizó la información de los tiempos totales de éstos, obtenidos en las tronaduras de prueba. Debido a que las rocas arrancadas en las diferentes pruebas fueron similares, no se consideró ajustes por tipo de roca.

El modelo desarrollado permitió determinar las “energías efectivas totales” correspondientes a la parte tronada en forma convencional y a la parte tronada con “activadores”, en cada prueba. Estas energías se correlacionaron con los tamaños característicos de las distribuciones de fragmentación respectivas, para validar el desarrollo teórico realizado y disponer así de un elemento de juicio adicional para contrastar el comportamiento de las tronaduras con “activadores” y de las tronaduras convencionales.

El costo unitario de las tronaduras con “activadores” con respecto al de las tronaduras convencionales, se determinó considerando solamente el ahorro en explosivo para realizar el mismo trabajo.

1.5 Supuestos del modelo

La determinación, mediante un modelo matemático, de la energía interna disponible o “energía efectiva” de una tronadura cualquiera, se basó en los siguientes supuestos:

- Las tronaduras pueden ser consideradas como procesos adiabáticos, debido a que las pérdidas de calor por transferencia a la roca es muy reducida, dada la brevedad del tiempo involucrado y la baja conductividad térmica de la roca.
- Considerando las tronaduras como sistemas explosivo-roca-taco, éstas pierden energía solamente por efecto de la expansión de la cámara que contiene los gases generados por la detonación del explosivo, ya sea por la presencia de cámaras de aire o por el desplazamiento de los “tacos” debido a su compactación y deslizamiento.
- Como consecuencia de lo anterior, es posible determinar la energía interna o “energía efectiva” instantánea y la “energía efectiva total” de los gases disponible durante la tronadura para realizar trabajo, haciendo la suposición de que el explosivo está contenido en un tubo indeformable (infinitamente rígido), cerrado en un extremo con el mismo material indeformable y en el opuesto por el taco.
- La geometría del modelo y las propiedades del explosivo y “taco” utilizadas son las mismas de la situación real. En este caso, la energía interna contenida en los gases no puede realizar ningún trabajo, a excepción de su expansión para llenar las eventuales cavidades liberadas por el desplazamiento del “taco” en su ajuste inicial por la presión y posteriores desplazamientos durante el proceso de quiebre. Así, la energía interna contenida en los gases, calculada mediante el modelo propuesto, corresponde a la “energía efectiva” de la cual habría dispuesto un pozo de la tronadura real modelada para

realizar trabajo. Eventualmente, la cámara de explosión por el modelo puede contener espaciadores de aire.

- Para obtener la energía interna o “energía efectiva” instantánea y total y que éstas representen la realidad de la situación, el modelo debe ser alimentado con el desplazamiento en el tiempo del taco. Este desplazamiento puede ser obtenido por mediciones directas de terreno o, en su defecto, puede ser estimado a partir de las mediciones del “tiempo de proceso” obtenido en las pruebas.
- El modelo contempla un desplazamiento (compactación más deslizamiento) inicial de los “tacos” por su ajuste a la presión de los gases y un desplazamiento con aceleración constante durante el proceso de quiebre. Esta aceleración puede ser obtenida mediante mediciones en las tronaduras de prueba registrando el desplazamiento de los “tacos” en el tiempo o, en su defecto, por iteración, utilizando los registros de los “tiempos de proceso” y las longitudes remanentes de los “tacos” luego de su desplazamiento inicial.
- El modelo permite obtener un “factor de eficacia” (FE) que entrega un valor representativo del aprovechamiento de la energía aportada por el explosivo, dividiendo la “energía efectiva total” obtenida por la “energía nominal” aportada por el explosivo.
- La “energía efectiva total” entregada por este modelo se correlaciona con el tamaño característico de la fragmentación resultante de la tronadura real, pudiendo unir el aspecto teórico con los resultados prácticos. Para ello se considera la “energía efectiva total” como disponible en la tronadura real modelada, para correlacionarla con los tamaños característicos de la fragmentación.
- Para correlacionar el modelo teórico con las tronaduras reales, se hacen las siguientes consideraciones para estas últimas:
 - Para un mismo tipo de roca el trabajo de fragmentación es proporcional a la “energía efectiva total” disponible en el proceso.
 - Las pérdidas de energía por desplazamiento de los “tacos” se van dando en el espacio y en tiempo, a medida que éste avanza.
 - El proceso de quiebre se inicia en el instante de la detonación del explosivo y termina cuando el frente de quiebre alcanza el extremo del taco, en cada pozo de la tronadura.
 - En una tronadura normal, el “taco” constituye el volumen más débil que rodea al explosivo. Razón por la cual su comportamiento controla el desempeño de las tronaduras.
- Debido a que los “tacos” están constituidos normalmente por material granular, la presión que ejercen los gases sobre ellos los compactan y los hacen deslizar sobre las superficies interiores de los pozos, liberando volumen que al ser ocupado por los gases les hace perder energía interna o “energía efectiva”.

- Los “activadores” le dan al extremo inferior del “taco” una forma cónica tal que éste desarrolla fuerzas de fricción mayores o iguales al empuje axial de los gases, impidiendo que éstos se desplacen (se retraigan o deslicen).
- Para determinar el desplazamiento de los “tacos” de las tronaduras convencionales se utilizaron como criterios:
 - Que el avance del quiebre de la roca generado por la tronadura se mueve con una aceleración constante y que esta aceleración es proporcional al nivel de “energía efectiva” promedio disponible al inicio del proceso de quiebre.
 - Que el quiebre se inicia en el extremo inferior de los “tacos”, después de los desplazamientos iniciales, y llega hasta el extremo superior de éstos.
- Que el tiempo que le toma al frente de quiebre recorrer la distancia entre el inicio y fin del quiebre, corresponde a los “tiempos de proceso” medidos en las pruebas. Para simplificar estos cálculos, se consideró que el desplazamiento inicial de los “tacos” ocurre al inicio de los procesos de quiebre.
- La Presión de Explosión (P_0) o presión inicial de trabajo, correspondiente al explosivo, es aproximadamente igual a la mitad de la presión de detonación del explosivo¹. Equivale a la presión de los gases contenidos en el mismo volumen ocupado originalmente por la carga explosiva.

CAPÍTULO II: ANTECEDENTES

2.1 Diseño de los “activadores” o “CATs”

Las tronaduras fragmentan la roca debido a la gran potencia liberada por el explosivo confinado al interior de la roca a ser fragmentada. Dado que el sistema explosivo- roca está conectado al exterior por la perforación que contiene al explosivo y separado sólo por “tacos” de material granular inerte, el volumen más débil en torno a cada carga explosiva corresponde al “taco”. Esto significa que su resistencia al empuje de los gases controla el nivel de las fuerzas actuantes y el trabajo efectuado por el explosivo en la roca. Así, cuanto mayor sea la capacidad de soporte de los “tacos”, menor será la pérdida de energía de estos sistemas, y mayor será la “energía efectiva” disponible en las tronaduras, para fragmentar la roca.

¹ Hustrulid Willian 1999. *Blasting Principles for Open Pit Mining* Vol 1 pág 65

Por otra parte, el espesor de roca que el explosivo debe fragmentar se ve reducido por el desplazamiento de los “tacos”, que mueve hacia arriba la interfase “gases-taco” y con ello también el inicio del frente de quiebre. Esto reduce el “tiempo de proceso” al permitir que los frentes de quiebre lleguen prematuramente a la superficie de la roca.

Para mejorar el rendimiento del explosivo mejorando la capacidad de soporte de los “tacos”, algunos centros de investigación y empresas extranjeras han desarrollado accesorios que aportan resistencia adicional a los “tacos”. Estos generan fuerzas de fricción, apretándose contra la superficie de las perforaciones o pozos, ya sea por deformación o por acuñaamiento, al ser empujados axialmente por la presión de los gases. Esto implica que tales accesorios contribuyen con su propia resistencia a generar en los “tacos” una capacidad de soporte adicional. Debido a que las presiones generadas por los explosivos son muy superiores a la resistencia de cualquier material utilizable, dichos accesorios se deforman y ceden ante la presión, limitando con ello la capacidad de fricción que pueden ejercer contra las paredes de los pozos.

A partir de estos conceptos el autor de este trabajo diseñó y probó un dispositivo basado en la idea de aumentar la capacidad de auto soporte de los “tacos”, utilizando la propia presión de los gases para conseguirlo. El diseño del dispositivo mencionado le da al extremo inferior de los “tacos” una forma tal que la presión de los gases se descompone sobre la superficie expuesta a ellos, generando una fuerza de fricción mayor que el empuje axial. La manera más simple de conseguirlo (ver Figura 1), es darle al extremo inferior de los “tacos” una forma cónica hueca, con su base orientada hacia el explosivo y con un ángulo de semiapertura “A” tal que la componente radial de la presión del gas, multiplicada por el ángulo de fricción “ φ ” del material del “taco”, sea mayor o igual a la componente axial. Es decir:

$$2.1) Pda \sin(A) \leq Pda \cos(A) \tan \varphi$$

donde “P” es la “presión de trabajo” del gas generado por el explosivo y “da” el elemento de área.

Simplificando por “Pda” y pasando “cos (A)” a la izquierda se obtiene:

$$2.2) \tan (A) \leq \tan (\varphi).$$

Esto significa que si el ángulo de semiapertura de los conos es menor o igual a la tangente del ángulo de fricción del material de los “tacos”, la fuerza de fricción generada contra la superficie de los pozos será mayor o igual al empuje axial generado por los gases.

De este modo, es la propia presión de los gases la que genera, en la base de cada “taco”, la fuerza resistente de fricción, mayor que el empuje axial, resultando así que las fuerzas resistentes y solicitantes son proporcionales a la presión de los gases, independientemente de sus magnitudes.

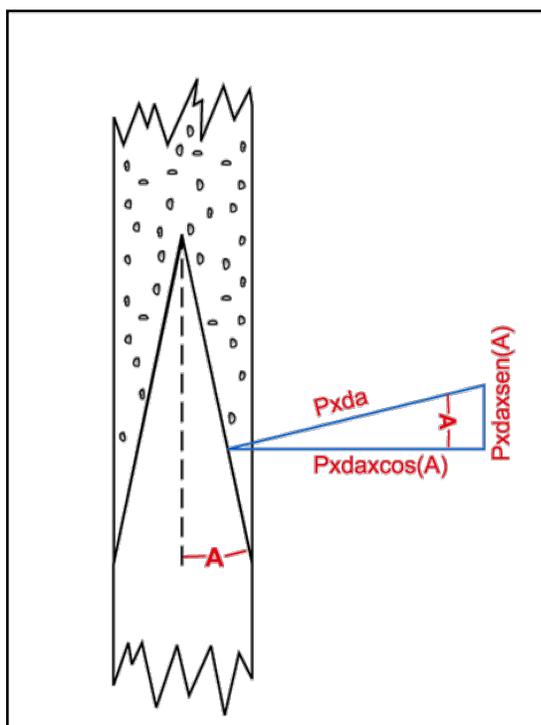


Figura 1. Esquema de funcionamiento de los “activadores”.

Para darle la forma requerida a la base de los “tacos” se utiliza un molde de plástico hueco, con paredes delgadas, que se instala descansando sobre la columna explosiva o colgándolo a una cierta distancia del extremo de ésta, mediante la cuerda que pasa por su vértice.

Las pruebas de tronadura con los accesorios en estudio, realizadas antes que las de Escondida, han mostrado mejores desempeños que las tronaduras con “tacos” convencionales o las que emplean otros dispositivos para mejorar la resistencia de los “tacos”. En tales pruebas, el desempeño conseguido con los “activadores” se evaluó en función del mayor volumen arrancado con respecto al carguío convencional. Es decir, también se evaluó atendiendo sólo a los resultados, sin llegar a correlacionarlos con la energía utilizada para conseguirlos.

El presente trabajo incluye el desarrollo de un modelo matemático que permite cuantificar el comportamiento de una tronadura cualquiera, con el fin de comparar el desempeño y las mediciones de fragmentación entre las tronaduras convencionales y las con “activadores”, realizadas por Minera Escondida.

La Figura 2 entrega la fotografía de un activador para diámetros de perforación de 12 ¼” ϕ .

En el programa de pruebas realizado por Minera Escondida dividió cada una de ellas en dos secciones para evaluar el desempeño de las tronaduras con “activadores” en comparación al correspondiente a las tronaduras convencionales. Estas pruebas se desarrollaron en diámetro de

12 ¼”, y se registraron los “tiempos de proceso” con cámaras de alta velocidad, las distribuciones de tamaños obtenidos y los capacidades horarias de las palas.

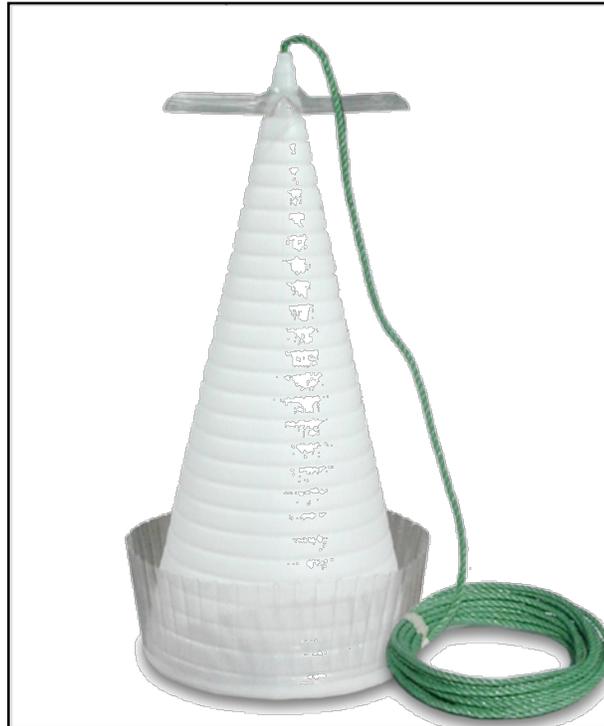


Figura 2. Fotografía de un “activador” de 12 ¼” ϕ .

2.2 Pruebas realizadas con “activadores” en Escondida.

En el programa de pruebas realizado por Minera Escondida dividió cada una de ellas en dos secciones para evaluar el desempeño de las tronaduras con “activadores” en comparación al correspondiente a las tronaduras convencionales. Estas pruebas se desarrollaron en diámetro de 12 ¼”, y se registraron los “tiempos de proceso” con cámaras de alta velocidad, las distribuciones de tamaños obtenidos y los capacidades horarias de las palas.

Con el desarrollo de las pruebas en 12 ¼” de ϕ se obtuvo una valiosa información, pero no se contó con una herramienta de análisis que permitiera obtener el desempeño de las tronaduras a partir de las mediciones de tiempos de retención (“tiempos de proceso”), razón por la cual fue necesario desarrollar dicha herramienta. Sin embargo, durante su desarrollo se pudo constatar que las mediciones de las distribuciones de fragmentación y de los “tiempos de proceso” son insuficientes para representar adecuadamente los procesos de tronaduras si se desconoce el comportamiento de los “tacos”. En consecuencia, para este trabajo fue necesario inferir dicho

comportamiento para lograr cuantificar las “energías efectivas” disponibles en cada parte de las tronaduras y correlacionarlas con las mediciones de fragmentación medidas en las pruebas.

2.3 Análisis de los “tacos”

En el presente estudio fue necesario contar con la información del comportamiento de los “tacos” de las tronaduras convencionales y las con “activadores” para modelar el proceso de tronadura correspondiente. Para conseguirlo, se analizaron conceptualmente ambos tipos de “tacos”. A continuación se entrega el desarrollo de este análisis.

2.3.1 “Tacos” convencionales.

Los “tacos” convencionales son generados por el relleno con detritus de perforación sobre el explosivo. En el análisis realizado no se consideró ningún tipo de compactación por efecto de la gravedad, ya que el peso de los “tacos” resulta insignificante en comparación con las fuerzas que estos deben soportar una vez que detona el explosivo.

De acuerdo a las mediciones de las distribuciones de fragmentación y de los “tiempos de proceso” de las tronaduras de pruebas realizadas por Minera Escondida, objeto de este estudio, las tronaduras convencionales desarrollan menos trabajo y disponen de un menor tiempo para realizar la fragmentación que las tronaduras con “CATs”. El menor tiempo disponible para efectuar trabajo, detectado en las tronaduras convencionales, podría explicar el menor trabajo realizado. Sin embargo, también podría indicar que el avance del frente de quiebre es más rápido, o bien que el espesor de roca entre el extremo inferior y superior del taco es menor.

Considerando que la velocidad con la cual avanza el frente de quiebre de la roca es proporcional al nivel de energía interna disponible por los gases, no es posible que la velocidad de avance del frente de quiebre de una tronadura convencional sea mayor que la obtenida por una tronadura con “CATs”, ya que en esta última los gases presentan un mayor nivel de energía interna durante el proceso. Esto se explica porque la forma que estos accesorios le dan al extremo inferior de los “tacos”, les permite resistir el desplazamiento inicial por efecto del brusco aumento de la presión al detonar el explosivo. Por lo tanto, la velocidad de avance de su frente de quiebre debe ser mayor. En consecuencia, el menor “tiempo de proceso” sólo puede deberse al menor espesor de roca que el explosivo debe quebrar para alcanzar la superficie.

El frente de quiebre se inicia en la superficie de contacto de los gases con la roca y avanza hacia la superficie expuesta de la roca. En la dirección axial, el quiebre se inicia en el contacto de los gases con el taco. Por lo tanto, un menor espesor de roca a ser quebrado significa un menor “taco” remanente y a igualdad de longitud del “taco” inicial, un mayor desplazamiento inicial. De este modo es posible concluir que los “tacos” de las tronaduras convencionales son afectados por un desplazamiento inicial, previo al inicio del proceso de quiebre.

En la Figura 3 se muestra esquemáticamente un “taco” convencional constituido por detritus de perforación ubicado sobre el explosivo. Se representan las fuerzas como flechas. “ F_0 ” representa la fuerza generada directamente por los gases sobre la base de los “tacos”. “ F ” corresponde a la fuerza transmitida a través del material de los “tacos”. “ dfr ” corresponde al diferencial de fricción en un punto ubicado a una distancia “ L ” desde el contacto gas-”taco” y “ Fr ” es la fuerza de fricción acumulada en la longitud “ L ”

Analizando la Figura 3, es posible deducir que al inicio de la tronadura, la enorme fuerza “ F_0 ” ejercida por los gases en el extremo inferior de los “tacos” ejerce un violento efecto de compactación sobre éste, al mismo tiempo que genera fuerzas de fricción que se oponen al empuje de los gases, creadas por efecto de las fuerzas radiales “ μF_0 ” sobre las paredes del pozo. De este modo, la fuerza de empuje y la fricción van disminuyendo a lo largo del “taco” al alejarse de su extremo inferior, creándose también un gradiente decreciente de compactación del material del taco.

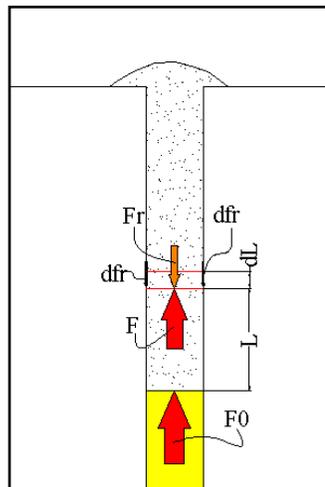


Figura 3. Esquema del “taco” convencional.

Cuando en algún segmento del pozo el “taco” se desapega de este, por corte, la disminución local de la fricción libera parte de la fuerza de empuje y se produce una re-compactación más arriba, en el segmento remanente.

Dependiendo de las características del material del taco, de la presión ejercida por los gases y del diámetro y la longitud del taco, se producirá un equilibrio dinámico de fuerzas en el taco, de tal modo que además de la retracción de éste, por efecto de la compactación, también es afectado por deslizamientos y re-compactaciones.

Todo el fenómeno de re-equilibrio inicial analizado, ocurre en un tiempo muy corto con relación al tiempo total del proceso. Para efecto de cálculo, se asume que el desplazamiento inicial ocurre en forma instantánea al inicio de la tronadura.

2.3.2 “Tacos” con “activadores”

A continuación se hace un análisis conceptual del comportamiento de los “tacos” con “activadores”, durante el proceso de tronadura.

Los “activadores” por diseño, actúan como moldes que le dan al extremo inferior del “taco” una forma cónica con un ángulo de semiapertura menor que el ángulo de fricción del material que lo conforma, que le permite auto soportarse bajo el empuje de los gases, evitando su desplazamiento inicial. Sin embargo, el “taco” no permanece en esa posición durante todo el proceso ya que el quiebre de la roca lo va destruyendo. En consecuencia, es necesario entender cómo se comporta el durante el proceso de fragmentación.

El proceso de tronadura se inicia a partir de la situación inicial mostrada en la Figura 4, previa a la detonación del explosivo. El cono descansa sobre el explosivo y soporta al material del “taco”.

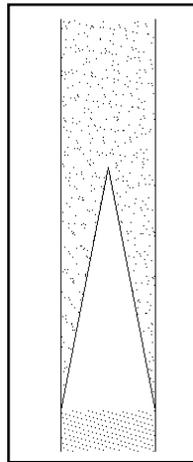


Figura 4. “Taco” antes de la detonación.

Al detonar el explosivo (Figura 5) las componentes de la presión sobre el material del “taco” genera fuerzas de fricción, que resisten al empuje de los gases en todo el manto cónico ($\tan A \leq \tan \phi$). Sin embargo en el extremo superior, que no tiene la forma que le permite autosoportarse, se deforma por el empuje de los gases. Toma una forma que tiende a una semi esfera. De este modo el círculo de contacto con el tronco cónico va tomando ángulos decrecientes a medida que esa superficie se deforma. Pero cuando el valor de este ángulo es igual al ángulo de fricción del material del taco, alcanza el equilibrio entre la fuerza de empuje y la resistencia por fricción y deja de deformarse. De este modo los diferentes círculos de la superficie que cierra al tronco de cono van incorporándose al tronco de cono, hasta incluir toda su superficie (Figura 6). En este

caso, el ángulo de semiapertura del cono generado es igual al ángulo de fricción del material del taco, es decir, mayor que el ángulo de diseño del “activador”

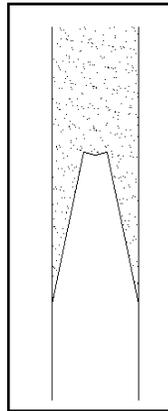


Figura 5. Inmediatamente después de la detonación.

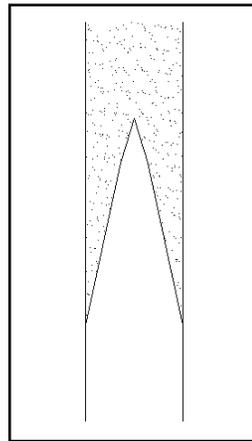


Figura 6. Re-equilibrio de la parte superior de la cavidad del taco.

Al iniciarse el proceso de fragmentación, la situación inicial descrita se ve alterada por el avance del frente de quiebre. En el sector del taco, éste va cortando gradualmente al pozo y con ello la base de la cavidad del extremo del “taco” (Figura 7).

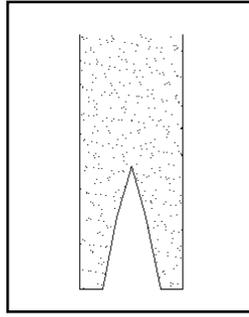


Figura 7. Corte de la base del taco.

El empuje axial ejercido por los gases sobre la cavidad deforma la base cortada del pozo por cizalle por efecto del empuje ejercido en la superficie cónica² (hacia arriba) y (hacia abajo) la fricción ejercida en el contacto del “taco” con las paredes del pozo Figura 8). Luego continúa deformándose hasta que va gradualmente alcanzando el ángulo de equilibrio (Figura 9), hasta que la base del “taco” sea nuevamente cortada y se reinicie el proceso de re-equilibrio o que toda la superficie de contacto gas-”taco” adquiere el ángulo de equilibrio (Figura 10).

Este proceso de regeneración de la forma se va dando en forma dinámica, continua y en tiempos prácticamente instantáneos. Esto significa que la forma auto-soportante de los “tacos” va siendo interrumpida y regenerada reiteradamente a medida que avanza el frente de quiebre de la roca.

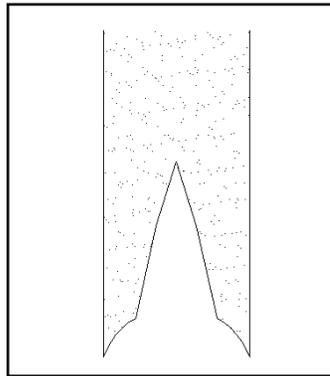


Figura 8. Deformación por cizalle del extremo del “taco” cortado.

² El menor cilindro que contiene la cavidad cónica están en equilibrio la fricción ejercida sobre el manto de este cilindro y el empuje axial ejercido por los gases al interior de dicha cavidad. Razón por la cual este cilindro no se deforma y actúa como un bloque.

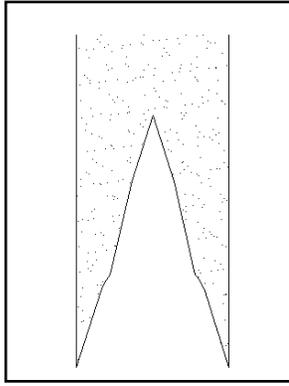


Figura 9. Avance del equilibrio al interior del taco.

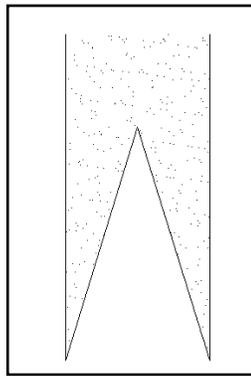


Figura 10. Término del proceso de reequilibrio del taco.

2.3.3 Misceláneos “tacos”

2.3.3.1 “Tacos” de agua

Los “tacos” de agua reemplazan el “taco” convencional por agua. En este caso, debido a la muy baja resistencia al corte del agua, la fricción que generan contra las paredes de los pozos es despreciable. Esto significa que los “tacos” de agua funcionan como elementos inerciales, siendo desplazados con una gran aceleración. La presión que se transmite a través del agua a la velocidad del sonido, al llegar al extremo opuesto ya saliendo del pozo pulveriza finamente al agua, generando una nube capaz de captar una gran parte del polvo liberado al aire por la tronadura.

Desde el punto de vista del desempeño del explosivo, el “taco” de agua es mejor que un pozo sin taco, pero evidentemente menor que el de un “taco” convencional.

Debido a que el agua es empujada por el gas y que este último no puede moverse más rápido que la velocidad del sonido, el “taco” de agua podrá moverse como máximo a esa velocidad. Para un pozo con 8 m de carga y 8 de “taco”, éste demora del orden de 9 ms en salir y continúa saliendo el gas cada vez con menos presión y velocidad. De este modo, sólo cuenta como máximo de unos 20 ms para realizar su trabajo, antes de que pierda su capacidad de romper el tipo roca específico al cual se aplica. El tiempo disponible será más corto cuanto más resistente sea la roca.

2.3.3.2 “Tacos” de aire

Los llamados “tacos” de aire constituyen en realidad cámaras de expansión para los gases generados por la detonación del explosivo. El efecto conseguido por la presencia de la cámara de aire es que la presión cae rápidamente y después continúa cayendo con una pendiente menos pronunciada que la de un “taco” normal. Su “tiempo de proceso” se alarga, pero disminuye el nivel de energía interna disponible, debido a la expansión del gas para llenar el “taco” de aire.

El uso de los “tacos” de aire es adecuado cuando se quiere reducir la generación de finos, ya que éstos se producen cuando la presión de los gases supera la resistencia a la compresión de la roca. De este modo, cuanto menor sea el tiempo en el cual la presión de los gases se mantenga sobre la resistencia a la compresión de la roca, menor será la cantidad de finos producida. Además, las tronaduras que los utilizan fragmentan un poco menos, pero entrega un material más uniforme. De acuerdo al léxico minero el material quebrado se “granea”.

2.3.3.3 Eyección de “tacos”

Según el análisis de las pruebas realizadas por Escondida con diferentes tipos de retenedores de “tacos”, uno de ellos, que le da al extremo del “taco” una forma convexa hacia el explosivo, resultó ser el único que disminuyó el “tiempo de proceso” con respecto al obtenido por los “tacos” convencionales. La explicación de esta ocurrencia está en que los gases, al meterse entre las paredes del pozo y los extremos del taco, empujan a estos últimos hacia los ejes de los pozos, como una cuña circular, que va despegándolo de las paredes del pozo. Esto significa, que toda vez que la superficie del extremo inferior del “taco” toma una forma convexa hacia abajo, los gases lo despegan de las paredes del pozo restándole fricción y consumiendo al “taco” tanto más rápido cuanto más convexa hacia abajo sea la forma del contacto. Si esta forma se da accidentalmente en algunos pozos, es posible que el barrido realizado por los gases sea suficientemente rápido para cubrir toda la longitud del “taco” antes de que termine el proceso, y se de la eyección de sus “tacos”.

Cabe hacer notar que la forma convexa hacia abajo es fácil que se dé en el extremo inferior de los “tacos”, ya que es suficiente que el material que lo forma tenga mayor densidad que el explosivo para que tienda a hundirse en forma creciente hacia el centro. En el capítulo 4 de este trabajo se puede verificar que este fenómeno es muy corriente en las tronaduras convencionales y que disminuye significativamente sus desempeños.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

Actualmente, el único método disponible para medir el desempeño de las tronaduras es evaluar la distribución de fragmentación de las tronaduras en estudio. Sin embargo, este método entrega solamente el resultado final, sin ninguna conexión con las causas que generan las diferencias de trabajo detectadas con las mediciones. Así por ejemplo, en las tronaduras de prueba realizadas en Escondida, las mediciones realizadas mostraron que el promedio del tamaño característico de las tronaduras con “activadores”, es menor en alrededor de un 40% que el tamaño característico promedio de las tronaduras convencionales. Pero no entregan ninguna luz de cómo ni por qué eso ocurre.

El autor de este trabajo consideró necesario dar respuesta a las interrogantes planteadas en el párrafo anterior mediante la evaluación del desempeño de las tronaduras con “activadores” realizadas en Escondida, para así considerar satisfecho el objetivo general de este trabajo. Como resultado de ello, se entrega en este capítulo el desarrollo de una herramienta de análisis que permite cuantificar el comportamiento de las tronaduras en términos de “energía efectiva total”, disponible para efectuar trabajo de fragmentación. Ello se realiza en base a las premisas establecidas en el marco teórico, al desplazamiento de los “tacos” y a los “tiempos de proceso” obtenidos a través de los registros de imágenes de las tronaduras.

3.1 Definiciones

A continuación se entregan las definiciones de los términos técnicos más empleados en este trabajo:

- “*Presión de explosión*” (P_0), es la presión de los gases cuando llenan el mismo volumen ocupado por el explosivo, antes de su detonación.
- “*Tiempo de proceso*” (T_p): Intervalo de tiempo comprendido entre la iniciación de la carga explosiva de un pozo hasta que el quiebre irrumpe a la zona de su collar.

- “*Presión de trabajo*”: Es la presión de los gases generados por el explosivo, durante todo el proceso de fragmentación de la roca.
- “*Energía efectiva instantánea*” (EEt): Corresponde a la energía interna contenida, en cada instante, por los gases durante el proceso de tronadura, considerado como un proceso adiabático. Está dada por el producto entre la presión y el volumen de los gases.
- “*Energía efectiva total*” (EET): Corresponde al área bajo la curva de la “energía efectiva” (PV) en función del tiempo. Puede ser expresada como el producto del valor medio de la “energía efectiva” durante el proceso de tronadura por el “tiempo de proceso”.
- “*Energía nominal*” (En): Es la energía entregada por el explosivo utilizado en cada pozo. Corresponde al producto de la presión de explosión del explosivo utilizado multiplicado por el volumen ocupado por éste, antes de su detonación.
- “*Factor de efectividad*” (FE): Es el cociente entre la “energía efectiva total” y la energía aportada por el explosivo. Corresponde a una medida del desempeño de la efectividad con la cual la tronadura en estudio utiliza la energía aportada por el explosivo.

3.2 Modelamiento del proceso de tronadura

El modelo consiste en representar las condiciones de los pozos de tronadura en una situación ideal, donde el explosivo detona al interior de una cámara con las dimensiones de una tronadura real, representada por un tubo de material indeformable con un extremo cerrado y el otro tapado por un “taco” con propiedades reales. Según este modelo, el explosivo no puede efectuar ningún trabajo a excepción del desplazamiento del taco; en consecuencia, la energía interna contenida en los gases durante el proceso de quiebre corresponde a la “energía efectiva” disponible para realizar trabajo. Dado que se modelan las condiciones de una tronadura real, ésta corresponde a la “energía efectiva” disponible por la tronadura real.

Los supuestos básicos considerados para las tronaduras reales a ser incorporados en el modelo son los siguientes:

- El trabajo de quiebre realizado por el explosivo es proporcional al nivel de “energía efectiva total” utilizable durante el proceso de fragmentación de la tronadura.
- La energía disponible para realizar trabajo de fragmentación durante el proceso de tronadura, corresponde a la energía interna contenida en los gases.

- La única pérdida neta de energía del sistema formado por el explosivo al interior de la cámara que lo contiene, corresponde a la expansión de los gases para llenar eventuales cámaras de aire, y los volúmenes liberados por el desplazamiento del “taco” al interior del pozo. La “energía interna”, residual a lo anterior, corresponde a la energía disponible para realizar trabajo.
- En las tronaduras convencionales los “tacos” sufren un desplazamiento inicial muy rápido, para ajustarse a la presión del explosivo, y otro durante el desarrollo del proceso de quiebre. En las tronaduras con “activadores” los “tacos” no sufren el desplazamiento inicial, sólo son afectados por el desplazamiento durante el desarrollo del proceso de quiebre.
- La pérdida de la energía interna de los gases se va dando a medida que el “taco” se desplaza a lo largo del pozo respectivo.

3.3 Cámaras de expansión

En el caso que las tronaduras incluyan los denominados “tacos de aire”, el efecto conseguido es un brusco descenso de la presión y disminución de la energía.

La expresión que caracteriza un proceso adiabático es la siguiente:

3.1) $PV^\gamma = constante$; siendo

- “P” la presión,
- “V” el volumen
- y “ γ ” el exponente de expansión adiabática. Esto significa que:

$$3.2) P_0 V_0^\gamma = PV^\gamma \Rightarrow P = P_0 \left(\frac{V_0}{V}\right)^\gamma$$

Multiplicando la expresión anterior por el volumen se obtiene la energía interna para un proceso adiabático.

$$3.3) EE = PV = P_0 \left(\frac{V_0}{V}\right)^\gamma V = P_0 V_0 \left(\frac{V_0}{V}\right)^{\gamma-1}$$

Esta expresión entrega la variación de la energía al variar el volumen de la cámara que contiene un gas, considerando que el proceso es adiabático y que no se realiza ningún trabajo de deformación o quiebre. Es decir, corresponde a la situación modelada de la tronadura real. Con este modelo, es posible conocer la cantidad de energía de la cual se habría dispuesto en una tronadura real, conociendo el desplazamiento de sus “tacos” en el tiempo.

En una tronadura cualquiera es opcional el uso de “tacos de aire” o cámaras de expansión. En el caso que se utilicen, los gases generados por la detonación del explosivo se expanden en los primeros instantes de la tronadura, a una velocidad que depende de la presión de los gases y coincide con la velocidad de propagación de las ondas de presión “ V_p ”. Para la “presión de

explosión” del Anfo, ésta es del orden de los 1.200 m/s; de este modo, si se tiene una cámara de expansión de 1,0 m, a los gases les tomará sólo 1,2 ms para llenarla, bajando su presión y su nivel de energía de acuerdo a las expresiones 3.2) y 3.3).

En el caso que la cámara de expansión esté inmediatamente bajo el extremo inferior de la columna de explosivo (forma en que las utiliza Minera Escondida), los gases estarán en forma inmediata en contacto con el extremo inferior de los “tacos”, pero experimentarán un rápido descenso de su presión y de su nivel de energía. En caso de que la cámara de aire se encuentre sobre el extremo superior de la columna explosiva, a los gases les tomará un tiempo muy pequeño entrar en contacto con el “taco” (1,2 ms para el ejemplo).

Una vez que los gases se ponen en contacto con el extremo inferior del “taco”, se inicia su desplazamiento generado por la retracción por compactación combinada con deslizamiento. Esto se realiza a la menor velocidad, entre la de propagación de los gases y la de propagación de la perturbación a través del material del “taco”. Pero en todo caso es del orden de unos pocos milisegundos.

En resumen y para efectos prácticos, se puede asumir que tanto el efecto de las cámaras de expansión como el del desplazamiento inicial de los “tacos”, se manifiestan al inicio del proceso de tronadura.

El tamaño de la cámara de expansión corresponde a la suma de los volúmenes dejados sin explosivo y sin “taco” al interior del pozo. Para el caso con “activadores” en $12 \frac{1}{4}$ ϕ , estos contribuyen con un volumen adicional equivalente a 0,2 m de pozo, correspondiente al volumen interior de los conos de los “activadores”. Eventualmente, estos dispositivos pueden ser llenados con explosivo antes de instalarlos. Esto se justifica en aquellos casos en los cuales se desea maximizar la producción de finos en rocas muy competentes.

Por otra parte, se vio anteriormente que el desplazamiento de los “tacos” depende de la fuerza ejercida por los gases sobre el “taco”, del ángulo de fricción del material del cual está conformado y de otros factores tales como la forma de la interfasetaco-explosivo que, de acuerdo a las mediciones de fragmentación de las tronaduras de prueba de Escondida se dan en forma aleatoria.

El desplazamiento de los “tacos” se calcula mediante iteración de acuerdo a lo explicado más adelante.

3.4 Determinación de la presión inicial del explosivo

Las tronaduras de prueba en Escondida mezclaron pozos cargados sólo con cargas de columna y otros cargados con carga de fondo y de columna.

En el primer caso, la presión corresponde directamente a la “presión de explosión” del explosivo. En el segundo caso, en el cual se emplean cargas compuestas por dos o más tipos de explosivos, la presión resultante se calcula aplicando el concepto de conservación de la energía. En este caso, la energía resultante de la mezcla de gases es igual a la suma de las energías aportada por cada explosivo. Es decir:

$$3.4) P_R V_R = \sum_{i=1}^n P_{Ci} V_{Ci} ; \text{ siendo:}$$

“ P_R ” y “ V_R ” la presión y el volumen resultante

y “ P_{Ci} ” y “ V_{Ci} ” las presiones y volúmenes de los diferentes explosivos que componen la carga.

Así la presión resultante está dada por la expresión:

$$3.5) P_R = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Ci} V_{Ci}}{\sum_{i=1}^n V_{Ci}}$$

Para el caso específico de carga de fondo “ F ” y de columna “ Col ”, la expresión queda de la siguiente forma:

$$3.6) P_R = \frac{P_F V_F + P_{Col} V_{Col}}{V_F + V_{Col}}, \text{ siendo la sección transversal la misma, esta expresión se simplifica quedando:}$$

$$3.7) P_R = \frac{P_F L_F + P_{Col} L_{Col}}{L_F + L_{Col}} \text{ donde:}$$

- “ L_F ” y “ L_{Col} ” corresponden a las longitudes de las cargas de fondo y de columna respectivamente.
- “ P_F ” y “ P_{Col} ” corresponden a las “presiones de explosión” de los explosivos que conforman las cargas de fondo y de columna respectivamente.

3.5 Determinación del desplazamiento inicial de los “tacos”

De acuerdo a los análisis desarrollados anteriormente, resulta claro que el comportamiento de los “tacos” condiciona el desempeño de las tronaduras. Debido a que en las tronaduras de prueba realizadas por Escondida se desconocía el desplazamiento inicial de los “tacos” fue necesario estimarlos en forma indirecta, a partir de los “tiempos de proceso” registrados en cada tronadura y calcular por iteración el desplazamiento de los “tacos”.

Para ello, se considera que la fuerza disponible para romper la roca en una tronadura y la rapidez con la cual avanza el quiebre de ésta, es proporcional al nivel de “energía efectiva” disponible al inicio del proceso de quiebre.

Se concluye más adelante en este capítulo, que es posible considerar que el frente de quiebre de la roca, avanza con una aceleración constante durante el proceso de fragmentación. Así, de

acuerdo con el párrafo anterior, esta aceleración es proporcional al nivel de “energía efectiva” disponible al inicio del proceso de fragmentación. El movimiento del “taco” que está controlado por el avance del frente de quiebre, se desplaza con la misma aceleración que este último.

La máxima aceleración que puede alcanzar el avance del quiebre, para un factor de carga nominal determinado, corresponde al nivel de “energía efectiva” sin ningún aumento de volumen de la cámara que contiene los gases. Para el caso de las tronaduras de prueba en Escondida, en las cuales se utiliza una cámara de aire de 1,0 m como estándar, la máxima aceleración se dará con el nivel de “energía efectiva” correspondiente al volumen de los gases expandidos para llenar dicha cámara. El nivel de “energía efectiva” obtenido por un pozo con “activador” es ligeramente menor que ese valor, ya que éste le agrega a la cámara de aire el volumen del cono equivalente a 0,2 m de longitud de cámara de aire cilíndrica de $12 \frac{1}{4} \phi$.

Para las tronaduras con “tacos” convencionales, se sabe que se produce un desplazamiento inicial de los “tacos” por ajuste a la presión de los gases. De este modo, la aceleración máxima correspondiente a un desplazamiento nulo de “tacos”, sólo tiene un valor referencial para iniciar el proceso de iteración, orientado a estimar el desplazamiento inicial de los “tacos” convencionales.

Sí en las tronaduras convencionales de alguna forma se consiguiera evitar el desplazamiento de los “tacos” por ajuste inicial a la presión, dispondría al inicio del proceso de fragmentación de una mayor cantidad de “energía efectiva” que le permitiría realizar el proceso de quiebre con una mayor aceleración. Siendo las condiciones de carguío de la sección convencional semejante a las de la sección con activadores, la aceleración del frente de quiebre de la sección convencional sin desplazamiento inicial debería ser semejante al de la sección con activadores, de la misma tronadura de prueba. Esto se debe a que al no tener desplazamiento inicial del taco, el “tiempo de proceso” y la longitud inicial del “taco” de la sección convencional de la tronadura, deberían ser los mismos de la tronadura con “activadores”. En consecuencia, al no disponer del valor de esta aceleración para la sección convencional, para efectos de cálculos, es posible reemplazar la aceleración del frente de quiebre que debería tener la tronadura convencional sin desplazamiento inicial, por la aceleración con que se desplaza el frente de la sección con activadores de la tronadura en estudio.

El desarrollo de la iteración consiste en ir calculando la longitud del “taco” (“taco” residual después del desplazamiento inicial) requerido para que el frente de quiebre lo pueda recorrer en el “tiempo de proceso” medido en la tronadura convencional analizada “ t_{PC} ”. Partiendo con la aceleración inicial “ a_0 ”, correspondiente a la aceleración del frente de quiebre sin desplazamiento inicial de los “tacos” (que se asume igual al obtenido en la tronadura con “activadores” de la misma prueba). Con el valor de la longitud del “taco” calculada, se obtiene la distancia que debió desplazarse inicialmente el “taco” para tener la longitud calculada. Con el valor de este desplazamiento se calcula en cuánto se redujo el nivel de energía respecto a la inicial y se obtiene la nueva aceleración, multiplicándola por un factor igual al cociente entre la energía inicial y la nueva. Con esta nueva aceleración se calcula la nueva longitud de “taco” requerido para sea recorrido en el “tiempo de proceso”. Luego se calcula el nuevo

desplazamiento, el nuevo factor de reducción de la energía y la nueva aceleración. El ciclo continua hasta que el cálculo converge.

El cálculo se inicia determinando cuánto recorre el frente de avance del quiebre (S1) durante el “tiempo de proceso” (t_{PC}), medido para esa tronadura convencional, con la aceleración máxima “ a_0 ” de acuerdo a la relación:

$$3.8) S_1 = \frac{1}{2} a_0 (t_{PC})^2$$

Siendo “ a_0 ” la aceleración ideal de la tronadura convencional, sin desplazamiento inicial de los “tacos” y considerada igual a la obtenida a la de la tronadura con “activadores que se obtiene como:

$$3.9) a_0 = \frac{2T_A}{(t_{PA})^2}$$

- Siendo “ T_A ” la longitud del taco de la sección con activadores y
- “ t_{PA} ” el tiempo de proceso medido en la tronadura de la sección con activadores.

El valor de “ S_1 ” corresponde al “taco”, residual al desplazamiento inicial del taco. Así el desplazamiento “ dz_1 ” será igual a la longitud del “taco” convencional “ T_C ” menos la longitud del “taco” residual “ S_1 ”. Es decir:

$$3.10) dz_1 = T_c - S_1$$

Debido al desplazamiento sufrido por el taco, la “energía efectiva” al inicio del proceso de quiebre “ E_1 ” es menor que la ideal considerada “ E_0 ”, razón por la cual la aceleración “ a_0 ” ideal inicial debe ser reducida a “ a_1 ” de acuerdo a la relación:

$$3.11) a_1 = a_0 \left(\frac{E_1}{E_0} \right) \text{ siendo:}$$

- “ E_0 ” la “energía efectiva” correspondiente al desplazamiento inicial nulo.
- “ E_1 ” la “energía efectiva” correspondiente a la primera iteración.

$$3.12) E_1 = P_0 V_0 \left(\frac{L_0}{L_1} \right)^{\gamma-1} \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^{\gamma-1} \text{ Siendo:}$$

- “ L_0 ” la longitud de la carga “ L_1 ” la longitud de la carga más la longitud de la cámara de aire.
- “ L_2 ” la longitud de la carga más la de la cámara de aire y más el desplazamiento del taco “ dz_1 ”.

Por su parte “ E_0 ” es entregado por:

$$3.13) E_0 = P_0 V_0 \left(\frac{L_0}{L_1} \right)^{\gamma-1}$$

En consecuencia:

$$3.14) a_1 = a_0 \left(\frac{E_1}{E_0} \right) = a_0 \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^{\gamma-1}$$

Con el valor de “a₁” se calcula el nuevo “taco” residual “S₂” como:

$$3.15) S_2 = \frac{1}{2} a_1 (t_{PC})^2$$

Con el valor de “S₂” se determina la aceleración “a₂” como:

$$3.16) a_2 = a_1 \left(\frac{L_2}{L_3} \right)^{\gamma-1}; \text{ siendo “L}_3\text{”}:$$

$$3.17) L_3 = L_1 + (dz_2) = L_1 + (T_c - S_2)$$

Para las diferentes iteraciones se tiene que:

$$3.18) \boxed{a_i = a_{(i-1)} \left(\frac{L_i}{L_{(i+1)}} \right)^{\gamma-1}}$$

Para la primera iteración (i=0) “a₀” corresponde a la aceleración del avance del quiebre en la tronadura con “activadores” de la misma prueba.

$$3.19) \boxed{S_i = \frac{1}{2} a_{(i-1)} (t_{PC})^2}$$

Siendo “S₁” el “taco” residual, obtenido con aceleración igual a “a₀”

$$3.20) \boxed{L_i = L_1 + T_c - S_{(i-1)}}$$

Siendo “L₁” igual al largo de la carga más el largo de la cámara de aire respectiva.

3.6 Desplazamiento de los “tacos” durante el proceso de quiebre.

En el capítulo 2 se vio que los “tacos” de la tronaduras convencionales sufren un desplazamiento inicial prácticamente instantáneo, para ajustarse a la presión de los gases, y luego un desplazamiento continuo durante el proceso de fragmentación. En las tronaduras con “activadores” los “tacos” sólo experimentan un desplazamiento continuo, durante el proceso de quiebre.

Una forma de obtener el avance del quiebre en el tiempo es medirlo experimentalmente. Estas mediciones pueden ser obtenidas por medio de cables “TDR” cementados, colocados en perforaciones paralelas a una distancia igual al diámetro de perforación, medida desde la superficie del pozo. Este sistema permite registrar dinámicamente la longitud del cable en las posiciones en las cuales va siendo cortado al irse moliendo o quebrando la roca por el efecto directo de la presión de los gases, ya que a esa distancia del pozo cargado, el cable queda dentro de la zona de generación de polvo.

En esta oportunidad no se contó con ningún tipo de mediciones del desplazamiento de los “tacos”, razón por lo cual su obtención se realizó en forma analítica-conceptual.

En una tronadura cualquiera, la intensidad de la fragmentación se distribuye radialmente hacia la cara libre, partiendo con su máxima intensidad en el proceso de fragmentación por compresión que genera polvo alrededor de los pozos. Continúa alejándose de los pozos con el proceso de fragmentación combinado por flexión, corte y tracción, al mismo tiempo que la intensidad de la fragmentación va disminuyendo hasta alcanzar la superficie. La generación de polvo se mantiene mientras la presión de los gases se mantenga sobre la resistencia a la compresión de la roca. El tiempo en el cual la presión se iguala a la resistencia a la compresión de la roca, depende de las características de cada tronadura. En la Figura 11 se esquematiza con una línea azul vertical el instante en que la presión desciende hasta alcanzar la resistencia a la compresión de la roca. Desde ese punto en adelante, sólo se da el proceso de fragmentación combinado.

Debido a que el proceso de generación de polvo consume una gran cantidad de energía, en forma local alrededor de los pozos, el proceso de fragmentación combinado demora en empezar, la velocidad de avance del quiebre empieza lento (Ver línea curva en Figura 11). Una vez que termina la generación de polvo (marcado con una línea azul) el proceso combinado se intensifica, aumentando la pendiente de la velocidad de avance del frente de quiebre. Debido a ello la energía disponible y la velocidad del frente de quiebre se empiezan a reducir generando un punto de inflexión en la curva. Desde allí en adelante la pendiente de la velocidad sigue disminuyendo hasta terminar el proceso de fragmentación.

En la Figura 11 la línea recta roja corresponde a una aceleración constante ajustada a la curva de velocidad descrita. Se puede ver que esta línea entrega una buena aproximación para la curva de velocidades. El uso de la recta de aceleración constante en lugar de la curva de distribución de velocidades, redonda sólo en que la distribución de la “energía efectiva” a través de “tiempo de proceso” se altera. Sin embargo, las “energías efectivas totales” son iguales para ambas trayectorias.

La aceleración, que da origen a la línea recta, puede ser obtenida a partir de la distancia “D” que debe recorrer el quiebre para llegar a la superficie y del tiempo “Tp” que le toma hacerlo. La distancia “D” corresponde a la separación existente entre el extremo inferior y superior del “taco”, al inicio del proceso. El tiempo “Tp” corresponde al “tiempo de proceso”, entregado por los registros de las tronaduras con cámaras de alta velocidad, para las condiciones específicas de la prueba. De este modo, la aceleración “a” está dada por la expresión

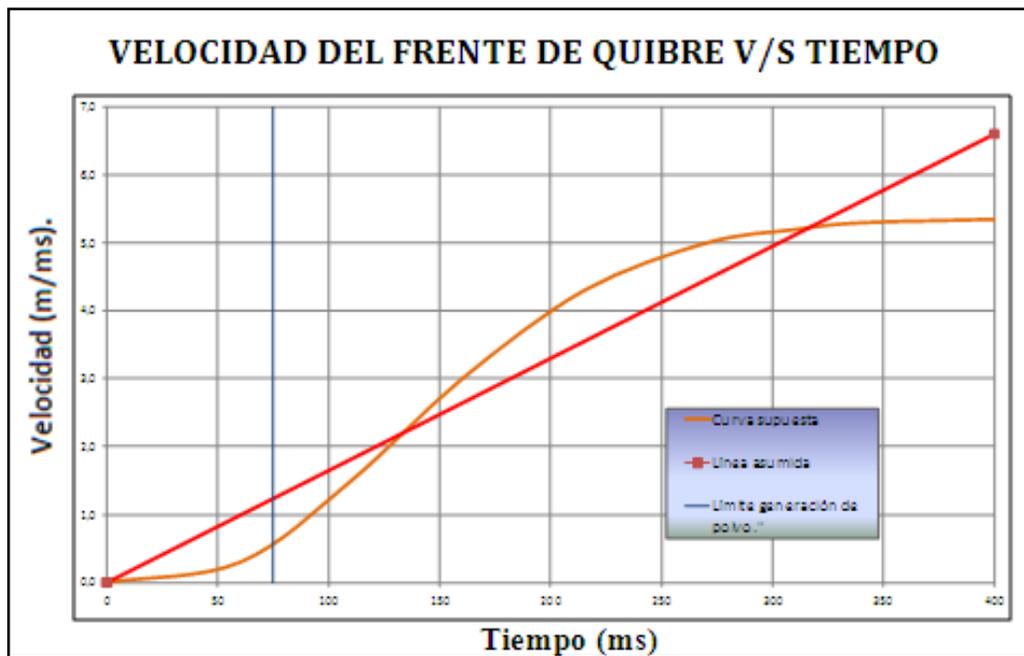


Figura 11. Esquema de la distribución de velocidades de avance del quiebre.

3.21)

$$a = \frac{2D}{T^2}$$

La distancia “D” para las tronaduras convencionales, corresponde a la longitud de los “tacos” menos el desplazamiento que éstos experimentan. Para las tronaduras con “activadores”, corresponde directamente a la longitud de los “tacos”.

De acuerdo a este análisis, no es posible el avance del quiebre con velocidad constante, ya que requeriría de una aceleración instantánea al inicio del proceso, lo cual no tiene explicación física. Por esta razón, en los análisis posteriores se considerará que una aceleración constante para el avance del quiebre es una aproximación adecuada al proceso real.

3.7 “Energía efectiva” vs tiempo.

La determinación de esta función es básica para poder evaluar el comportamiento de las tronaduras por medio de los parámetros “energía efectiva total” y los “factores de efectividad” de las tronaduras

La expresión de la “energía efectiva”, al ocupar los gases un volumen “V” en un proceso adiabático y sin que realice trabajo (cámara indeformable), está dada por la expresión 3.3), que puede ser reformulada como:

$$3.22) EE = P_{0e} V_{0e} \left(\frac{V_{0e}}{V} \right)^{\gamma-1},$$

siendo “P_{0e}” la presión posterior a la expansión inicial de los gases para ocupar las eventuales cámaras de aire más el volumen liberado por el desplazamiento inicial de los “tacos”, y “V_{0e}” el volumen correspondiente.

El volumen “V” en un instante cualquiera en función del tiempo, está dado por la expresión:

$$3.23) V = V_{0e} + A \frac{1}{2} at^2; \text{ siendo}$$

- “a” la aceleración del avance del quiebre, dada por la expresión 3.21),
- “t” la variable tiempo, desde cero hasta el “tiempo de proceso” y
- “A” la sección transversal de los pozos. En el caso que los volúmenes estén expresados en lt, “A” debe ser expresada “lt/m”.

La aceleración constante “a” con la cual se considera que se desplaza el taco, se determina suponiendo que la distancia que éste recorre durante el “tiempo de proceso” es igual a la longitud del taco. En el caso de las tronaduras convencionales, en las cuales los “tacos” sufren un desplazamiento en su ajuste inicial a la presión de los gases, la longitud a ser considerada es la longitud inicial del “taco” menos este desplazamiento.

El “tiempo de proceso” es entregado por los registros de las imágenes de las tronaduras de prueba, obtenidas con cámaras de alta velocidad. De este modo, la expresión de la “energía efectiva” en función del tiempo queda de la forma siguiente:

$$3.24) EE_t = P_{0e} V_{0e} \left(\frac{V_{0e}}{V_{0e} + A \frac{1}{2} at^2} \right)^{\gamma-1}$$

Esta expresión entrega la energía en cada instante, en el supuesto que sólo hay desplazamiento del “taco” y que no se realiza trabajo de deformación ni de quiebre. Corresponde a la situación considerada por el modelo (cámara indeformable cerrada en un extremo por un taco).

Para referirla a las condiciones iniciales de presión y volumen (P₀ y V₀), correspondientes a la “presión de explosión” del explosivo y al volumen ocupado por éste antes de su detonación, se tiene la relación:

$$3.25) P_{0e}V_{0e} = P_0V_0 \left(\frac{V_0}{V_{0e}}\right)^{\gamma-1}.$$

De este modo, la expresión de la energía en función del tiempo, referida a las condiciones iniciales, queda como:

$$3.26) \quad EE_t = P_0V_0 \left(\frac{V_0}{V_{0e}}\right)^{\gamma-1} \left(\frac{V_{0e}}{V_{0e} + A\frac{1}{2}at^2}\right)^{\gamma-1}$$

Con esta expresión es posible obtener la energía del explosivo disponible en el tiempo para realizar trabajo, a partir de la geometría de las cargas, del explosivo empleado y de las mediciones de los “tiempos de proceso”, obtenidos a través de registros de imágenes de las tronaduras con cámaras de alta velocidad. Esta herramienta permite determinar el desempeño de cualquier cambio introducido a una tronadura de prueba, respecto a un caso base conocido, a condición de que se conozca la forma en que se desplazan los “tacos” en el tiempo.

En la expresión 3.26) el producto “ P_0V_0 ” corresponde a la energía aportada por el explosivo en cada pozo. Es posible expresar la “energía efectiva” en el tiempo de diferentes maneras. Por ejemplo, referida al total de la tronadura, reemplazando el volumen “ V_0 ” por la sumatoria de los volúmenes de las cargas de cada pozo. La forma más práctica de expresar la “energía efectiva” en función del tiempo es hacerlo en grs/ton, reemplazando el producto “ P_0V_0 ” por el factor de carga “FC” correspondiente a cada tronadura. Ya que corresponde a la forma habitual de expresar la energía aportada por el explosivo en las tronaduras. La expresión 3.27) siguiente entrega la “energía efectiva” en el tiempo en grs/ton.

$$3.27) \quad EE_t = FC \left(\frac{V_0}{V_{0e}}\right)^{\gamma-1} \left(\frac{V_{0e}}{V_{0e} + A\frac{1}{2}at^2}\right)^{\gamma-1}$$

3.8 “Energía efectiva total” durante el proceso de quiebre.

La expresión 3.26) representa la energía interna instantánea contenida en los gases, o “energía efectiva” en cada instante “t” del proceso de tronadura, entregada por el modelo de paredes indeformables planteado en este trabajo. La “energía efectiva total” disponible por una tronadura para efectuar trabajo, corresponde al área bajo esta curva ($EE_t = f(t)$), ya que en este modelo la energía no se consume por trabajo sino que permanece disponible.

El área bajo la curva puede expresarse como el producto entre el valor promedio de la “energía efectiva” y el “tiempo de proceso”.

El valor de la “energía efectiva total” dividida por la energía entregada por el explosivo (P_0V_0), corresponde al “factor de efectividad”. Es decir, al factor que multiplicado por la “energía nominal” del pozo, referida a la tonelada de roca o a la tronadura completa, entrega el valor de la “energía efectiva” disponible.

Debido a que no se dispone de una función integral de la expresión de la “energía efectiva” vs tiempo, el cálculo de la “energía efectiva total” se realizó en forma numérica para las tres tronaduras que disponen de medición del “tiempo de proceso” (3050 32, 2990 y 3020), tanto con pozos convencionales (Conv) y con “activadores” (CC). Para este cálculo se utilizaron incrementos de tiempos de 0,01seg. Por otra parte, debido a que los pozos convencionales de las tronaduras recién mencionadas sufren desplazamientos, el “taco” residual (“taco” inicial menos el desplazamiento) que debe desplazarse durante el “tiempo de proceso” es más corto. Como consecuencia de ello, la aceleración también disminuye. Esto significa que para calcular la variación de la “energía efectiva” se deben utilizar las aceleraciones correspondientes a los valores de convergencia obtenidos por iteración .

En aquellos casos en los cuales se dispone de mediciones del desplazamiento de los “tacos” en el tiempo sus valores se introducen directamente al modelo. Para el caso de las tronaduras de Escondida, no se dispuso de esta información siendo necesario calcularla en forma indirecta.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE LAS TRONADURAS REALIZADAS POR ESCONDIDA

El presente capítulo evalúa el desempeño de las tronaduras con “activadores” realizadas por Minera Escondida, mediante el empleo de las herramientas de análisis desarrolladas en los capítulos anteriores. Para ello, se realizó un análisis comparativo entre los resultados de las secciones tronadas en forma convencional y los de las secciones que utilizaron “activadores”, de las tronaduras de prueba realizadas por esta empresa.

4.1 Información entregada por Escondida.

Las pruebas realizadas por Escondida en el mismo tipo de roca fueron 5. Dos de ellas incompletas, debido a que falló la grabación de las tronaduras, quedando finalmente sólo 3 pruebas utilizables para realizar correlaciones directas con el tiempo. Las pruebas se realizaron en las tronaduras 2990 N1 M11, 3050 N3 M32, la 3020 N° 3 #5, 3050 N3 M33 y la 3065 N3 M45. Cada tronadura de prueba fue dividida en dos secciones, según una línea normal a la cara libre. Una sección fue cargada en forma convencional y la otra utilizando “activadores”. Los pozos tronados en forma convencional tuvieron como objetivo servir como base en la evaluación del desempeño de las tronaduras con “activadores”.

La medición de los “tiempos de proceso” se realizó por medio de grabaciones con cámaras de alta velocidad. Para facilitar el registro del inicio de la detonación del explosivo, los pozos controlados fueron premunidos con flashes de cordón detonante. Las mediciones de los “tiempos de proceso” fueron tomadas sobre una muestra de pozos entre 6 y 19 unidades.

La información recibida fue entregada en cinco archivos Power Point. Dos de ellos sin “tiempos de proceso”. De las tres tronaduras restantes, dos contienen “tiempos de proceso”, curvas de distribución de tamaño y desempeño horario de carguío de los camiones. En la última tronadura (Banco 3020 N° 3 #5) no se midió la fragmentación ni se registró la capacidad horaria de las palas correspondientes al material generado por esta tronadura.

A continuación, se entregan los antecedentes de las cinco tronaduras de prueba realizadas por Minera Escondida. Las tres primeras corresponden a las tronaduras con registros de tiempos de retención (“tiempos de proceso”). Las dos últimas corresponden a las tronaduras sin registros de tiempos de retención (de proceso).

4.1.1 Tronadura banco 2990 n1 malla 11

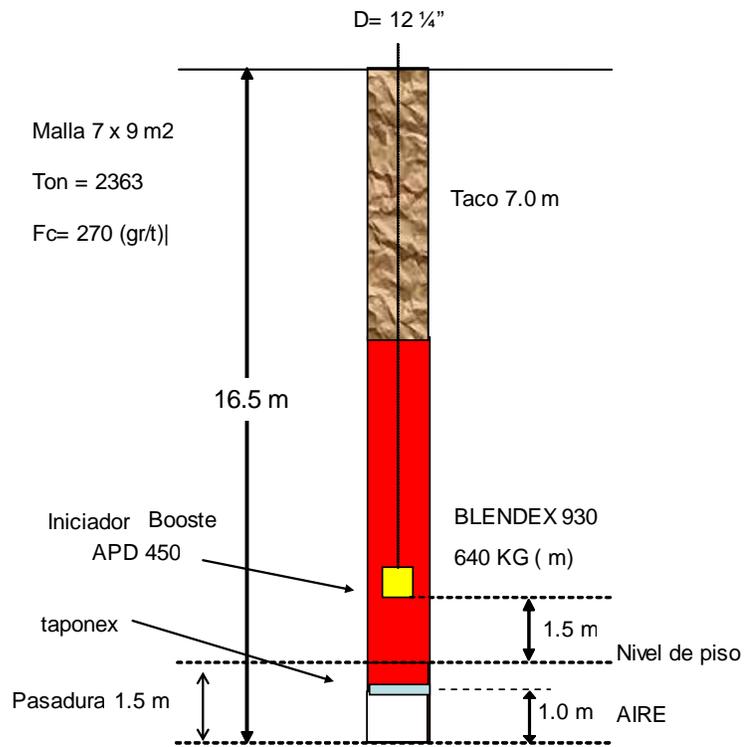
BANCO 2990_N1_MALLA 11	
NROS POZOS	= 107
TIPO EXPLOSIVO	= BLENDX 930
EXPLOSIVO	= 66310 Kgs



Asistencia Técnica

Enaex Escondida

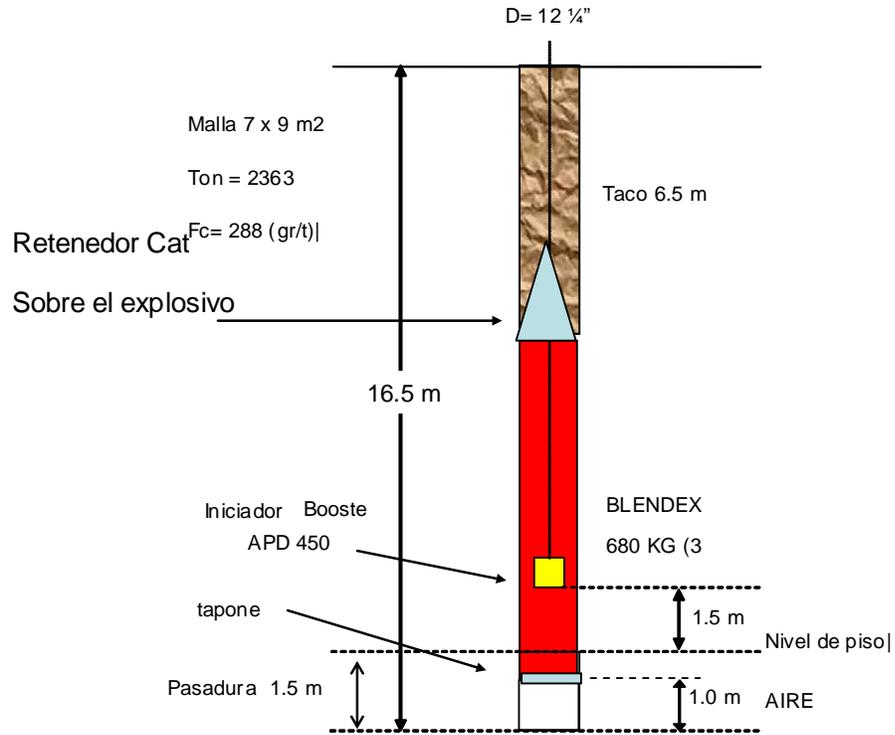
POZOS CON CARGA NORMAL





Asistencia Técnica

Enaex Escondida **POZOS CON CARGA CON RETENEDOR**

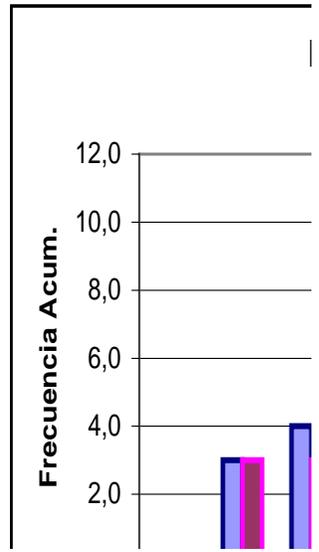


Con Retenedor_CAT

Número Pozo	Tiempo Retención
21	158
5	160
4	200
22	212
3	316
31	392
30	436
58	568
59	572
47	650

Sin Retenedor_CAT

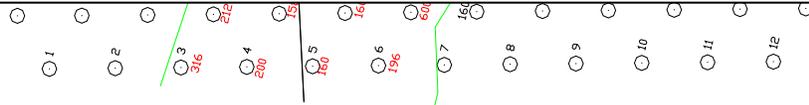
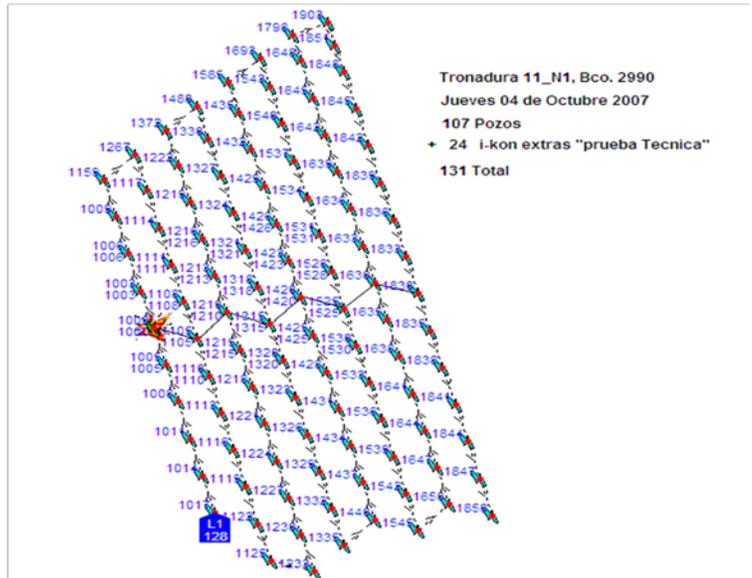
Número Pozo	Tiempo Retención
20	160
19	170
6	196
284	284
32	432
33	432
536	536





Asistencia Técnica
Enaex Escondida

SECUENCIA DE DISPARO



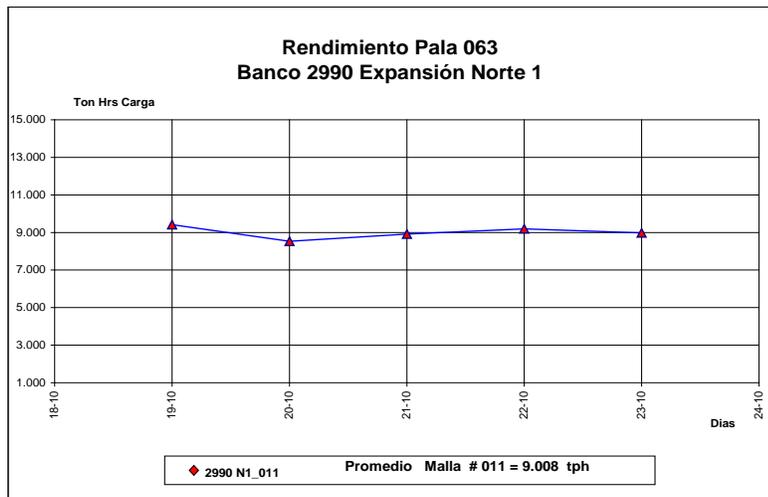
Asistencia Técnica
Enaex Escondida

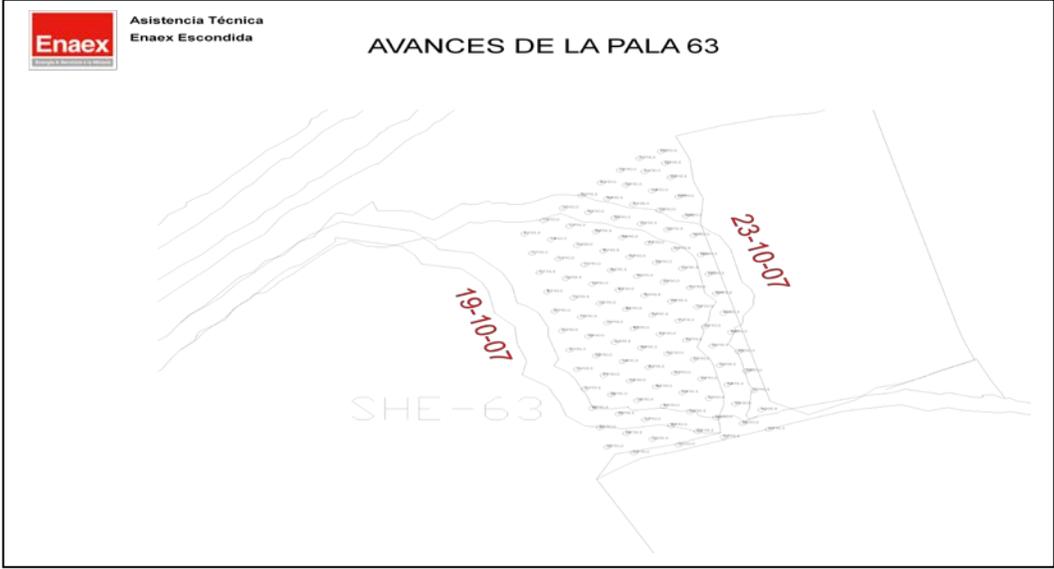
RENDIMIENTO PALA 63

Tron	Fecha	N° Pala	Día	Noche	Media
011	19-10-2007	63	8.938	9.889	9.414
011	20-10-2007	63	8.534		8.534
011	21-10-2007	63		8.920	8.920
011	22-10-2007	63	8.148	10.241	9.195
011	23-10-2007	63	9.702	8.255	8.979
					9.008

Desviación Malla 011

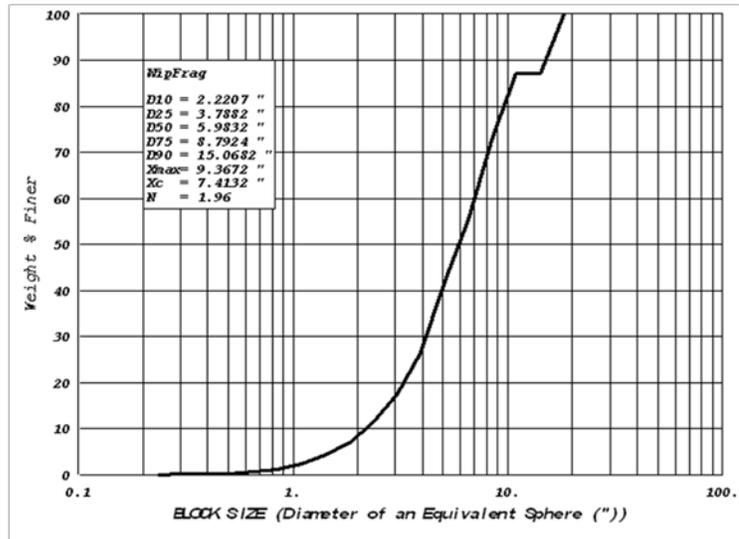
329







FRAGMENTACIÓN CON RETENEDOR CAT



FRAGMENTACIÓN SIN RETENEDOR CAT



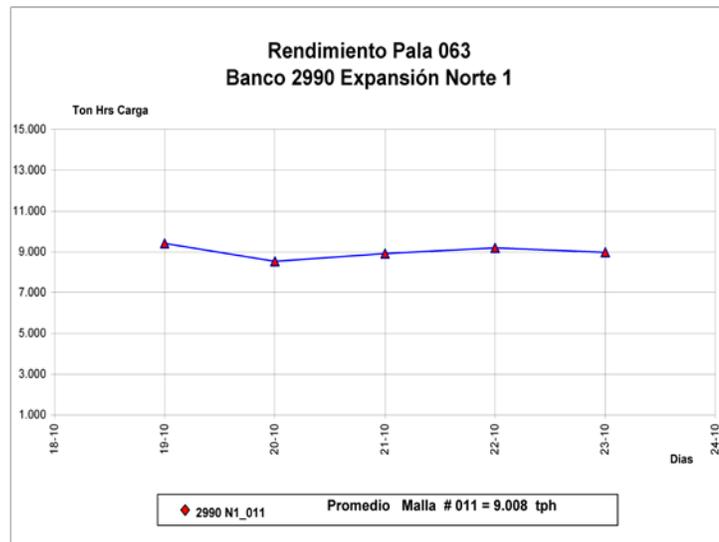


RENDIMIENTO PALA 63

Tron	Fecha	N° Pala	Día	Noche	Media
011	19-10-2007	63	8.938	9.889	9.414
011	20-10-2007	63	8.534		8.534
011	21-10-2007	63		8.920	8.920
011	22-10-2007	63	8.148	10.241	9.195
011	23-10-2007	63	9.702	8.255	8.979

Desviación Malla 011

329



CONCLUSIONES

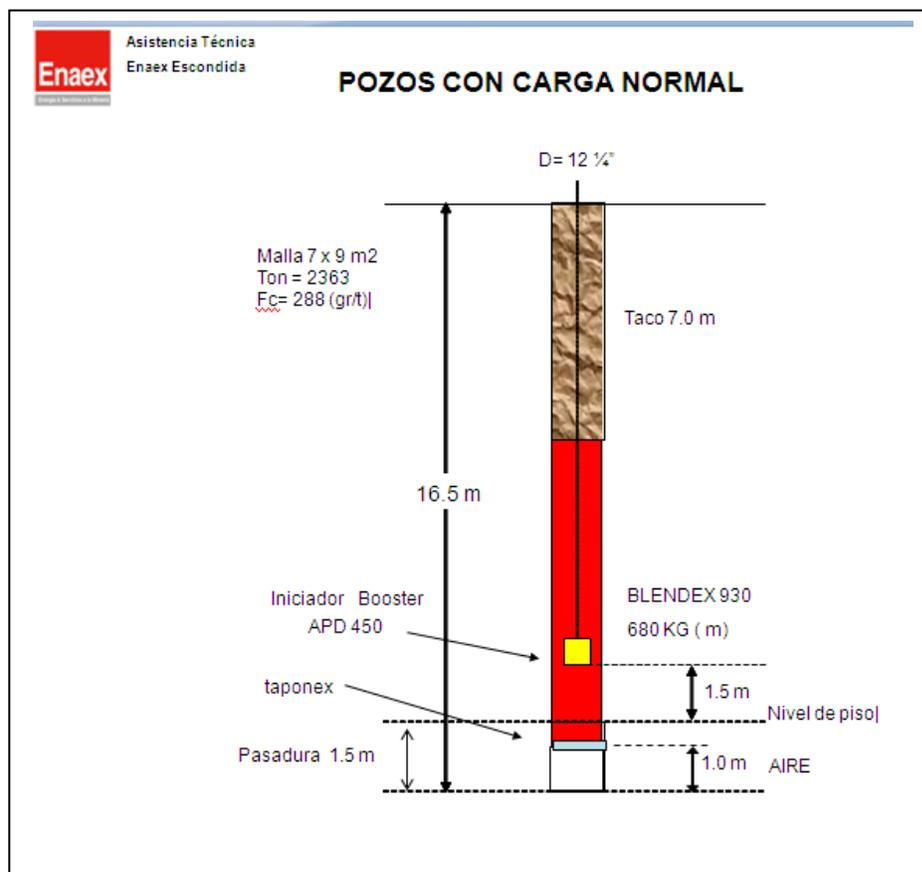
•Se aprecia una mejora en la fragmentación en la zona con retenedores.

Los rendimientos se mantienen dentro del rango normal de trabajo.

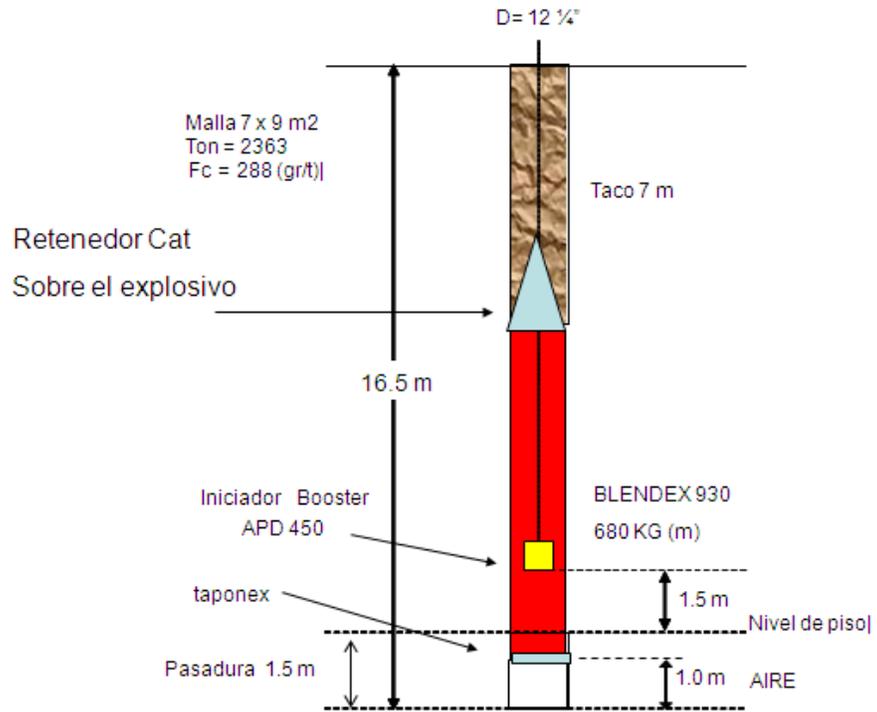
4.1.2 Tronadura banco 3050 n3 malla 32.

BANCO 3050_N3_MALLA 32

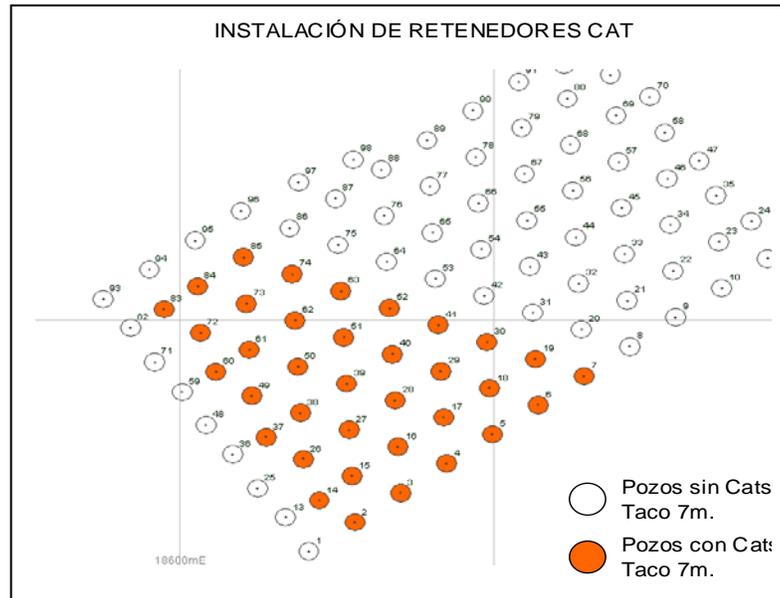
NROS POZOS	= 78
TIPO EXPLOSIVO	= BLENDIX 930
EXPLOSIVO	= 53040 <u>Kgs</u>
MATERIAL TRONADO	= 184314 TON
FACTOR DE CARGA	= 288 <u>grs/ton</u>



POZOS CON CARGA CON RETENEDOR



INSTALACIÓN DE RETENEDORES CAT

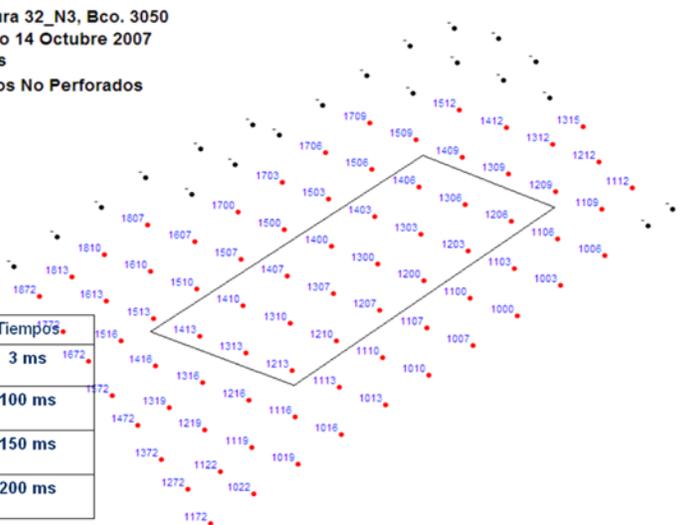


Tiempos de Salida

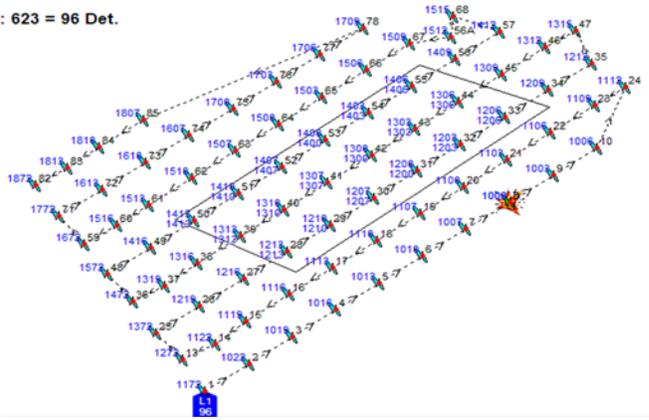
Tronadura 32_N3, Bco. 3050
Domingo 14 Octubre 2007
77 Pozos

• Pozos No Perforados

32_3050_N3	Tiempos
Entre Pozos	3 ms
Entre Filas	100 ms
Contorno	150 ms
Ultimo	200 ms



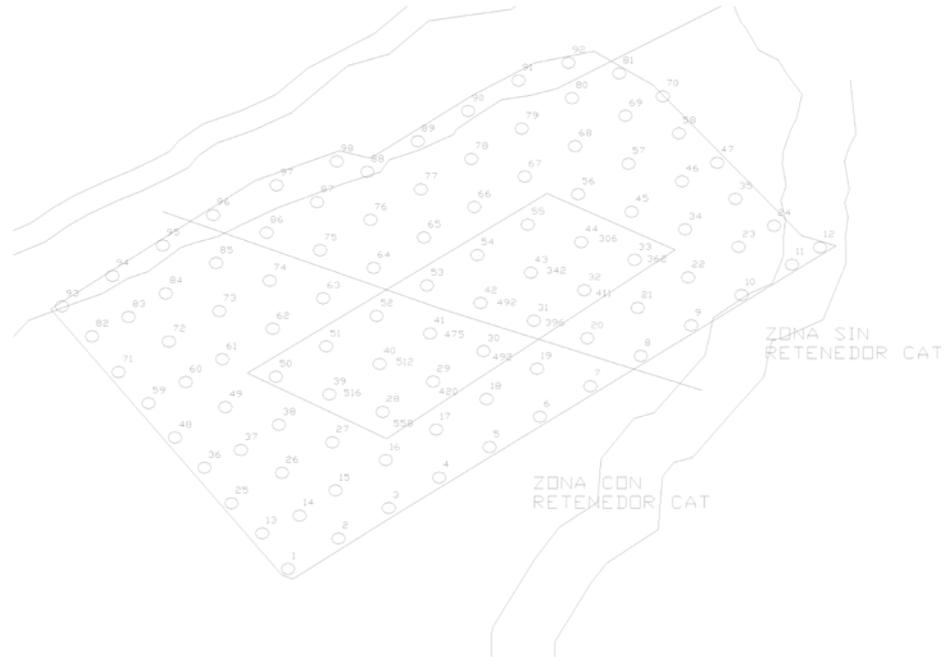
Tronadura 32_N3, Bco. 3050
Domingo 14 Octubre 2007
78 Pozos
18 ikon extra "Prueba Tecnica"
Logger 1: 623 = 96 Det.





Asistencia Técnica
Enaex Escondida

TIEMPOS DE RETENCIÓN



Asistencia Técnica
Enaex Escondida

RESUMEN ESTADISTICO

Con Retenedor_CAT

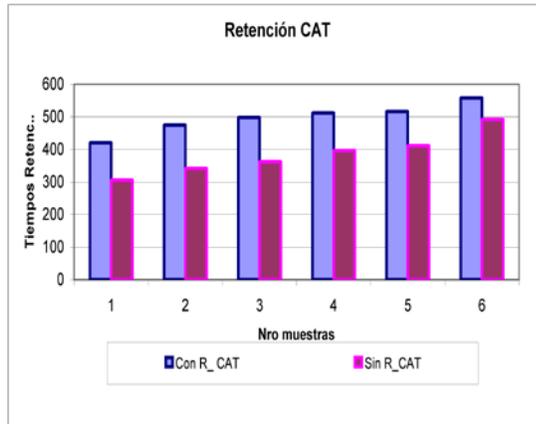
Número Pozo	Tiempo Retención
29	420
41	475
30	498
40	512
39	516
28	558

Max	558,0
Min	420,0
Media	496,5

Sin Retenedor_CAT

Número Pozo	Tiempo Retención
44	306
43	342
33	362
31	396
32	411
42	492

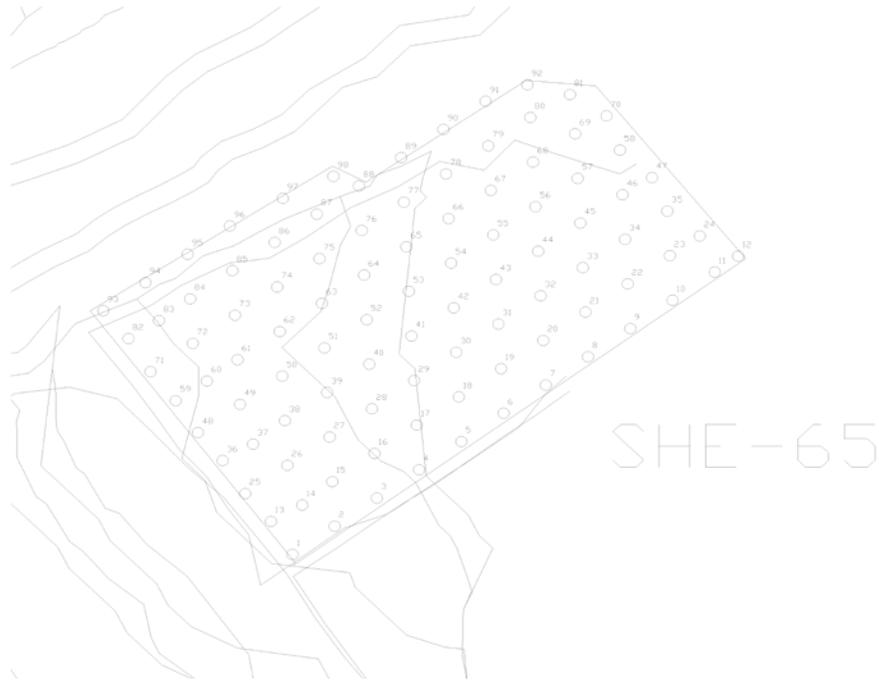
Max	492,0
Min	306,0
Media	384,8





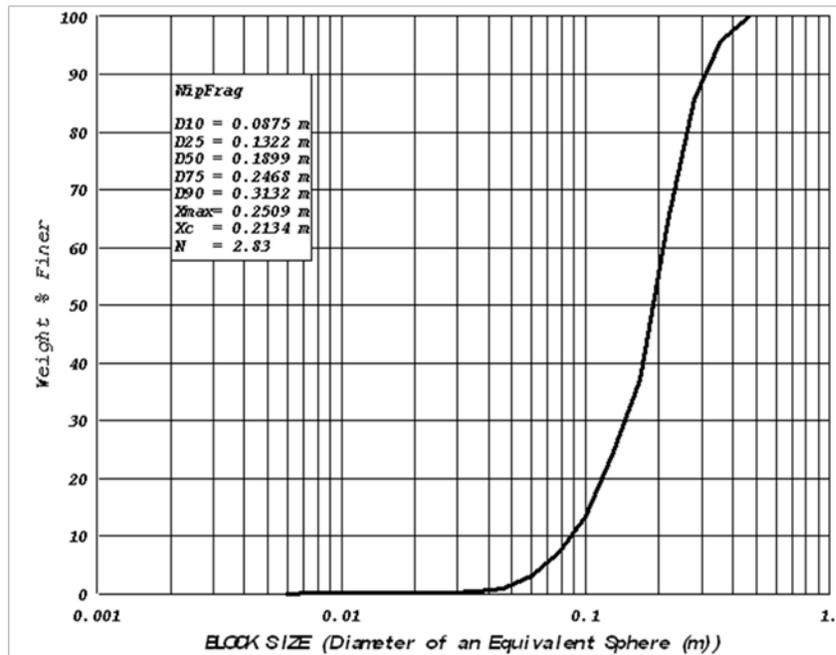
Asistencia Técnica
Enaex Escondida

AVANCES DE LA PALA 63



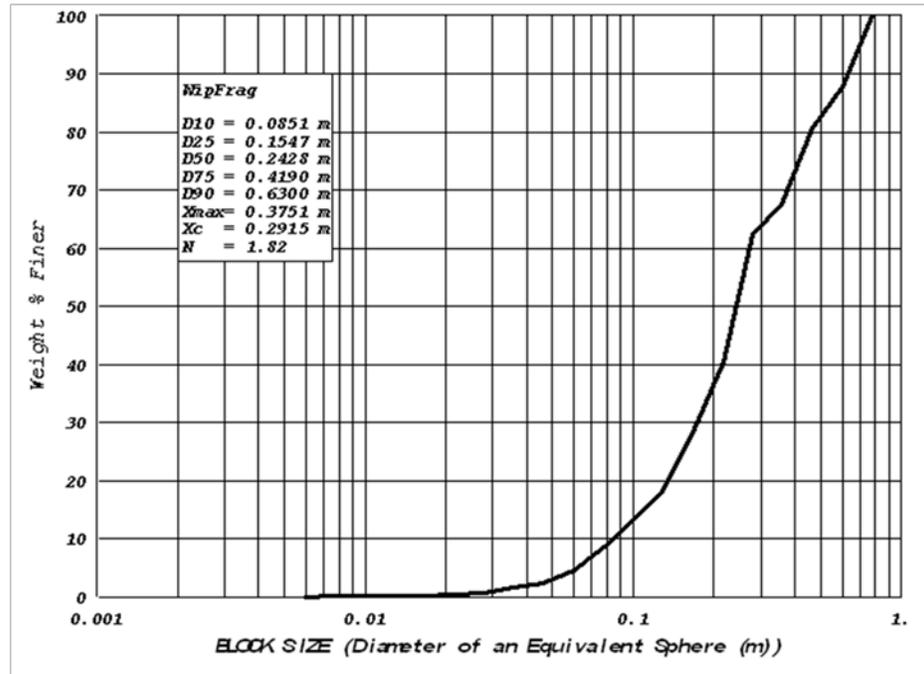
Asistencia Técnica
Enaex Escondida

FRAGMENTACIÓN CON RETENEDOR CAT





FRAGMENTACIÓN SIN RETENEDOR CAT



RENDIMIENTO PALA 65

Rendimiento Palas Banco 3050 Norte 3

Tron	Fecha	N° Pala	Día	Noche	Media
032	18-10-2007	65	9.378	11.705	10.542
032	19-10-2007	65	9.603	8.843	9.223
032	20-10-2007	65	7.812	8.431	8.122
032	21-10-2007	65	9.089	8.939	9.014
033	22-10-2007	65	8.417	8.918	8.668
033	23-10-2007	65	11.146	9.654	10.400
033	24-10-2007	65	12.560	11.535	12.048
033	25-10-2007	65			
033		65			10.372

Desviación Malla 032

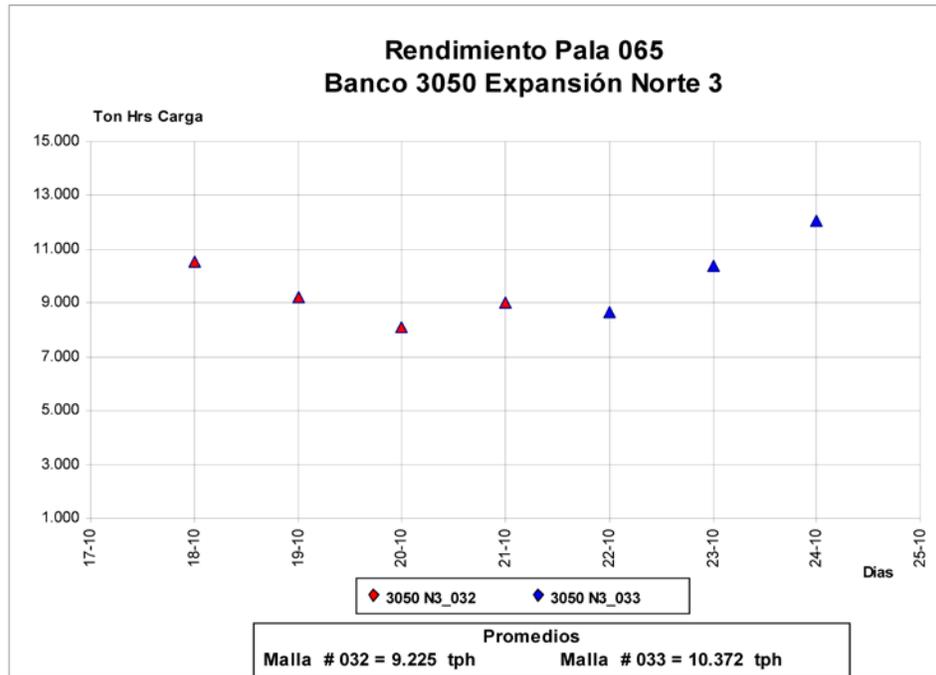
999

Desviación Malla 033

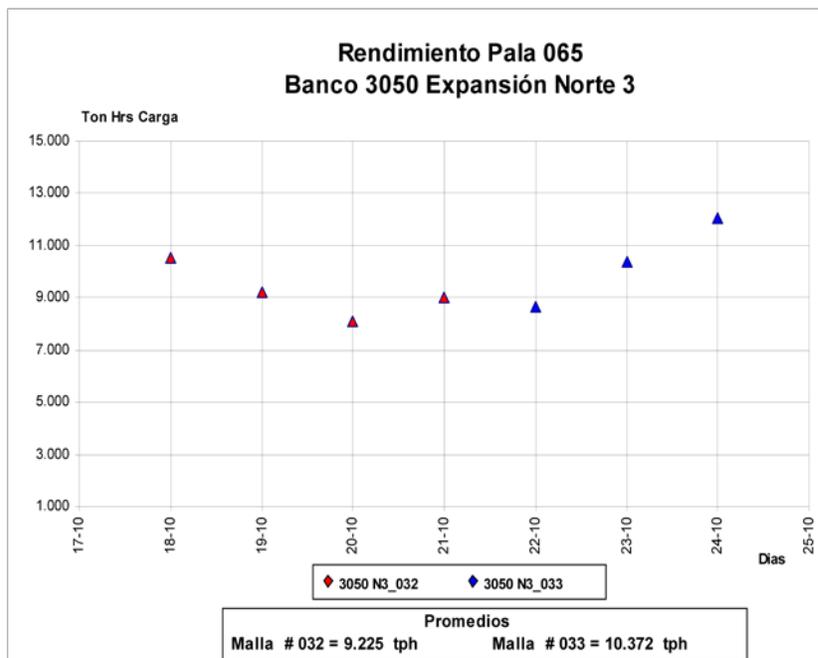
1.690



Asistencia Técnica
Enaex Escondida

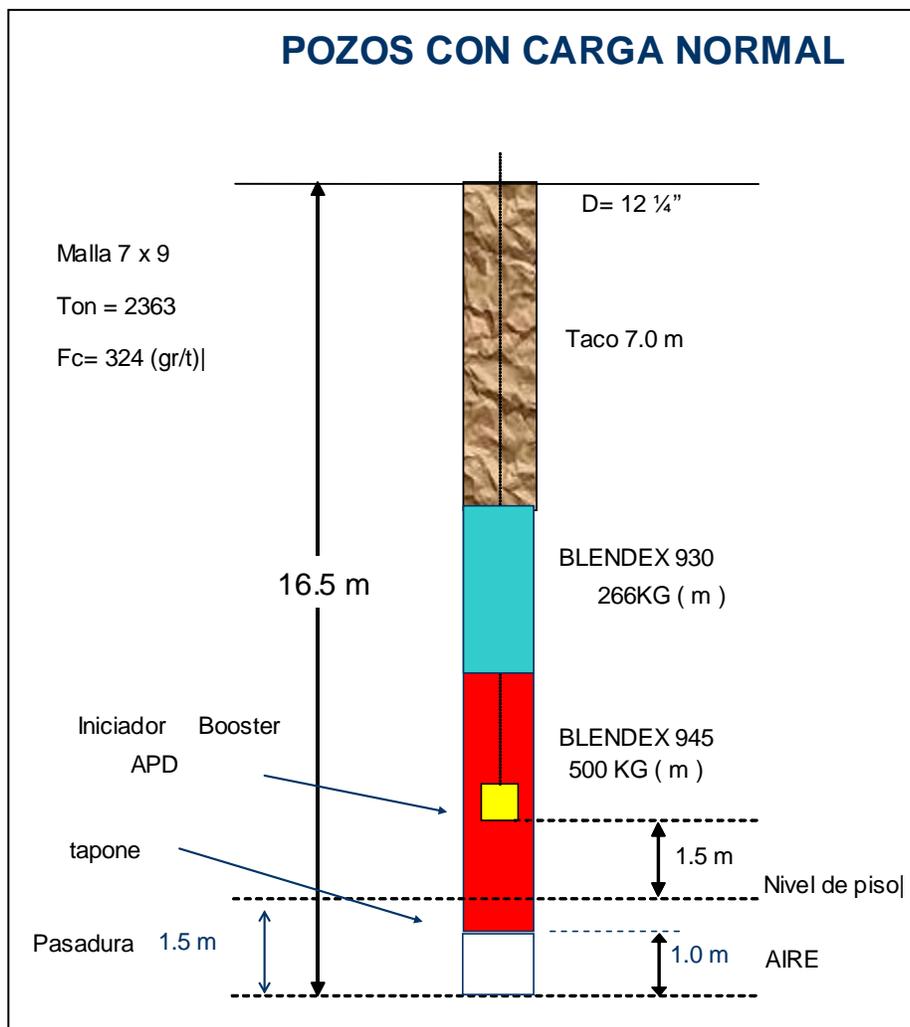


Asistencia Técnica
Enaex Escondida

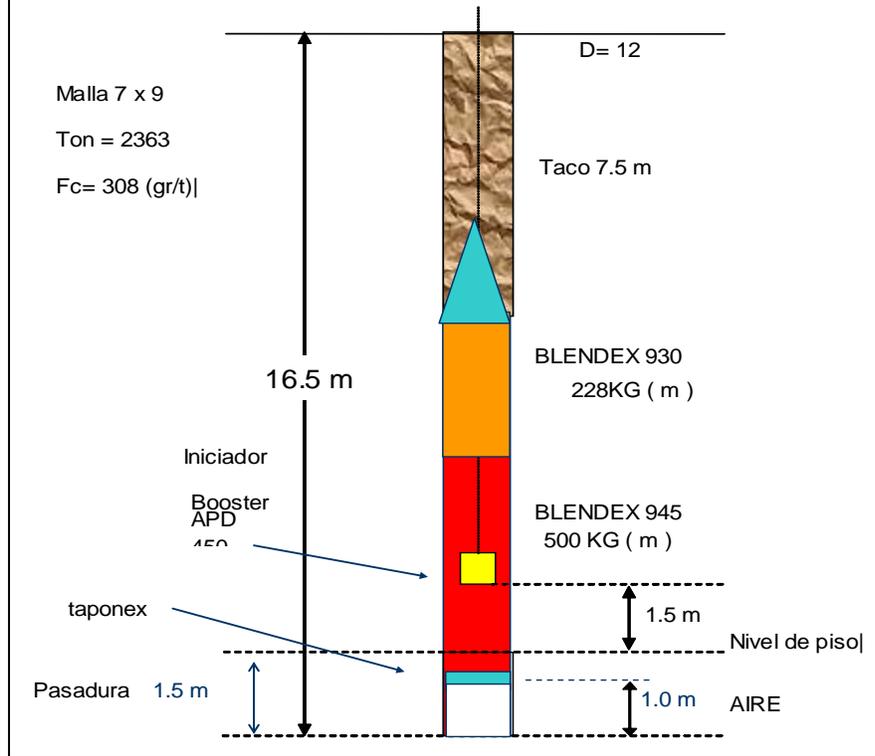


4.1.3 Tronadura banco 3020 n° 3 #5.

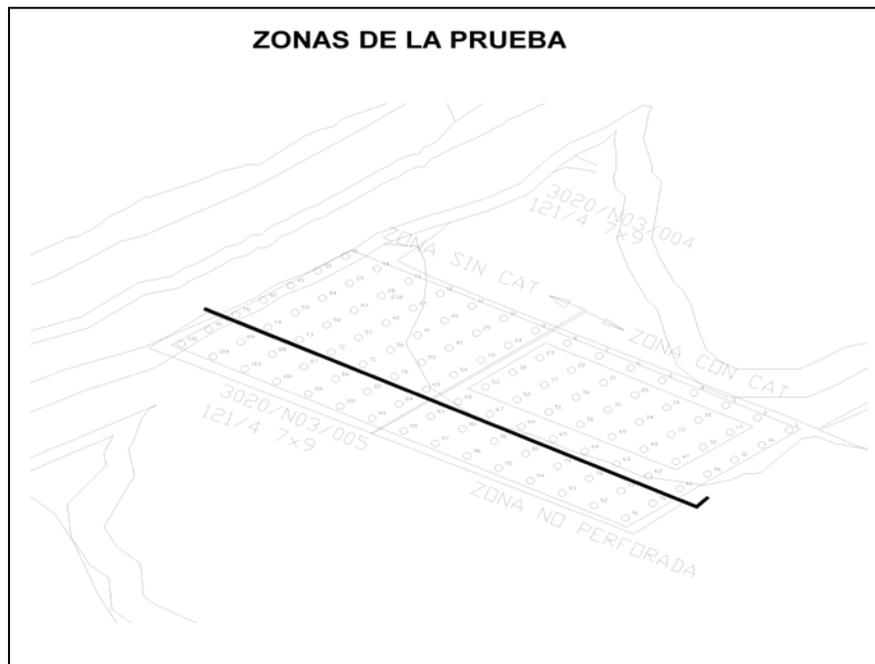
NROS POZOS	= 70
TIPO EXPLOSIVO	= BLENDIX 930 BLENDIX 945
EXPLOSIVO	= 25074 26500 Kgs
MATERIAL TRONADO	= 155183 TON
FACTOR DE CARGA	= 332.3 grs/ton



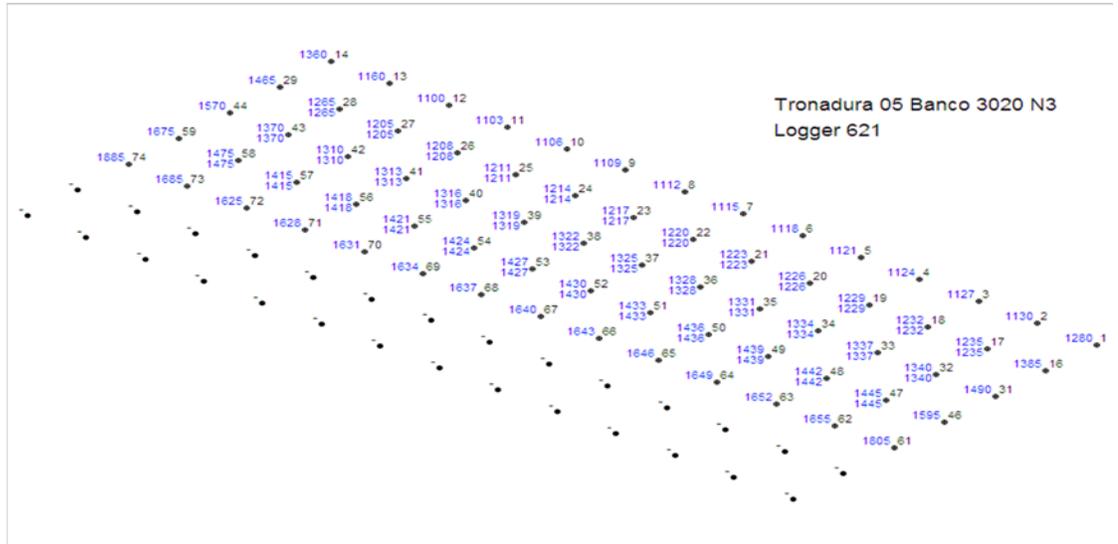
POZOS CON RETENEDORES



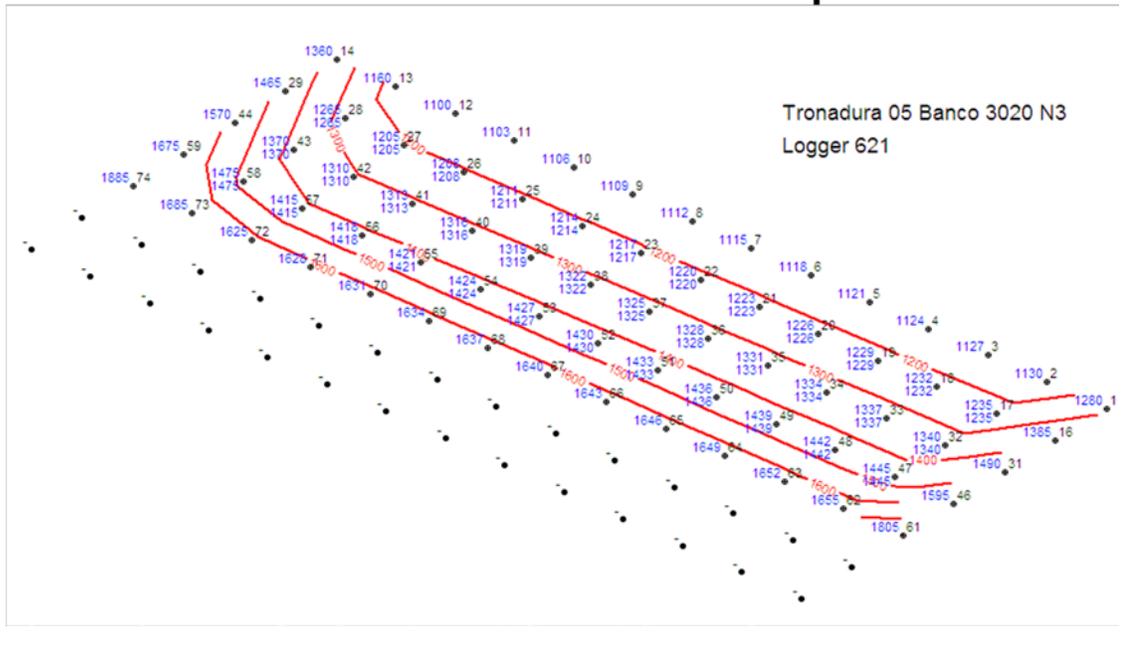
ZONAS DE LA PRUEBA



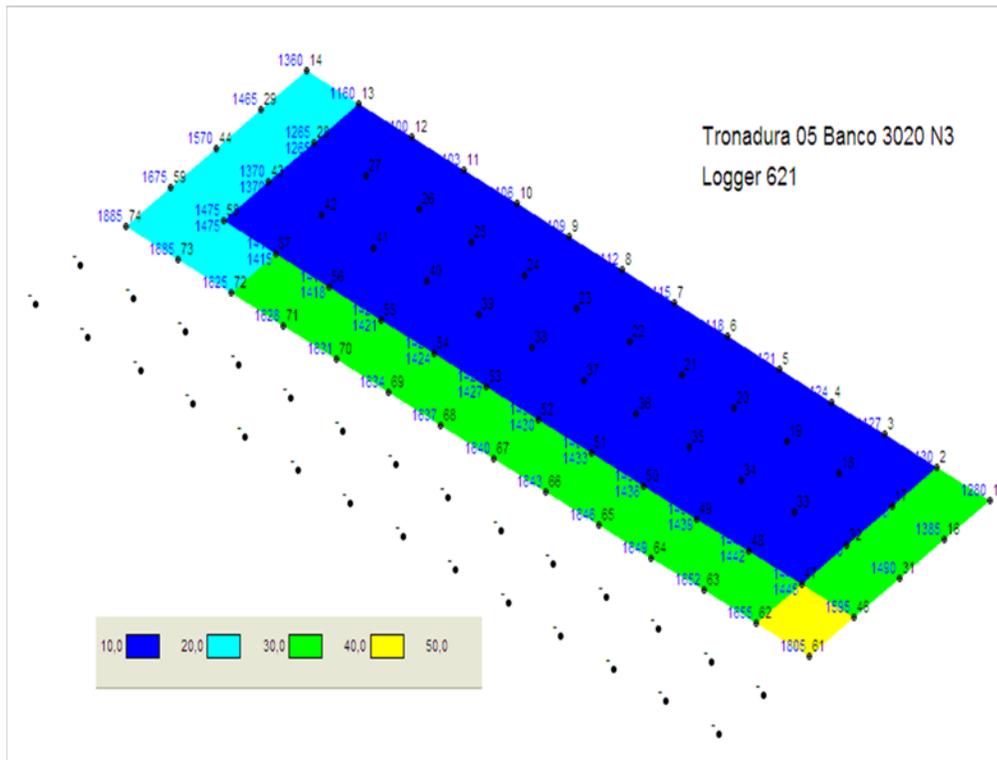
Tiempos de Salida



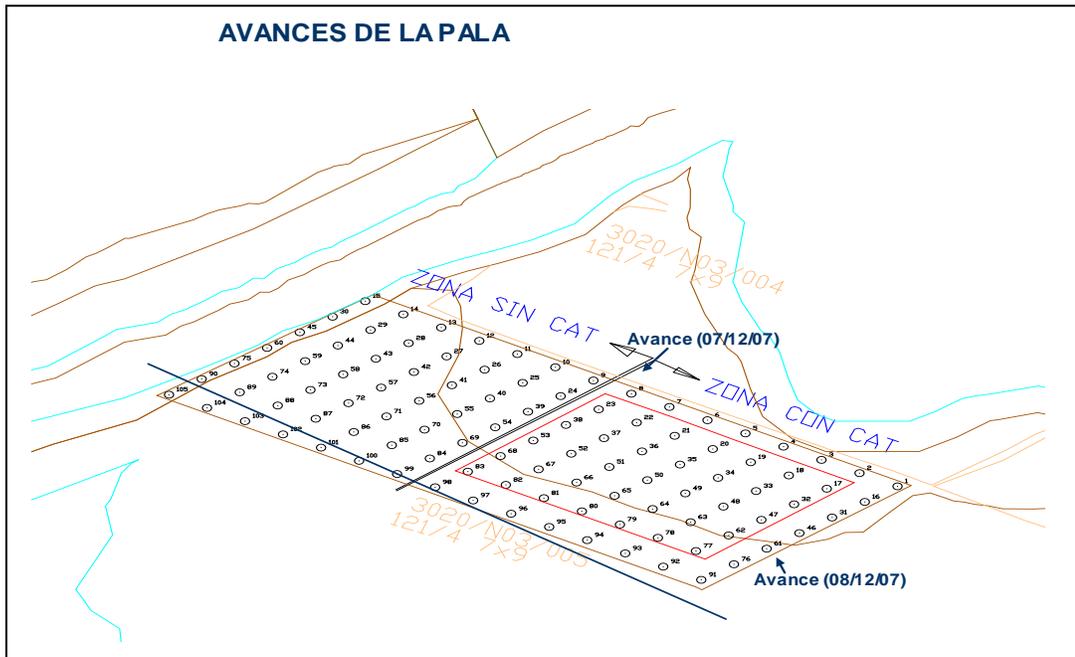
Curvas de Isotiempo



Burden de alivio



AVANCES DE LA PALA



ESTADISTICA DE RETENCIÓN DEL TACO

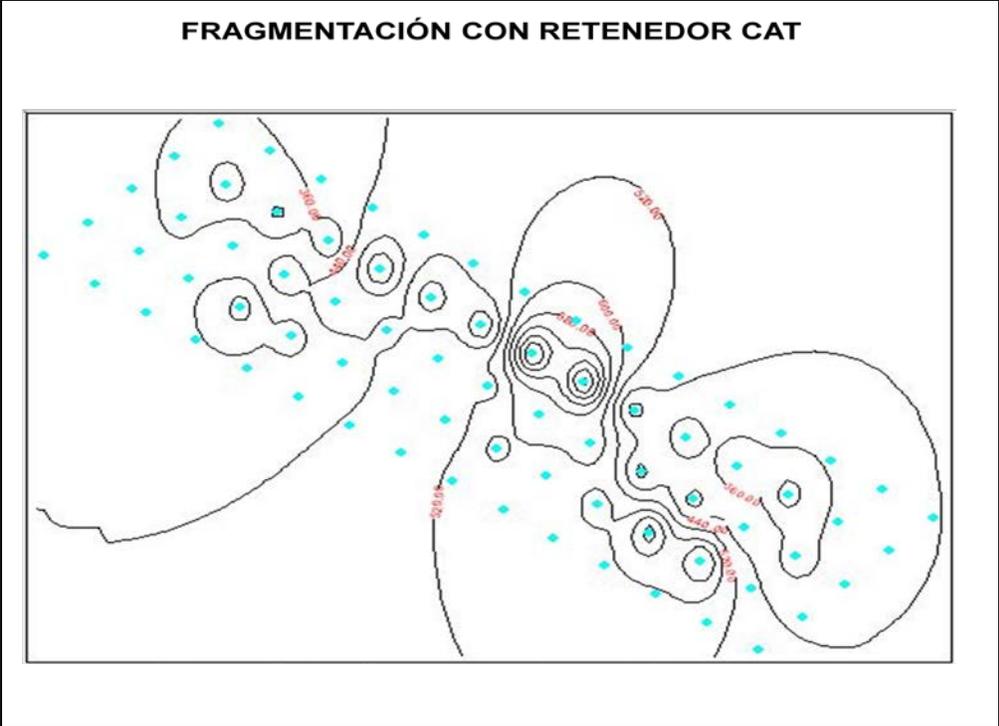
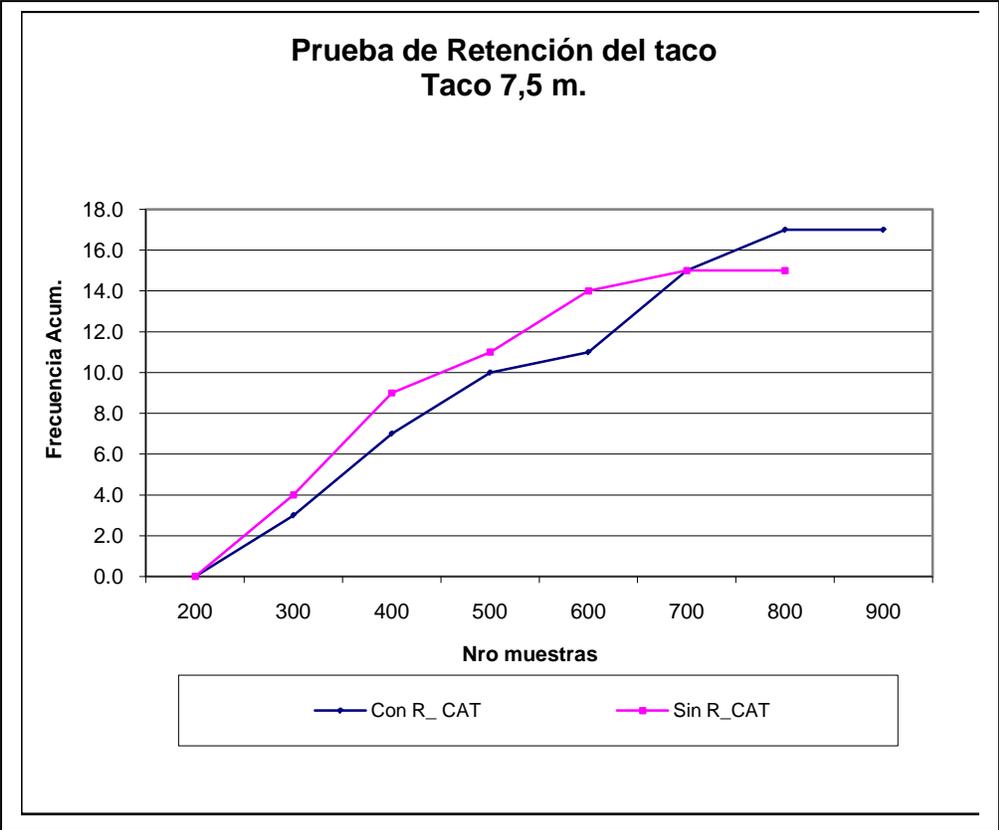
Con Retenedor_CAT	
Número Pozo	Tiempo Retención
18	252
19	294
20	296
32	334
21	336
34	336
35	340
33	410
53	466
38	500
51	540
52	614
50	632
36	646
37	652
48	772
49	794
23	1012
22	1012

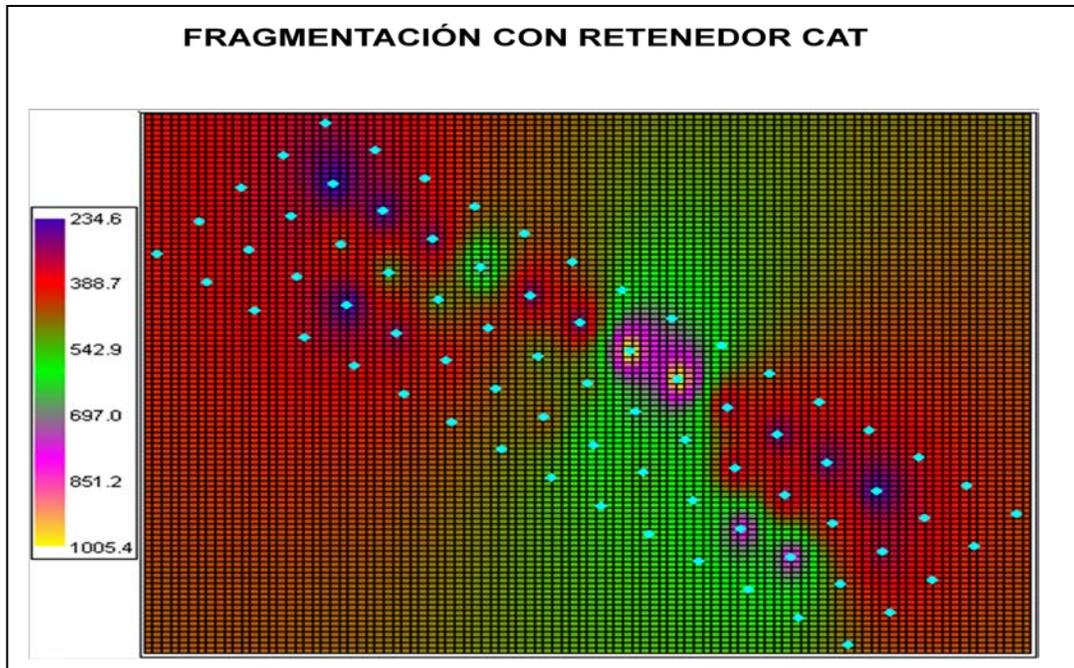
Sin Retenedor_CAT	
Número Pozo	Tiempo Retención
29	234
57	250
28	270
24	296
25	306
27	309
56	322
44	356
55	396
40	426
43	430
39	502
42	506
41	506
26	678

Max	1012.0
Min	252.0
Media	538.8
Desv	248.7

Max	678.0
Min	234.0
Media	385.8
	137.0

Difer. Medias	153.0
	97.4





CONCLUSIONES

Para esta prueba se observó que no hay gran diferencia en cuanto a retenciones usando el dispositivo CATS, que sin su uso.

* La capacidad de una mayor retención se ve influenciada por las estructuras principales que existan en la tronadura

4.1.4 Tronadura banco 3050_n3_malla 33.

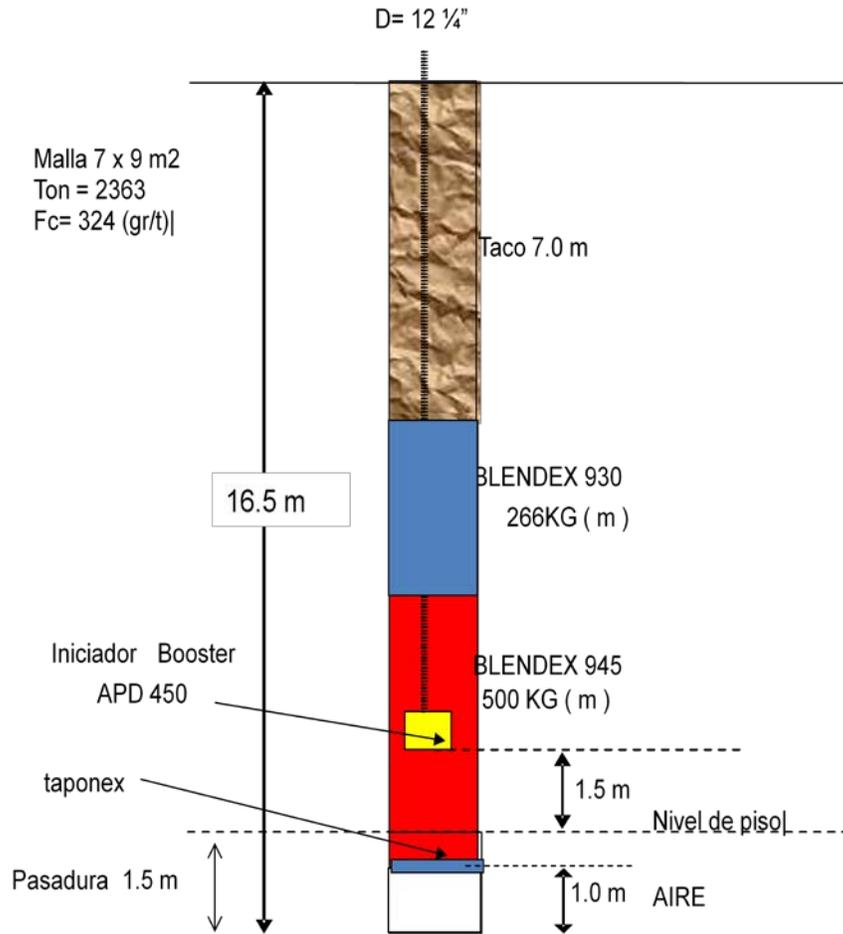
BANCO 3050_N3_MALLA 33

NROS POZOS	= 132	
TIPO EXPLOSIVO	=	BLENDEX 930 BLENDEX 945
EXPLOSIVO	= 36748	55653 Kgs



Asistencia Técnica
Enaex Escondida

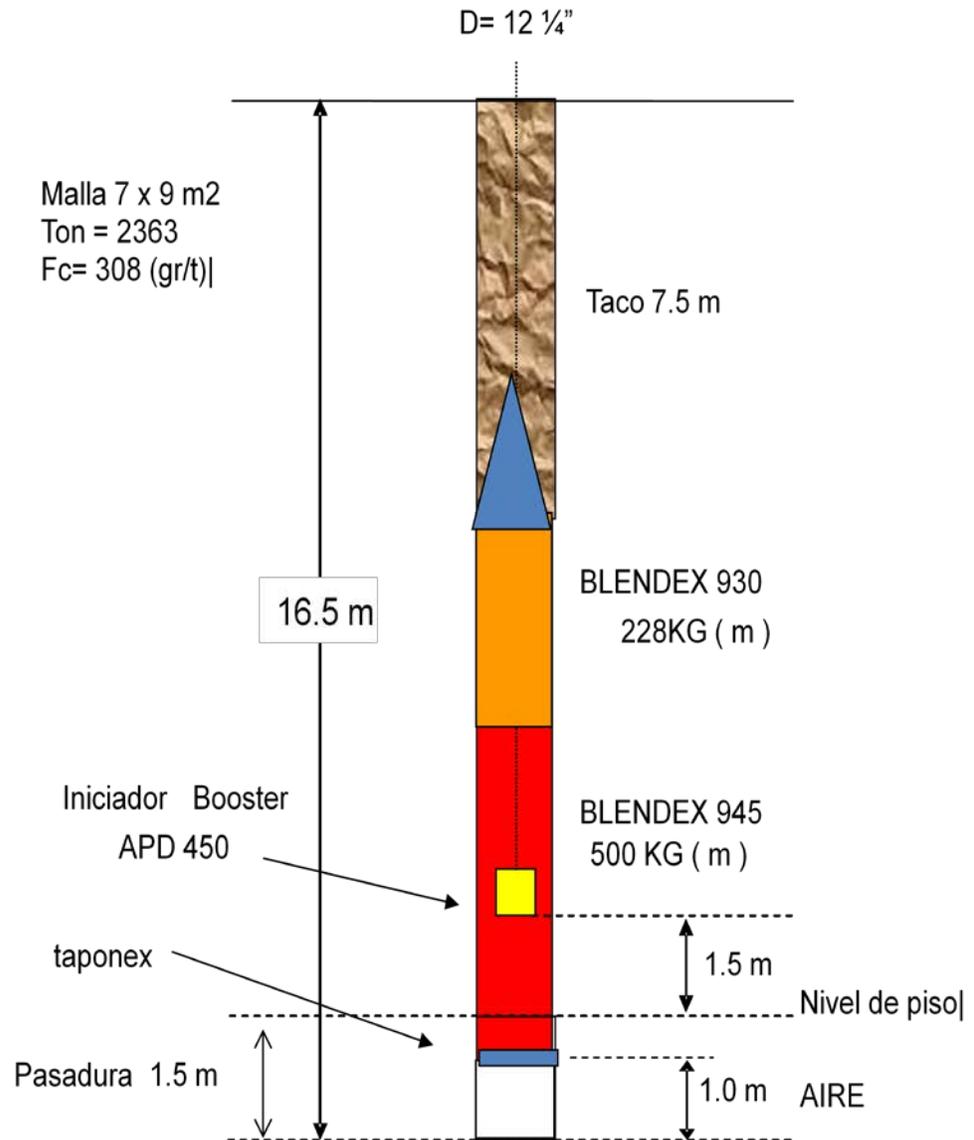
POZOS CON CARGA NORMAL





EscondidaAsistencia
Técnica Enaex

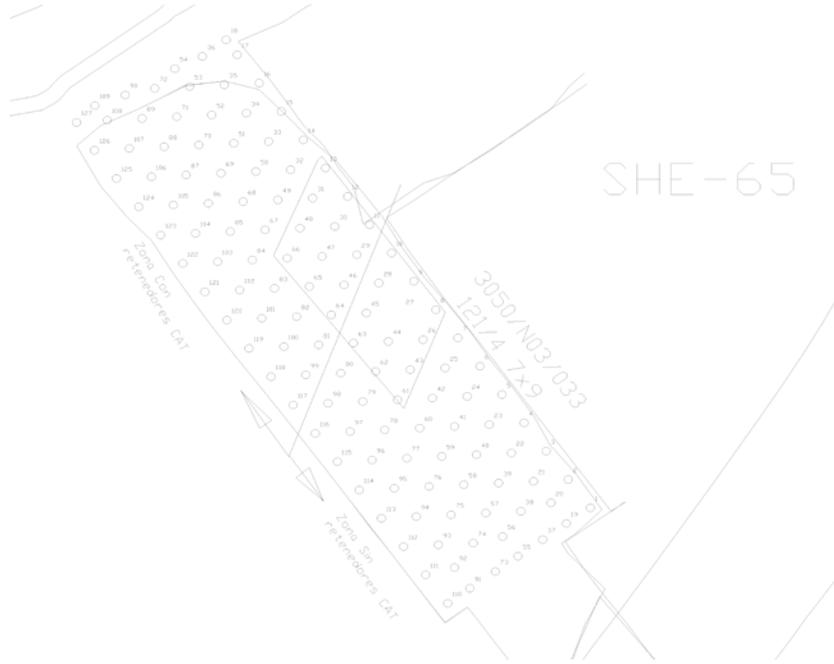
POZOS CON RETENEDORES



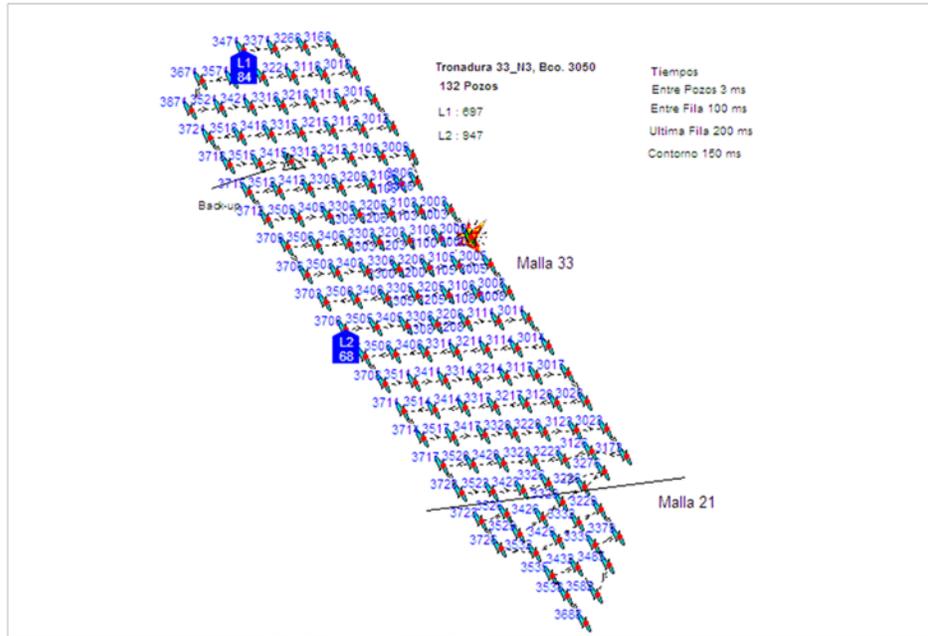


Asistencia Técnica
Enaex Escondida

INSTALACIÓN DE RETENEDORES CAT



Asistencia Técnica
Enaex Escondida

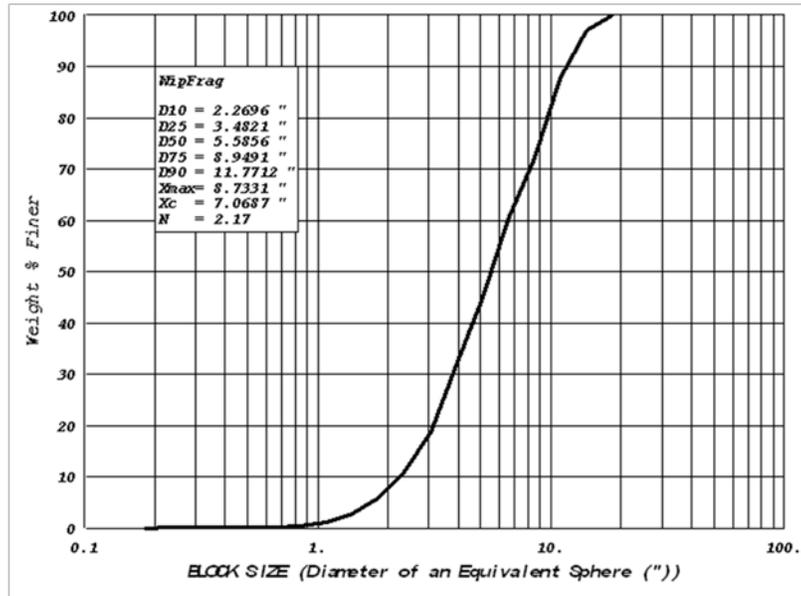




AVANCES DE LA PALA 63

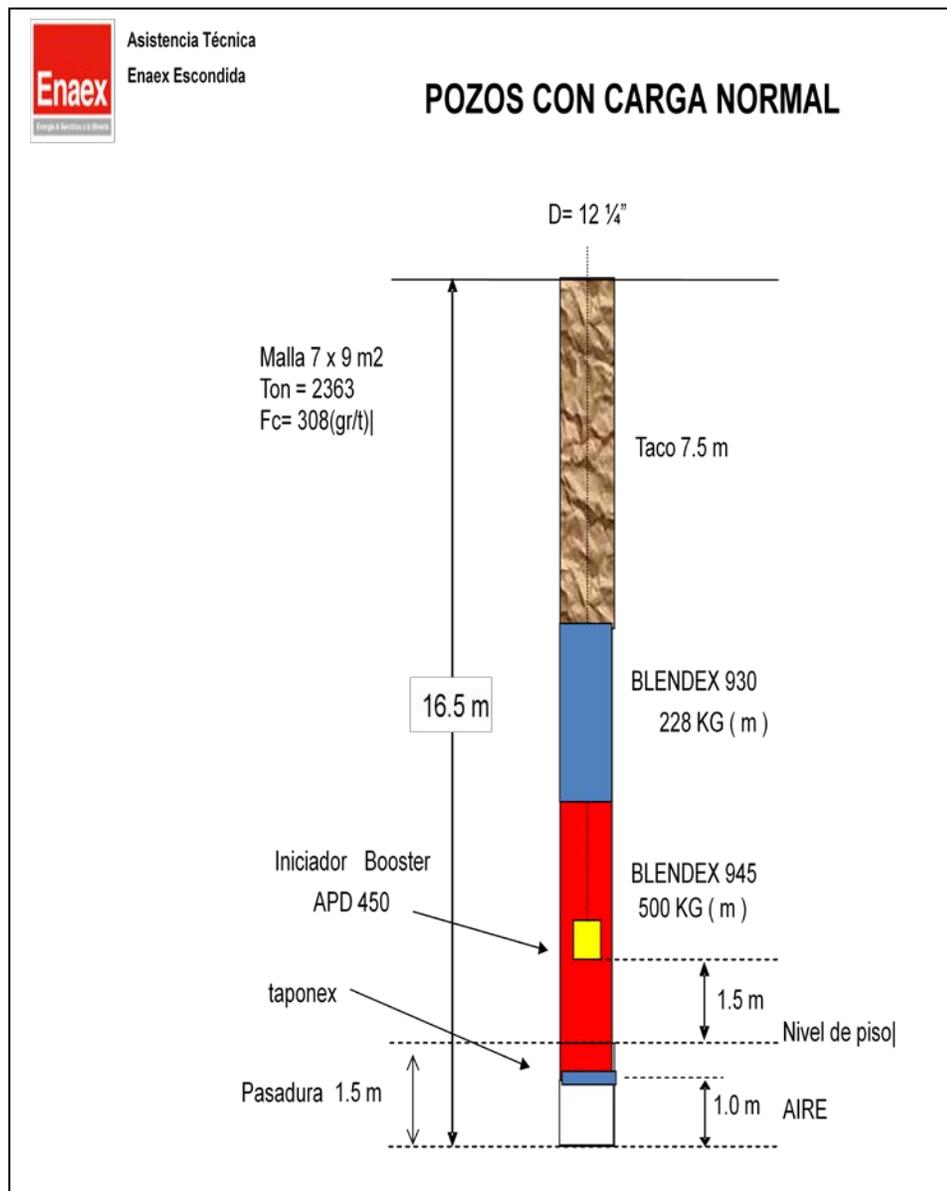


FRAGMENTACIÓN CON RETENEDOR CAT



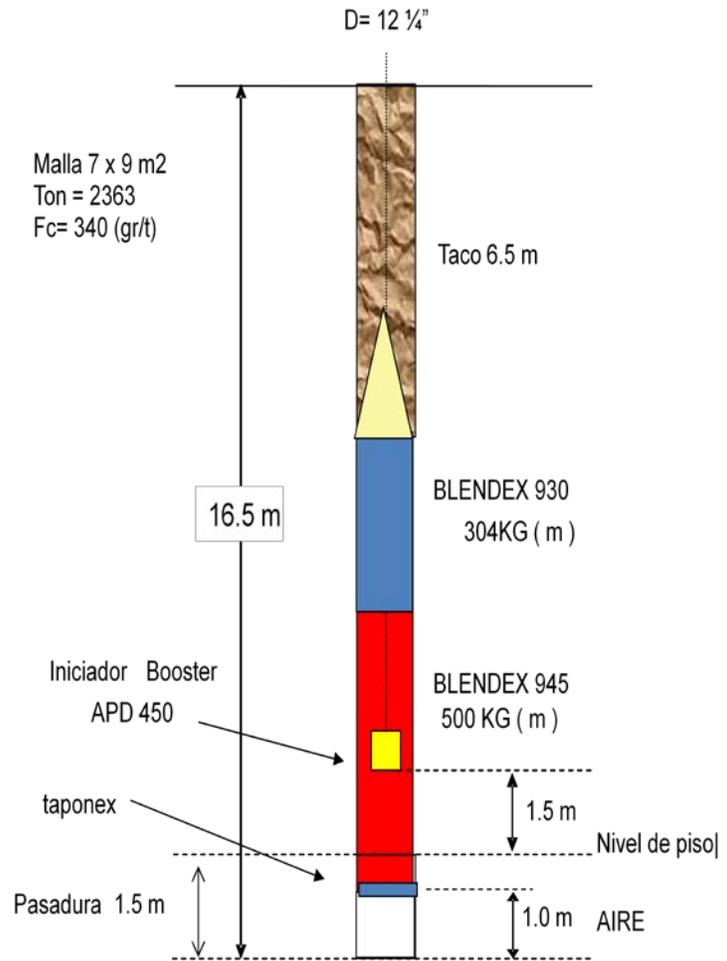
4.1.5 Tronadura banco 3065_n3_malla 45.

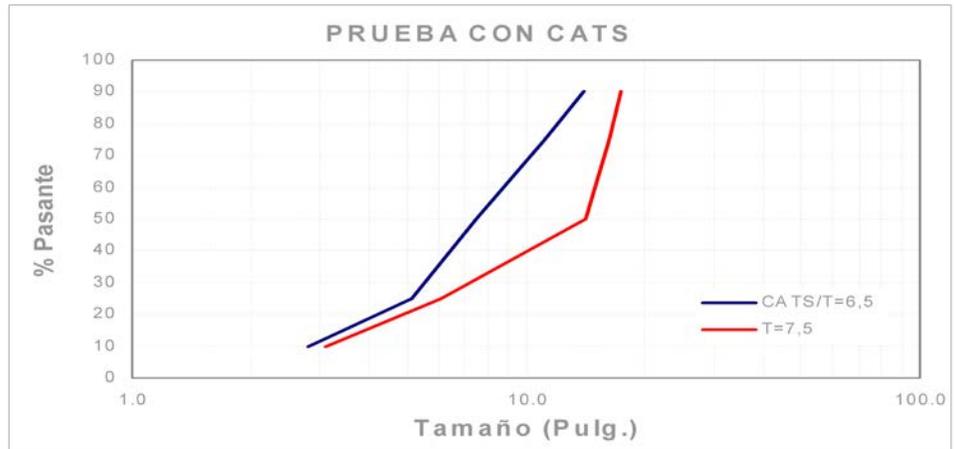
BANCO 3065_N3_MALLA 45	
NROS POZOS	= 101
TIPO EXPLOSIVO	= BLENDEX 930 BLENDEX 945
EXPLOSIVO	= 40587 38950 Kgs
MATERIAL TRONADO	= 232191 TON
FACTOR DE CARGA	= 342.5 grs/ton





POZOS CON RETENEDORES

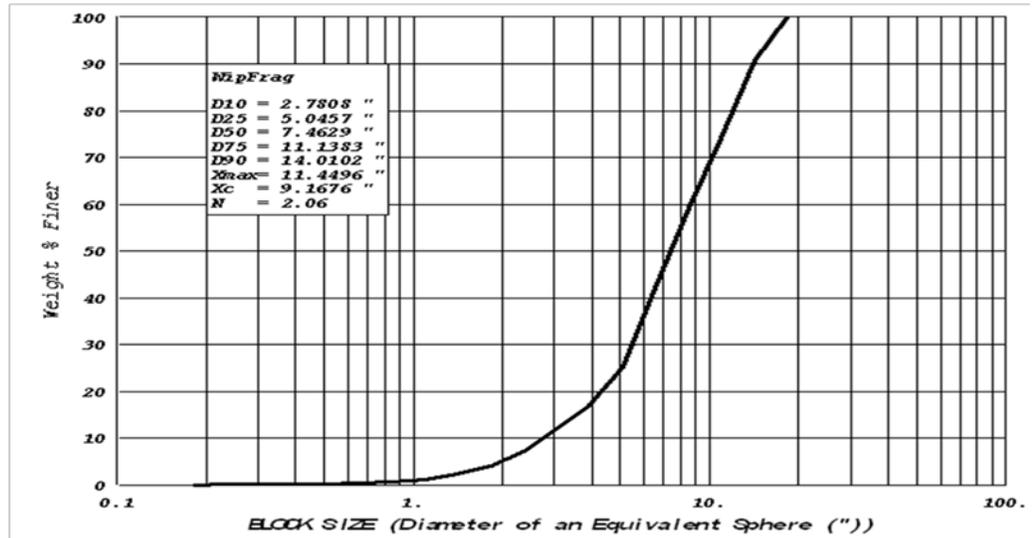




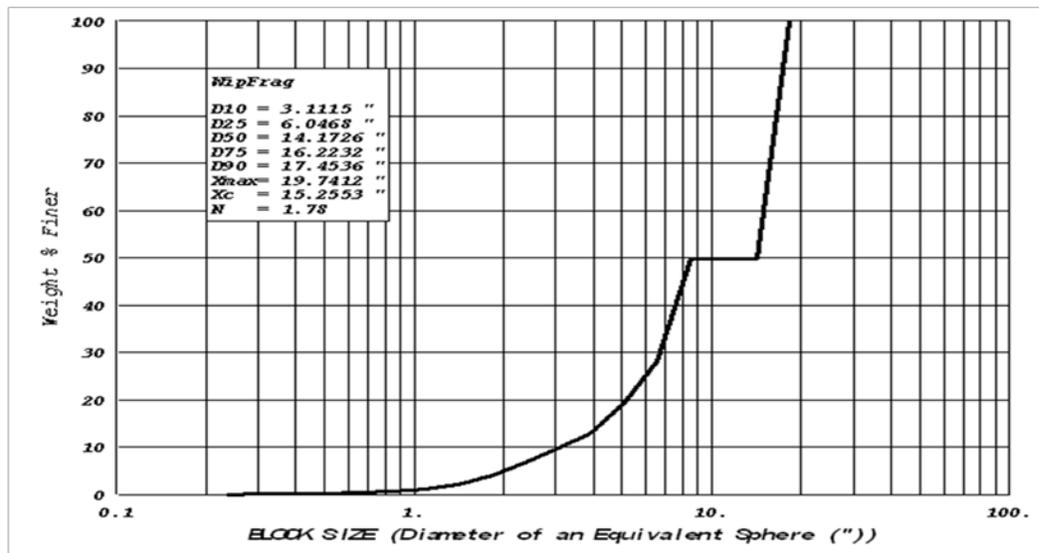
$D_{80} (T=6,5) =$

$D_{80} (T=7,5) =$

ZONA CON CATS Y TACO 6,5 M.



ZONA CON TACO 7,5 M.



CONCLUSIONES

- 1.- EXISTE UNA MEJORA EN LA FRAGMENTACIÓN , TENIENDOSE D75% = 11" CON EL USO DEL RETENEDOR, Y UN D75%=16.2" SIN EL USO DEL RETENEDOR.
- 2.- SE MANTIENE RENDIMIENTO DE LA PALA DENTRO DEL RANGO NORMAL DE TRABAJO.
- 3.- EXISTE PROYECCIÓN DE ALGUNOS POZOS DE PRIMERA FILA.

4.2 Análisis de la información.

En relación a este estudio, el trabajo de terreno realizado por ENAEX para Escondida no se ajustó completamente a lo solicitado; además, los datos entregados contenían algunas inconsistencias. Esta situación, además de restarle confiabilidad a la información, introdujo

ciertas incertidumbres en su aplicación, lo cual hizo necesario un trabajo adicional significativo para hacerla utilizable.

En este sentido, se realizó un análisis de esta información orientado a determinar cuál de ella podía ser considerada básica confiable, de modo de obviar así las inconsistencias. Como resultado de este análisis, se concluyó que la cantidad y la densidad de las cargas informadas eran más fidedignas, dado que la cantidad de explosivo informado por Enaex es controlado por el cliente y por las autoridades fiscalizadoras del ejército, y que las densidades varían menos del 5% de acuerdo al catálogo de esta empresa.

La Tabla 1 entrega el resumen de la información disponible, resultantes de los ajustes de las cargas de acuerdo a lo indicado en el párrafo anterior. En esta tabla, se puede observar que falta la información de los “tiempos de proceso” de las tronaduras 3050-33 y 3065. Además, no se midió la distribución de la fragmentación de la tronadura 3020.

Tronadura	TRONADURA CONVENCIONAL					TRONADURAS CON CATS				
	Taco m	Tpo Proc ms	Cám. De Aire	Fc gr/ton	Xc pulg.	Taco m	Tpo Proc ms	Cám. De Aire	Fc gr/ton	Xc pulg.
2990	6,6	315,7	1	268	19,89	6,6	366,4	1,2	268	10,04
3050-32	6,6	384,8	1	268	11,47	6,6	496,5	1,2	268	8,4
3020	6,9	385,8	1	293		7,4	538,8	1,2	278	
3050-33	6,9		1	293	23,77	7,4		1,2	278	10,04
3065	7,4		1	278	15,26	6,4		1,2	308	8,4

Tabla 1. Información utilizable entregada por Escondida.

4.2.1 Cálculo del desplazamiento inicial de los “tacos”.

Debido a que el comportamiento de los “tacos” determina el desempeño de las tronaduras, se requiere contar con tal información para cuantificarlo. En el capítulo II se pudo ver que el desplazamiento inicial de los “tacos” para ajustarse a la presión de los gases se compone de una retracción por compactación del material del “taco”, más un deslizamiento de éste sobre las paredes del pozo. Debido a que no se contó con esta información, ni tampoco con alguna forma de cálculo que permita estimarlo, el desplazamiento inicial de los “tacos” se estimó en forma indirecta, por iteración, haciendo uso de los “tiempos de proceso” medidos en las tronaduras de prueba, considerando que la aceleración del frente de quiebre y del “taco” durante el proceso de fragmentación es proporcional a la “energía efectiva” contenida en los gases.

Para facilitar la comprensión de la estimación del desplazamiento inicial de los “tacos” se incluye a continuación una pequeña descripción del comportamiento de los “tacos”, en las tronaduras convencionales y en las con “activadores”, de acuerdo al modelo considerado. Es decir sin realizar trabajo de fragmentación.

Inmediatamente después de la detonación del explosivo, los gases se expanden casi sin resistencia para llenar las cámaras de aire, hasta alcanzar el “taco” que les ofrece una resistencia creciente, partiendo de cero, en la medida que se compacta y se acomoda. Luego se inicia el

proceso de quiebre durante el cual el “taco” se desplaza con aceleración constante, durante el resto del proceso.

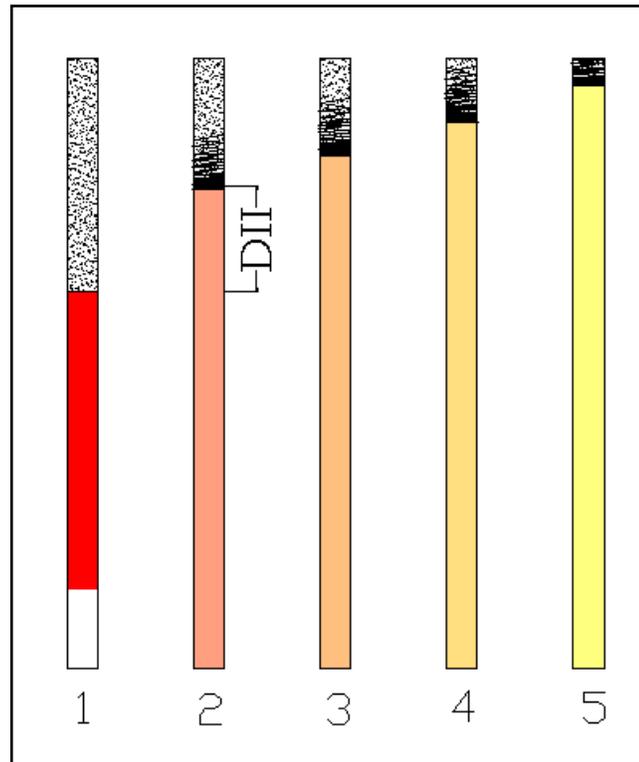


Figura 12. Comportamiento “tacos” tronadura convencional según el modelo.

La figura 12 entrega un esquema del comportamiento de los “tacos” en una tronadura convencional, de acuerdo al modelo. La degradación de los tonos rojos representan la disminución de la presión de los gases y con la disminución de energía .

La primera imagen corresponde al instante de la detonación en el cual los gases aún ocupan el mismo volumen del explosivo antes de la detonación.

La segunda imagen corresponde al instante posterior al ajuste inicial del “taco” a la presión de los gases. Este sufre un desplazamiento inicial, prácticamente instantáneo con relación al tiempo de proceso “DII”. Este desplazamiento está compuesto por la disminución de tamaño por compactación y deslizamiento sobre las paredes del pozo.

Las imágenes tercera a quinta corresponden al desplazamiento del “taco” con aceleración constante, durante el proceso de quiebre. Esta aceleración está dada por la relación entre la resistencia de la roca y la “energía efectiva” disponible para fragmentarla. Para una misma roca, a mayor “energía efectiva” disponible corresponde una mayor aceleración. Debido a que los gases pierden energía por expansión, cuánto mayor sea ésta, menor será aceleración.

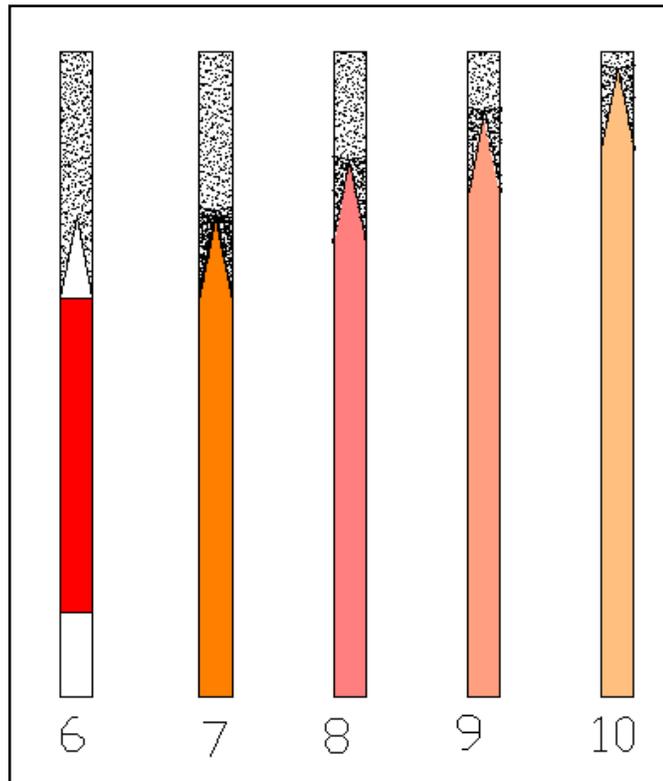


Figura 13. Comportamiento “tacos” tronadura con activador según el modelo.

La Figura 13 entrega un esquema del comportamiento de un pozo con activador, de acuerdo al modelo. La imagen 6 corresponde al instante de la detonación, en el cual los gases ocupan el mismo volumen del explosivo antes de su detonación.

La imagen 7 corresponde al instante posterior al ajuste inicial. En este caso la forma adoptada por el “taco” le permite resistir el empuje de los gases sin desplazarse axialmente.

Las imágenes 8, 9 y 10 corresponden al proceso de quiebre, durante el cual el frente de éste avanza con aceleración constante.

La comparación entre la Figura 12 y la Figura 13, muestra que la tronadura con activador al no permitir el desplazamiento inicial del “taco” muestra durante todo el proceso una mayor presión de los gases y “energía efectiva” y como consecuencia de ello presenta una mayor aceleración en su proceso de fragmentación.

A continuación, se calculan los desplazamientos de los “tacos” de los pozos convencionales correspondientes a las tronaduras de prueba 3050 32, 2990 y 3020, de acuerdo a lo explicado en el punto 3.5 y utilizando las expresiones 3.18 a 3.20.

$$3.18) \quad a_i = a_{(i-1)} \left(\frac{L_i}{L_{(i+1)}} \right)^{\gamma-1}$$

Siendo “a₀” la aceleración del avance del quiebre en la tronadura con “activadores” respectiva.

$$3.19) \quad S_i = \frac{1}{2} a_{(i-1)} (t_{PC})^2$$

Siendo “S₁” el “taco” residual obtenido con “a₀”

$$3.20) \quad L_i = L_1 + T_C - S_{(i-1)}$$

Siendo “L₁” igual al largo de la carga más el largo de la cámara de aire correspondiente.

La Tabla 2 entrega la variación de “γ” con la presión. Debido a que la “presión de trabajo” se mantiene siempre sobre las 4500 atm, se emplea “γ” =2,035 en todos los cálculos que la incluyen.

PRESIÓN	γ
Atmósferas	Ad.
4500 ≤ P ≤ 19971	2,035
500 ≤ P ≤ 4500	1,631
100 ≤ P ≤ 500	1,285
1 ≤ P ≤ 100	1,271

Tabla 2. Variación de “γ” con la presión³.

Las tablas siguientes entregan las planillas de cálculo de los desplazamientos por iteración de las tronaduras convencionales que contaron con mediciones de “tiempos de proceso”.

La Tabla 3 entrega la planilla de cálculo de los desplazamientos de las tronadura 3050 32 convencional.

³ Hustrulid William. *Blasting Principles for Open Pit Mining*. Vol 1. Cap. 3, pág 65

Tronadura	Taco	Tpo. Proc.	Aceleración	Largo carga	Largo inicial
	m	seg	m/s ²	m	m
3050 32 C A	6,6	0,4965	53,5	8,9	10,1
3050 32 Conv	6,6	0,3848	89,1	8,9	9,9
	Subíndice	S	L	a	
		m	m	m/s ²	
	0			53,5	
	1	3,96	12,54	41,94	
	2	3,11	13,39	39,16	
	3	2,90	13,60	38,55	
	4	2,85	13,65	38,41	
	5	2,84	13,66	38,38	
	6	2,84	13,66	38,38	

Tabla 3. Cálculo por iteración del desplazamiento de los “tacos”. Tronadura 3050 32.

La Tabla 4 entrega el cálculo por iteración de la tronadura 2990 y la Tabla 5 entrega el de la tronadura 3020.

Tronadura	Taco	Tpo. Proc.	Aceleración	Largo carga	Largo inicial
	m	seg	m/s ²	m	m
2990 CC	6,6	0,3664	98,3	8,9	10,1
2990 CA	6,6	0,3157	132,4	8,9	9,9
	Subíndice	S	L	a	
		m	m	m/s ²	
	0			98,3	
	1	4,90	11,60	83,45	
	2	4,16	12,34	78,27	
	3	3,90	12,60	76,61	
	4	3,82	12,68	76,09	
	5	3,79	12,71	75,93	
	6	3,78	12,72	75,88	
	7	3,78	12,72	75,87	

Tabla 4. Cálculo por iteración del desplazamiento de los “tacos”. Tronadura 2990.

Tronadura	Taco	Tpo. Proc.	Aceleración	Largo carga	Largo inicial
	m	seg	m/s ²	m	m
3020 CC	7,4	0,5388	51,0	8,1	9,3
3020 Conv	6,9	0,3858	92,7	8,6	9,6
	Subíndice	S	L	a	
		m	m	m/s ²	
	0			51,0	
	1	3,79	12,71	38,14	
	2	2,84	13,66	35,39	
	3	2,63	13,87	35,05	
	4	2,61	13,89	35,01	
	5	2,61	13,89	35,01	
	6	2,61	13,89	35,01	

Tabla 5. Cálculo por iteración del desplazamiento de los “tacos”. Tronadura 3020.

La Tabla 6 entrega los valores de los “tacos” iniciales, de los “tacos” residuales y de los desplazamientos de los “tacos” obtenidos por iteración en las tronaduras convencionales que contaron con mediciones de “tiempo de proceso”.

TRONADURA	Taco Inicial	Taco Residual	Desplaz.Inic
	m	m	m
3050 32 Conv	6,6	2,84	3,76
2990 Conv	6,6	3,78	2,82
3020 Conv	6,9	2,61	4,29

Tabla 6. Resumen valores obtenidos por las iteraciones.

4.2.2 Determinación de la “energía efectiva total”.

En este punto se determina la “energía efectiva total” de los pozos convencionales y de los con “activadores” de las tronaduras 3050 32, 2990 y 3020. Para conseguirlo se calcula numéricamente el área bajo la curva entregada por la expresión 3.26).

$$EE_t = P_0 V_0 \left(\frac{V_0}{V_{0e}} \right)^{\gamma-1} \left(\frac{V_{0e}}{V_{0e} + A \frac{1}{2} at^2} \right)^{\gamma-1}$$

El cálculo se efectúa desde el “t=0” hasta el tiempo “t=tiempo de proceso” de la tronadura respectiva. Se utilizan incrementos de tiempos de 10 ms. La Tabla 7 entrega los parámetros utilizados para el cálculo de la “energía efectiva total”. Corresponde a las tronaduras que cuentan con mediciones de los “tiempos de proceso”.

TRONADURA	PO	V0	V0e	Gam	A	a	Tp.Proc
	Katm lt	lt	lt	adm	lt/m	m/s ²	seg
3050 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,4965
3050 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,385
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,366
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,316
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,539
3020 Conv	26,16	651	1053	2,035	76,04	35,0	0,386

Tabla 7. Datos de entrada para cálculo de la “energía efectiva total”.

Los resultados de los cálculos numéricos de la “energía efectiva total” se muestran en la Tabla 8. Se incluyen en ésta como columna el “tiempo de proceso” de cada tronadura, la aceleración “a” obtenida, los valores medios de la “efectiva” instantáneas (EEt med), la “energía efectiva total” (EET), el factor de eficacia (FE), el factor de carga empleado (FC), la “energía efectiva total” (EET) expresada en grs /ton y el tamaño característico de las distribuciones de fragmentación medidas en terreno, para cada una de las secciones de las tronaduras 3050 32 y 2990, que son las que cuentan con mediciones del “tiempo de proceso” y de la distribución granulométrica

TRONADURA	Tp.Proc	a	EEtMed	EET	FE	FC	EET	TamCar.
	seg	m/s ²	Katlt/pz	Katlt/pz	Adim	grs/ton	grs/ton	pulg
3050 N 32 CC	0,497	53,5	9835	4.883	0,364	268	97	9,2
3050 N 32 Conv	0,385	38,4	8063	3.103	0,231	268	62	11,5
2990 CC	0,366	98,3	9824	3.599	0,268	268	72	10,4
2990 Conv	0,316	75,9	8455	2.669	0,199	268	53	19,9

Tabla 8. Resultados obtenidos para las tronaduras con información completa.

Los puntos formados por las dos últimas columnas de la Tabla 8 se graficaron y se les ajustó una línea de tendencia exponencial (Figura 14). La función resultante de este ajuste se utilizó para

determinar el tamaño característico de las tronaduras 3020, la “energía efectiva total”, y el “factor de efectividad” de las tronaduras 3050-33 y 3065, convencional y con “activadores”.

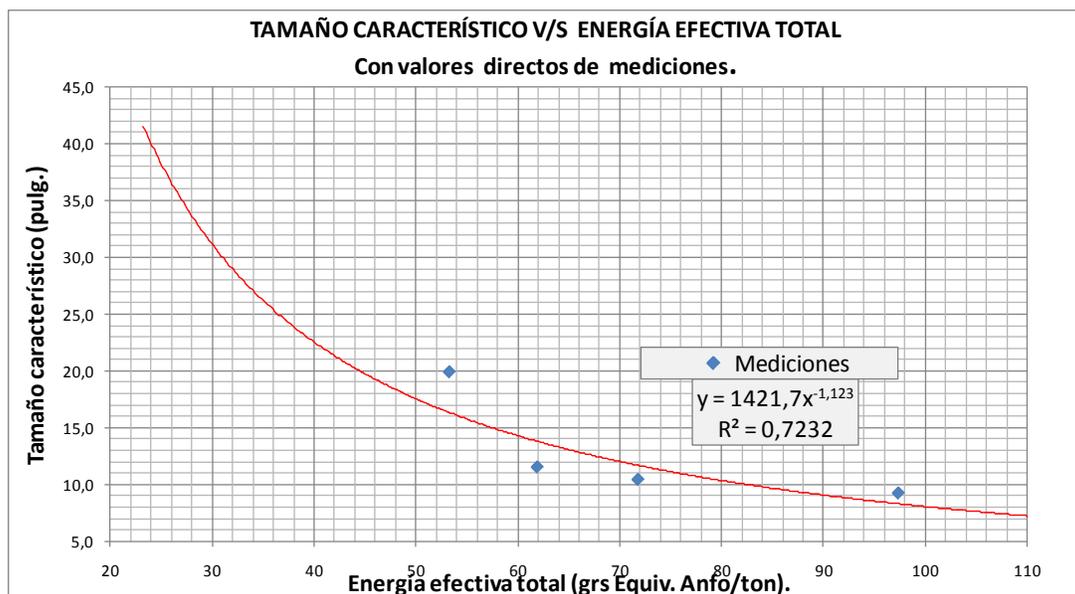


Figura 14. Gráfico tamaños característicos vs “energías efectivas totales” (EET).

TRONADURA	EET gr/ton	Tam. Car. pulg
3050 N 32 CC	97	9,2
3050 N 32 Conv	62	11,5
2990 CC	72	10,4
2990 Conv	53	19,9
3020 CC	105	7,6
3020 Conv	65	13,2
3065CC	73	11,5
3065Conv	57	15,3
3050 N33 CC	89	9,2
3050 Conv	38	23,7

Tabla 9. “Energía efectiva total” y tamaño característico consolidado.

La Tabla 9 entrega los valores de la “energía efectiva total” (EET) consolidadas con los valores obtenidos por medio de la función de tendencia exponencial ajustada a los puntos de la tabla 8, graficados en la Figura 14. La Figura 15 corresponde al gráfico construido con los puntos de la Tabla 9.

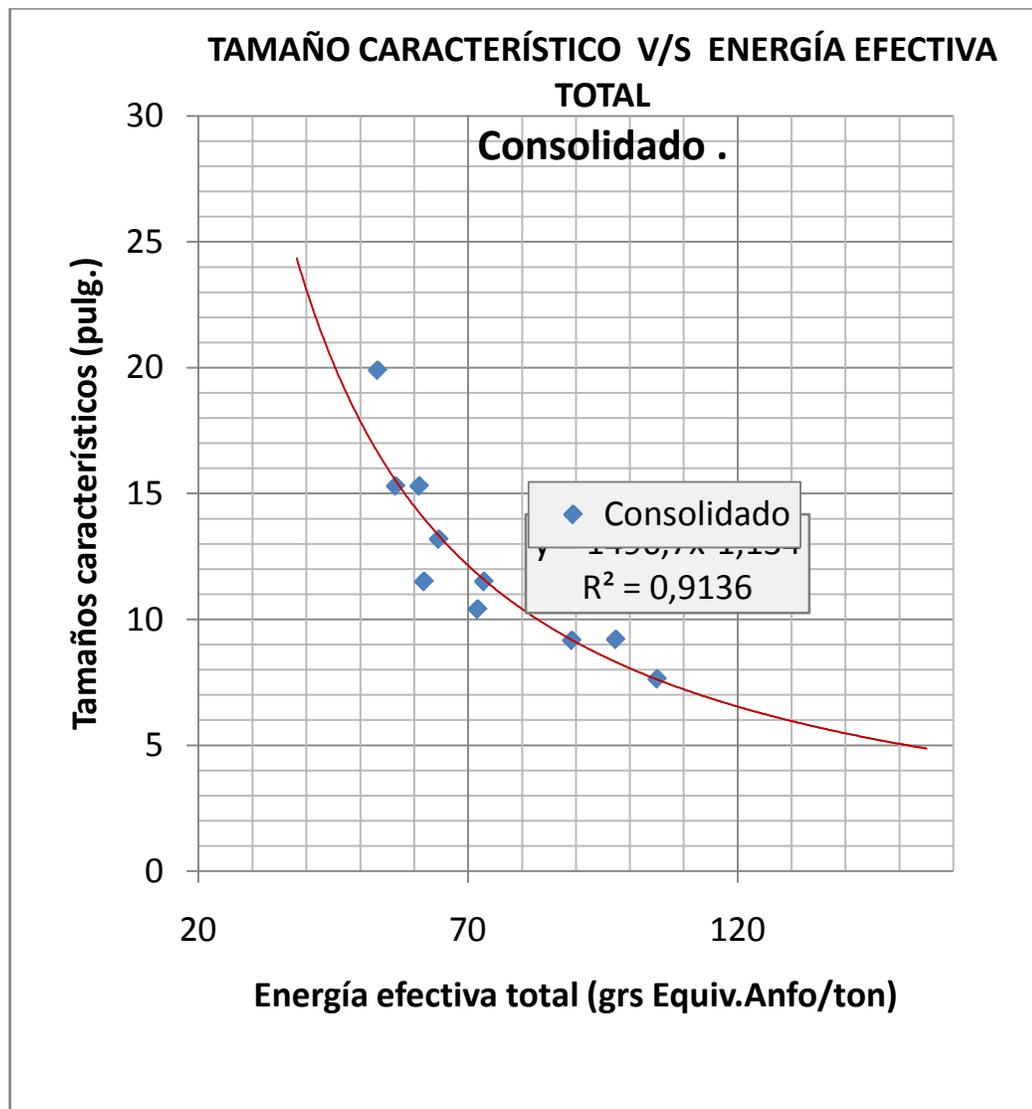


Figura 15. Tamaño característico vs “energía efectiva total”, consolidado.

TRONADURA	PO Katm lt	V0 lt	V0e lt	Gam adm	A lt/m	a m/s ²	Tp.Proc seg	EET (Katlt/pz)	FE Adim	EET gr/ton	TamCar. pulg.
3050 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,4965	4.883	0,364	97,4	9,2
3050 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,3848	3.103	0,231	61,9	11,5
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,3664	3.599	0,268	71,8	10,4
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,3157	2.669	0,199	53,2	19,9
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,539	6.145	0,378	105,0	7,6
3020 Conv	26,16	651	1053	2,035	76,04	35,0	0,386	3.751	0,220	64,6	13,2

Tabla 10. Resumen del cálculo de las “energías efectivas totales”.

La Tabla 10 entrega la “energía efectiva total” y los tamaños característicos de las tronaduras que contaron con mediciones de los “tiempos de proceso”. Es decir, las tronaduras de prueba 3050-32, 2990 y 3020.

La Tabla 11 resume los parámetros empleados y los resultados obtenidos en las tronaduras de prueba realizadas por Minera Escondida.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17

TRONADURA	Cfon	Ccol	FC	V ₀	Caire	Despl	Po	V0e	Vpz	Tpo Proc	Poe	PromEET	EET	FE	EET	Tam. Car.
	m	Kg	grs/ton	lt	m	m	KAtm.	m	it	seg.	Katm	(Katmlt/pz)	(Katlt/pz)	Adim	gr/ton	pulg
3050 N 32 CC	0	680	268	680,0	1,2	0,00	19,74	771	1.255	0,497	15,28	9.835	4.883	0,364	97,4	9,2
3050 N 32 Conv	0	680	268	680,0	1,0	3,76	19,74	1.042	1.255	0,385	8,89	8.063	3.103	0,231	61,9	11,5
2990 CC	0	680	268	680,0	1,2	0,00	19,74	771	1.255	0,366	15,28	9.824	3.599	0,268	71,8	10,4
2990 Conv	0	680	268	680,0	1,0	2,82	19,74	970	1.255	0,316	10,40	8.455	2.669	0,199	53,2	19,9
3020 CC	500	228	278	612,6	1,2	0,00	26,56	704	1.255	0,539	20,02	11.406	6.145	0,378	105,0	7,6
3020 Conv	500	266	293	650,6	1,0	4,29	26,16	1.053	1.255	0,386	10,64	9.722	3.751	0,220	64,6	13,2
3065CC	500	304	308	688,6	1,2		25,81		1.255		25,72		4.208	0,237	72,9	11,5
3065Conv	500	228	278	612,6	1,0		26,56		1.255		26,19		3.309	0,203	56,6	15,3
3050 N33 CC	500	228	278	612,6	1,2		26,56		1.255		26,46		5.221	0,321	89,2	9,2
3050 Conv	500	266	293	650,6	1,0		26,16		1.255		25,82		2.225	0,131	38,3	23,7

Tabla 11. Resumen de los parámetros de entrada y resultados obtenidos.

El contenido de esta tabla es el siguiente: La primera columna corresponde a la identificación de la tronadura. La abreviatura “CC” corresponde a las sección con “activadores”. La abreviatura “Conv” corresponde a la sección con “taco” convencional.

La segunda y tercera columna corresponden, respectivamente, a las cargas de explosivo utilizadas (Kg), de fondo y de columna respectivamente. La cuarta columna entrega el factor de carga (grs/ton) resultante de la cantidad de explosivo utilizada, de la geometría de la tronadura y de la densidad de la roca.

La quinta columna entrega el volumen inicial “V₀” (lts) ocupado por la carga en cada pozo. La sexta indica la longitud (m) de la cámara de aire de cada tronadura. La cámara de aire utilizada en forma estándar por Escondida es de 1,0 m de longitud y va ubicada al fondo de los pozos. En el caso de las tronaduras con “activadores”, a la longitud indicada se le agrega 0,2 m de cámara de aire para incluir en los cálculos el efecto de la cavidad que dejan los conos en la parte inferior de los “tacos”.

La séptima columna corresponde al desplazamiento inicial del “taco” en las tronaduras convencionales (m), calculados por iteración utilizando los “tiempos de proceso” de las secciones convencionales y con “activadores”.

La octava columna entrega la presión de explosión “ P_0 ” (Katm). La novena columna entrega el volumen ocupado por los gases después del desplazamiento inicial “ V_{0e} ” (lt). La décima entrega el volumen total de los pozos “ V_{pz} ” (lt).

La décimo primera columna entrega los “tiempos de proceso” medidos en las tronaduras 3050-32, 2990, 3020.

La décima segunda columna entrega la presión “ P_{0e} ” de los gases después del ajuste inicial del “taco” (katm). La décima tercera columna entrega el valor promedio de la “energía efectiva” calculada para los diferentes tiempos, con incrementos de 10 en 10 ms, en (Katm lt)

La décimo cuarta columna entrega la “energía efectiva total” (Katm lt), determinada como la sumatoria de los productos de la energía calculada para cada intervalo de tiempo, por el incremento de tiempo utilizado. Corresponde al área bajo la curva EE vs el tiempo (expresión 3.26).

La décimo quinta columna incluye el valor del “factor de efectividad” (FE) (adimensional) de cada tronadura. Corresponde al valor de la “energía efectiva total” (columna 14°) dividido por la “energía nominal” aportada por el explosivo (P_0V_0).

La décimo sexta columna entrega la “energía efectiva total” expresada en grs/ton. Se calcula como el producto entre el “factor de efectividad” (FE) y el factor de carga (FC).

La décimo séptima columna entrega los tamaños característicos de la fragmentación, medidas en las tronaduras de prueba (pulg) y de la tronadura 3020 estimada a través de la relación tamaño característico vs “energía efectiva total”, obtenida de la correlación de los cálculos teóricos de esta energía, con los tamaños característicos obtenidos en las tronaduras de prueba (línea de tendencia de la Figura 14).

Las filas 3ª a 8ª de esta tabla corresponden a las tronaduras de prueba que contaron con la información de los “tiempos de proceso” y de fragmentación. Las filas séptima y octava corresponden a la tronadura 3020 que contó con mediciones de los “tiempos de proceso” pero no de fragmentación. Y las filas novena a última corresponden a las tronaduras 3065 y 3050-33, que contaron con las mediciones de fragmentación pero no con las de “tiempos de proceso”.

La última columna de las filas 7ª y 8ª se llenaron haciendo uso de la relación entregada por la línea de tendencia de la Figura 14.

Las columnas 12, 14, 15 y 16, de las filas novena a la décima segunda, se completaron partiendo de la última columna, utilizando la relación entregada por la línea de tendencia de la Figura 14.

4.2.3 Análisis de los resultados.

La Tabla 12 y la Tabla 13 entregan los datos de la Tabla 11 separados en tronaduras convencionales y tronaduras con “activadores”, para compararlos por tipo de tronadura.

TRONADURA	Cfon	Ccol	FC	V ₀	C aire	Despl	Po	V0e	Vpz	Tpo Proc	Poe	PromEET	EET	FE	EET	Tam. Car.
	m	Kg	grs/ton	lt	m	m	KAtm.	m	it	seg.	Katm	(Katmlt/pz)	(Katlt/pz)	Adim	gr/ton	pulg
3050 N 32 Conv	0	680	268	680	1,0	3,76	19,74	1042	1.255	0,385	8,89	8.063	3.103	0,231	61,9	11,5
2990 Conv	0	680	268	680	1,0	2,82	19,74	970	1.255	0,316	10,40	8.455	2.669	0,199	53,2	19,9
3020 Conv	500	266	293	651	1,0	4,29	26,16	1053	1.255	0,386	10,64	9.722	3.751	0,220	64,6	13,2
3065 Conv	500	266	278	613	1,0		26,56		1.255		26,19		3.309	0,203	56,6	15,3
3050 Conv	500	266	293	651	1,0		26,16		1.255		25,82		2.225	0,131	38,3	23,7
PROMEDIO			280	655	1,0	3,62	23,67	1022	1255	0,362	16,39	8.747	3.011	0,197	54,9	16,7
DESV ESTÁN			12,7	28	0,0	0,74	3,592	45	0	0,040	8,80	867	587	0,039	10,3	5,01

Tabla 12. Resumen de los parámetros resultantes de las tronaduras convencionales

TRONADURA	Cfon	Ccol	FC	V ₀	C aire	Despl	Po	V0e	Vpz	Tpo Proc	Poe	PromEET	EET	FE	EET	Tam. Car.
	m	Kg	grs/ton	lt	m	m	KAtm.	m	it	seg.	Katm	(Katmlt/pz)	(Katlt/pz)	Adim	gr/ton	pulg
3050 N 32 CC	0	680	268	680	1,2	0,00	19,74	771	1.255	0,497	15,28	9.835	4.883	0,364	97,4	9,2
2990 CC	0	680	268	680	1,2	0,00	19,74	771	1.255	0,366	15,28	9.824	3.599	0,268	71,8	10,4
3020 CC	500	228	278	613	1,2	0,00	26,56	704	1.255	0,539	20,02	11.406	6.145	0,378	105,0	7,6
3065 CC	500	304	308	689	1,2		25,81		1.255		25,72		4.208	0,237	72,9	11,5
3050 N33 CC	500	228	278	613	1,2		26,56		1.255		26,46		5.221	0,321	89,2	9,2
PROMEDIO	300	424	280	655	1,2	0,0	23,68	749	1255	0,467	20,55	10.355	4.811	0,313	87,3	9,6
DESV ESTÁN			16,6	39	0,0	0,0	3,610	38,8	0,0	0,090	5,42	910	973	0,060	14,7	1,45

Tabla 13. Resumen de los parámetros resultantes de las tronaduras con “activadores”.

La Tabla 14 entrega el cuociente entre los promedios de los resultados de las tronaduras con “activadores”, divididos por los promedios de los resultados de las tronaduras convencionales, considerando todas las tronaduras de prueba. La

Tabla 15 entrega lo mismo que la Tabla 14, pero excluyendo la información de las tronaduras 3050 33 y 3065 que no disponen de mediciones de los “tiempos de proceso”.

TRONADURA	Cfon	Ccol	FC	V ₀	Caire	Despl	Po	V0e	Vpz	Tpo Proc	Poe	PromEet	EET	FE	EET	Tam. Car.
	m	Kg	grs/ton	lt	m	m	KAtm.	m	it	seg.	Katm	(Katmlt/pz)	(Katlt/pz)	Adim	gr/ton	pulg
PromT Conv	300	424	280	655	1,0	3,62	23,67	1022	1255	0,362	16,39	8.747	3.011	0,197	54,9	16,7
PronT CC	300	424	280	655	1,2	0,00	23,68	749	1255	0,467	20,55	10.355	4.811	0,313	87,3	9,6
P CC/P Conv			1,0	1,0	1,2	0,00	1,0	0,73	1,0	1,29	1,25	1,18	1,60	1,59	1,59	0,57

Tabla 14. Promedios tronaduras con “activadores”/promedios convencionales

TRONADURA	PO	V0	V0e	Gam	A	a	Tp.Proc	EET	FE	EET	TamCar.
	Katm lt	lt	lt	adm	lt/m	m/s ²	seg	(Katlt/pz)	Adim	gr/ton	pulg
Promedio CC	22,02	658	749	2,035	76,04	67,6	0,453	4.876	0,337	91,4	9,1
Promedio Conv.	21,88	670	1.022	2,035	76,04	49,8	0,362	3.174	0,217	59,9	14,9
PrmCC/PrmConv	1,01	0,98	0,73	1,00	1,00	1,36	1,25	1,54	1,55	1,53	0,61

Tabla 15. Prom. Tron con CATs/ Pron Tron Conv. Tronaduras con “tiempos de proceso”

Del análisis de las tronaduras de prueba se pudo establecer, que en promedio, las secciones tronadas con “activadores” comparadas con las secciones convencionales (Tabla 15), mostraron que:

- Sus “tiempos de proceso”, son mayores en un 29%.
- Sus presiones iniciales expandidas (P_{0e}) son mayores en un 25%.
- Su “energía efectiva” media es mayor en un 18%.

Su “energía efectiva total” y su “factor de eficacia” (FE), resultaron mayores en un 59%, considerando todas las tronaduras y mayores en 54% considerando solo las tronaduras que dispusieron de “tiempos de proceso” (Tabla 15).

- El volumen promedio de sus cámaras expandidas (para llenar las cámaras de aire y espacios liberados por el desplazamiento de los “tacos”), resultó menor en un 27%.
- Los tamaños característicos de sus distribuciones de tamaño resultaron menores en alrededor de un 40 %.

De lo anterior, es posible deducir que lo que genera la diferencia entre ambos tipos de tronaduras es la mayor expansión inicial de los gases y el menor tiempo del proceso de quiebre de las tronaduras convencionales con respecto a las tronaduras con “activadores”. Ello incide en reducir el promedio de la “energía efectiva” instantánea (EET Prom) y en disponer de un menor tiempo para transferir la “energía efectiva” disponible a la roca (“tiempo de proceso”), redundando en una menor “energía efectiva total” (EET) y un menor trabajo de fragmentación, respecto al realizado por las tronaduras con “activadores”.

Lo anterior se ve verificado por las marcadas diferencias observadas entre las distribuciones de fragmentación de las tronaduras convencionales y las tronaduras con “activadores” mostradas en la Figura 16. Distribuciones de fragmentación medidas en la tronaduras de prueba. Las distribuciones de fragmentación de las secciones tronadas en forma convencional en las pruebas muestran una importante dispersión. Ello estaría indicando un comportamiento aleatorio de sus “tacos”, mientras que las distribuciones de fragmentación de las secciones tronadas con “activadores” muestran un comportamiento muy regular. Esto permite deducir que el mejor comportamiento de las tronaduras con “activadores” se debe a que estos dispositivos, de algún modo, controlan la causa que genera la aleatoriedad del comportamiento de los “tacos”. Considerando que los “activadores” imponen una forma específica a la interfase explosivo-taco, es posible deducir que el comportamiento aleatorio de las tronaduras convencionales se debe a que la forma que toma esa interfase varía aleatoriamente y genera un comportamiento aleatorio de los “tacos”. Ello redundaría en un desempeño de las tronaduras y una fragmentación también aleatoria.

Lo anterior, pone de manifiesto que es posible conseguir mejoras importantes en las tronaduras, forzando la forma de los extremos de los “tacos”, función para la cual fueron diseñados los “conos activadores de tacos” (CATs).

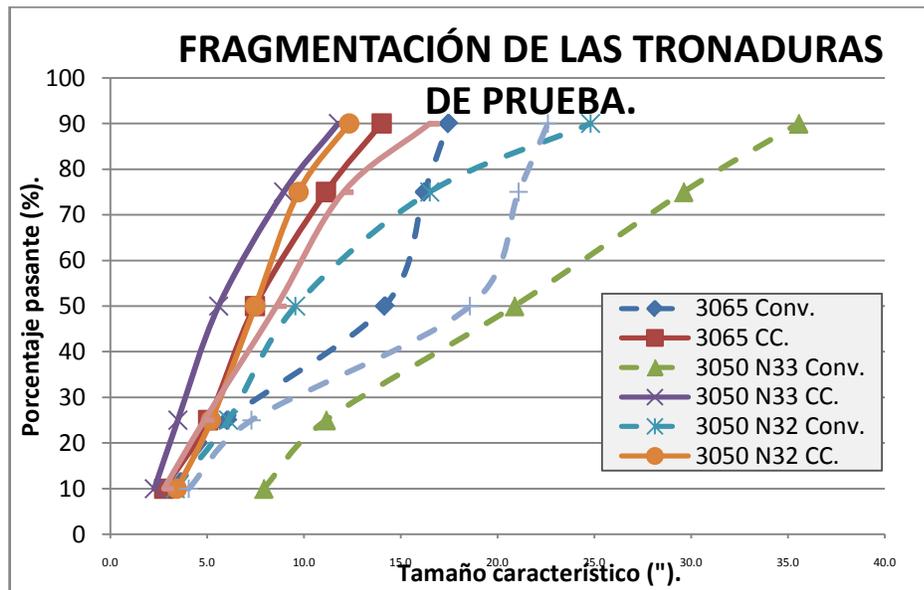


Figura 16. Distribuciones de fragmentación medidas en la tronaduras de prueba.

4.2.4 Consideraciones económicas.

Para cuantificar económicamente las ventajas de las tronaduras con “activadores” con respecto a las tronaduras convencionales, se debe determinar el ahorro generado por el mejor desempeño de las tronaduras que los utilizan, en forma directa en perforación y tronadura y también indirecta en las operaciones de carguío, transporte y molienda.

Para este trabajo no se contó con la información para estimar los posibles ahorros en mantenimiento, consumo de aceros de reposición y energía de molienda por efecto de la mejor fragmentación obtenida con los “activadores”. Por otra parte, la información recibida mostró que el costo unitario de carguío de las palas no fue afectado por la mejor distribución de fragmentación conseguida con el empleo de los “activadores”, debido probablemente a que las tronaduras convencionales entregan a esos equipos una fragmentación más finas de la que pueden mover en forma holgada. De ese modo una mejor fragmentación no aumenta su capacidad horaria. En consecuencia, sólo fue posible considerar los ahorros directos en perforación y tronaduras, para evaluar el impacto de los tronaduras con “activadores”.

Dado que sólo 2 de las 5 tronaduras de prueba fueron registradas en forma completa, para estimar el ahorro asociado a las tronaduras con “activadores” con respecto a las convencionales, se realizó un cálculo teórico referido al desempeño de la tronadura 2990 - que resultó ser más conservadora, según el modelo propuesto - asumiendo valores de entrada idénticos para ambas secciones de esta prueba.

La Tabla 16 entrega la información de entrada de las tronaduras 3050 32 y 2990 y los resultados obtenidos en los cálculos.

TRONADURA	Cfon	Ccol	FC	V ₀	Caire	Despl	Po	V0e	Vpz	Tpo Proc	Poe	PromEET	EET	FE	EET	Tam. Car.
	m	Kg	grs/ton	lt	m	m	KAtm.	m	it	seg.	Katm	(Katmlt/pz)	(Katlt/pz)	Adim	gr/ton	pulg
3050 N 32 CC	0	680	268	680,0	1,2	0,00	19,74	771	1.255	0,497	15,28	9.835	4.883	0,364	97,4	9,2
3050 N 32 Conv	0	680	268	680,0	1,0	3,76	19,74	1.042	1.255	0,385	8,89	8.063	3.103	0,231	61,9	11,5
2990 CC	0	680	268	680,0	1,2	0,00	19,74	771	1.255	0,366	15,28	9.824	3.599	0,268	71,8	10,4
2990 Conv	0	680	268	680,0	1,0	2,82	19,74	970	1.255	0,316	10,40	8.455	2.669	0,199	53,2	19,9

Tabla 16. Resultados de las tronaduras de prueba 3050-32 y 2990.

De esta tabla se obtiene que para la tronadura 2290 el cuociente entre el “factor de efectividad” de la sección con “activadores” y del caso base (convencional) resulta igual a 1,35.

En resumen, asumiendo que el único beneficio que se puede obtener por efecto del mejor desempeño de las tronaduras con “activadores” es un ahorro de explosivo, se concluye que en caso de la tronadura 2990 con “activadores” es posible inferir un menor consumo del orden de

un 25% $((1-1/1,35)*100)$ con respecto al utilizado en una tronadura convencional, obteniendo la misma “energía efectiva total.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El objetivo general de este trabajo de cuantificar el desempeño de las tronaduras con “activadores”⁴ en las pruebas realizadas por Minera Escondida, fue sólo parcialmente cumplido. Se dispuso de las herramientas que permiten conseguir este propósito, pero la calidad, confiabilidad y cantidad de la información recibida, sólo permitió su utilización de modo referencial, limitando el alcance de las conclusiones a un nivel cualitativo.
- El estudio consistió fundamentalmente en desarrollar un modelo matemático que represente los procesos de tronadura y que permita cuantificar sus resultados, con el fin de evaluar el desempeño de los “conos activadores de tacos” a partir de las tronaduras de prueba realizadas por Minera Escondida. El estudio se desarrolló con un criterio comparativo entre el comportamiento de las tronaduras convencionales y el de las tronaduras con “activadores”.
- Para representar los procesos de tronadura mediante relaciones matemáticas, fue necesario analizar el comportamiento de los “tacos” convencionales y el de los con “activadores”, de modo que el modelo refleje más cabalmente el fenómeno que se quiere simular.
- Para determinar la “energía efectiva” instantánea y total de una tronadura, ésta se representó por un modelo en el cual el explosivo está contenido en un tubo indeformable de las mismas dimensiones de un pozo real; cerrado en un extremo y tapado en el otro con un “taco” real. Este modelo considera que la única energía que pierden los gases corresponde a la caída de energía interna por expansión de la cámara de explosión. De este modo, la energía interna disponible para hacer trabajo o “energía efectiva”, es la energía interna remanente a dichas pérdidas.
- En este trabajo el proceso de tronadura se supone dividido en dos etapas. La primera se refiere a un ajuste inicial, prácticamente instantáneo, por efecto del cambio de presión. La segunda corresponde al proceso de quiebre que se inicia una vez que el taco es capaz de ofrecer resistencia a la presión de los gases. En la primera etapa se produce un movimiento de la interfase taco-gases por compactación y deslizamiento, y por lo tanto una expansión preliminar de los gases. En la segunda etapa realiza el trabajo de

⁴ Dispositivo diseñado por el autor de este trabajo, para mejorar la resistencia de los tacos.

fragmentación, cuyo frente avanza en la dirección del eje del pozo con una aceleración constante desde la posición de equilibrio inicial taco-gases hasta alcanzar el collar del pozo, en el tiempo de proceso⁵. El tiempo de ajuste inicial se considera irrelevante en relación a éste.

- El modelo desarrollado permite obtener la “energía efectiva total” disponible en el proceso de una tronadura cualquiera, en base al comportamiento de los “tacos”. En este estudio no se dispuso de mediciones del desplazamiento de los “tacos” en el tiempo. Por ello, fue necesario obtenerlo en forma indirecta utilizando el modelo mencionado en el punto anterior, en base a las mediciones de los “tiempos de proceso” medidos en las tronaduras de prueba.
- Todas las conclusiones están basadas en los resultados entregados por el modelo desarrollado, aplicado tanto al caso base como al caso en estudio; y en las distribuciones de fragmentación obtenidas en las tronaduras de prueba. Como resultado del análisis comparativo entre ambas situaciones se obtuvieron las conclusiones que se indican en los puntos siguientes.
- Las tronaduras de prueba realizadas por Minera Escondida corresponden a las tronaduras estándar de la faena. En ellas se utiliza una cámara de aire de 1,0 m de longitud ubicada al fondo de los pozos, las cuales afectan negativamente a la “energía efectiva total” de las tronaduras.
- Durante el proceso de las tronaduras convencionales, los “tacos” se ajustan a la presión de los gases generados por la detonación del explosivo, desplazándose por compactación y deslizamiento al interior de los pozos. Los gases se expanden para llenar las cámaras de aire y los volúmenes liberados por el desplazamiento de los “tacos”, todo ello en forma prácticamente instantánea. Durante el proceso de fragmentación (posterior al desplazamiento inicial de los tacos) se asume que los “tacos” se desplazan con una aceleración constante.
- Los “tacos” de las tronaduras con “activadores” son capaces de resistir al empuje inicial de los gases, lo que evita que sufran un desplazamiento inicial. No obstante, son afectados por un desplazamiento posterior con aceleración constante (que combina empuje con quiebre) y van retomando instantáneamente la forma que les permite generar la fuerza de fricción igual al empuje axial que los caracteriza.
- Los “activadores” para diámetros de 12 ¼” contribuyen con un volumen adicional equivalente a 0,2 m de la cámara de aire ubicada al fondo del pozo debido a que el volumen interior de los conos permanece vacío.

⁵ “Tiempo de proceso” es el tiempo que transcurre entre la iniciación del explosivo y el instante en el cual el quiebre de la roca alcanza la posición del collar del pozo respectivo.

- Para el caso de las tronaduras de prueba, el desplazamiento inicial de los “tacos” convencionales se calculó por iteración, haciendo uso de los “tiempos de proceso” de las tronaduras convencionales y con “activadores”, debido a que no se contó con mediciones del desplazamiento de los “tacos” en el tiempo.
- Durante el proceso de quiebre de una tronadura real, los pozos y los “tacos” van siendo cortados a medida que avanza el frente de los quiebre a través de la roca. Así, el extremo inferior de los “tacos” queda expuesto a la presión directa de los gases. Esto va generando un ajuste dinámico a las condiciones en cada instante. En el caso de una tronadura convencional, esto se traduce en una recompactación y deslizamiento de los “tacos” mientras que en una tronaduras con “activadores” sólo se va dando una pérdida de material del taco.
- El desplazamiento inicial de los “tacos” genera en las tronaduras convencionales dos tipos de problemas. Por una parte, los gases experimentan una expansión al ocupar el espacio dejado por este desplazamiento, disminuyendo su “energía efectiva”. Por otra parte, también se reduce el espesor de roca entre el extremo superior de la cámara de explosión y la superficie. Como consecuencia de ambos fenómenos, se reduce la “energía efectiva” contenida en los gases y el “tiempo de proceso” (de fragmentación), al irrumpir el quiebre de la roca en forma prematura a la superficie que contiene el collar del pozo observado.
- Las diferencias detectadas en este estudio entre el comportamiento de los “tacos” de las tronaduras convencionales y el de las tronaduras con “activadores”, incide en que estas últimas mejoran significativamente su desempeño con respecto a las primeras. Considerando sólo las tronaduras 3050 32 y 2990, que contaron con mediciones de los “tiempos de proceso” y de fragmentación, los “factores de efectividad” de las secciones con “activadores” superan a los de las secciones convencionales en porcentajes que van desde un 34% a un 57%.
- Al analizar las distribuciones de fragmentación de las secciones convencionales de las tronaduras de prueba (ver Figura 16. Distribuciones de fragmentación medidas en la tronaduras de prueba.), se puede observar que presentan un comportamiento manifiestamente errático, de lo cual se deduce que sus “tacos” se comportaron también en forma errática. En cambio, en el caso de las tronaduras con activadores, no se observó este tipo de comportamiento..
- Debido a que la única diferencia entre ambos tipos de tronadura es la presencia de los “activadores” entre la carga explosiva y los “tacos”, es posible deducir que son ellos los que reducen significativamente el comportamiento aleatorio de los “tacos”.
- El mejor desempeño obtenido por las tronaduras con “activadores”, estimado mediante el “factor de efectividad”, se vio reflejado en la fragmentación, que muestra un tamaño característico promedio del orden de un 40 % inferior con respecto al obtenido en las tronaduras convencionales.

- Suponiendo, conservadoramente, que el único ahorro posible por efecto de este mejor desempeño de las tronaduras con “activadores” es una reducción en el factor de carga, se puede inferir un eventual menor consumo de explosivo del orden de un 25% con respecto al requerido por una tronadura convencional, manteniendo la misma disponibilidad de “energía efectiva total”.
- En promedio, en las tronaduras de prueba convencionales sólo el 22% de la energía aportada por el explosivo resulta disponible para realizar trabajo, mientras que en las tronaduras con activadores ese porcentaje sube a un 34%. Cabe hacer notar que estas cifras son un poco más bajas de las que se podrían esperar de tronaduras normales que no utilizan cámaras de aire. Se debe recordar que todas las tronaduras de prueba de Minera Escondida se realizaron con cámaras de aire de 1,0 m, lo que reducen significativamente su desempeño.
- El modelo matemático desarrollado para representar los procesos de tronadura entrega valores de la “energía efectiva” instantánea y total muy sensibles a las variaciones de volumen de la cámara de explosión. En las tronaduras de prueba no se dispuso de mediciones de la evolución de los “tacos” en el tiempo. Este proceso fue necesario necesario estimarlo por iteración, a partir de deducciones lógicas y de las mediciones de los “tiempos de proceso” de cada tronadura. Para ello, se supuso que los “tacos” de las tronaduras con “activadores” no sufren retracción ni deslizamiento al inicio del proceso (ajuste inicial), en consecuencia pudieron ser usados como referencia para calcular los desplazamientos de los “tacos” convencionales.
- La aplicación del modelo matemático desarrollado para representar los procesos de una tronadura, a partir del comportamiento de los “tacos”, en las pruebas de Escondida, mostró una buena correlación ($R^2 = 0,72$) entre el tamaño característico de las distribuciones granulométricas registradas medidas en las pruebas con la “energía efectiva total” obtenida mediante los cálculos teóricos. De acuerdo a lo anterior, la aplicación de este modelo podría ser una herramienta promisorio para cuantificar el desempeño de una tronadura cualquiera, en el sentido de predecir su nivel de fragmentación y para caracterizar la “tronabilidad” de los diferentes tipos de roca presentes en las faenas, siempre que se disponga de información respecto al comportamiento de los “tacos”.
- Con la finalidad de perfeccionar el modelo, se recomienda desarrollar la integral de la expresión de la energía en función del tiempo dada por la relación 3.26), para así facilitar el análisis de los procesos de tronadura.
- Se recomienda realizar pruebas adicionales que incluyan mediciones de los “tiempos de proceso”, distribuciones de fragmentación y del desplazamiento de los “tacos”. En estas pruebas se debe utilizar la misma longitud de taco y de carga explosiva. Además deberían ser agrupadas por tipo de roca (mínimo 4 pruebas exitosas por tipo de roca), para obtener los tamaños característicos en función de la “energía efectiva total” (EET). Esto permitiría caracterizar los diferentes tipos de roca por medio de un “factor de

tronabilidad”, obtenido en base a la “energía efectiva total” y al factor de carga empleado.

- Finalmente, se recomienda también determinar, en forma previa, la relación “longitud de taco vs longitud de carga” que maximice la “energía efectiva total” y luego aplicarla, como criterio de diseño único, en las tronaduras.

CAPÍTULO VI: GLOSARIO.

A continuación se entregan las definiciones de los términos técnicos más empleados en este trabajo:

- “*Presión de explosión*” (P_0), es la presión de los gases cuando llenan el mismo volumen ocupado por el explosivo, antes de su detonación.
- “*Tiempo de proceso*” (T_P): Intervalo de tiempo comprendido entre la iniciación de la carga explosiva de un pozo hasta que el quiebre irrumpe a la zona de su collar.
- “*Presión de trabajo*”: Es la presión de los gases generados por el explosivo, durante todo el proceso de fragmentación de la roca.
- “*Energía efectiva instantánea*” (EEt): Corresponde a la energía interna contenida, en cada instante, por los gases durante el proceso de tronadura, considerado como un proceso adiabático. Está dada por el producto entre la presión y el volumen de los gases.
- “*Energía efectiva total*” (EET): Corresponde al área bajo la curva de la “energía efectiva” (PV) en función del tiempo. Puede ser expresada como el producto del valor medio de la “energía efectiva” durante el proceso de tronadura por el “tiempo de proceso”.
- “*Energía nominal*” (En): Es la energía entregada por el explosivo utilizado en cada pozo. Corresponde al producto de la presión de explosión del explosivo utilizado multiplicado por el volumen ocupado por éste, antes de su detonación.
- “*Factor de efectividad*” (FE): Es el cociente entre la “energía efectiva total” y la energía aportada por el explosivo. Corresponde a una medida del desempeño de la efectividad con la cual la tronadura en estudio utiliza la energía aportada por el explosivo.

CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA

Para este trabajo se utilizaron:

- El manual de perforación y tronadura de Hustrulid Willian 1999. *Blasting Principles for Open Pit Mining*.
- Los apuntes de clase del profesor Jaime Chacón.

ANEXO 1: Memoria de cálculo.

MEMORIA DE CÁLCULO

“ENERGÍA EFECTIVA” TRONADURAS 3050 32 CONVENCIONAL Y CON CATS.

1- Cálculo del desplazamiento de los “tacos” convencionales.

La tabla 1 entrega las longitudes de los “tacos”, los “tiempos de proceso”, las aceleraciones resultantes de acuerdo a la expresión 3.21), los largos de las cargas y los largos de las cargas más las cámaras de aire, para la tronadura con CATs y la convencional.

Tronadura	Taco	Tpo. Proc.	Aceleración	Largo carga	Largo inicial
	m	seg	m/s ²	m	m
3050 32 C A	6,6	0,4965	53,5	8,9	10,1
3050 32 Conv	6,6	0,3848	89,1	8,9	9,9

Tabla 1. Datos de entrada.

i	S _i	L _i	a
	m	m	m/seg ²
0			a ₀
			$2*6,6/(0,4965^2)$
1	S ₁	L ₁	a ₁
	$0,5*53,5*(0,3848)^2$	$9,9+6,6-3,96$	$53,50*(9,9/12,54)^{1,035}$
2	S ₂	L ₂	a ₂
	$0,5*41,94*(0,3848)^2$	$9,9+6,6-3,11$	$41,94*(12,54/13,4)^{1,035}$
3	S ₃	L ₃	a ₃
	$0,5*39,16*(0,3848)^2$	$9,9+6,6-2,9$	$39,16*(13,08/13,6)^{1,035}$
4	S ₄	L ₄	a ₄
	$0,5*38,55*(0,3848)^2$	$9,9+6,6-2,85$	$38,55*(13,6/13,65)^{1,035}$
5	S ₅	L ₅	a ₅
	$0,5*38,41*(0,3848)^2$	$9,9+6,6-2,84$	$38,41*(13,65/13,66)^{1,035}$
6	S ₆	L ₆	a ₆
	$0,5*44,67*(0,3848)^2$	$9,9+6,6-2,84$	$38,38*(13,66/13,66)^{1,035}$
	$S_i = \frac{1}{2} a_{(i-1)} (t_{PC})^2$	$L_i = L_1 + T_c - S_{(i-1)}$	$a_i = a_{(i-1)} \left(\frac{L_i}{L_{(i+1)}} \right)^{Y-1}$

Tabla 2. Valores utilizados en los cálculos de iteración

La tabla 2 entrega los valores utilizados y las relaciones que se utilizan para calcular los parámetros aceleraciones, “tacos” residuales y longitud de las cámaras que contienen los gases de una carga representativa.

La tabla 3 entrega los resultados obtenidos en los cálculos. El valor del desplazamiento de los “tacos” de la tronadura 3050 32 convencional, es igual a la longitud del “taco” inicial (6,6 m), menos el “taco” residual final obtenido en la iteración (2,84 m). Es decir: Desplazamiento de los “tacos” es igual a: $(6,6 - 2,84) = 3,76\text{m}$

Subíndice	S m	L m	a m/s ²
0			53,5
1	3,96	12,54	41,94
2	3,11	13,39	39,16
3	2,90	13,60	38,55
4	2,85	13,65	38,41
5	2,84	13,66	38,38
6	2,84	13,66	38,38

Tabla 3. Resultados obtenidos en la iteración

Cálculo de la “energía efectiva” de la tronadura 3050 32 convencional.

La energía interna de un gas es entregada por la expresión:

$$E = PV$$

Para las expansiones adiabáticas se tiene :

$$E = P_0V_0 \left(\frac{V_0}{V}\right)^{\gamma-1} \text{ siendo } P_0 \text{ y } V_0 \text{ la presión inicial y el volumen inicial.}$$

Esta expresión entrega la energía interna para cada volumen “ V” que adquieran los gases.

Si el volumen es expresado en función del tiempo, la expresión entrega la energía interna en cada instante del proceso.

El modelo utilizado no considera consumo de energía en realizar trabajo, a excepción del trabajo realizado por expansión de la cámara que contiene los gases. De este modo, la energía entregada por el área bajo la curva corresponderá a la energía total de la que se dispuso en el proceso para realizar trabajo.

La expresión 3.26) siguiente, entrega en cada instante la energía interna disponible o “energía efectiva” del modelo, que considera una expansión inicial de “ V_0 ” a “ V_{0e} ” expresada en función de los parámetros “ P_0 ”, “ V_0 ”, “ V_{0e} ” y de la variable tiempo. El área bajo curva 3.26) entre el tiempo 0 y el tiempo total del proceso, medido en terreno, corresponde a la “energía efectiva total” entregada por el modelo para la situación modelada. Entendiéndose por “tiempo de proceso” al intervalo de tiempo entre la iniciación del explosivo, hasta el instante en el cual la envolvente del material fragmentado (frente de quiebre) alcanza la posición del collar del pozo tronado.

Para este trabajo, el cálculo de la “energía efectiva total” de las tronaduras de pruebas, se realizó en forma numérica, utilizando la relación 3.26).

$$EE_t = P_0 V_0 \left(\frac{V_0}{V_{0e}} \right)^{\gamma-1} \left(\frac{V_{0e}}{V_{0e} + A \frac{1}{2} a t^2} \right)^{\gamma-1}$$

El volumen “ V_{0e} ” de la cámara de gases después de la expansión inicial es igual a la suma del volumen inicial “ V_0 ”, más los volúmenes correspondientes a la cámara de aire de 1,0 m de longitud y al liberado por el desplazamiento del taco, obtenido mediante la iteración (3,76 m). Considerando que un pozo de 12 1/4” ϕ , tiene un volumen unitario de 76,04 lt/m. Se tiene:

$$1) V_{0e} = 680 + 76,04(1,0 + 3,76) = 1042 \text{ lt}$$

El valor de “A” corresponde al volumen unitario de los pozos de prueba, 76,04 lt/m.

“a” está dada en m/seg^2 y el tiempo en seg. El valor de “a” se calcula como: $a = 2S/t^2$. Siendo “S” la longitud del “taco” después del ajuste inicial de los “tacos”. Es decir la longitud nominal del taco, menos su desplazamiento (6,6 m-3,76 m = 2,84 m) y “t” el “tiempo de proceso”. Para el caso de las tronaduras convencionales, que sufren desplazamientos iniciales, la longitud del “taco” corresponde al “taco” inicial menos el desplazamiento calculado por iteración. Para la tronadura 3050-32, S =2,84 m y el “tiempo de proceso” es 0,3848 seg. De ello resulta una aceleración igual a 38,4 m/s^2 .

El valor de la presión “ P_0 ” corresponde a la presión de explosión del Blendex 930, 20 Kbar. Para expresarlo lt-atm se debe multiplicar por 0,987 así $P_0 = 19,74 \text{ Klt-atm}$.

El volumen “V₀” corresponde al volumen de la carga de explosivo. Son 680 kg de explosivo con densidad igual a 1,0. Es decir 680 lt.

La “energía nominal”, aportada por el explosivo a cada pozo es igual a “P₀xV₀”=13.423.200 atm lt. Esta carga corresponde a un tonelaje igual al volumen de influencia del pozo multiplicado por la densidad de la roca Es decir: Tonelaje=7x9x15x 2,5=2362,5 ton. La energía por tonelada resulta igual al total aportado por el explosivo al pozo (13.358.058 atm lt), dividido por el tonelaje arrancado por el pozo (2362,5 ton), resultando igual 5681 atm-lt/ton.

Para determinar la “energía efectiva total” disponible para cada tronadura se calculó el área bajo curva de “energía efectiva” instantánea en función del tiempo, entregado por la expresión 3.26) del modelo desarrollado), mediante cálculo numérico, ya que no se dispone de la función integral de esta expresión.

$$EE_t = 19.74 * 680 * \left(\frac{680}{1042}\right)^{1.035} \left(\frac{1042}{1042 + 76.04 * \frac{1}{2} * 38,4 * t^2}\right)^{1.035}$$

Para el cálculo de la “energía efectiva total” por cálculo numérico se determinaron las “energías efectivas” instantáneas, partiendo de 0, hasta llegar al valor del tiempo total de proceso, medido en terreno, con incrementos de 0.01 en 0.01 s. Cada uno de esas “energías efectivas” instantáneas se multiplicaron por el incremento de tiempo (0,01) y se sumaron.

La tabla 4, entrega el detalle del cálculo numérico para obtener la “energía efectiva total” de la sección convencional de la tronadura 3050 32.

La “energía efectiva total” entregada por este cálculo, arroja un valor igual a 3.103 K atm lt = 75083 kcal = 32.049.858 Kg-m, para un pozo representativo de la tronadura. Dividiendo este valor por el producto de la presión de explosión “P₀” del explosivo y el volumen “V₀” que éste ocupa antes de su detonación, se obtiene el valor del “factor de efectividad” (FE) igual 0,231.

De acuerdo con el proveedor de los explosivos (ENAEX), el explosivo utilizado en la tronadura 3050 32, Blendex 930 entrega 830 Kcal por kg. En consecuencia, se tienen 564400 Kcal para los 680 kg empleados en cada pozo.

TRONADURA	PO	V0	V0e	Gam	A	a	Tpo	EEt	EEt Δt
0,3848 tpo Proc	Katm	lt	lt	adm	lt/m	m/s ²	seg	(katmlt)	(katmlt)
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0	8.630	
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,01	8.629	86,3
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,02	8.625	86,3
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,03	8.619	86,2
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,04	8.610	86,1
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,05	8.599	86,0
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,06	8.586	85,9
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,07	8.570	85,8
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,08	8.551	85,6
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,09	8.530	85,4
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,1	8.507	85,2
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,11	8.482	84,9
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,12	8.454	84,7
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,13	8.424	84,4
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,14	8.392	84,1
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,15	8.358	83,7
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,16	8.321	83,4
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,17	8.283	83,0
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,18	8.243	82,6
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,19	8.201	82,2
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,2	8.157	81,8
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,21	8.111	81,3
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,22	8.064	80,9
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,23	8.015	80,4
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,24	7.965	79,9
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,25	7.913	79,4
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,26	7.859	78,9
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,27	7.804	78,3
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,28	7.748	77,8
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,29	7.691	77,2
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,3	7.633	76,6
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,31	7.573	76,0
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,32	7.513	75,4
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,33	7.451	74,8
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,34	7.389	74,2
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,35	7.326	73,6
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,36	7.262	72,9
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,37	7.198	72,3
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,38	7.133	71,7
3053 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,385	7.101	34,2
							Prom	8.063	79,7
							Suma		3.109,5
							EEtPro por Tpo Proc		3.102,6
							FE		0,231

Tabla 4. Cálculo de la “energía efectiva total” y el “factor de efectividad”.

Cálculo de la “energía efectiva total “ con CATS

Para la tronadura 3050 32 con CATs, el valor del volumen “V_{0e}” es igual al volumen de la carga (680 lt), más el volumen correspondiente a 1,2 m de cámara de aire (91,3 lt). Es decir 771 lt.

Los valores de “P₀” y “V₀” son los mismos que los correspondientes a la tronadura convencional, es decir 19,74 Katm lt y 680 lt respectivamente. La aceleración del “taco” corresponde a dos veces el largo del taco, dividido por el “tiempo de proceso” al cuadrado ($2 * 6,6 / 0,4965^2 = 53,5$ (m/seg²). En consecuencia, la relación 3.26) que entrega la “energía efectiva” en cada instante, toma la siguiente forma:

$$EE_t = 19.74 * 680 * \left(\frac{680}{771}\right)^{1.035} \left(\frac{771}{771 + 76.04 * \frac{1}{2} 53.5 t^2}\right)^{1.035}$$

La tabla 5, entrega el desarrollo del cálculo numérico de la “energía efectiva total” para la tronadura 3050 32 con CATs.

Para este caso, el cálculo de la “energía efectiva total” entrega un valor igual a 4.883 Katm-lt = 118.169 Kcal = 50.441.390 Kg-m, para el pozo representativo de la tronadura.

Dividiendo la “energía efectiva total” obtenida mediante el cálculo, por la energía aportada por el explosivo ((P₀V₀), se obtiene el “factor de efectividad” (FE) igual 0,364.

La energía calórica entregada por el explosivo asciende a 680*830 =564.400 Kcal, de acuerdo al valor calórico entregado por ENAEX para el Blendex 930, 830 Kcal/kg.

Tronadura	PO	V0	V0e	Gam	A	a	Tpo	EEt	EEt Δt
0,4965Tpo proc	Katm	lt	lt	adm	lt/m	m/s ²	seg	(katmlt)	(katmlt)
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0	11.783	
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,01	11.784	117,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,02	11.774	117,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,03	11.758	117,7
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,04	11.736	117,5
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,05	11.707	117,2
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,06	11.672	116,9
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,07	11.631	116,5
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,08	11.584	116,1
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,09	11.532	115,6
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,1	11.474	115,0
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,11	11.410	114,4
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,12	11.341	113,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,13	11.267	113,0
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,14	11.188	112,3
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,15	11.104	111,5
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,16	11.016	110,6
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,17	10.924	109,7
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,18	10.828	108,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,19	10.728	107,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,2	10.624	106,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,21	10.518	105,7
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,22	10.408	104,6
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,23	10.296	103,5
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,24	10.182	102,4
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,25	10.065	101,2
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,26	9.946	100,1
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,27	9.825	98,9
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,28	9.703	97,6
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,29	9.579	96,4
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,3	9.455	95,2
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,31	9.329	93,9
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,32	9.203	92,7
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,33	9.076	91,4
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,34	8.949	90,1
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,35	8.821	88,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,36	8.694	87,6
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,37	8.566	86,3
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,38	8.439	85,0
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,39	8.313	83,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,4	8.187	82,5
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,41	8.061	81,2
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,42	7.937	80,0
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,43	7.813	78,7
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,44	7.690	77,5
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,45	7.568	76,3
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,46	7.448	75,1
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,47	7.328	73,9
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,48	7.210	72,7
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,49	7.093	71,5
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,497	7.018	45,9
							Prom	9.835	97,9
							Suma		4.897,1
							EEtPro por Tpo Proc		4.883,0
							FE		0,364

Tabla 5. Calculo de la “energía efectiva total” y FE tronadura 3050 32 CC.

La figura 4, entrega en forma gráfica la variación de la “energía efectiva” instantánea de las tronaduras 3050 32 convencional y con “activadores”, entre los tiempos 0 y el tiempo total del proceso de quiebre.

□

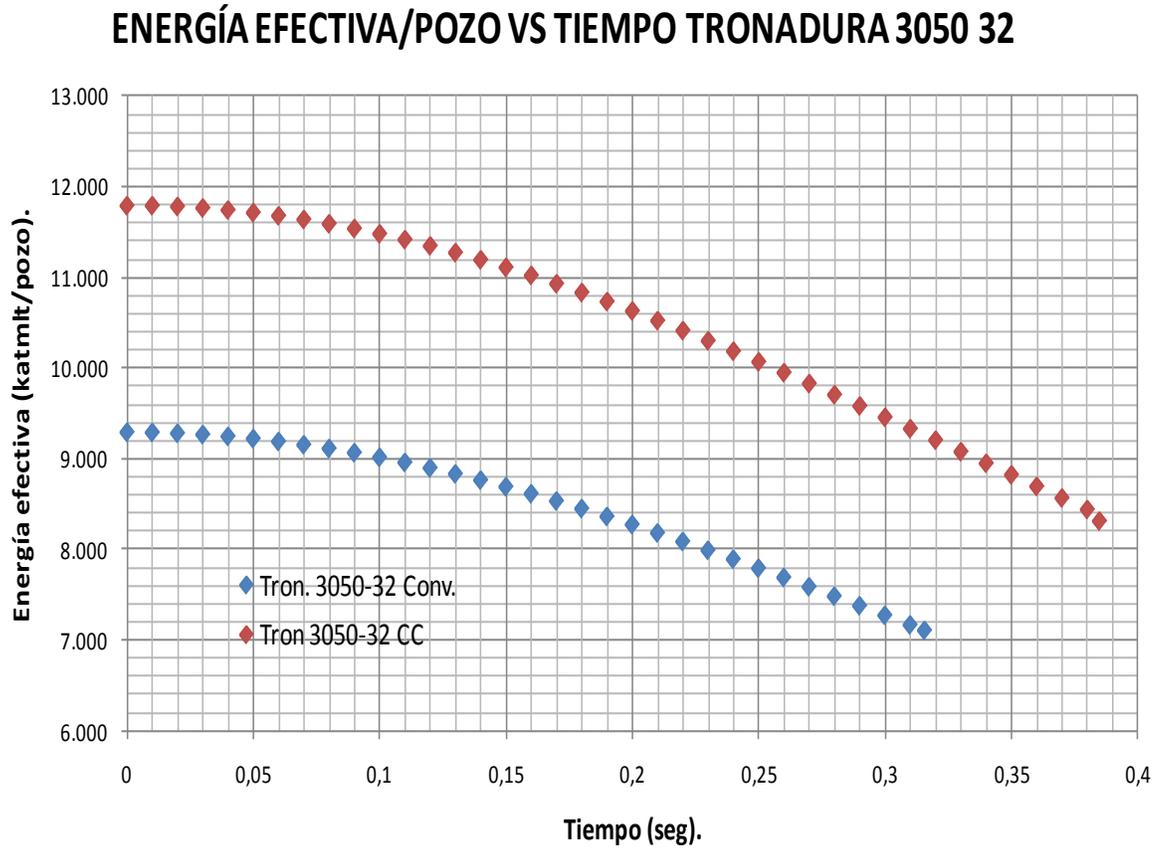


Figura 4. Distribución de la “energía efectiva” en el tiempo.

ANEXO 2: Planillas de cálculo y gráficos y gráficos de la “energía efectiva”

TRONADURA 3050 32

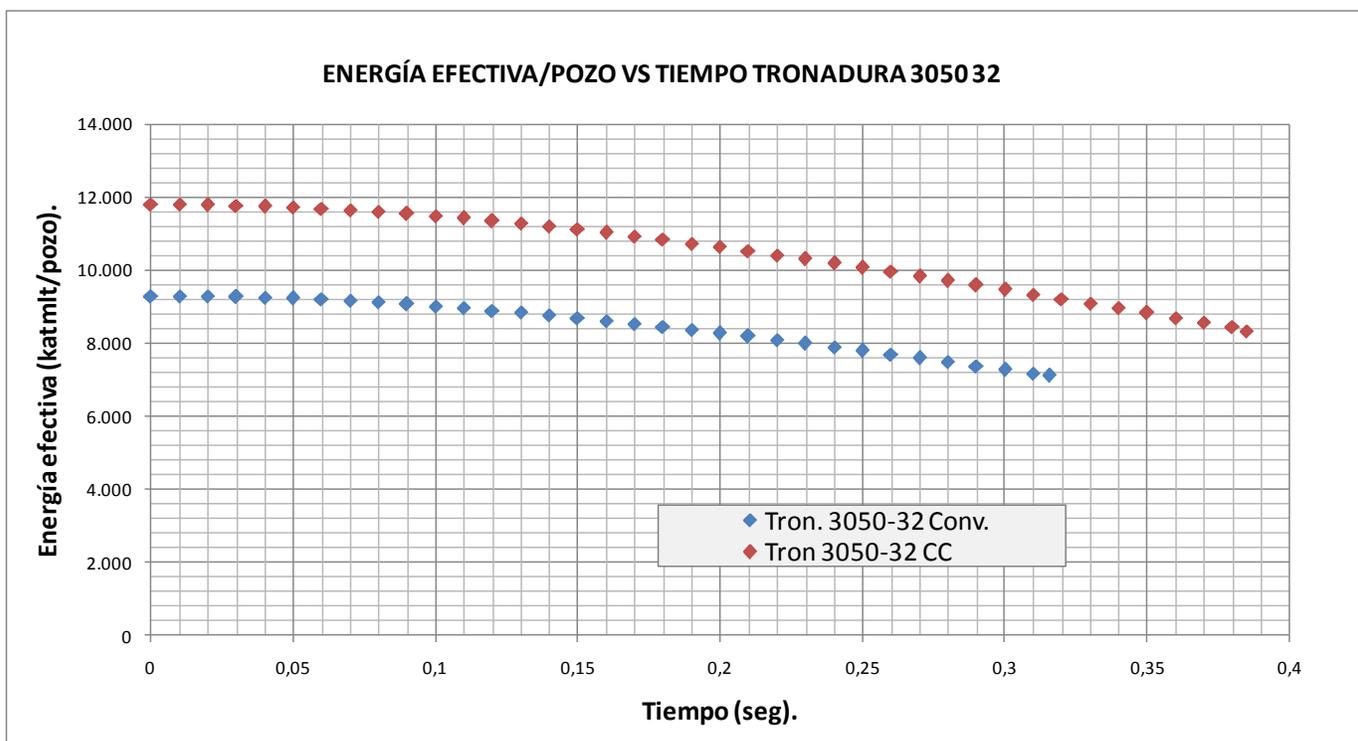
Tronadura 3050 32 convencional.

TRONADURA	PO	V0	V0e	Gam	A	a	Tpo	EEt	EEt Δt
0,3848 tpo Proc	Katm	lt	lt	adm	lt/m	m/s ²	seg	(katmlt)	katmlt
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0	8.630	
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,01	8.629	86,3
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,02	8.625	86,3
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,03	8.619	86,2
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,04	8.610	86,1
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,05	8.599	86,0
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,06	8.586	85,9
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,07	8.570	85,8
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,08	8.551	85,6
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,09	8.530	85,4
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,1	8.507	85,2
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,11	8.482	84,9
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,12	8.454	84,7
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,13	8.424	84,4
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,14	8.392	84,1
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,15	8.358	83,7
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,16	8.321	83,4
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,17	8.283	83,0
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,18	8.243	82,6
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,19	8.201	82,2
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,2	8.157	81,8
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,21	8.111	81,3
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,22	8.064	80,9
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,23	8.015	80,4
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,24	7.965	79,9
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,25	7.913	79,4
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,26	7.859	78,9
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,27	7.804	78,3
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,28	7.748	77,8
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,29	7.691	77,2
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,3	7.633	76,6
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,31	7.573	76,0
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,32	7.513	75,4
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,33	7.451	74,8
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,34	7.389	74,2
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,35	7.326	73,6
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,36	7.262	72,9
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,37	7.198	72,3
3052 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,38	7.133	71,7
3053 N 32 Conv	19,74	680	1042	2,035	76,04	38,4	0,385	7.101	34,2
							Prom	8.063	79,7
							Suma		3.110
							EetPro por Tpo		3.103
							FE		0,231

Tronadura con “conos activadores de tacos” “CATs”

Tronadura	PO	V0	V0e	Gam	A	a	Tpo	EEt	EEt Δt
0,4965Tpo proc	Katm	lt	lt	adm	lt/m	m/s ²	seg	(katmlt)	katmlt
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0	11.783	
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,01	11.784	117,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,02	11.774	117,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,03	11.758	117,7
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,04	11.736	117,5
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,05	11.707	117,2
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,06	11.672	116,9
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,07	11.631	116,5
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,08	11.584	116,1
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,09	11.532	115,6
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,1	11.474	115,0
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,11	11.410	114,4
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,12	11.341	113,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,13	11.267	113,0
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,14	11.188	112,3
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,15	11.104	111,5
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,16	11.016	110,6
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,17	10.924	109,7
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,18	10.828	108,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,19	10.728	107,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,2	10.624	106,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,21	10.518	105,7
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,22	10.408	104,6
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,23	10.296	103,5
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,24	10.182	102,4
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,25	10.065	101,2
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,26	9.946	100,1
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,27	9.825	98,9
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,28	9.703	97,6
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,29	9.579	96,4
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,3	9.455	95,2
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,31	9.329	93,9
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,32	9.203	92,7
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,33	9.076	91,4
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,34	8.949	90,1
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,35	8.821	88,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,36	8.694	87,6
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,37	8.566	86,3
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,38	8.439	85,0
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,39	8.313	83,8
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,4	8.187	82,5
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,41	8.061	81,2
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,42	7.937	80,0
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,43	7.813	78,7
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,44	7.690	77,5
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,45	7.568	76,3
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,46	7.448	75,1
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,47	7.328	73,9
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,48	7.210	72,7
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,49	7.093	71,5
3052 N 32 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	53,5	0,497	7.018	45,9
							Prom	9.835	97,9
							Suma		4.897
							EEtPro por Tpo f		4.883
							FE		0,364

Gráficos: “Energía efectiva” vs tiempo, tronadura convencional y con CATs.



TRONADURA 2990

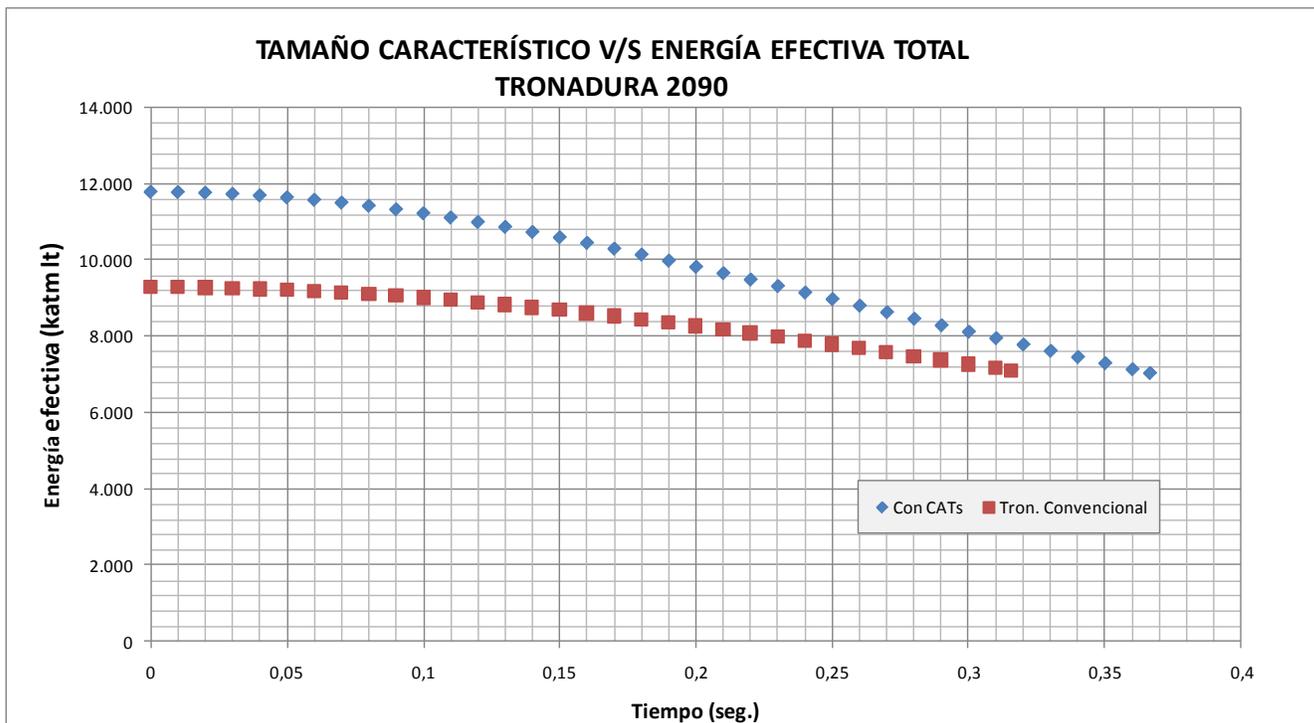
Tronadura 2990 convencional.

TRONADURA	PO	V0	V0e	Gam	A	a	Tpo	EEt	EEt Δt
0,3157tpo Proc	Katm	lt	lt	adm	lt/m	m/s ²	seg	(katmlt)	katmlt
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0	9.289	
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,01	9.286	92,9
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,02	9.278	92,8
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,03	9.263	92,7
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,04	9.244	92,5
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,05	9.218	92,3
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,06	9.187	92,0
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,07	9.151	91,7
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,08	9.110	91,3
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,09	9.063	90,9
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,1	9.012	90,4
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,11	8.956	89,8
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,12	8.895	89,3
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,13	8.830	88,6
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,14	8.760	88,0
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,15	8.687	87,2
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,16	8.610	86,5
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,17	8.530	85,7
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,18	8.446	84,9
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,19	8.359	84,0
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,2	8.269	83,1
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,21	8.177	82,2
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,22	8.083	81,3
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,23	7.986	80,3
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,24	7.887	79,4
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,25	7.787	78,4
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,26	7.686	77,4
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,27	7.583	76,3
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,28	7.479	75,3
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,29	7.374	74,3
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,3	7.268	73,2
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,31	7.162	72,2
2990 Conv	19,74	680	970	2,035	76,04	75,9	0,316	7.101	40,7
							Prom	8.455	83,7
							Suma		2.678
							EetPro por Tpo f		2.669
							FE		0,199

Tronadura con “conos activadores de tacos” “CATs”

TRONADURA	PO	V0	V0e	Gam	A	a	Tpo	EEt	EEt Δt
0,3664 tpo Proc	Katm	lt	lt	adm	lt/m	m/s ²	seg	atmlt)/sek	katmlt
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0	11.787	
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,01	11.781	117,8
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,02	11.763	117,7
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,03	11.734	117,5
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,04	11.693	117,1
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,05	11.641	116,7
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,06	11.578	116,1
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,07	11.504	115,4
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,08	11.420	114,6
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,09	11.326	113,7
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,1	11.223	112,7
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,11	11.112	111,7
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,12	10.992	110,5
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,13	10.864	109,3
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,14	10.730	108,0
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,15	10.589	106,6
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,16	10.443	105,2
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,17	10.291	103,7
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,18	10.135	102,1
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,19	9.975	100,6
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,2	9.812	98,9
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,21	9.645	97,3
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,22	9.477	95,6
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,23	9.307	93,9
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,24	9.135	92,2
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,25	8.963	90,5
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,26	8.790	88,8
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,27	8.618	87,0
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,28	8.445	85,3
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,29	8.274	83,6
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,3	8.103	81,9
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,31	7.934	80,2
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,32	7.767	78,5
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,33	7.601	76,8
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,34	7.437	75,2
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,35	7.276	73,6
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,36	7.117	72,0
2990 CC	19,74	680	771	2,035	76,04	98,3	0,366	7.016	45,2
							Prom	9.824	97,7
							Suma		3.614
							EEtPro por Tpo		3.599
							FE		0,268

Gráficos: “Energía efectiva” vs tiempo, tronaduras convencional y con CATs.



TRONADURA 3020

Tronadura 3020 convencional.

TRONADURA	PO	V0	V0e	Gam	A	a	Tpo	EEt	EEt Δt
0,3858tpo Proc	Katm	lt	lt	adm	lt/m	m/s ²	seg	(katmlt)	katmlt
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0	10.343	
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,01	10.341	103,4
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,02	10.337	103,4
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,03	10.331	103,3
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,04	10.321	103,3
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,05	10.309	103,2
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,06	10.294	103,0
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,07	10.277	102,9
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,08	10.257	102,7
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,09	10.234	102,5
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,1	10.209	102,2
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,11	10.182	102,0
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,12	10.151	101,7
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,13	10.119	101,4
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,14	10.084	101,0
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,15	10.047	100,7
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,16	10.007	100,3
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,17	9.966	99,9
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,18	9.922	99,4
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,19	9.876	99,0
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,2	9.828	98,5
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,21	9.778	98,0
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,22	9.726	97,5
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,23	9.673	97,0
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,24	9.617	96,4
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,25	9.560	95,9
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,26	9.501	95,3
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,27	9.441	94,7
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,28	9.379	94,1
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,29	9.316	93,5
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,3	9.251	92,8
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,31	9.185	92,2
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,32	9.118	91,5
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,33	9.050	90,8
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,34	8.981	90,2
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,35	8.911	89,5
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,36	8.840	88,8
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,37	8.768	88,0
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,38	8.695	87,3
3020 Conv	26,16	651	1.053	2,035	76,04	35,0	0,386	8.652	50,3
							Prom	9.722	96,3
							Suma		3.757
							EEtPro por Tpo l		3.751
							FE		0,220

Tronadura con “conos activadores de tacos” “CATs”

TRONADURA	PO	V0	V0e	Gam	A	a	Tpo	EEt	EEt Δt
0,5388tpo Proc	Katm	lt	lt	adm	lt/m	m/s ²	seg	(katmlt)	katmlt
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0	14.093	
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,01	14.089	140,9
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,02	14.077	140,8
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,03	14.057	140,7
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,04	14.029	140,4
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,05	13.994	140,1
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,06	13.950	139,7
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,07	13.899	139,2
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,08	13.841	138,7
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,09	13.775	138,1
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,1	13.703	137,4
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,11	13.623	136,6
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,12	13.537	135,8
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,13	13.445	134,9
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,14	13.347	134,0
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,15	13.243	132,9
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,16	13.134	131,9
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,17	13.019	130,8
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,18	12.900	129,6
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,19	12.776	128,4
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,2	12.648	127,1
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,21	12.516	125,8
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,22	12.381	124,5
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,23	12.242	123,1
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,24	12.101	121,7
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,25	11.957	120,3
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,26	11.810	118,8
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,27	11.662	117,4
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,28	11.511	115,9
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,29	11.359	114,4
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,3	11.206	112,8
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,31	11.052	111,3
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,32	10.897	109,7
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,33	10.742	108,2
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,34	10.586	106,6
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,35	10.431	105,1
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,36	10.275	103,5
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,37	10.120	102,0
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,38	9.965	100,4
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,39	9.811	98,9
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,4	9.658	97,3
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,41	9.505	95,8
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,42	9.354	94,3
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,43	9.204	92,8
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,44	9.055	91,3
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,45	8.907	89,8
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,46	8.761	88,3
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,47	8.617	86,9
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,48	8.474	85,5
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,49	8.333	84,0
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,5	8.194	82,6
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,51	8.057	81,3
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,52	7.921	79,9
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,53	7.787	78,5
3020 CC	26,56	613	704	2,035	76,04	51,0	0,539	7.671	68,0
							Prom	11.406	114,0
							Suma		6.155
							EEtPro por Tpo		6.145
							FE		0,378

Gráficos: “Energía efectiva” vs tiempo, tronaduras convencional y con CATs.

