



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**EFFECTOS EN EL MACIZO ROCOSO Y EN LA FRAGMENTACIÓN
INDUCIDOS POR TRONADURA EN TÚNELES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

CRISTÓBAL EDUARDO LASTRA MOYA

**PROFESOR GUÍA:
WINSTON ROCHER ANDA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN
MAGÍN TORRES RUBILAR
CAMILO SALINAS TORRES**

**SANTIAGO DE CHILE
JULIO 2014**

RESUMEN

Actualmente se ha tomado consciencia lo fundamental que es medir y controlar la granulometría resultante de la etapa de tronadura, ya que siendo ésta la primera instancia de conminución de la roca in-situ, tendrá gran influencia en la eficiencia de los procesos que lo prosiguen, tales como el carguío, transporte y reducción secundaria entre otros.

La presente investigación pretende elaborar un modelo que tenga como objetivo la predicción de la distribución granulométrica en túneles, en función de los parámetros de diseño de perforación y tronadura, y de las propiedades físicas de la roca. A pesar de que existen en la literatura modelos que cumplen con el objetivo –como el modelo Kuz-Ram y Swebrec–, éstos son complejos, es por eso que el modelo elaborado en este trabajo tendrá la ventaja de ser simple, sin que eso merme el acierto de la predicción.

Para construir el modelo se han obtenido fotografías de la marina resultante de la tronadura de una faena en particular (en este caso de la Mina Esmeralda, de la división El Teniente), de las cuales se estimará una distribución granulométrica por medio del análisis de imágenes. Se utiliza la distribución de Gaudin-Schuhmann para la construcción del modelo, relacionando de manera lineal los parámetros de ésta con las variables litológicas y de diseño.

El modelo construido presenta un error promedio de 7.8%, y es válido para el rango de parámetros bajo los cuáles fue ajustado. Una aplicación directa del mismo es la capacidad predictiva del modelo con el cual fue posible diseñar una malla de perforación en las galerías del nivel de acarreo, y que tenga por finalidad una redistribución de los tiros sin que esto implique un aumento significativo en el tamaño máximo de fragmento resultante.

Como conclusiones principales de este trabajo, se observa que el tamaño máximo resultante está condicionado por los parámetros burden, espaciamiento y largo de avance de los tiros (quienes limitan el volumen del fragmento en sus tres dimensiones), es decir, al aumentar los parámetros geométricos de diseño del diagrama de perforación, se observa un aumento del tamaño máximo de partícula, lo cual concuerda con la teoría básica de perforación y tronadura. Por otro lado se tiene que al aumentar el burden, espaciamiento y el factor de carga, se observa un aumento en la heterogeneidad de la muestra.

La aplicación de esta herramienta trae consigo grandes beneficios para el ciclo minero, ya que permite al ingeniero de perforación y tronadura rediseñar los diagramas de disparo en función de una distribución granulométrica deseada, permitiendo optimizar la cantidad de perforaciones realizadas por avance, lo cual a largo plazo se traduce, no tan sólo en un ahorro de tiempo, sino que además en un cuantioso ahorro de insumos para la operación. Cabe destacar, además, que esta metodología es replicable para cualquier otra condición de perforación y tronadura.

ABSTRACT

Nowadays it has been realized how important it is to measuring and controlling the size distribution resulting from blasting, since this being the first instance of in-situ rock comminuting, it will have great influence on the next processes' efficiency, such as the loading, transportation and secondary reduction among others.

The current investigation seeks to develop a model which predicts the size distribution in tunnels, in relation to the drilling and blasting design, and the physical properties of rocks. Although there are other models in the literature which fulfill the objective -like Kuz-Ram and Swebrec' models-, they are complex, that's why the model developed in this work has the advantage of being simple, without that undermine the success of the prediction.

To build the model, photographs of fragmented rocks resulting from the blasting were taken from one mine in particular (in this case the Esmeralda Mine, at El Teniente), from it will get the size distribution estimated by image analysis. The Gaudin-Schuhmann distribution it will be used to build the model, fitting the parameters of this distribution, linearly with design and lithology parameters.

The constructed model has an average error of 7.8%, and is available for the range of parameters under which it was created. A direct application is the predictive capability of the model, with which it was possible redesign a drilling design for the haulage level, and its object is a redistribution of drill holes, ensure it does not means a huge increase in the maximum size of the resulting fragment.

As main conclusions of this work indicates that the maximum resulting size is influenced by the parameters burden, spacing and length of the drill holes (which limit the volume of the fragment in three dimensions), in other words, by increasing the geometric design parameters of the drilling diagram, an increase of the maximum particle size, which agrees with the drilling and blasting theory. Furthermore, increasing the burden, spacing and the load factor, the sample's heterogeneity increase too.

The implementation of this tool brings huge benefits to the mining cycle, allowing the mining engineer to redesign the drilling design according to get a desired particle size distribution, optimizing the amount of perforations made by advancing, which might in the long term mean, not only to secure time savings, but also in a substantial operating supplies savings. It is noteworthy that this methodology is replicable for any other drilling and blasting condition.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a Dios y a mi familia, mis padres Sofía y Leandro, y a mis hermanos Leandro y Esteban por el incondicional apoyo que me han brindado durante toda mi vida y por ayudarme a lograr todas las metas que me he propuesto. Gracias por ser un pilar en todos estos años y por ser el incentivo en lo que me queda por recorrer.

Agradezco a Winston Rocher y Magín Torres por la tremenda disposición que me otorgaron durante todo el proceso de titulación y por guiarme en cada etapa. Fueron un apoyo fundamental para lograr el objetivo propuesto.

Gracias a Mas Errázuriz por darme la posibilidad de desempeñar en su obra de la mina Esmeralda las labores que permitieron desarrollar el presente escrito, en especial a Don Sergio Pereira por supervisar y apoyar las labores realizadas.

Quiero agradecer a mis amigos mineros, con los cuales tuve el agrado de realizar más de un trabajo a lo largo de la carrera y de compartir innumerables vivencias. A mis amigos Miguel Jorquera, Ricardo Duque, Jaime Rojas, Juan Dreyfus, Diego Olivares, Felipe López y Cristián Martínez. Es realmente un gusto haber encontrado personas valiosas durante los años de carrera.

Por último quiero agradecer y dedicar este trabajo a mi madrina, mi tía Florinda, quien en conjunto con mis padres hicieron posible que estudiara la carrera de Ingeniería Civil de Minas, acompañándome y cuidándome en todo momento sin pedir nada a cambio. Definitivamente dar las gracias no basta, pero lamentablemente no se ha inventado aún una palabra con la que pueda expresar la gratitud que siento por usted, por lo que quedo una vez más en deuda.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	3
INTRODUCCIÓN	3
1.1. <i>Objetivos</i>	4
1.1.1. <i>Objetivo general</i>	4
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	4
1.2. <i>Alcances</i>	4
1.3. <i>Organización del Presente Escrito</i>	5
CAPÍTULO 2	6
ANTECEDENTES	6
2.1 <i>Construcción de Túneles</i>	6
2.2 <i>Diseño Diagrama de Perforación</i>	9
2.3 <i>Análisis de Sistemas Particulados</i>	11
2.3.1 <i>Curva granulométrica</i>	11
2.3.2 <i>Modelos de curvas granulométricas</i>	12
2.3.3 <i>Modelos predictivos de granulometría por tronadura</i>	14
2.3.4 <i>Análisis de imágenes</i>	17
2.4 <i>Modelo de Regresión Lineal</i>	19
CAPÍTULO 3	21
METODOLOGÍA	21
CAPÍTULO 4	23
MODELO DE GRANULOMETRÍA RESULTANTE DE MARINA EN TÚNELES DE PROYECTO ESMERALDA LARGO PLAZO	23
4.1 <i>Caso de Estudio – Proyecto Esmeralda Largo Plazo</i>	23
4.2 <i>Diagramas de Perforación y Tronadura</i>	24
4.2.1 <i>Diámetro de perforación en nivel de acarreo</i>	25
4.2.2 <i>Diámetro de perforación en nivel de ventilación</i>	26
4.3 <i>Litologías</i>	28
4.4 <i>Análisis de Imágenes - Cálculo de Tamaño del Fragmento</i>	30
4.5 <i>Obtención Curva Granulométrica del Avance</i>	33

4.6	<i>Base de Datos para Construcción del Modelo</i>	37
4.7	<i>Detección de Outliers de los Parámetros del Modelo</i>	40
4.8	<i>Modelación de los Parámetros m y K</i>	51
CAPÍTULO 5		53
RESULTADOS		53
5.1	<i>Validación del Modelo</i>	53
5.2	<i>Propuesta de Diagrama de Perforación</i>	56
CAPÍTULO 6		60
CONCLUSIONES		60
CAPÍTULO 7		62
RECOMENDACIONES		62
BIBLIOGRAFÍA		63
ANEXO A		65
MUESTREO – PORCENTAJE ACUMULADO PASANTE		65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Estimación cuadrantes rainura	9
Tabla 4.1: Detalles del diagrama de perforación, nivel de acarreo.	25
Tabla 4.2: Detalles del primer diagrama de perforación, nivel de ventilación.	26
Tabla 4.3: Detalles del segundo diagrama de perforación, nivel de ventilación.	27
Tabla 4.4: Propiedades físicas para unidades litológicas	29
Tabla 4.5: Función acumulada bajo tamaño de imagen combinada	35
Tabla 4.6: Muestreo total de datos.	39
Tabla 4.7: Estadísticas Parámetro “m”	41
Tabla 4.8: Estadísticas Parámetro “K”	42
Tabla 4.9: Estadísticas Parámetro “Largo Avance”	42
Tabla 4.10: Estadísticas Parámetro “Burden”	43
Tabla 4.11: Estadísticas Parámetro “Espaciamiento”	43
Tabla 4.12: Estadísticas Parámetro “Espaciamiento”	44
Tabla 4.13: Estadísticas Parámetro “Área”	45
Tabla 4.14: Estadísticas final Parámetro “Área”	45
Tabla 4.15: Estadísticas Parámetro “Explosivo Tronex”	46
Tabla 4.16: Estadísticas Parámetro “Explosivo Softron”	46
Tabla 4.17: Estadísticas Parámetro “Explosivo ANFO”	47
Tabla 4.18: Estadísticas Parámetro “Factor de Carga”	47
Tabla 4.19: Estadísticas Parámetro “UCS”	48
Tabla 4.20: Estadísticas Parámetro “UCS”	48
Tabla 4.21: Set de datos eliminados – outliers.	49
Tabla 4.22: Set de datos utilizados para la construcción del modelo.	50
Tabla 4.23: Detalles de cálculo del error de ajuste del modelo.	52
Tabla 5.1: Set de datos para validación.	53
Tabla 5.2: Porcentaje acumulado pasante original versus modelado	54
Tabla 5.3: Estimación cuadrantes rainura	56
Tabla 5.4: Parámetros diagrama original versus diagrama propuesta	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de perforación en frente de trabajo	7
Figura 2.2: Zonas en frente de trabajo	8
Figura 2.3: Cuadrantes rainura	10
Figura 2.4: Ejemplo de una curva granulométrica	11
Figura 2.5: Conceptualización de área proyectada	18
Figura 3.1: Distribución de tamaño de partícula obtenida por fotografías.....	21
Figura 4.1: División El Teniente, CODELCO	23
Figura 4.2: Nivel de acarreo y subnivel de ventilación, proyecto ELP.....	24
Figura 4.3: Diagrama de perforación, nivel de acarreo.....	25
Figura 4.4: Diagrama de perforación, sub-nivel de ventilación.	26
Figura 4.5: Litología proyecto ELP.....	28
Figura 4.6: Leyenda Litológica.	28
Figura 4.7: Cálculo del tamaño de fragmento	31
Figura 4.8: Cálculo de área del fragmento	32
Figura 4.9: Obtención curva granulométrica, Fotografía 1	33
Figura 4.10: Obtención curva granulométrica, Fotografía 2	34
Figura 4.11: Obtención curva granulométrica, Fotografía 3	34
Figura 4.12: Obtención curva granulométrica, Imagen Combinada	36
Figura 4.13: Distribución de muestras para validar y construir modelo	37
Figura 4.14: Boxplot típico para una serie	40
Figura 4.15: Boxplot parámetro “m”	41
Figura 4.16: Boxplot parámetro “K”	42
Figura 4.17: Boxplot parámetro “Largo Avance”	42
Figura 4.18: Boxplot parámetro “Burden”	43
Figura 4.19: Boxplot parámetro “Espaciamiento”	43
Figura 4.20: Boxplot final parámetro “Espaciamiento”	44
Figura 4.21: Boxplot parámetro “Área”	45
Figura 4.22: Boxplot final parámetro “Área”	45
Figura 4.23: Boxplot parámetro “Explosivo Tronex”	46
Figura 4.24: Boxplot parámetro “Explosivo Softron”	46
Figura 4.25: Boxplot parámetro “Explosivo ANFO”	47
Figura 4.26: Boxplot parámetro “Factor de Carga”	47
Figura 4.27: Boxplot parámetro “UCS”	48
Figura 4.28: Boxplot final parámetro “UCS”	48
Figura 4.29: Set de parámetros admisibles para modelación	49
Figura 5.1: Porcentaje acumulado pasante experimental versus modelado	55
Figura 5.2: Propuesta diagrama de perforación galería 5,0x4,9[m ²]	57
Figura 5.3: Parámetros diagrama original versus diagrama propuesta	59

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1: Distribución de Rosin-Rammler.....	12
Ecuación 2.2: Distribución de Swebrec.....	12
Ecuación 2.3: Parámetro de ondulación de la curva.....	12
Ecuación 2.4: Distribución de Gaudin-Schuhmann.....	12
Ecuación 2.5: Distribución de Rosin-Rammler.....	14
Ecuación 2.6: x_{50} Kuznetsov.....	14
Ecuación 2.7: Coeficiente de uniformidad de Cunningham para un explosivo.....	14
Ecuación 2.8: Coeficiente de uniformidad de Cunningham para dos explosivos.....	15
Ecuación 2.9: x_{50} de Finn Ouchterlony.....	15
Ecuación 2.10: Función $g(n)$ de Finn Ouchterlony.....	15
Ecuación 2.11: Parámetro A de Finn Ouchterlony.....	16
Ecuación 2.12: Diámetro equivalente de área proyectada.....	18
Ecuación 2.13: Matriz a modelar.....	19
Ecuación 2.14: Matriz de variables independientes.....	19
Ecuación 2.15: Modelo Lineal.....	19
Ecuación 2.16: Solución matricial regresión lineal múltiple.....	19
Ecuación 2.17: Cálculo de coeficientes en regresión lineal múltiple.....	20
Ecuación 3.1: Distribución de Gaudin-Schumann.....	21
Ecuación 4.1 Diámetro equivalente de área proyectada.....	31
Ecuación 4.2: Cálculo de área de fragmento.....	32
Ecuación 4.3: Cálculo de porcentaje retenido.....	33
Ecuación 4.4: Error de ajuste.....	36
Ecuación 4.5: Modelo obtenido.....	51

LISTA DE SÍMBOLOS

- m: Metro.
- mm: Milímetro.
- gr: Gramo.
- Kg: Kilogramo.
- MPa: Megapascal.
- $F_u(x)$: Función acumulada bajo tamaño, [%].
- x : Tamaño de partícula, [m].
- K : Tamaño máximo de partícula de Gaudin-Schuhmann, [m].
- m : Pendiente de la distribución de Gaudin-Schuhmann en gráfico log-log.
- $f_i(x)$: Función retenida, [%].
- ϕ : Diámetro del tiro, [mm].
- B : Burden, [m].
- E : Espaciamiento, [m].
- L : Longitud del tiro, [m].
- T : Longitud del taco, [m].
- D : Diámetro ficticio de alivio, [mm].
- H : Largo de avance eficiente, [m].
- q_f : Concentración lineal de carga en el fondo, [Kg/m].
- d^2 : Diámetro del cartucho de explosivo de fondo, [mm].
- δ : Densidad del explosivo, [gr/cm³].
- d_{100} : Tamaño bajo el cual se encuentre el 100 % del muestreo de partículas, [m].
- d_{80} : Tamaño bajo el cual se encuentre el 80 % del muestreo de partículas, [m].
- d_{50} : Tamaño bajo el cual se encuentre el 50 % del muestreo de partículas, [m].
- d_e : Diámetro equivalente de área proyectada, [mm].
- LA : Largo de avance, [m].
- A : Área de la sección de la galería, [m²].
- Ex_T : Porcentaje en peso del explosivo tronex (en ANFO equivalente), utilizado para el avance en particular, [%].
- Ex_S : Porcentaje en peso del explosivo softron (en ANFO equivalente), utilizado para el avance en particular, [%].
- Ex_A : Porcentaje en peso del explosivo ANFO, utilizado para el avance en particular, [%].
- FC : Factor de carga, [Kg ANFO/m³].
- UCS : Índice de compresión uniaxial, [MPa].
- x_{50} : Tamaño bajo el cual se encuentre el 50 % del muestreo de partículas, [m].
- x_{max} : Tamaño máximo de partícula en un muestreo, [m].
- n : Coeficiente de uniformidad de Cunningham.

- b : Parámetro de ondulación de la curva.
- Q : Masa de explosivo en un tiro, [kg].
- K : Factor de carga (Q/V_0), [kg/m^3]. (Modelo Kuz-Ram).
- V_0 : Roca tronada por tiro, [m^3].
- S_{anfo} : Potencia rompedora del explosivo.
- A : Factor de dureza de la roca.
- D : Diámetro de tiro, [mm]. (Modelo Kuz-Ram).
- W : Desviación estándar de la exactitud de perforación, [m].
- L : Longitud de la carga total, [m]. (Modelo Kuz-Ram).
- H : Largo de avance, [m]. (Modelo Kuz-Ram).
- LCF : Longitud de carga de fondo, [m].
- LCC : Longitud de carga de columna, [m].
- RMD : Descriptor de la masa rocosa. (Modelo Swebrec).
- JPS : Esparcimiento de las diaclasas verticales. (Modelo Swebrec).
- JPA : Ángulo del plano de la diaclasa. (Modelo Swebrec).
- RDI : Influencia de la densidad. (Modelo Swebrec).
- HF : Factor de dureza, dependiente del módulo de Young (E). (Modelo Swebrec).

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La etapa de perforación y tronadura en el ciclo minero es una de las más importantes, debido a que ésta corresponde a la primera instancia de conminución de la roca in-situ. La granulometría obtenida en esta fase tendrá gran relevancia en la eficiencia de los procesos posteriores, tales como el carguío, transporte y reducción secundaria, entre otros. Es por esto que es de suma importancia mantenerla controlada bajo ciertos rangos.

Para controlar la distribución de tamaño de los fragmentos obtenidos post-tronadura, es necesario conocer cuáles son los parámetros involucrados en este proceso, y cómo se relacionan entre sí. De este modo es posible optimizar el proceso de tronadura, y por consiguiente la eficiencia del ciclo completo.

Así mismo resulta impracticable en la operación el hecho de tamizar el volumen de roca tronada para calcular la distribución de los fragmentos, es por ello que se propone realizar este proceso mediante un análisis de imágenes, el cual no sólo es más económico, sino que además es más fácil y rápido de realizar.

A pesar de que existen en la literatura modelos que predigan la distribución granulométrica resultante de la tronadura, como los modelos de Kuz-Ram y Swebrec, éstos presentan una formulación compleja, en donde requieren de un alto conocimiento de las características de la roca y por tanto resultan ser ineficaces en la práctica, cuando no se tiene información disponible.

Se busca, entonces, con este trabajo elaborar una alternativa más eficiente y simple de las ya existentes, utilizando una distribución de Gaudin-Schuhmann para crear un modelo de predicción granulométrica para desarrollos horizontales, dependiente de los parámetros de la malla de perforación y tronadura y de las propiedades físicas de la roca, creado para un ambiente geológico y litológico en particular.

La construcción de este modelo permitirá rediseñar diagramas de disparo en función de una distribución granulométrica deseada, que a su vez permita no tan sólo una optimización de recursos en la etapa de tronadura, sino que además maximice la eficiencia de las etapas posteriores del ciclo minero.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

El objetivo general que se persigue es crear un modelo de predicción granulométrica post-tronadura, en función de los parámetros de diseño de perforación y tronadura, y de las propiedades físicas de la roca.

1.1.2. Objetivos específicos

- Obtener la distribución granulométrica de diversas frentes de avance en túneles, mediante análisis de imágenes.
- Identificar parámetros de diseño de perforación y tronadura, y propiedades físicas de la roca influyentes en la fragmentación.
- Realizar un modelo empírico para los parámetros de la distribución de Gaudin-Schuhmann, que a su vez sean dependientes de los parámetros del diagrama de perforación y tronadura, y de las propiedades físicas de la roca.
- Realizar un análisis estadístico de los datos, de manera de identificar *outliers* del muestreo.
- Determinar el set de parámetros bajo los cuales se obtiene un mejor escenario para la operación.

1.2. Alcances

- El trabajo se realiza en túneles mineros.
- Se utilizan datos de la mina Esmeralda de la división El Teniente, en los niveles de acarreo y sub-nivel de ventilación.
- Se consideran fijas las características del macizo rocoso.
- El cálculo de la distribución granulométrica de la marina resultante post-tronadura, se realiza en función de un análisis de imágenes de los fragmentos superficiales.
- No se consideran tamaños menores a 1/2", ya que no es posible apreciarlo en un análisis de imágenes.
- En el cálculo del diámetro de los fragmentos se utiliza la metodología de área proyectada.

1.3. Organización del Presente Escrito

El presente escrito está dividido en 7 capítulos.

- El capítulo 1 presenta una introducción al tema desarrollado, además de los objetivos que persigue, tanto general como específicos, y los alcances a considerar en este estudio.
- El capítulo 2 incluye los antecedentes bajo los cuales se sustenta el trabajo. Dando a conocer los parámetros que tienen lugar en la frente de trabajo de cada avance unitario, y que componen la malla de perforación y tronadura. Así mismo se presentan algunos de los modelos predictivos de granulometría existentes en la actualidad, y se describe la distribución de Gaudin-Schuhmann, que se utiliza para la construcción del modelo, luego se presenta los beneficios y limitaciones de un análisis de imágenes, entre otros tópicos de importancia.
- En el capítulo 3 se presentan los pasos a realizar para la construcción del modelo de predicción granulométrica.
- En el capítulo 4 se da a conocer el proyecto en donde se realiza la toma de muestras, y características propias de éste. Además se exhiben los desarrollos de cálculo que permiten la realización del estudio, así como la obtención de las curvas granulométricas mediante imágenes de marina y la detección y eliminación de *outliers* en los parámetros del modelo.
- En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos, así como la validación del modelo y una propuesta del diagrama de disparo para la galería de acarreo.
- En el capítulo 6 se exponen las conclusiones del trabajo.
- En el capítulo 7 se presentan recomendaciones a realizar para un futuro proyecto que tenga relación con éste mismo.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 Construcción de Túneles

En minería subterránea es necesaria la construcción de túneles, tanto de desarrollo –que permitan acceder al cuerpo mineralizado– como también de preparación – ubicados en el terreno de la explotación misma–, para los cuales se deben realizar distintas operaciones en cada avance unitario, como perforación, tronadura, ventilación, carguío de marina y transporte.

La sección y forma de los túneles depende de su finalidad y la duración en que se utiliza, existiendo secciones de 5 [m²] para galerías de explotación manual, hasta más de 30 [m²] para galerías principales de transporte, las cuales pueden construirse de manera horizontal o con cierta inclinación, dependiendo de su propósito.

Existen diversos tipos de túneles en minería subterránea, tanto verticales como horizontales, llevadas a cabo en forma manual o en forma mecanizada. En minería subterránea explotada por el método block caving se tiene el nivel de hundimiento, que corresponde a un conjunto de galerías a partir de las cuales se realiza la socavación o corte basal de la columna mineralizada; bajo este nivel se encuentra el nivel de producción, que corresponde a un conjunto de galerías en donde se realiza la operación de extracción del mineral. Además se tiene el nivel de acarreo, el cual es un conjunto de galerías donde llega el mineral proveniente del nivel de producción, mediante piques de traspaso. A su vez el subnivel de ventilación son todas aquellas galerías por las cuales se inyecta o extrae el aire necesario.

La perforación tiene como propósito generar un volumen hueco dentro de la roca para distribuir y confinar el explosivo. Una mala ejecución de la etapa de perforación y tronadura puede generar sobre y sub-excavaciones, además de ocasionar daños en la roca caja, implicando mayores costos de fortificación y aumentando los tiempos de ciclo.

En el diagrama de perforación se consideran distintos parámetros para la disposición de los tiros, como:

- Diámetro de perforación (ϕ)
- Burden (B): distancia perpendicular de un tiro a la cara libre.
- Espaciamiento (E): distancia entre tiros contiguos.
- Longitud de los tiros (L).
- Taco (T): longitud de tiro sin cargar.

A continuación se ilustran los parámetros de burden y espaciamiento en la frente de trabajo.

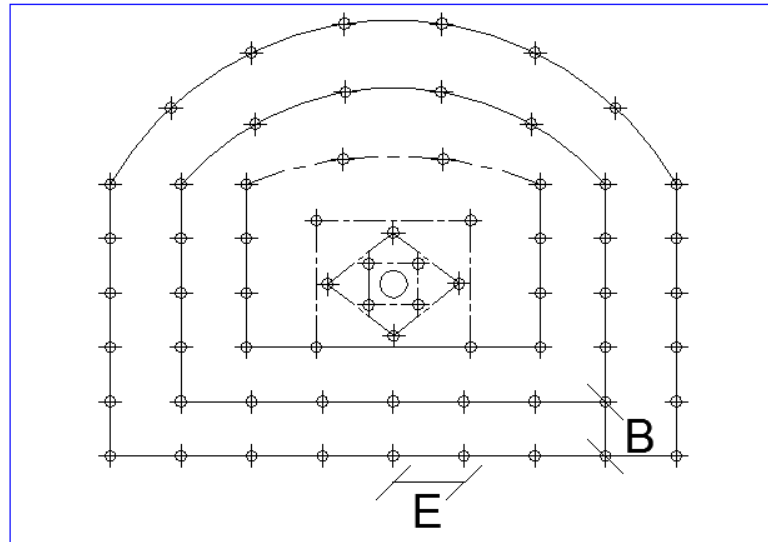


Figura 2.1: Diagrama de perforación en frente de trabajo

En las labores subterráneas de avance de galería se distinguen distintos objetivos del diagrama de perforación, los cuales vamos a definir por zonas (Guzmán, 2009. [9]).

- Zona 0: Rainura, correspondiente al primer conjunto de perforaciones, que presentan una mayor densidad de carga y son las primeras en detonar, para agrandar la cara libre (espacio vacío necesario para sopesar el aumento de volumen de la roca –esponjamiento–, debido a la tronadura).
- Zona 1: Zapatera, correspondiente a los tiros ubicados en la parte inferior, tienen como objetivo dejar una calle sin daño y dejar el piso con la inclinación de diseño lo más cercano posible.
- Zona 2: Caja, corresponde a los tiros ubicados en el contorno de la excavación, su geometría se establece de manera de producir el menor daño.
- Zona 3: Auxiliares (tiros de avance), correspondiente a los tiros dispuestos alrededor de la rainura, sobre los tiros de zapatera y en el interior de los tiros de contorno.

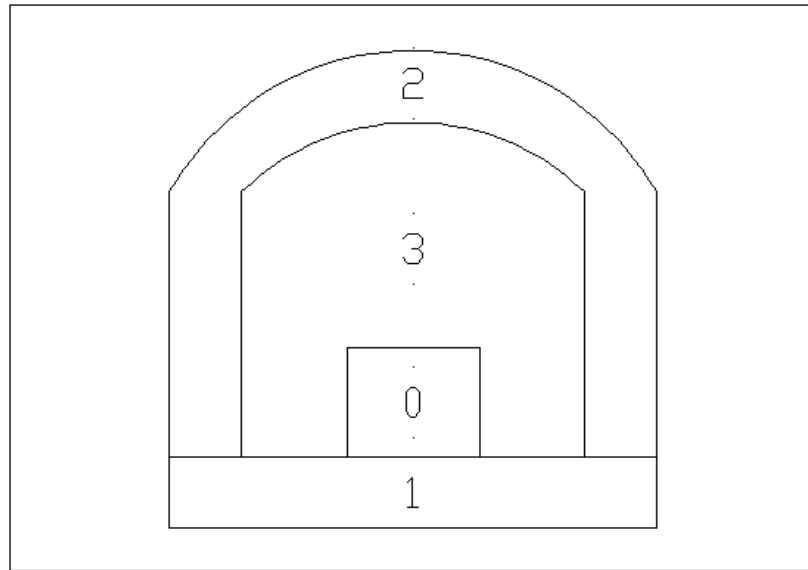


Figura 2.2: Zonas en frente de trabajo

Es parte de la información necesaria conocer las propiedades del explosivo, para generar una granulometría adecuada en la etapa de tronadura. Se definen los siguientes parámetros:

- Densidad del explosivo: Corresponde al peso del explosivo por unidad de volumen. Influye en la velocidad y presión de detonación.
- Factor de carga: Corresponde al peso del explosivo requerido para fragmentar un volumen o peso de roca. Se expresa en unidades de Kg/ ton, Kg/m³.
- Potencia rompedora del explosivo: Indica la capacidad del explosivo para realizar el proceso de fragmentación. Se utiliza el ANFO como punto de comparación (S_{ANFO}), correspondiéndole a éste un valor base de 100.

2.2 Diseño Diagrama de Perforación

Un diagrama de perforación es un esquema gráfico en donde se indica la disposición de las distintas perforaciones que tiene por propósito crear una excavación de dimensiones requeridas. Para la estimación de la malla de perforación se utilizará la metodología de diseño de geometría y cargas para rainuras del tipo Large-Hole-Cut, basado en fórmulas empíricas obtenidas a partir de investigaciones y experiencias realizadas por Langefors-Holmberg (Music, 2007. [11]).

En primer lugar se define el burden del primer cuadrante en relación al diámetro del tiro de alivio (tiros vacíos, sin carga explosiva), según la siguiente expresión:

$$B_1 = 1,50 * \phi$$

Donde:

- B_1 : Burden del primer cuadrante.
- ϕ : Diámetro del tiro de alivio.

Por otro lado, cuando hay más de un tiro de alivio como cara libre, se estima un diámetro ficticio del tiro de alivio según la relación:

$$D = \sqrt{n} * \phi$$

Donde:

- D: Diámetro ficticio.
- n: Número de tiros de alivio.

Además, esta metodología asegura un largo de avance eficiente (H), según la siguiente ecuación:

$$H = 0,15 + 34,10 * D - 39,40 * D^2$$

El burden de los siguientes cuadrantes viene dado por las ecuaciones detalladas en la tabla 2.1.

Cuadrante	Valor Burden	Lado del cuadrante
1°	$B_1 = 1,50 * D$	$W_1 = B_1 * \sqrt{2}$
2°	$B_2 = B_1 * \sqrt{2}$	$W_2 = 1,50 * B_2 * \sqrt{2}$
3°	$B_3 = 1,50 * B_2 * \sqrt{2}$	$W_3 = 1,50 * B_3 * \sqrt{2}$

Tabla 2.1: Estimación cuadrantes rainura

En la figura 2.3 se presenta un ejemplo de los cuadrantes ubicados en la zona de rainura para generar la cara libre, además del tiro de alivio ubicado en el centro para este caso en particular.

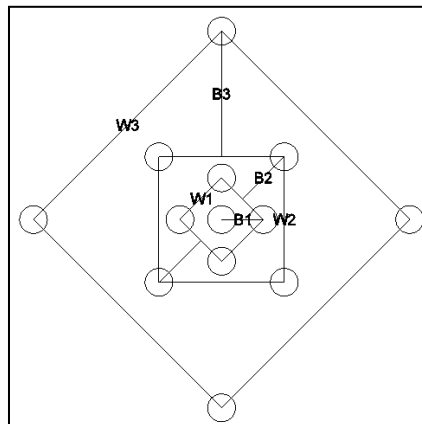


Figura 2.3: Cuadrantes rainura

Para calcular la ubicación y el carguío del resto de los tiros del diagrama, se parte de la estimación del burden “B” y de la concentración lineal de carga en el fondo de los tiros “ q_f ” para el explosivo y diámetro utilizado, según las fórmulas que se indican:

$$q_f = 7,85 \times 10^{-4} * d^2 * \delta$$

$$B = 0,88 * q_f^{0,35}$$

Donde:

- d^2 : Diámetro del cartucho de explosivo de fondo, [mm].
- δ : Densidad del explosivo, [gr/cm³].

De este modo, para el resto de los tiros se considera un burden igual a B y un espaciamiento igual a $1,10 * B$.

Esta malla de perforación debe considerarse como un diseño básico de primera aproximación, sujeto a mejoramientos dependiente de los resultados de la operación; así como también el posicionamiento de la rainura en la frente de avance, dependiente de las propiedades físicas de la roca en la frente de avance.

2.3 Análisis de Sistemas Particulados

Un sistema particulado está compuesto por partículas irregulares de diferentes tamaños, en donde para determinar su distribución y poder caracterizarla, se recurre a propiedades asociadas al conjunto de partículas, como su área superficial, masa o volumen, las cuales se grafican en curvas granulométricas.

2.3.1 Curva granulométrica

Es una representación de la distribución porcentual del tamaño de partículas, ésta se obtiene mediante la construcción de un histograma de valores obtenidos de un tamizaje, conteo de partículas o análisis de imágenes. Tal como se muestra en la figura 2.4, el eje de las abscisas corresponde al tamaño de partícula, y el eje de ordenadas a la función acumulada bajo tamaño (Bergman, 2005. [1]).

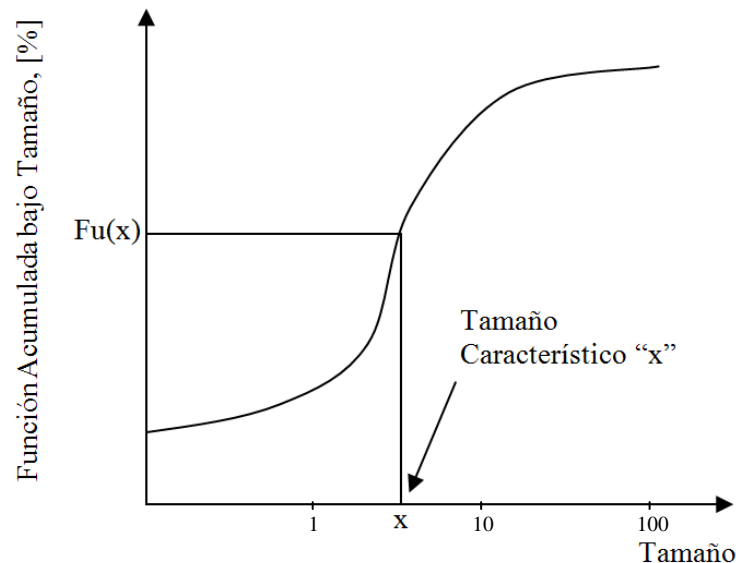


Figura 2.4: Ejemplo de una curva granulométrica

La zona superior de la curva indica la cantidad de gruesos presentes en el conjunto de fragmentos estudiados, por otro lado la zona inferior indica la cantidad de material fino existente.

Mediante esta representación gráfica es posible observar con mayor claridad los tamaños característicos típicos, como el d_{50} ó el d_{80} que indican los tamaños bajo los cuales se encuentran el 50% y el 80% de la muestra respectivamente.

Existen formas de representar esta curva mediante modelos, tales como Gaudin-Schuhmann, Rosin-Rammler, etc.

2.3.2 Modelos de curvas granulométricas

2.3.2.1 Rosin-Rammler

$$F_u(x) = 1 - \exp^{-0.693 \left(\frac{x}{x_{50}}\right)^n}$$

Ecuación 2.1: Distribución de Rosin-Rammler.

Donde x_{50} corresponde al tamaño bajo el cual se encuentra el 50% de la muestra y n se denomina como el coeficiente de uniformidad de Cunningham (King, 2001) (Rojas, 2009. [14]).

2.3.2.2 Swebrec

$$F_u(x) = \frac{1}{1 + \left[\ln\left(\frac{x_{max}}{x}\right) / \ln\left(\frac{x_{max}}{x_{50}}\right) \right]^b}$$

Ecuación 2.2: Distribución de Swebrec.

$$b = [2 \ln 2 * \ln(x_{max} / x_{50})] * n$$

Ecuación 2.3: Parámetro de ondulación de la curva.

Donde x_{max} corresponde al tamaño máximo de fragmento, x_{50} es el tamaño promedio y b se denomina como el parámetro de ondulación de la curva, el cual es función del coeficiente de uniformidad de Cunningham (Finn Ouchterlony, 2004. [5]).

2.3.2.3 Gaudin-Schuhmann

$$F_u(x) = \left(\frac{x}{K}\right)^m$$

Ecuación 2.4: Distribución de Gaudin-Schuhmann

Desarrollada por los investigadores Gates, Gaudin y Schuhmann entre los años 1915 y 1940 ([13]). Donde $F_u(x)$ corresponde a la función acumulada bajo tamaño, x es el tamaño de partícula, K corresponde al tamaño máximo de partícula (d_{100}) cuando el ajuste es bueno y m corresponde a la pendiente de esta ecuación e indica cuán distribuida está la granulometría del muestreo.

En este trabajo se opta por trabajar con una distribución de Gaudin-Schuhmann debido a la simplicidad que ésta presenta en su formulación con respecto a las otras, y considerando

además que tiene a su haber tan sólo dos parámetros, sin que ello implique una merma en la precisión de la estimación granulométrica.

2.3.3 Modelos predictivos de granulometría por tronadura

2.3.3.1 Kuz-Ram

Kuznetsov y Cunningham han utilizado la distribución de Rosin-Rammler para modelar la distribución de tamaños de partículas post-tronadura (Finn Ouchterlony, 2005. [7]). Esta ecuación se conoce como el modelo de Kuz-Ram (Kuznetov-Rammler), publicado en 1983.

$$F_u(x) = 1 - e^{-0.693 \left(\frac{x}{x_{50}}\right)^n}$$

Ecuación 2.5: Distribución de Rosin-Rammler.

Kuznetsov (1973), modela la constante x_{50} como:

$$x_{50} = A(K)^{-0.8} Q^{(1/6)} \left(\frac{115}{S_{anfo}}\right)^{19/20}$$

Ecuación 2.6: x_{50} Kuznetsov.

Donde:

- Q : Masa de explosivo en un tiro, [kg].
- K : Factor de carga (Q/V_0), [kg/m^3].
- V_0 : Roca tronada por tiro, [m^3].
- S_{anfo} : Potencia rompedora del explosivo (ANFO=100, TNT=115).
- A : Factor de dureza de la roca (7 media; 10 dura; 13 muy dura).

Además, el coeficiente de uniformidad de Cunningham n (1987) se modela, para el uso de sólo un explosivo (Cunningham, 2005. [2]), como:

$$n = \left(2.2 - 14 \frac{B}{D}\right) \left(1 - \frac{W}{B}\right) \left(\frac{1 + S/B}{2}\right)^{0.5} \frac{L}{H}$$

Ecuación 2.7: Coeficiente de uniformidad de Cunningham para un explosivo.

Ahora bien, para dos explosivos de distinta naturaleza se utiliza:

$$n = \left(2.2 - 14 \frac{B}{D}\right) \left(1 - \frac{W}{B}\right) \left(\frac{1 + S/B}{2}\right)^{0.5} \left(\left(\text{abs}\left(\frac{LCF - LCC}{L}\right)\right) + 0.1\right)^{0.1} \frac{L}{H}$$

Ecuación 2.8: Coeficiente de uniformidad de Cunningham para dos explosivos.

Donde:

- n : Exponente Rosin-Rammler, índice de uniformidad, [adim].
- B : Burden. [m].
- D : Diámetro del pozo, [mm].
- W : Desviación estándar de la exactitud de perforación, [m].
- A : Radio entre espaciamiento y burden.
- L : Longitud de la carga total, [m].
- H : Largo de avance, [m].
- S : Espaciamiento, [m].
- LCF : Longitud de carga de fondo, [m].
- LCC : Longitud de carga de columna, [m].

Cabe señalar que cuando la roca es competente se suele ocupar dos tipos de explosivos, uno denominado carga de fondo (CF) y otro carga de columna (CC).

2.3.3.2 Swebrec

El Swedish Blasting Research Centre at Luleå University of Technology propone la ecuación de Swebrec para modelar la distribución (Finn Ouchterlony, 2005. [6]).

El investigador Finn Ouchterlony (2004) modela la constante x_{50} como:

$$x_{50} = g(n)A(K)^{-0.8}Q^{(1/6)}\left(\frac{115}{S_{anfo}}\right)^{0.633}$$

Ecuación 2.9: x_{50} de Finn Ouchterlony

Donde:

$$g(n) \begin{cases} 1 \\ (\ln 2)^{1/n} / \Gamma(1 + 1/n) \end{cases}$$

Ecuación 2.10: Función $g(n)$ de Finn Ouchterlony

Siendo “ Γ ” la función gamma. Además el parámetro “ A ”, a diferencia del modelo de Kuz-Ram, se calcula como:

$$A = 0.06(RMD + JPS + JPA + RDI + HF)$$

Ecuación 2.11: Parámetro A de Finn Ouchterlony

Donde:

- RMD: Descriptor de la masa rocosa.
 - Polvo: puntaje de 10
 - Masivo: puntaje de 50
 - Vertical joints: $JF=JPS+JPA$
- JPS: Esparcimiento de las diaclasas verticales.
 - Average joint spacing $S_j < 0.1$ [m]: puntaje de 10
 - 0.1 [m] $< S_j < \text{oversize}$: puntaje de 20
 - $S_j > \text{oversize}$: puntaje de 50
- JPA: Ángulo del plano de la diaclasa.
 - Dip out of face: puntaje de 20
 - Strike \perp face: puntaje de 30
 - Dip into face: puntaje de 40
- RDI: Influencia de la densidad.
 - $0.025 * \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] - 50$
- HF: Factor de dureza, dependiente del módulo de Young (E).
 - $HF \begin{cases} \frac{E}{3} & \text{si } E < 50 \\ \frac{\sigma_c}{5} & \text{si } E > 50, \end{cases}$

2.3.4 Análisis de imágenes

La medición del tamaño de la fragmentación se realiza mediante el procesamiento de imágenes, y por medio del análisis de éstas se obtienen curvas granulométricas.

Los beneficios (Norbert, 2001. [12]) que presentan este tipo de sistemas de medición son:

- La medición se realiza de manera rápida.
- No hay costos asociados a la toma de mediciones adicionales.
- No interfiere mayormente en la producción.

Por otro lado las limitaciones que presenta son:

- Existen errores en la transformación asociada al cambio de 2D a 3D.
- Los fragmentos tienden a estar parcialmente solapados, por lo que se deben desarrollar algoritmos de probabilidad geométrica para obtener una buena distribución.
- Variabilidad en la iluminación, perspectiva y escala de la imagen genera distintas distribución de granulometrías.
- El sistema es incapaz de medir los finos.

Por lo general los sistemas ópticos de análisis de imágenes poseen una alta precisión (poca variabilidad en torno a un valor medio), pero una baja exactitud. En caso de que el objetivo de la medición de tamaño sea la especificación de la distribución, entonces la exactitud jugará un papel más importante, en cambio cuando se busca controlar algún proceso es más importante la precisión de la medida.

2.3.5 Diámetro de área proyectada

Existen diversos métodos para caracterizar una partícula de forma irregular, utilizando para ello diámetros equivalentes en relación a sus propiedades geométricas, como lo son el diámetro de área proyectada, diámetro de Martin o diámetro de Feret, entre otros.

Se opta por utilizar el diámetro de área proyectada para caracterizar a las partículas, ya que según lo observado en terreno, las partículas resultantes (en general) se asemejan más a una esfera que a cualquier otra figura geométrica, y teniendo a disposición imágenes en 2D, lo lógico entonces es caracterizarla por medio de un área proyectada.

El diámetro de área proyectada (d_e) consiste en atribuir un diámetro equivalente igual al de una circunferencia que posea igual área proyectada (A) a la partícula que se desea caracterizar, y que dependerá de la orientación de la partícula al momento de la medición.

$$d_e = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

Ecuación 2.12: Diámetro equivalente de área proyectada

En la figura 2.5 se ejemplifica cómo una partícula irregular (en azul) queda caracterizada por el diámetro de una circunferencia (en rojo) de igual área a ésta [16].

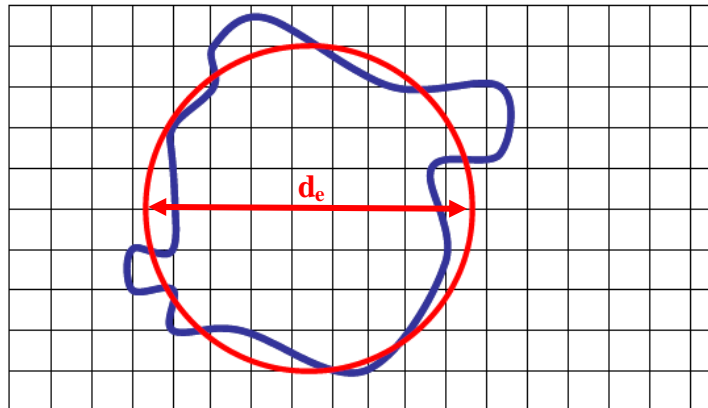


Figura 2.5: Conceptualización de área proyectada

2.4 Modelo de Regresión Lineal

Para la construcción del modelo predictivo se emplea una metodología de regresión lineal, con el cual es posible obtener una dependencia lineal de los parámetros de Gaudin-Schuhmann con las propiedades físicas de la roca y los parámetros de diseño de perforación y tronadura.

A continuación se detalla la metodología para construir modelos lineales (Uriel, 2013. [17]). Dada una matriz Y de dimensiones $(n,1)$, en donde n es la cantidad de observaciones del parámetro a modelar, y dada una matriz X de dimensiones (n,k) , donde k es la cantidad de variables independientes (propiedades físicas de la roca y los parámetros de perforación y tronadura) que serán utilizadas para modelar, en este caso, los parámetros de Gaudin-Schuhmann.

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$$

Ecuación 2.13: Matriz a modelar

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{pmatrix}$$

Ecuación 2.14: Matriz de variables independientes

Se desea obtener un modelo del tipo:

$$y_i = a_0 + a_1 * x_{1i} + a_2 * x_{2i} + \cdots + a_k * x_{ki}; \text{ donde } i \in [1, n]$$

Ecuación 2.15: Modelo Lineal

Es decir, se buscan los coeficientes $a_0, a_1, a_2, \dots, a_k$ que satisfagan la ecuación. Para ello se debe resolver la siguiente ecuación matricial, por teoría:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_{1i} y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ki} y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{1i} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ki} \\ \sum_{i=1}^n x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{ki} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ki} & \sum_{i=1}^n x_{ki} x_{1i} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ki}^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix}$$

Ecuación 2.16: Solución matricial regresión lineal múltiple

Por lo tanto el valor de los coeficientes viene dado por la siguiente expresión matemática:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{1i} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ki} \\ \sum_{i=1}^n x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{ki} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ki} & \sum_{i=1}^n x_{ki} x_{1i} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ki}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_{1i} y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ki} y_i \end{bmatrix}$$

Ecuación 2.17: Cálculo de coeficientes en regresión lineal múltiple

De esta manera es posible obtener la ecuación de predicción o la ecuación de regresión, bajo un modelo lineal, al resolver un conjunto de $k+1$ ecuaciones, con un número igual de incógnitas.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

Como trabajo de esta memoria, se desea obtener un modelo que permita estimar la distribución de tamaño de partículas post tronadura para los avances en el desarrollo de una galería.

La ecuación utilizada para representar la granulometría de tronadura será la de Gaudin-Schuhmman, debido a la simplicidad que ésta presenta en su formulación con respecto a otras, y debido a que tiene a su haber tan sólo 2 parámetros. Esta ecuación es la siguiente:

$$F_u(x) = \left(\frac{x}{K}\right)^m$$

Ecuación 3.1: Distribución de Gaudin-Schumann

Para la ejecución de esta memoria se trabaja con imágenes de las marinas en la frente de trabajo (3 imágenes por avance, de las cuales 2 corresponden a la marina que reposa en el sector de tronadura, y otra correspondiente a los fragmentos que se alejan de la frente) en donde se ubica un marco de dimensiones conocidas con el fin de definir una escala, tanto en profundidad como también en primer plano.

De este modo, mediante un análisis de imágenes, y utilizando el diámetro de área proyectada, es posible caracterizar los distintos fragmentos detectados y realizar un conteo estadístico, obteniendo así una distribución de tamaños de partículas para cada fotografía, y por consiguiente una distribución de tamaños de partículas para cada avance en particular (al incluir las tres imágenes por avance) tal como se muestra en la siguiente ilustración.

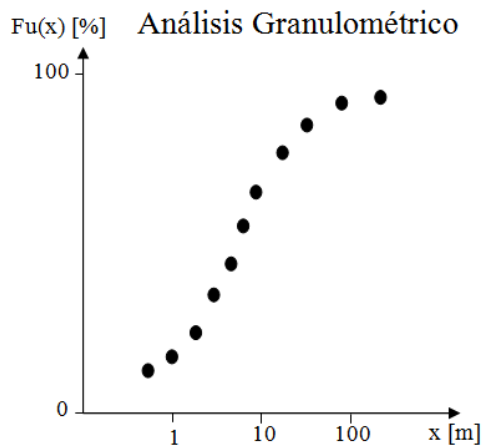


Figura 3.1: Distribución de tamaño de partícula obtenida por fotografías.

Los parámetros K y m de la distribución de Gaudin-Schuhmman, de cada avance, serán estimados a partir del ajuste de la distribución de tamaños obtenida mediante el análisis de imágenes.

Una vez obtenido un set de valores de K y m para cada uno de los avances, éstos serán relacionados con diferentes parámetros asociados a cada evento de perforación y tronadura, además de las propiedades físicas presentes en cada zona donde se realizó esta operación.

Para la construcción del modelo se realiza una regresión lineal de los datos, con el cual se estima un modelo para los parámetros de Gaudin-Schuhmann (utilizando sólo un 80% del total de los datos, obtenidos al azar) dependientes tanto de los parámetros de diseño de perforación y tronadura de los avances, y de las propiedades físicas de la roca.

Así se obtiene un modelo del tipo:

$$F_u(x) = \left(\frac{x}{K(B, S, UCS, \dots)} \right)^{m(UCS, B, \dots)}$$

$$m = a_0 + a_1 * UCS + a_2 * B + \dots$$

$$K = b_0 + b_1 * B + b_2 * S + b_3 * UCS + \dots$$

Para poder validar el modelo creado y conocer el error asociado que éste presenta se utilizan el 20% de los datos restantes, al cual se le aplicará el modelo obtenido y así validarlo según su exactitud.

Este modelo permitirá estimar la distribución de tamaños de partículas para futuros desarrollos de galerías en túneles, que presenten propiedades físicas y diagrama de perforación y tronadura similares a las cuales se utilizó para crear el modelo validado.

CAPÍTULO 4

MODELO DE GRANULOMETRÍA RESULTANTE DE MARINA EN TÚNELES DE PROYECTO ESMERALDA LARGO PLAZO

4.1 Caso de Estudio – Proyecto Esmeralda Largo Plazo

El proyecto Esmeralda Largo Plazo (ELP) tiene relación con la preparación de las obras en la mina Esmeralda, de la División El Teniente, CODELCO. Específicamente en el sub-nivel de ventilación, nivel de acarreo y en el nivel de extracción del sector Panel 1, lo cual permite ampliar la vida del sector incorporando nueva área para su explotación.

A la fecha de realización del presente estudio, el proyecto se encuentra en la fase de desarrollos horizontales, construcción de línea férrea, construcción y puesta en marcha de buzones, entre otras actividades.

El proyecto tiene contemplado, durante un período de 4 años, un avance en desarrollos horizontales de 11.316 [m], de los cuales 2.622 [m] corresponden al sub-nivel de ventilación, 3.021 [m] al nivel de acarreo, y 5.673 [m] a desarrollos en el Panel 1. Estos avances se realizan por medio del método de perforación y tronadura, empleando un jumbo de avance de 2 brazos, modelo Boomer H-282 (Mas Errázuriz, 2013. [10]).

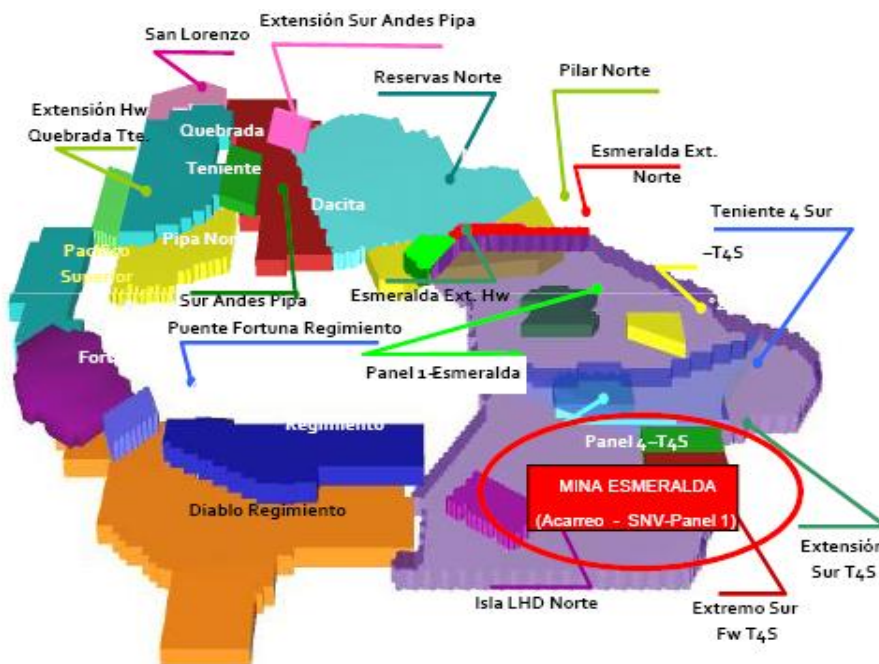


Figura 4.1: División El Teniente, CODELCO

4.2 Diagramas de Perforación y Tronadura

Para el desarrollo del trabajo se recopiló información de 5 frentes de avance distintas, de los cuales se conocían los diseños de perforación y tronadura implementados, además de las propiedades físicas de la roca en las cuales se estaban trabajando.

En la figura 4.2 se presentan las labores horizontales, en planta, efectuadas en el proyecto ELP. En rojo se muestran los desarrollos correspondientes al nivel de acarreo, y en azul correspondiente al sub-nivel de ventilación, las cuales se ubican a distintas cotas. Las frentes de las cuales se recopiló información han sido denominadas como:

- XC-43 FW Acarreo
- XC-48 FW Acarreo
- XC-48 HW Acarreo
- HW DR SUR Acarreo
- XC-51 FW Inyección

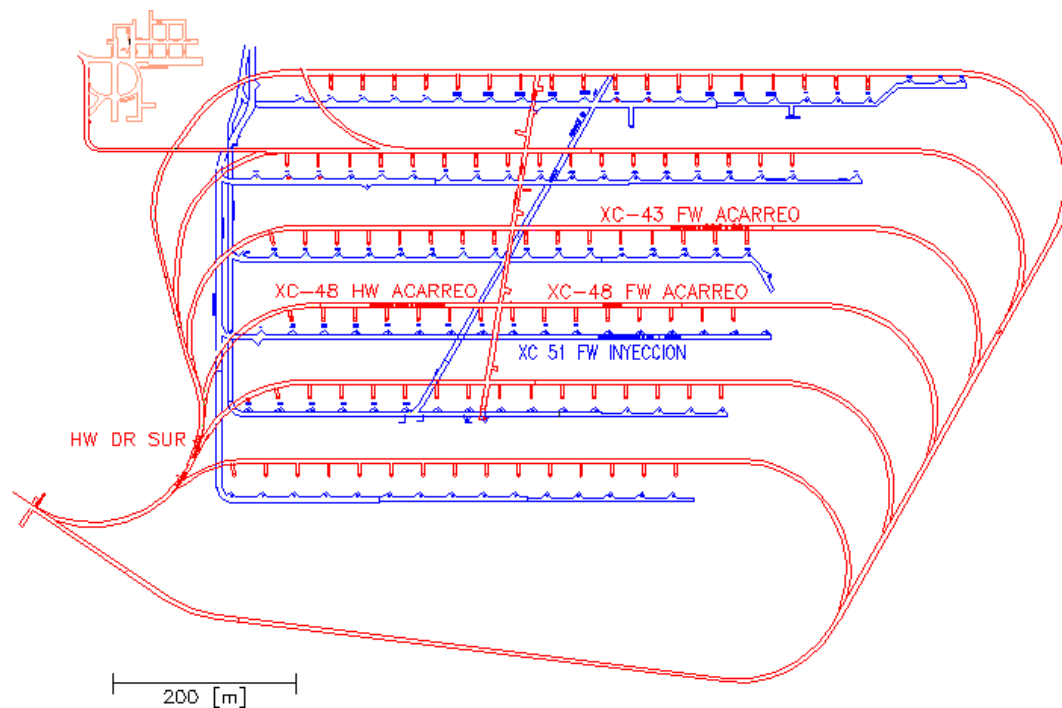


Figura 4.2: Nivel de acarreo y subnivel de ventilación, proyecto ELP.

4.2.1 Diámetro de perforación en nivel de acarreo

A continuación se ilustra en la figura 4.3 el diagrama de perforación en el nivel de acarreo y en la tabla 4.1 los detalles de éste.

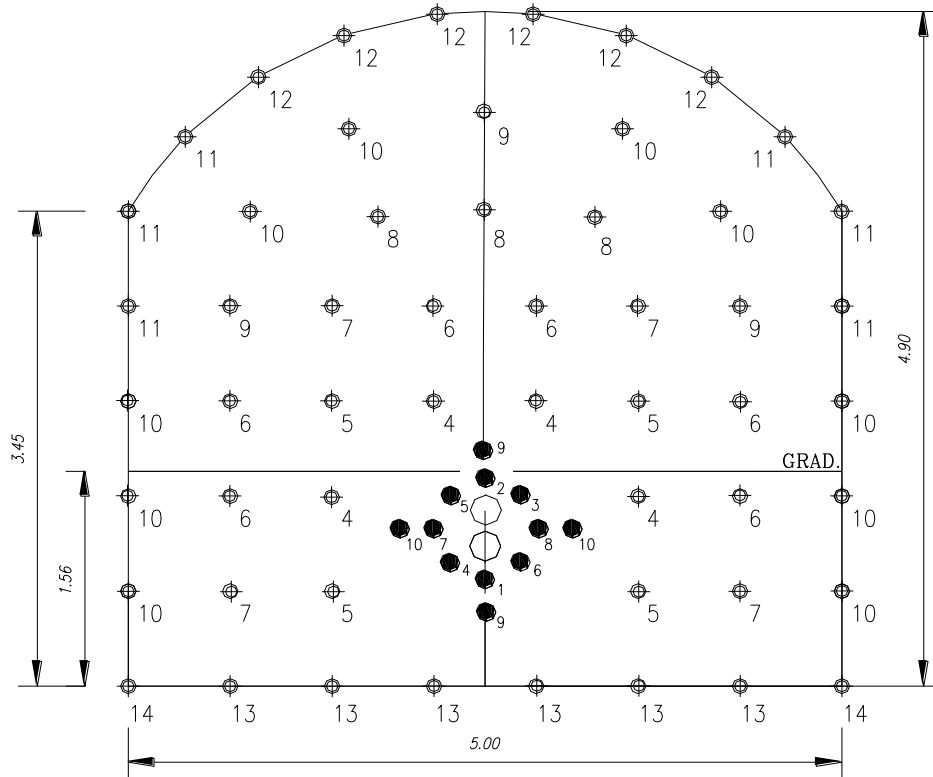


Figura 4.3: Diagrama de perforación, nivel de acarreo.

Nivel de Acarreo	
Sección [m ²]	5,0x4,9
N° Perforación rainura	12
N° Perforación de alivio	2
N° Perforación zapatera	8
N° Perforación caja	10
N° Perforación corona	8
N° Perforación auxiliar	28
Total perforaciones	66 + 2
Diámetro de perforación [mm]	45
Diámetro de pozo de alivio [mm]	110
Longitud de perforación [m]	3,8
Factor de carga [Kg ANFO/m ³].	2,32
Burden perforaciones auxiliares [m]	0,69
Espaciamiento perforaciones zapatera [m]	0,71

Tabla 4.1: Detalles del diagrama de perforación, nivel de acarreo.

4.2.2 Diámetro de perforación en nivel de ventilación

A continuación se ilustra en la figura 4.4 el diagrama de perforación en el nivel de ventilación y en la tabla 4.2 los detalles de éste.

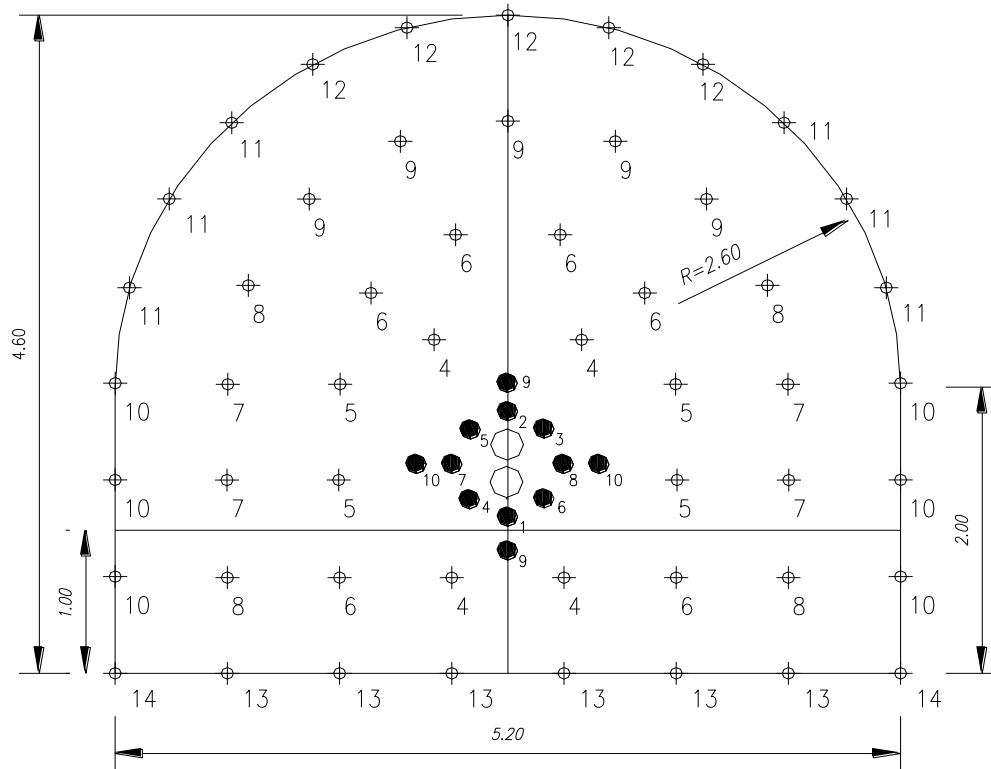


Figura 4.4: Diagrama de perforación, sub-nivel de ventilación.

Nivel de Ventilación, Primer Diagrama	
Sección [m ²]	5,2x4,6
N° Perforación rainura	12
N° Perforación de alivio	2
N° Perforación zapatera	8
N° Perforación caja	6
N° Perforación corona	11
N° Perforación auxiliar	27
Total perforaciones	64 + 2
Diámetro de perforación [mm]	45
Diámetro de pozo de alivio [mm]	110
Longitud de perforación [m]	3,8
Factor de carga [Kg ANFO/m ³].	2,19
Burden perforaciones auxiliares [m]	0,67
Espaciamiento perforaciones zapatera [m]	0,74

Tabla 4.2: Detalles del primer diagrama de perforación, nivel de ventilación.

Cabe mencionar que en el "XC-51 FW Inyección" se observa un cambio de sección, disminuyendo de 5,2x4,6 [m²] a 4,2x4,1 [m²], los detalles se presentan en la tabla 4.3.

Nivel de Ventilación, Segundo Diagrama	
Sección [m²]	4,2x4,1
N° Perforación rainura	12
N° Perforación de alivio	2
N° Perforación zapatera	8
N° Perforación caja	6
N° Perforación corona	9
N° Perforación auxiliar	20
Total perforaciones	55 + 2
Diámetro de perforación [mm]	45
Diámetro de pozo de alivio [mm]	110
Longitud de perforación [m]	3,8
Factor de carga [Kg ANFO/m³].	2,27
Burden perforaciones auxiliares [m]	0,67
Espaciamiento perforaciones zapatera [m]	0,60

Tabla 4.3: Detalles del segundo diagrama de perforación, nivel de ventilación.

4.3 Litologías

De manera de relacionar la granulometría de los disparos con las distintas propiedades físicas de la roca, se ilustra a continuación en la figura 4.5 las litologías presentes en el proyecto ELP.

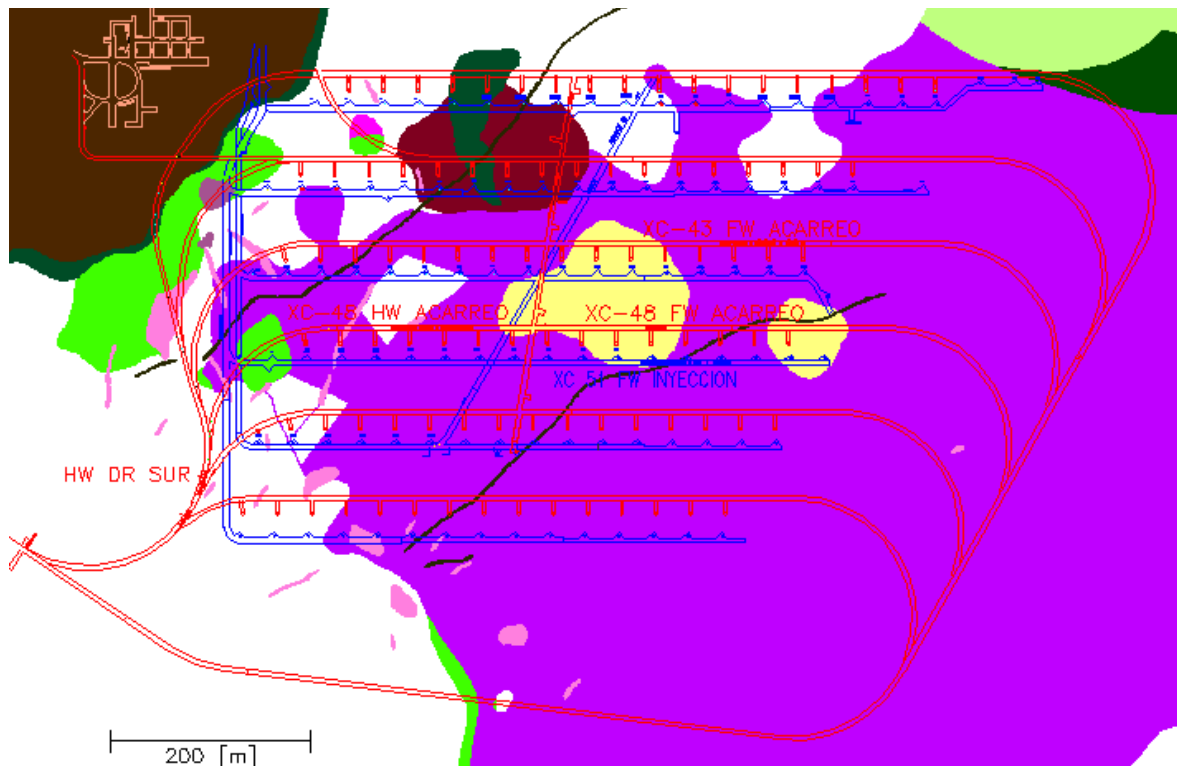


Figura 4.5: Litología proyecto ELP.

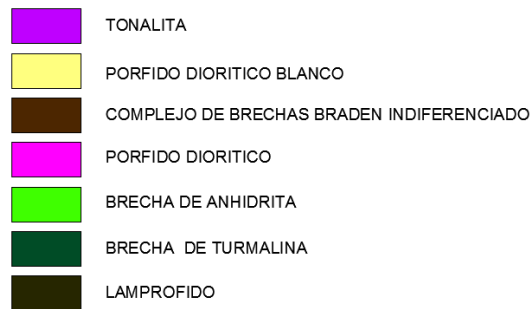


Figura 4.6: Leyenda Litológica.

En las distintas frentes de avances, donde se recopiló información, se identifican dos litologías; por un lado se observa un desarrollo en tonalita, y en menor medida en pórfido diorítico blanco.

Las propiedades físicas de estas litologías se presentan a continuación (Codelco Chile, División El Teniente, 2010. [8]).

Parámetro	Unidad	Pórfido Diorítico Blanco	Tonalita
Densidad	[ton/m ³]	2,70	2,70
Porosidad	[%]	0,80	0,90
UCS	[Mpa]	130	171
Módulo de Young	[Gpa]	52	52
Razón de Poisson		0,12	0,12

Tabla 4.4: Propiedades físicas para unidades litológicas

Como se puede apreciar en la tabla 4.4, los parámetros físicos de las rocas no se diferencian, salvo en los parámetros de índice de compresión uniaxial (UCS) y porosidad, pero en este último la diferencia no es cuantiosa para generar efectos significativamente distintos, por lo que para fines de este trabajo, las litologías quedarán representadas únicamente bajo su UCS.

Cabe destacar que se desconoce la litología presente en los avances realizados en “HW DR SUR”, pero se sabe que corresponde a una de las dos litologías detalladas con anterioridad. Se realiza un análisis estadístico comparativo entre los resultados obtenidos de esta frente de avance con respecto a las frentes de avances con litologías tonalita y pórfido diorítico blanco, y se determina que la zona correspondiente al “HW DR SUR” presenta propiedades físicas similares a las de tonalita, por lo que son estas propiedades las que se utilizan para caracterizar dicha zona.

4.4 Análisis de Imágenes - Cálculo de Tamaño del Fragmento

Se realiza un análisis de imágenes para calcular la frecuencia de fragmentos de cada fotografía, la cual presenta la ventaja de evitar un tamizaje a grandes volúmenes de roca, además de ser una alternativa más económica, fácil y rápida de usar.

Para lograr el objetivo con el análisis de imágenes se debe seguir una serie de pasos, los cuales se detallan a continuación:

- 1) Ubicación del marco (figura 4.7 [a]). Para normalizar la imagen (conversión de pixeles a milímetros) se utiliza un marco de dimensiones conocidas (1,0x1,0 [m²]) que se posiciona sobre la marina.
- 2) Identificar vértices del marco (figura 4.7 [b]). Con el puntero mouse se reconocen los vértices del marco, estableciendo así las dimensiones de la imagen, tanto en el eje de las abscisas, como también de las ordenadas (corrigiendo de este modo la sensación de profundidad), mediante las siguientes ecuaciones:

$$2.a) \frac{1000}{|x_{Marco,1} - x_{Marco,2}|}, \text{ para el eje de las abscisas}$$

$$2.b) \frac{1000}{|y_{Marco,1} - y_{Marco,2}|}, \text{ para el eje de las ordenadas}$$

- 3) Discretizar partícula (figura 4.7 [c]). Con el puntero mouse se discretiza la partícula a mesurar, obteniendo así un conjunto de triángulos tal como se indica en la figura 4.8, y a los cuales se calcula su área (A_i , $i=\{1, \dots, n\}$) mediante la ecuación 4.2, en donde se incluye el ajuste de dimensiones por el marco.
- 4) Cálculo del área de partícula (figura 4.7 [d]). Conociendo las áreas individuales de los triángulos que componen a la partícula (A_i , $i=\{1, \dots, n\}$), la sumatoria de éstas conforman el área de la partícula.

$$4.a) A_{part\ icula} [mm^2] = \sum_i^n A_i$$

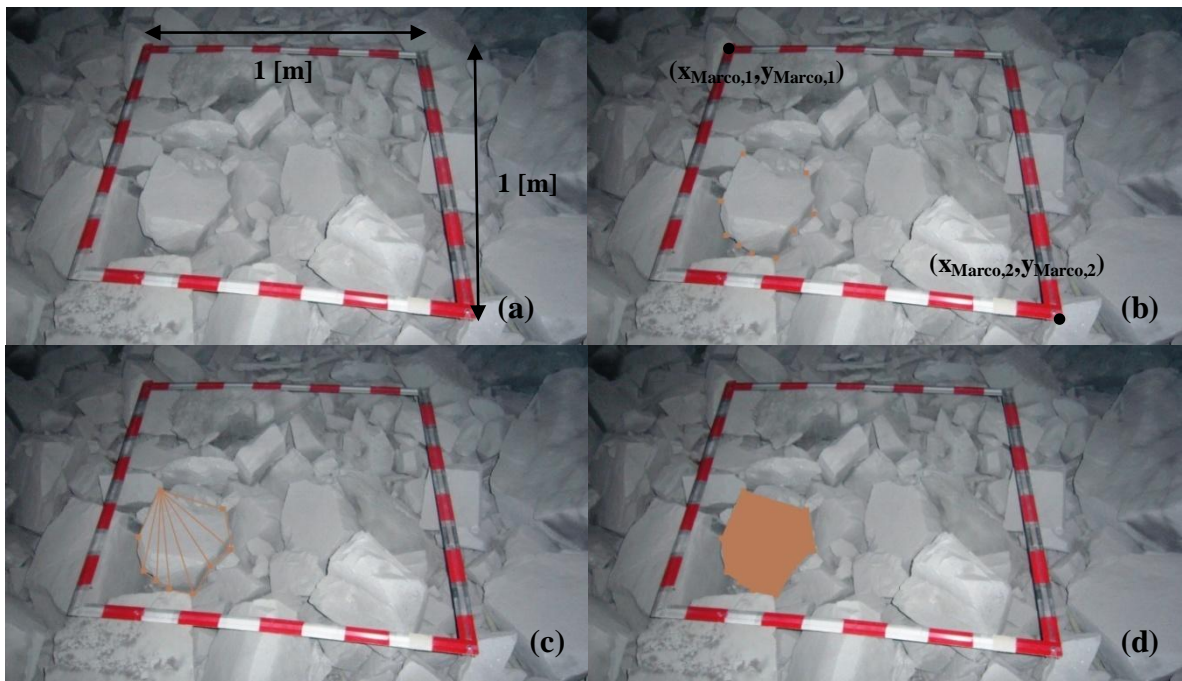


Figura 4.7: Cálculo del tamaño de fragmento

Una vez que se dispone del área de la partícula, se obtiene un tamaño o diámetro equivalente (d_e) utilizando la metodología de área proyectada, según la ecuación 4.1, y este tamaño de partícula se ordena en el correspondiente intervalo de tamaño de malla, discretizada en proporción a la raíz de 2.

$$d_e = \sqrt{\frac{4 * A_{particula}}{\pi}}$$

Ecuación 4.1 Diámetro equivalente de área proyectada

Realizando este procedimiento para el resto de los fragmentos de la imagen es posible obtener una frecuencia de fragmentos por cada fotografía. Se utilizará una macro de Excel para estos fines.

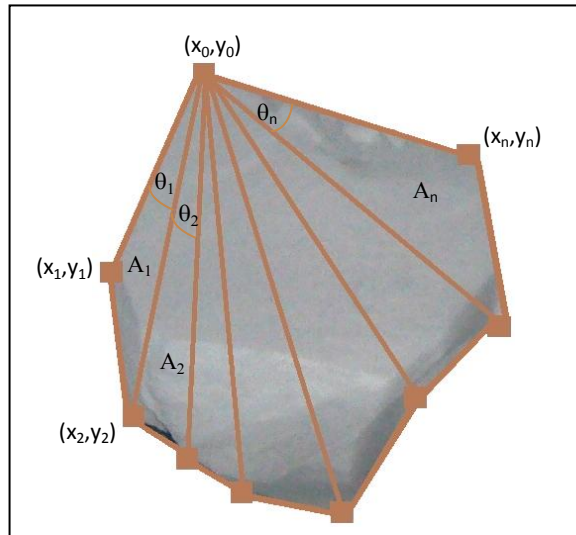


Figura 4.8: Cálculo de área del fragmento

$$A_i [mm^2] = \frac{1}{2} * \sin(\theta_i) * \sqrt{\frac{1.000}{\hat{x}} (x_i - x_0)^2 + \frac{1.000}{\hat{y}} (y_i - y_0)^2} * \sqrt{\frac{1.000}{\hat{x}} (x_{i+1} - x_0)^2 + \frac{1.000}{\hat{y}} (y_{i+1} - y_0)^2}$$

Ecuación 4.2: Cálculo de área de fragmento

Donde:

- $\hat{x} = |x_{Marco,1} - x_{Marco,2}|$
- $\hat{y} = |y_{Marco,1} - y_{Marco,2}|$

4.5 Obtención Curva Granulométrica del Avance

De cada avance por tronadura en los túneles mineros (67 en total) se toman 3 fotografías de la marina, 2 de ellas correspondientes a la marina que reposaba en la frente (debido a que en una única imagen no se alcanza a apreciar el gran volumen de roca en este sector) y 1 a aquella que escapan de la misma, ya que según lo observado en terreno esta granulometría es de menores dimensiones con respecto a la que reposa en la frente, por lo tanto debe incluirse para no incurrir en una pérdida de información del muestreo. A partir de estas imágenes se obtiene la distribución granulométrica del avance, al cual se le ajusta la distribución de Gaudin-Schuhmann para obtener los parámetros m y K .

A modo de ejemplo se ilustra cómo se realiza lo anteriormente descrito para un caso particular (en anexos se presentan los detalles del resto de los avances). Una vez obtenida la frecuencia de fragmentos por medio del análisis de imágenes, y utilizando la metodología de diámetro de área proyectada, se procede a obtener el porcentaje retenido según:

$$f_i [\%] = \frac{\text{Frecuencia}_i}{\sum_i^n \text{Frecuencia}_i} * 100$$

Ecuación 4.3: Cálculo de porcentaje retenido

Posteriormente se calcula el porcentaje acumulado pasante (F_u [%]), realizando este procedimiento para las 3 fotografías.

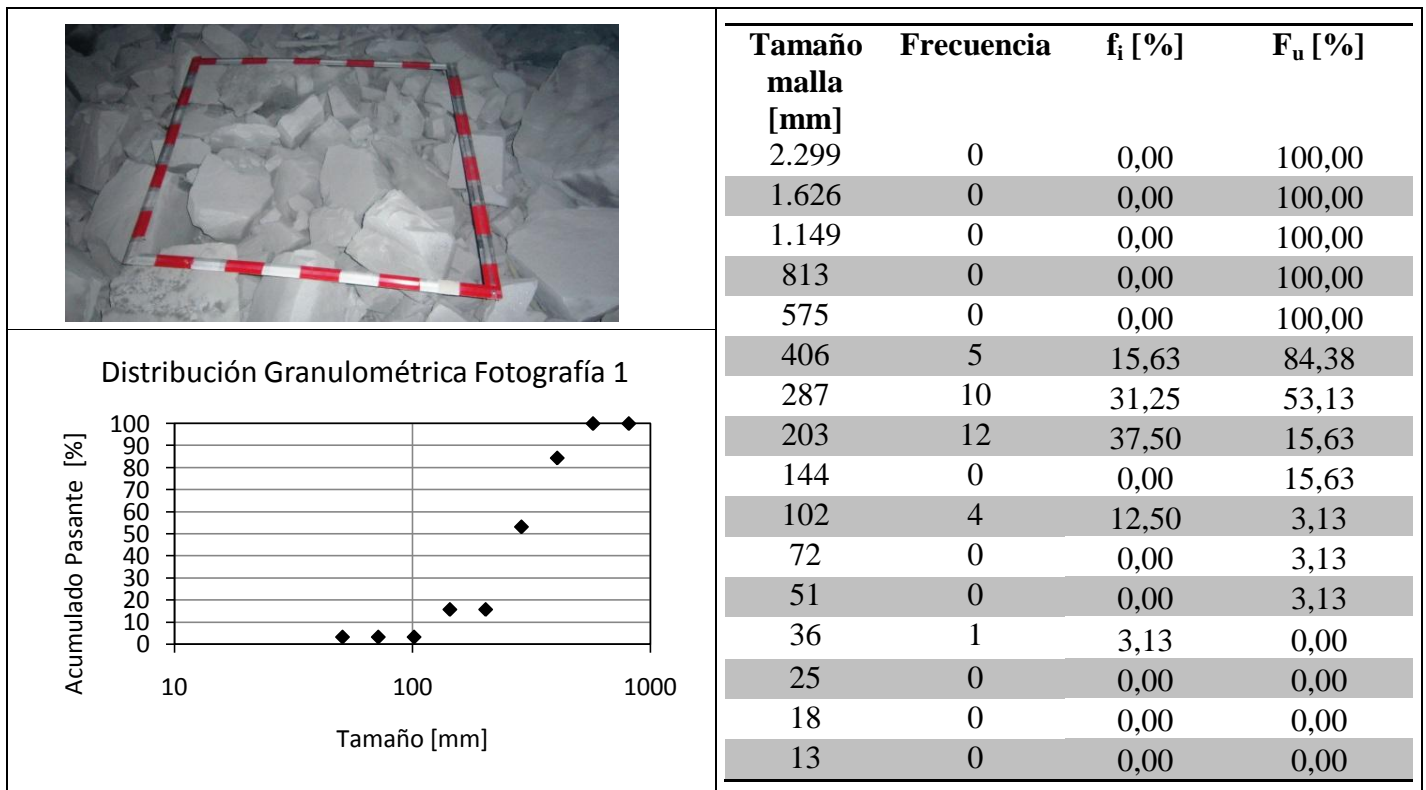
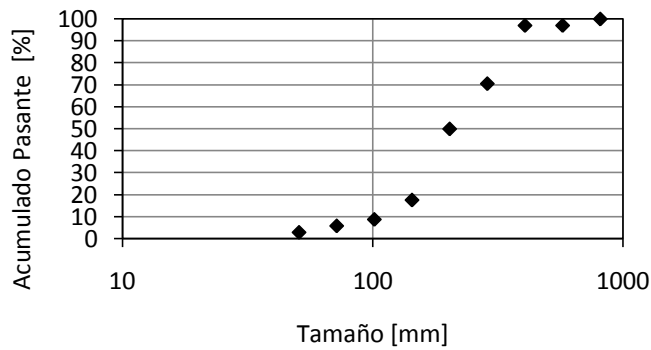


Figura 4.9: Obtención curva granulométrica, Fotografía 1



Distribución Granulométrica Fotografía 2

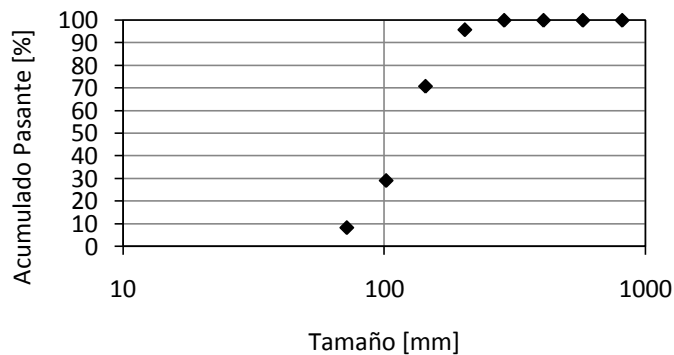


Tamaño malla [mm]	Frecuencia	f_i [%]	F_u [%]
2.299	0	0,00	100,00
1.626	0	0,00	100,00
1.149	0	0,00	100,00
813	0	0,00	100,00
575	1	2,94	97,06
406	0	0,00	97,06
287	9	26,47	70,59
203	7	20,59	50,00
144	11	32,35	17,65
102	3	8,82	8,82
72	1	2,94	5,88
51	1	2,94	2,94
36	1	2,94	0,00
25	0	0,00	0,00
18	1	0,00	0,00
13	0	0,00	0,00

Figura 4.10: Obtención curva granulométrica, Fotografía 2



Distribución Granulométrica Fotografía 3



Tamaño malla [mm]	Frecuencia	f_i [%]	F_u [%]
2.299	0	0,00	100,00
1.626	0	0,00	100,00
1.149	0	0,00	100,00
813	0	0,00	100,00
575	0	0,00	100,00
406	0	0,00	100,00
287	0	0,00	100,00
203	1	4,17	95,83
144	6	25,00	70,83
102	10	41,67	29,17
72	5	20,83	8,33
51	2	8,33	0,00
36	0	0,00	0,00
25	0	0,00	0,00
18	0	0,00	0,00
13	0	0,00	0,00

Figura 4.11: Obtención curva granulométrica, Fotografía 3

El volumen de roca tronada, que se escapa de la frente de trabajo (fotografía 3) es menor con respecto a la marina que reposa en la zona de tronadura (fotografías 1 y 2), por lo que se deben asignar distintas ponderaciones a las imágenes a fin de obtener una función acumulada bajo tamaño experimental para cada avance en particular, la cual se denomina “imagen combinada”.

Por observaciones de terreno, se designa una ponderación de 5% a las imágenes de la marina que escapan de la frente, y el 95% restante se distribuye entre las imágenes 1 y 2.

Al ajustar la función acumulada bajo tamaño experimental (de la imagen combinada de este ejemplo) a la distribución de Gaudin-Schuhmann se obtienen los parámetros, los que para este ejemplo en particular son:

- m: 1,61
- K: 0,45[m]

A continuación se presentan los valores obtenidos para este ejemplo, tanto de la función acumulada bajo tamaño experimental, como también aquella ajustada por la distribución de Gaudin-Schuhmann (en Anexo A se presenta la función acumulada bajo tamaño experimental para la totalidad del muestreo obtenido).

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1 47,5%	Frecuencia Imagen 2 47,5%	Frecuencia Imagen 3 5%	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2.299	0	0	0	0,00	100,00	100,00
1.626	0	0	0	0,00	100,00	100,00
1.149	0	0	0	0,00	100,00	100,00
813	0	0	0	0,00	100,00	100,00
575	0	1	0	0,48	98,54	100,00
406	5	0	0	2,38	91,24	83,96
287	10	9	0	9,03	63,52	48,11
203	12	7	1	9,08	35,64	27,56
144	0	11	6	5,53	18,66	15,79
102	4	3	10	3,83	6,91	9,05
72	0	1	5	0,73	4,69	5,18
51	0	1	2	0,58	2,92	2,97
36	1	1	0	0,95	0,00	1,70
25	0	0	0	0,00	0,00	0,98
18	0	0	0	0,00	0,00	0,56
13	0	0	0	0,00	0,00	0,32

Tabla 4.5: Función acumulada bajo tamaño de imagen combinada

A continuación se presenta una representación gráfica de los valores experimentales y el ajuste de Gaudin-Schuhmann.

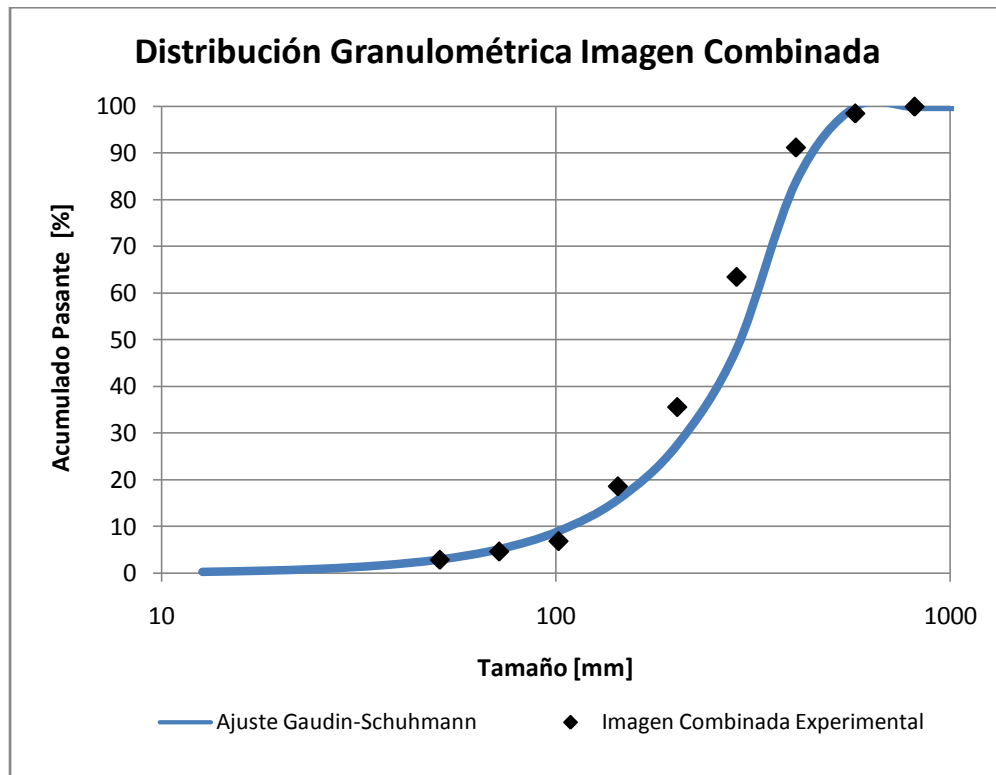


Figura 4.12: Obtención curva granulométrica, Imagen Combinada

El error de ajuste obtenido en este ejemplo en particular es de un 5,0%, y este error se calcula de la siguiente manera:

$$Error[\%] = \sqrt{\frac{\sum (F_u^{G-S}(x) - F_u^{Exp}(x))^2}{(n - p + 1)}}$$

Ecuación 4.4: Error de ajuste

Donde:

- $F_u^{G-S}(x)$: Porcentaje acumulado pasante del ajuste de Gaudin-Schuhmann.
- $F_u^{Exp}(x)$: Porcentaje acumulado pasante experimental.
- n : Número de datos.
- p : Número de parámetros del modelo.

En este caso “ n ” corresponde a 16, debido a la cantidad de veces en que se dividió la malla, y “ p ” corresponde a 2, debido a los dos parámetros de la distribución de Gaudin-Schuhmann (m y K).

4.6 Base de Datos para Construcción del Modelo

Del 100% del muestreo (67 disparos de avance) –tabla 4.6–, sólo se utiliza el 81% del total (54 sets de parámetros) seleccionados al azar, para la creación del modelo, y el restante 19% (13 sets de parámetros) –tabla 5.1– se excluyen para una posterior validación del modelo.

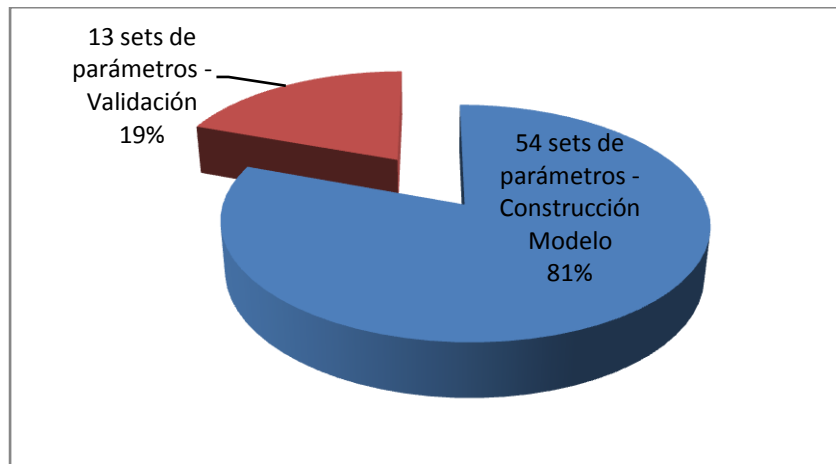


Figura 4.13: Distribución de muestras para validar y construir modelo

Ahora bien, para modelar los parámetros de Gaudin-Schuhmann se utilizan los parámetros a continuación:

- Burden, [m].
- Espaciamiento, [m].
- Largo de avance, [m].
- Área de la sección, [m²].
- Explosivo tronex, [%].
- Explosivo softron, [%].
- Explosivo ANFO, [%].
- Factor de carga, [Kg ANFO/m³].
- UCS, [MPa].

Tanto los parámetros m y K son obtenidos mediante el ajuste del análisis de imágenes. Tanto el burden (B), como el espaciamiento (S) y el área de la sección (A) se obtienen del diagrama de perforación respectivo, y el largo de avance (LA) se obtiene por mensura del departamento de topografía.

La inclusión de las variables de explosivos –como el explosivo tronex (Ex_T), explosivo softron (Ex_S) y explosivo ANFO (Ex_A)– se realizó en unidades porcentuales, donde se convirtió a una unidad común ([Kg]) y se asignó el porcentaje de explosivo que cada una de las variables representa frente al total.

Para el cálculo del factor de carga (FC) se consideró la potencia relativa con respecto al ANFO en peso, tanto del tronex como también del softron, para obtener un factor de carga en función de un ANFO equivalente, con unidades de [Kg ANFO/m³].

La potencia relativa con respecto al ANFO en peso del softron se valoró en 1,13 (ficha técnica ENAEX. [4]), y para el tronex en 1,22 (ficha técnica ENAEX. [3]).

Finalmente el parámetro UCS se designa según la litología a la que corresponda el avance en particular. De este modo se tiene un total de 9 parámetros para modelar el m y K de Gaudin-Schumann, con los cuales se tiene información del diseño de perforación y tronadura del avance, y los parámetros litológicos del macizo.

Imagen	m	K [m]	LA [m]	B [m]	S [m]	A [m ²]	Ex_T [%]	Ex_S [%]	Ex_A [%]	FC [Kg/m ³]	UCS [MPa]
1	1,52	0,56	3,40	0,69	0,71	22,42	7,87	5,59	86,55	2,73	171,00
2	1,45	0,63	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	171,00
3	1,51	0,44	3,40	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,77	171,00
4	2,16	0,32	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	171,00
5	1,75	0,37	3,80	0,67	0,74	21,02	7,81	6,24	85,95	2,63	166,90
6	1,10	0,50	5,66	0,69	0,71	22,42	14,49	5,79	79,72	1,81	171,00
7	1,22	0,49	4,60	0,69	0,71	22,42	14,49	5,79	79,72	2,23	171,00
8	1,19	0,34	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	171,00
9	1,50	0,48	3,80	0,67	0,74	21,02	14,44	6,15	79,41	2,89	154,60
10	1,38	0,34	3,40	0,69	0,71	22,42	9,90	8,43	81,67	2,12	171,00
11	2,00	0,29	3,40	0,69	0,71	22,42	7,81	6,24	85,95	2,75	171,00
12	1,94	0,37	3,90	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	2,64	171,00
13	1,07	0,44	3,40	0,67	0,74	21,02	14,49	5,79	79,72	3,21	158,70
14	2,46	0,24	4,60	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	2,15	171,00
15	2,11	0,32	3,40	0,67	0,74	21,02	7,78	6,63	85,59	2,95	166,90
16	1,45	0,36	3,40	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,77	171,00
17	1,60	0,40	2,75	0,67	0,74	21,02	14,44	6,15	79,41	3,99	154,60
18	1,25	0,44	3,00	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,43	171,00
19	1,56	0,36	3,00	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	3,14	171,00
20	1,81	0,34	2,75	0,67	0,74	21,02	7,78	6,63	85,59	3,65	154,60
21	1,16	0,37	4,30	0,67	0,60	15,33	0,00	6,77	93,23	2,89	171,00
22	1,83	0,42	3,57	0,69	0,71	22,42	16,73	14,25	69,01	1,26	171,00
23	1,61	0,30	3,40	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,77	171,00
24	1,82	0,35	3,40	0,69	0,71	22,42	8,71	7,42	83,86	2,48	171,00
25	2,17	0,34	3,40	0,67	0,60	15,33	11,60	8,65	79,75	2,74	171,00
26	1,98	0,35	3,40	0,69	0,71	22,42	16,03	6,83	77,14	2,73	171,00
27	2,44	0,28	3,40	0,67	0,60	15,33	14,44	6,15	79,41	4,42	171,00
28	2,15	0,33	3,40	0,69	0,71	22,42	10,09	6,71	83,20	2,15	171,00
29	1,27	0,33	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	171,00

30	2,49	0,29	3,40	0,67	0,60	15,33	14,44	6,15	79,41	4,42	171,00
31	2,44	0,24	3,40	0,69	0,71	22,42	16,03	6,83	77,14	2,73	171,00
32	1,97	0,31	3,40	0,69	0,71	22,42	7,81	6,24	85,95	2,75	171,00
33	1,41	0,47	3,40	0,69	0,71	22,42	14,49	5,79	79,72	3,01	171,00
34	2,30	0,33	3,70	0,69	0,71	22,42	21,98	17,56	60,46	0,94	171,00
35	2,08	0,30	3,40	0,69	0,71	22,42	9,95	7,95	82,10	2,11	171,00
36	1,78	0,30	3,40	0,69	0,71	22,42	14,49	5,79	79,72	3,01	171,00
37	1,89	0,33	3,40	0,67	0,60	15,33	9,90	8,43	81,67	3,20	171,00
38	2,10	0,30	3,40	0,69	0,71	22,42	7,87	5,59	86,55	2,73	171,00
39	2,03	0,40	3,40	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,77	166,90
40	2,05	0,43	3,40	0,67	0,60	15,33	14,44	6,15	79,41	4,42	171,00
41	2,72	0,28	1,00	0,69	0,71	22,42	78,97	21,03	0,00	3,61	171,00
42	1,34	0,46	4,05	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	2,54	171,00
43	1,61	0,45	3,90	0,67	0,60	15,33	7,78	6,63	85,59	3,53	171,00
44	1,28	0,43	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	138,20
45	1,61	0,37	3,40	0,67	0,60	15,33	7,78	6,63	85,59	4,05	171,00
46	1,86	0,44	4,05	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,32	171,00
47	2,02	0,33	3,60	0,67	0,60	15,33	7,78	6,63	85,59	3,82	171,00
48	2,09	0,34	3,40	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,77	162,80
49	2,26	0,41	4,32	0,67	0,60	15,33	7,78	6,63	85,59	3,18	171,00
50	1,93	0,46	3,10	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	3,03	171,00
51	1,58	0,52	3,80	0,67	0,60	15,33	7,78	6,63	85,59	3,62	171,00
52	1,74	0,54	3,20	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,94	171,00
53	2,31	0,38	4,00	0,67	0,60	15,33	7,78	6,63	85,59	3,44	171,00
54	1,62	0,48	3,40	0,67	0,74	21,02	8,74	7,14	84,12	2,63	130,00
55	1,35	0,48	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	130,00
56	1,83	0,26	3,40	0,67	0,74	21,02	14,44	6,15	79,41	3,22	130,00
57	2,33	0,39	3,40	0,69	0,71	22,42	7,81	6,24	85,95	2,75	130,00
58	1,92	0,34	4,50	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	2,28	130,00
59	1,42	0,34	3,95	0,69	0,71	22,42	14,49	5,79	79,72	2,59	130,00
60	1,73	0,24	3,80	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,48	130,00
61	1,82	0,40	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	171,00
62	1,52	0,36	3,40	0,69	0,71	22,42	9,90	8,43	81,67	2,19	171,00
63	1,47	0,43	3,25	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,89	171,00
64	1,05	0,31	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	171,00
65	1,48	0,38	4,60	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	2,23	171,00
66	1,93	0,47	1,50	0,69	0,71	22,42	54,00	46,00	0,00	1,04	171,00
67	1,40	0,36	1,50	0,69	0,71	22,42	18,55	4,94	76,51	5,37	171,00

Tabla 4.6: Muestreo total de datos.

4.7 Detección de Outliers de los Parámetros del Modelo

Antes de trabajar con la base de datos para obtener el modelo, es necesario identificar los *outliers* o valores atípicos de cada una de las variables disponibles, con el objetivo de eliminarlos, ya que el emplearlos trae consigo una eventual inclusión de ruido en la creación del modelo.

En el presente trabajo se utilizarán diagramas de caja o *boxplot* [15], para identificar los *outliers*, que son gráficos basados en cuartiles, y mediante los cuales es posible distinguir valores atípicos entre un conjunto de datos.

Tal como se aprecia en la figura 4.14, el conjunto de “X” corresponde al conjunto de datos que son representativos del muestreo, y los datos “O” están fuera de un rango admisible, denominados valores atípicos u *outliers*.

Del muestreo de datos se calculan:

- Q1: Mediana de la primera mitad de valores.
- Q2: Mediana del muestreo.
- Q3: Mediana de la segunda mitad de valores.
- RIC: Rango inter-cuartil, $Q3 - Q1$.
- Mínimo Admisible: $Q1 - RIC * 1,5$.
- Máximo Admisible: $Q3 + RIC * 1,5$.

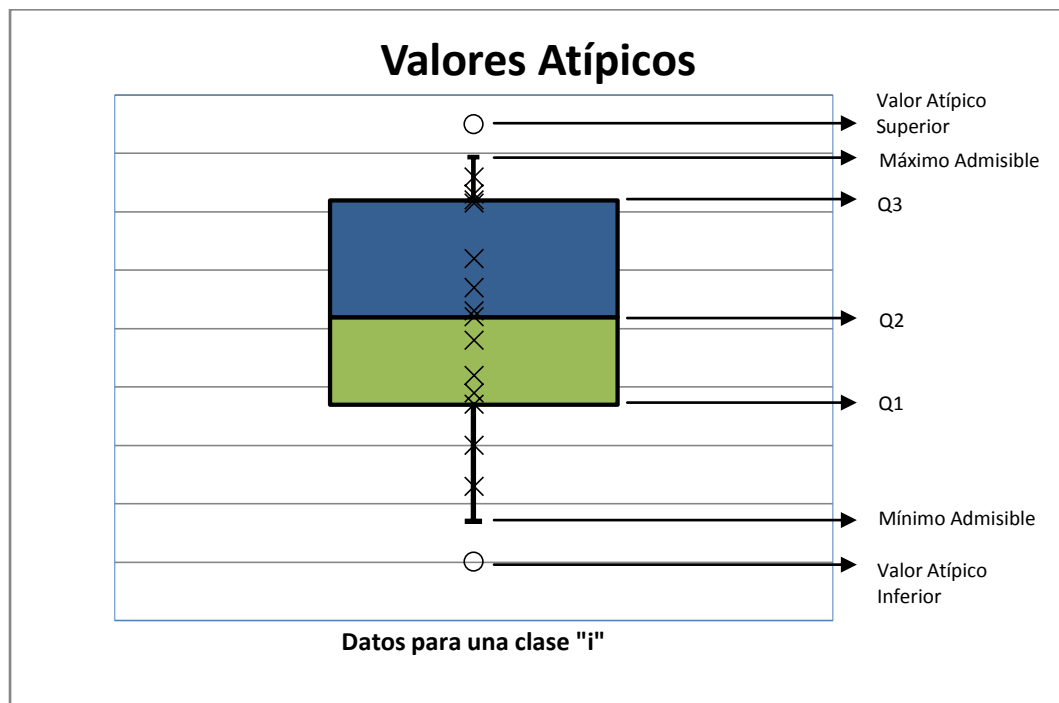
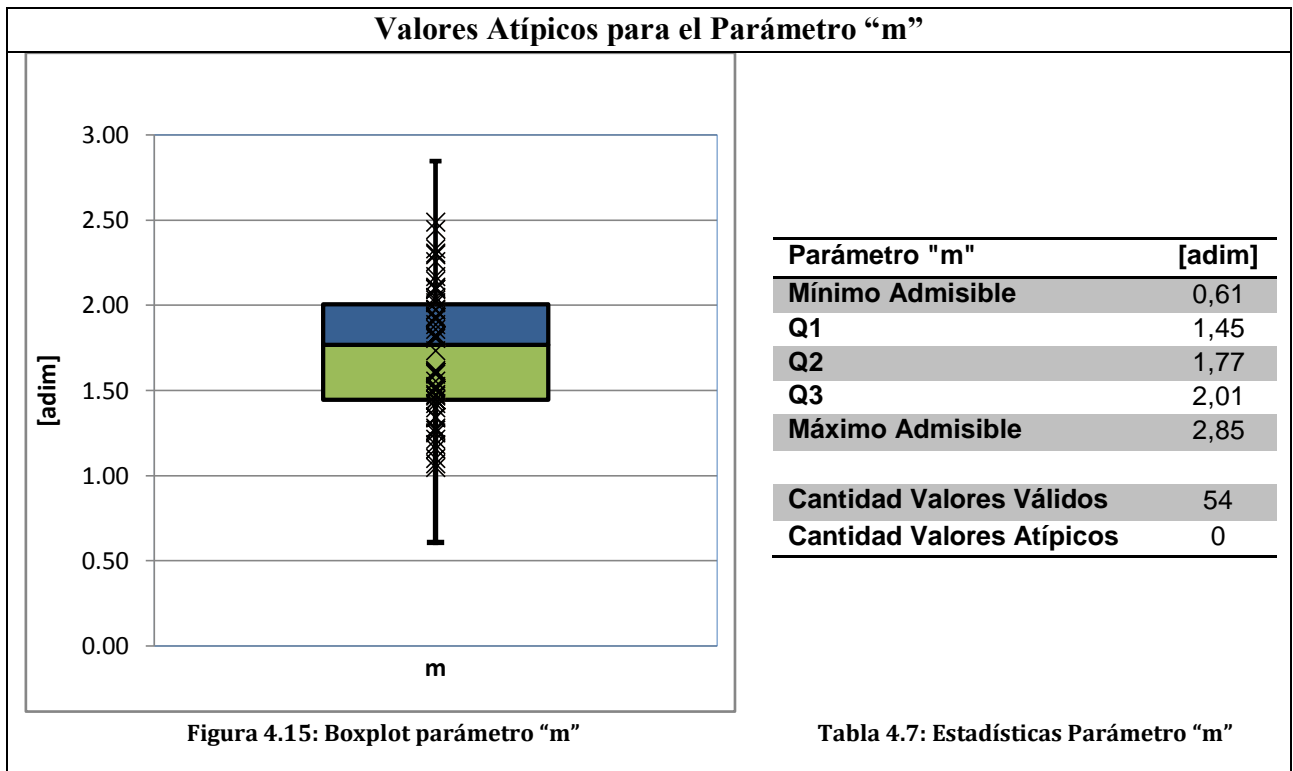


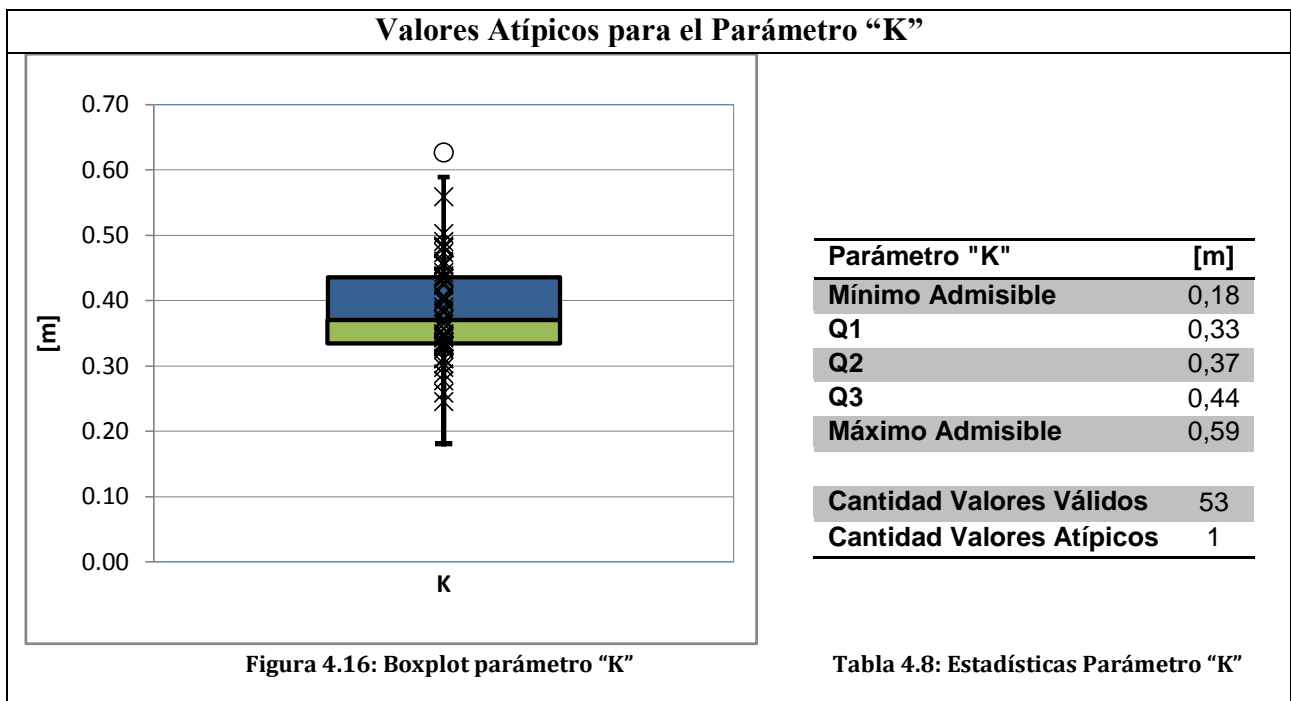
Figura 4.14: Boxplot típico para una serie

Cabe señalar que una vez detectado los *outliers* se debe investigar su procedencia, y si se concluye que se ha generado por errores en el muestreo, entonces se deben eliminar, de lo contrario se deben conservar para no perder información.

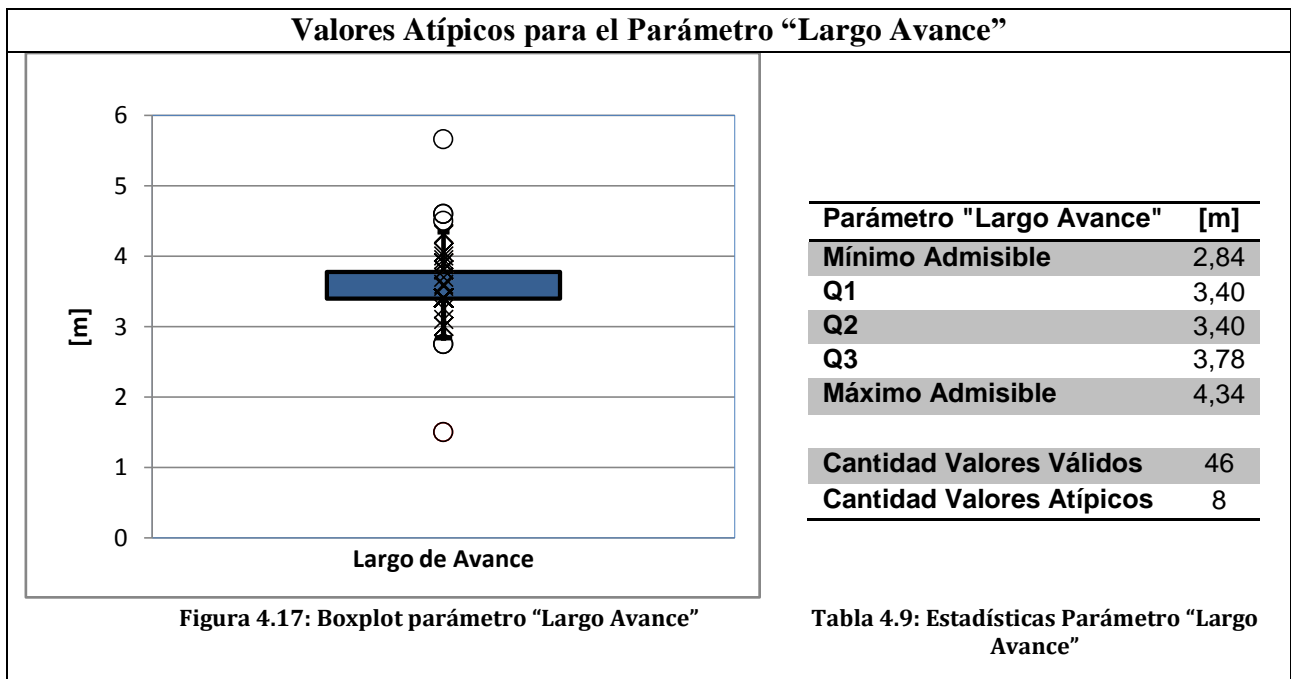
A continuación se presentan los boxplot de cada variable, así como también una tabla resumen de los máximos y mínimos admisibles y la cantidad de valores que pertenecen o no a estos rangos.



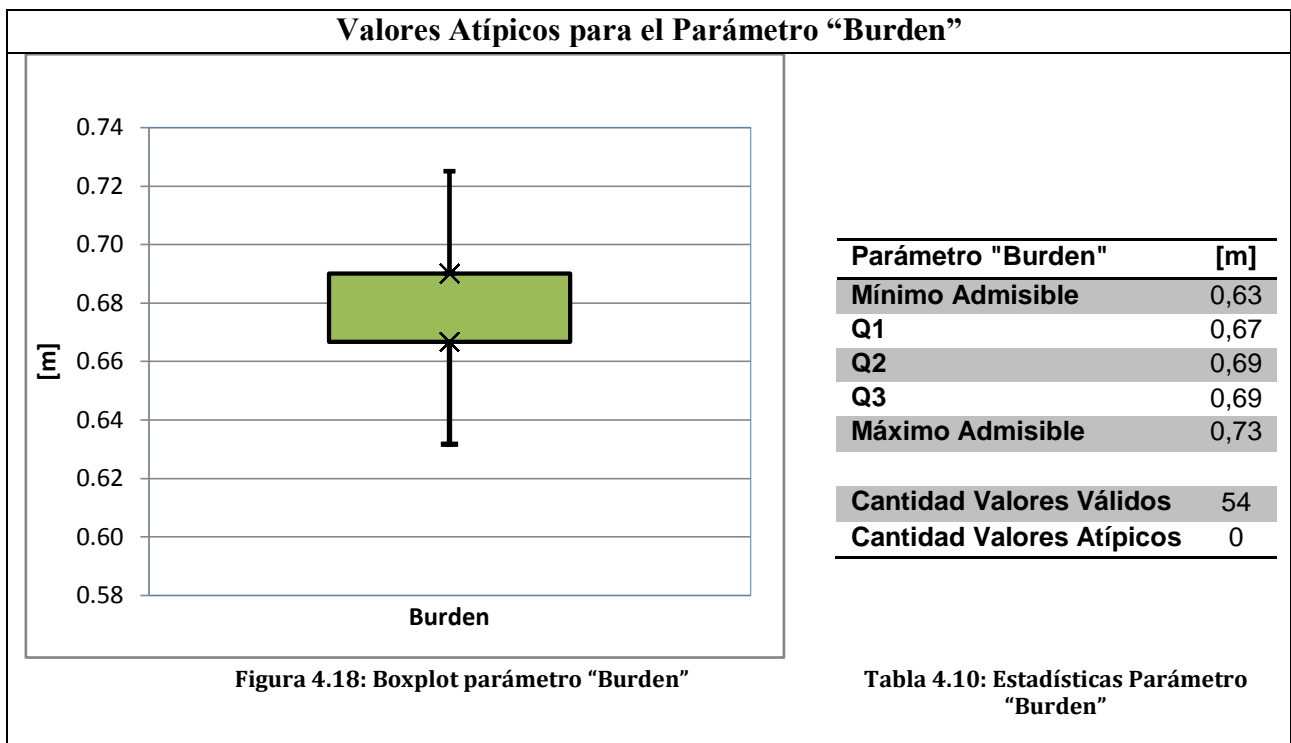
No se identifican *outliers* según el parámetro “m”.



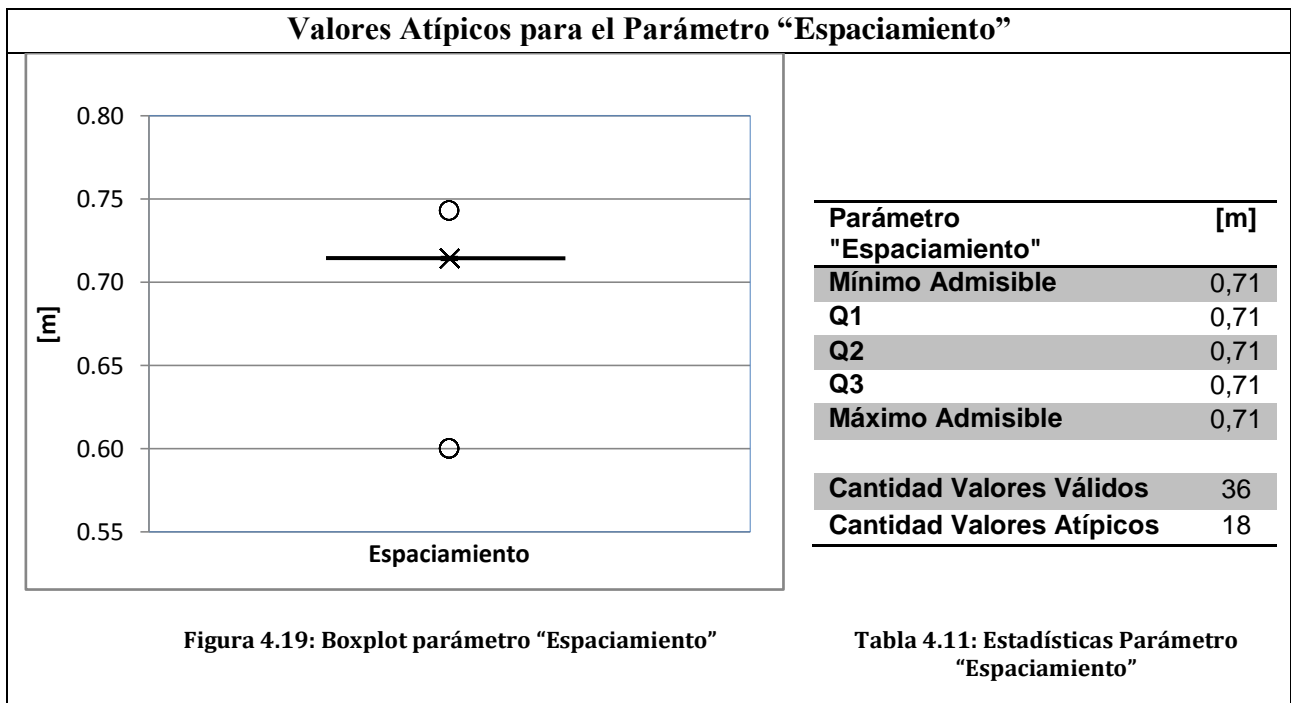
Se identifica un valor atípico en el parámetro "K" (tamaño máximo de partícula de 0,63 [m]) que puede haberse debido a cuña de sobre-excavación, por lo que se debe eliminar de la base de datos, ya que no es representativo del muestreo total.



Se identifican 8 *outliers* en el parámetro "largo de avance" que pueden haberse generado debido a avances controlados estructuralmente, y por ser casos excepcionales no son representativos del muestreo, por lo que deben eliminarse.



No se identifican *outliers* según el parámetro "burden".



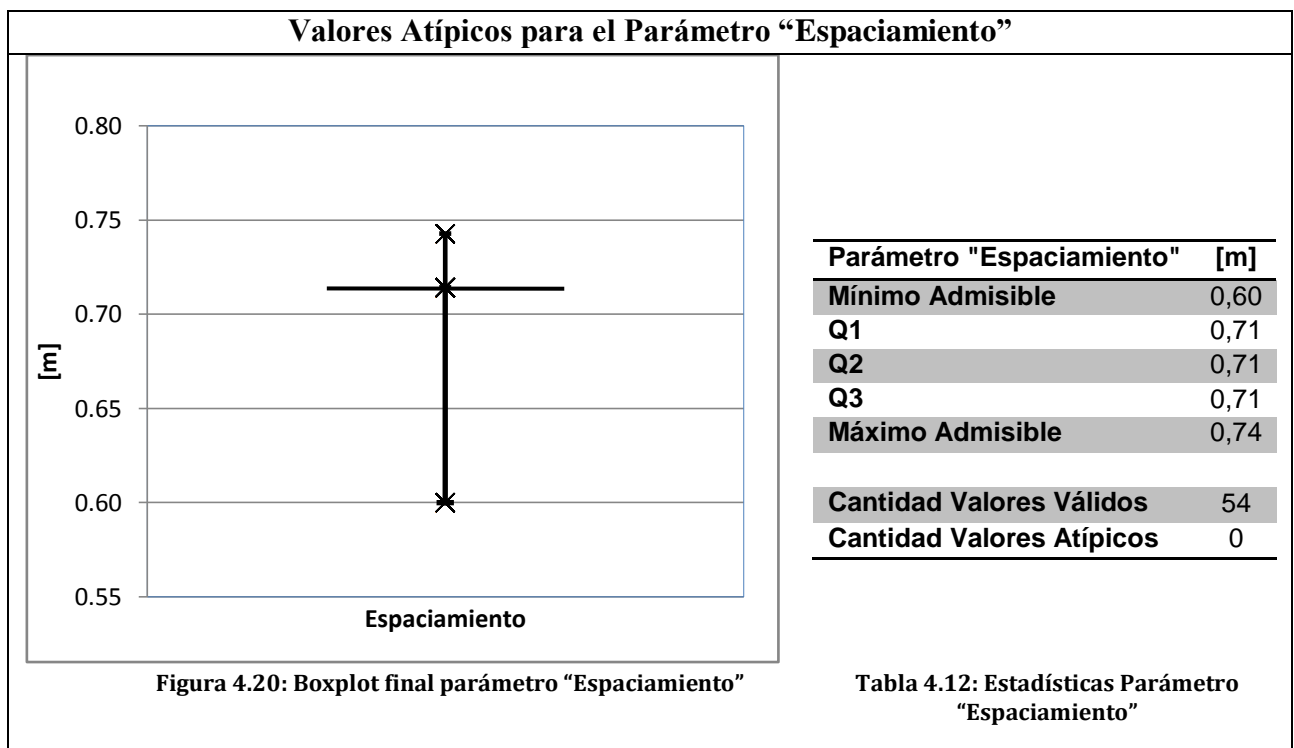
En este caso, en particular, se observa que los valores en la base de dato, para la variable "Espaciamento", son 0,60 [m], 0,71[m] y 0,74[m], y en donde mayoritariamente corresponden a 0,71 [m], con lo cual se obtiene un caso excepcional, donde el mínimo admisible es igual al

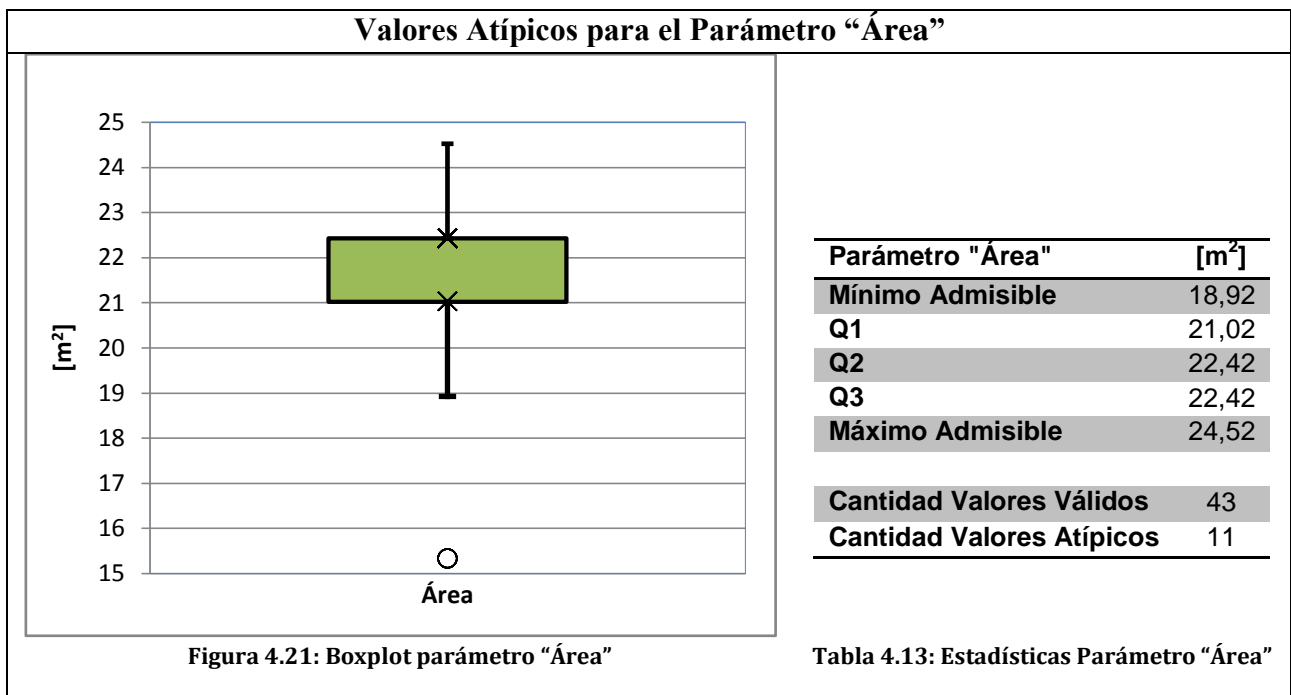
máximo admisible, y por tanto se identifican como *outliers* a todos aquellos casos en que el espaciamiento sea 0,60 [m] y 0,74[m],

Ahora bien, eliminar estos supuestos *outliers* no es correcto, ya que no se generan debido a un error en el proceso de construcción de túneles. De este modo se deben conservar estos valores para no restringir el modelo a un caso específico, lo cual es indeseable, y hacerlo para un amplio rango de valores.

Es por este motivo que para esta variable no se descartarán los datos atípicos, y se incluirán en la base de datos para la construcción del modelo, imponiendo un mínimo admisible de 0,6 [m] y un máximo admisible de 0,74 [m].

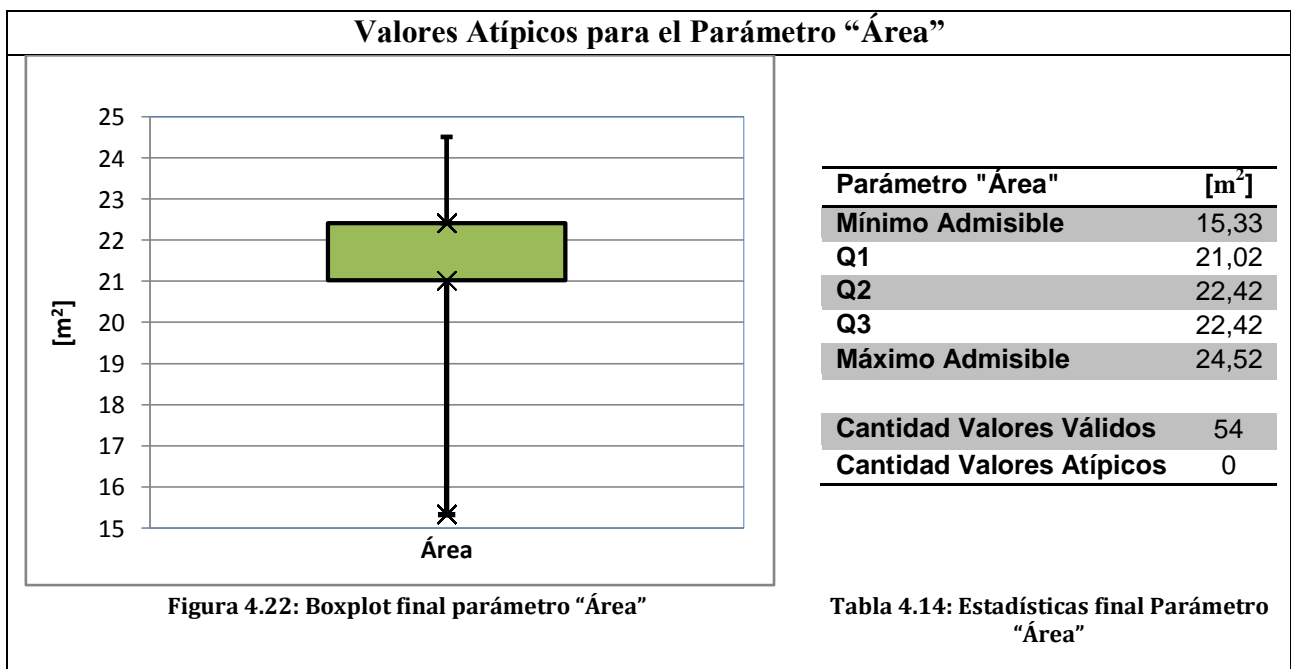
A continuación se presenta, tanto el boxplot como la tabla resumen, de los datos a utilizar para esta variable.





Siguiendo el mismo argumento presentado en la variable anterior, se decide no descartar los *outliers* de la variable "área", ya que se aísla un caso particular, en donde el área de la sección del diagrama de disparo es igual a 15,33 [m²], tal como se aprecia a continuación.

Finalmente se impone un mínimo admisible igual a 15,33 [m²], de manera de ampliar el rango de área válido para el modelo de predicción granulométrica.



Valores Atípicos para el Parámetro "Explosivo Tronex"

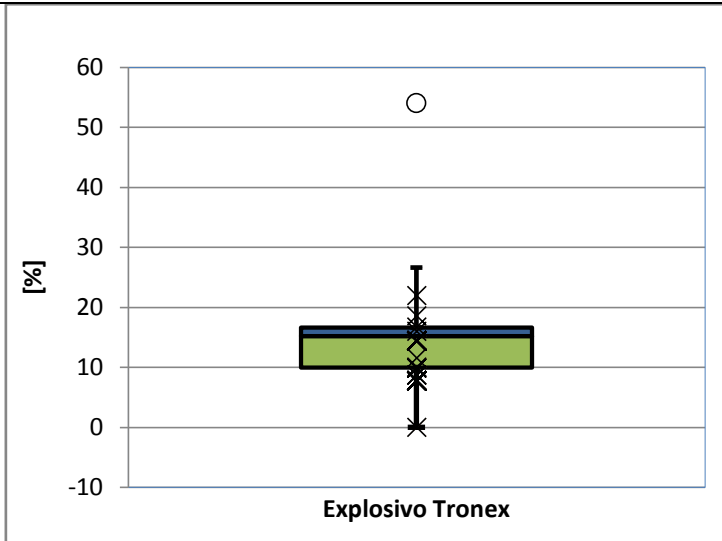


Figura 4.23: Boxplot parámetro "Explosivo Tronex"

Parámetro "Explosivo Tronex"	[%]
Mínimo Admisible	0
Q1	7,78
Q2	13,02
Q3	14,44
Máximo Admisible	24,42
Cantidad Valores Válidos	53
Cantidad Valores Atípicos	1

Tabla 4.15: Estadísticas Parámetro "Explosivo Tronex"

Se identifica 1 *outlier*, el cual se descarta debido a que representa un caso en particular en que se utilizó un exceso del explosivo tronex, y por tanto no es característico del muestreo total.

Valores Atípicos para el Parámetro "Explosivo Softron"

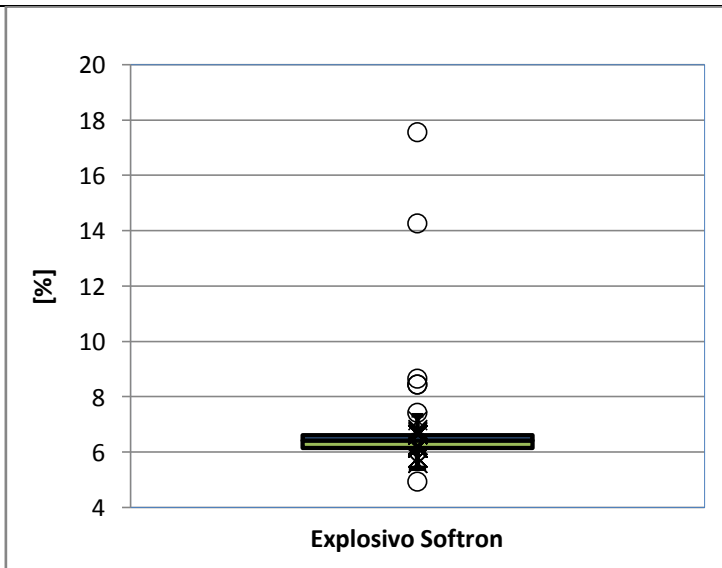


Figura 4.24: Boxplot parámetro "Explosivo Softron"

Parámetro "Explosivo Softron"	[%]
Mínimo Admisible	5,43
Q1	6,15
Q2	6,44
Q3	6,63
Máximo Admisible	7,35
Cantidad Valores Válidos	46
Cantidad Valores Atípicos	8

Tabla 4.16: Estadísticas Parámetro "Explosivo Softron"

Se identifican 8 *outliers*, los cuales se descartan –al igual que el caso anterior– debido a que representan eventos excepcionales en la cantidad de softron utilizado para lograr el avance.

Valores Atípicos para el Parámetro "Explosivo ANFO"

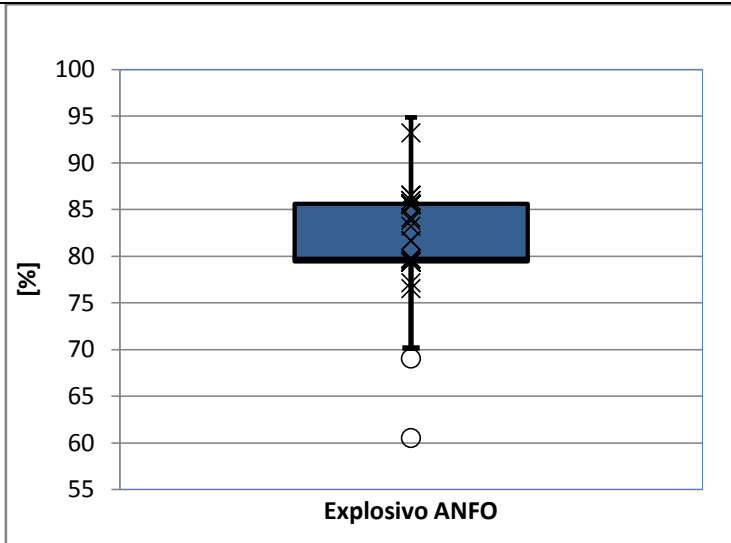


Figura 4.25: Boxplot parámetro "Explosivo ANFO"

Parámetro "Explosivo ANFO"	[%]
Mínimo Admisible	70,14
Q1	79,41
Q2	79,73
Q3	85,59
Máximo Admisible	94,86
Cantidad Valores Válidos	51
Cantidad Valores Atípicos	3

Tabla 4.17: Estadísticas Parámetro "Explosivo ANFO"

Al igual que en los últimos dos casos expuestos, los 3 *outliers* identificados se eliminan ya que no son representativos del muestreo total. En estos 3 casos se utilizó una mínima cantidad de explosivo ANFO con respecto a los otros explosivos, y por esto mismo escapa de lo convencionalmente utilizado.

Valores Atípicos para el Parámetro "Factor de Carga"

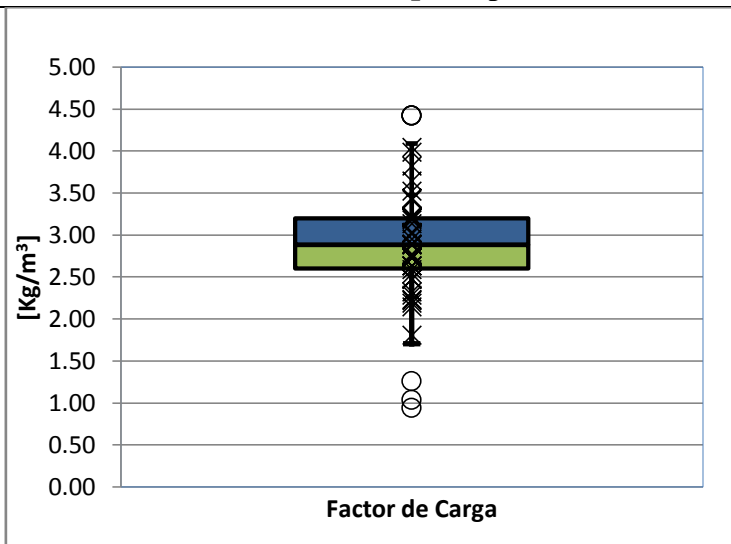
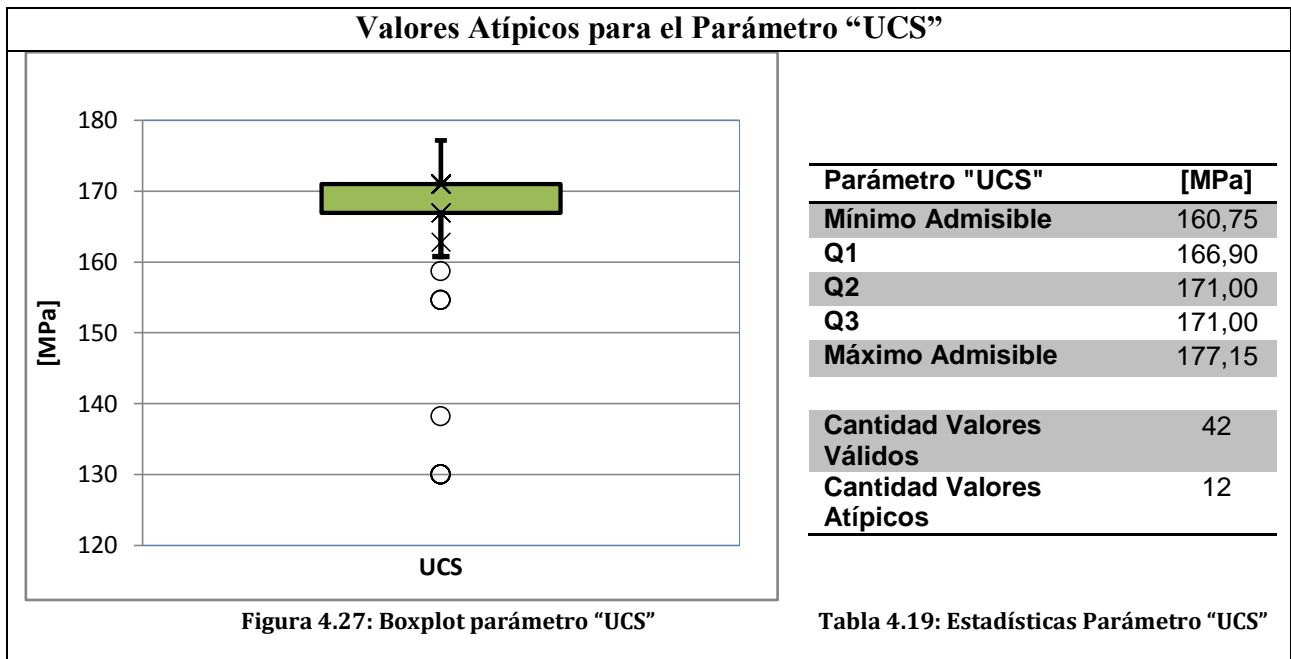


Figura 4.26: Boxplot parámetro "Factor de Carga"

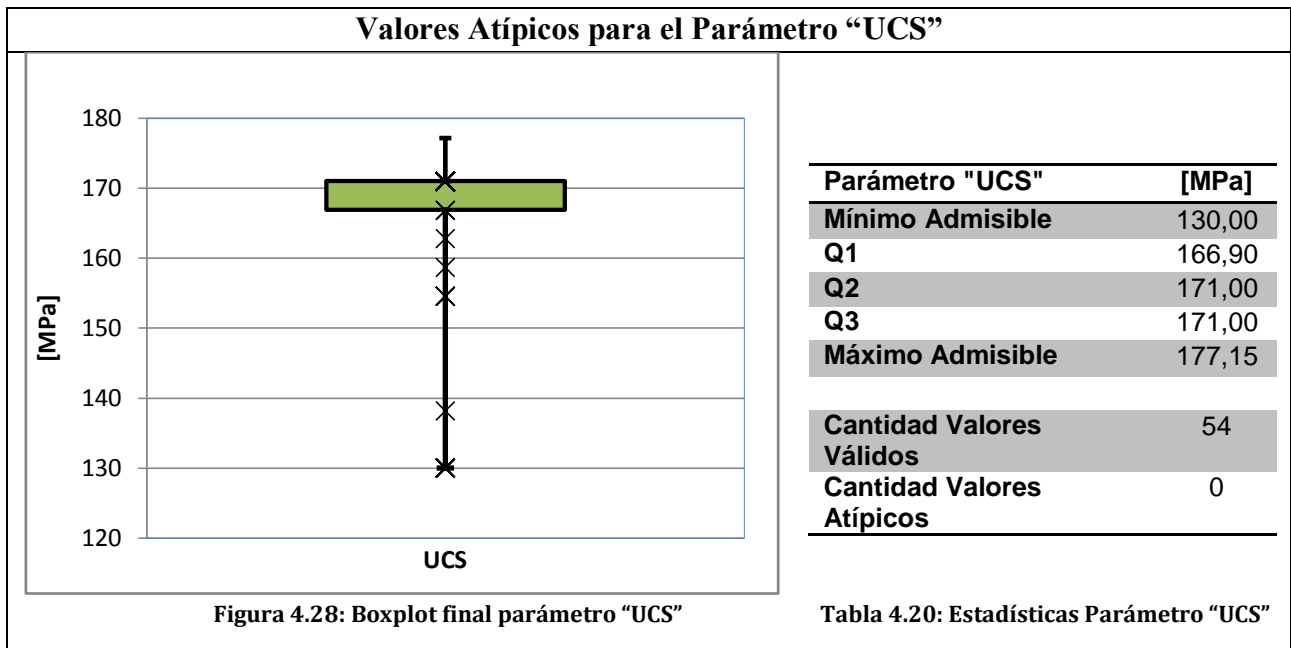
Parámetro "Factor de Carga"	[Kg/m³]
Mínimo Admisible	1,71
Q1	2,60
Q2	2,89
Q3	3,20
Máximo Admisible	4,09
Cantidad Valores Válidos	47
Cantidad Valores Atípicos	7

Tabla 4.18: Estadísticas Parámetro "Factor de Carga"

Se descartan los 7 *outliers* identificados según el factor de carga, que se generan debido a los mismos datos atípicos relacionados con la cantidad de explosivo utilizado y al largo de avance, entre otros.



Por último, tampoco se descartan los *outliers* de la variable UCS, hacerlo implicaría una pérdida de información, ya que el modelo quedaría restringido a un rango reducido de propiedades físicas. Así se impone un mínimo admisible de 130 [MPa], lo cual involucra una nula presencia de valores atípicos por la variable UCS, tal como se indica en la figura 4.28.



Por lo tanto, de los 54 sets de valores dispuestos para la construcción del modelo, 18 fueron descartados –tabla 4.21–, ya que al menos un valor de sus parámetros corresponde a un valor atípico generado principalmente por la inusual cantidad del uso de los distintos explosivos y al largo de su avance; en consecuencia, 36 set de valores son los que, finalmente, se utilizarán para la modelación –tabla 4.22–.

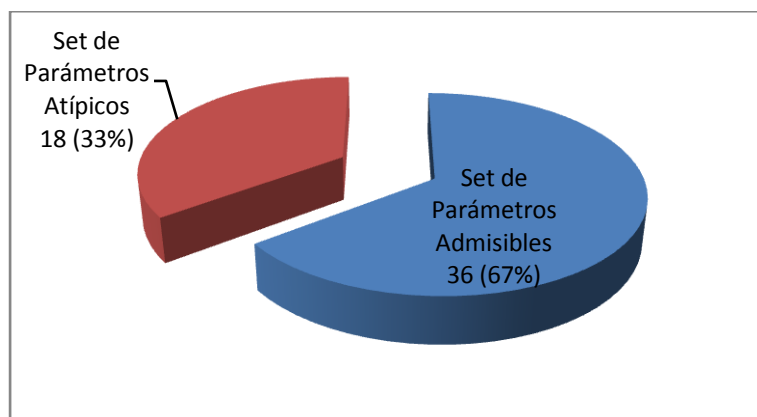


Figura 4.29: Set de parámetros admisibles para modelación

En color rojo de la tabla 4.21 se muestran los valores atípicos de los parámetros, y bajo los cuales se elimina todo el set de datos que lo contiene.

m	K [m]	LA [m]	B [m]	S [m]	A [m ²]	Ex_T [%]	Ex_S [%]	Ex_A [%]	FC [Kg/m ³]	UCS [MPa]
1,45	0,63	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	171,00
1,10	0,50	5,66	0,69	0,71	22,42	14,49	5,79	79,72	1,81	171,00
1,22	0,49	4,60	0,69	0,71	22,42	14,49	5,79	79,72	2,23	171,00
1,60	0,40	2,75	0,67	0,74	21,02	14,44	6,15	79,41	3,99	154,60
1,81	0,34	2,75	0,67	0,74	21,02	7,78	6,63	85,59	3,65	154,60
1,83	0,42	3,57	0,69	0,71	22,42	16,73	14,25	69,01	1,26	171,00
1,82	0,35	3,40	0,69	0,71	22,42	8,71	7,42	83,86	2,48	171,00
2,17	0,34	3,40	0,67	0,60	15,33	11,60	8,65	79,75	2,74	171,00
2,44	0,28	3,40	0,67	0,60	15,33	14,44	6,15	79,41	4,42	171,00
2,49	0,29	3,40	0,67	0,60	15,33	14,44	6,15	79,41	4,42	171,00
2,30	0,33	3,70	0,69	0,71	22,42	21,98	17,56	60,46	0,94	171,00
1,89	0,33	3,40	0,67	0,60	15,33	9,90	8,43	81,67	3,20	171,00
2,05	0,43	3,40	0,67	0,60	15,33	14,44	6,15	79,41	4,42	171,00
1,92	0,34	4,50	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	2,28	130,00
1,52	0,36	3,40	0,69	0,71	22,42	9,90	8,43	81,67	2,19	171,00
1,48	0,38	4,60	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	2,23	171,00
1,93	0,47	1,50	0,69	0,71	22,42	54,00	46,00	0,00	1,04	171,00
1,40	0,36	1,50	0,69	0,71	22,42	18,55	4,94	76,51	5,37	171,00

Tabla 4.21: Set de datos eliminados - outliers.

m	K [m]	LA [m]	B [m]	S [m]	A [m ²]	Ex_T [%]	Ex_S [%]	Ex_A [%]	FC [Kg/m ³]	UCS [MPa]
1,52	0,56	3,40	0,69	0,71	22,42	7,87	5,59	86,55	2,73	171,00
1,19	0,34	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	171,00
1,50	0,48	3,80	0,67	0,74	21,02	14,44	6,15	79,41	2,89	154,60
1,94	0,37	3,90	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	2,64	171,00
1,07	0,44	3,40	0,67	0,74	21,02	14,49	5,79	79,72	3,21	158,70
2,11	0,32	3,40	0,67	0,74	21,02	7,78	6,63	85,59	2,95	166,90
1,45	0,36	3,40	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,77	171,00
1,25	0,44	3,00	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,43	171,00
1,56	0,36	3,00	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	3,14	171,00
1,16	0,37	4,30	0,67	0,60	15,33	0,00	6,77	93,23	2,89	171,00
1,61	0,30	3,40	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,77	171,00
1,98	0,35	3,40	0,69	0,71	22,42	16,03	6,83	77,14	2,73	171,00
2,15	0,33	3,40	0,69	0,71	22,42	10,09	6,71	83,20	2,15	171,00
1,27	0,33	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	171,00
1,97	0,31	3,40	0,69	0,71	22,42	7,81	6,24	85,95	2,75	171,00
2,10	0,30	3,40	0,69	0,71	22,42	7,87	5,59	86,55	2,73	171,00
2,03	0,40	3,40	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,77	166,90
1,34	0,46	4,05	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	2,54	171,00
1,61	0,45	3,90	0,67	0,60	15,33	7,78	6,63	85,59	3,53	171,00
1,28	0,43	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	138,20
1,61	0,37	3,40	0,67	0,60	15,33	7,78	6,63	85,59	4,05	171,00
1,86	0,44	4,05	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,32	171,00
2,02	0,33	3,60	0,67	0,60	15,33	7,78	6,63	85,59	3,82	171,00
2,09	0,34	3,40	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,77	162,80
2,26	0,41	4,32	0,67	0,60	15,33	7,78	6,63	85,59	3,18	171,00
1,93	0,46	3,10	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	3,03	171,00
2,31	0,38	4,00	0,67	0,60	15,33	7,78	6,63	85,59	3,44	171,00
1,62	0,48	3,40	0,67	0,74	21,02	8,74	7,14	84,12	2,63	130,00
1,35	0,48	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	130,00
1,83	0,26	3,40	0,67	0,74	21,02	14,44	6,15	79,41	3,22	130,00
2,33	0,39	3,40	0,69	0,71	22,42	7,81	6,24	85,95	2,75	130,00
1,42	0,34	3,95	0,69	0,71	22,42	14,49	5,79	79,72	2,59	130,00
1,73	0,24	3,80	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,48	130,00
1,82	0,40	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	171,00
1,47	0,43	3,25	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,89	171,00
1,05	0,31	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	171,00

Tabla 4.22: Set de datos utilizados para la construcción del modelo.

4.8 Modelación de los Parámetros m y K

Obtenido los 36 sets de parámetros admisibles, es posible realizar la construcción del modelo.

Se utiliza la metodología de regresión lineal para calcular las mayores correlaciones de los parámetros de Gaudin-Schuhmann (m y K) en función de los parámetros de diseño de perforación y tronadura, y de las propiedades físicas de la roca. Según el modelo de regresión lineal, los parámetros que ajustan a m son el burden, espaciamiento y el factor de carga –se excluye el resto de los parámetros, ya que la incorporación de éstos no implica un aumento en la exactitud del ajuste–. Por otro lado los parámetros que ajustan a K son el burden, espaciamiento y el largo de avance.

A continuación se presenta la dependencia lineal de los parámetros para la predicción, tanto de m como de K .

$$F_u(x) = \left(\frac{x}{K(B, S, LA)} \right)^{m(B, E, FC)}$$
$$m = 13,18 - 9,00 * B - 5,01 * S - 0,61 * FC$$
$$K = 0,32 * B + 0,09 * S + 0,03 * LA$$

Ecuación 4.5: Modelo obtenido

El rango de valores válidos para el modelo viene dado por los mismos valores admisibles que se utilizaron para la construcción de éste, que son:

- $m \in [0,61 - 2,85]$.
- $K \in [0,18 - 0,59] [m]$.
- $LA \in [2,84 - 4,34] [m]$.
- $B \in [0,63 - 0,73] [m]$.
- $S \in [0,60 - 0,74] [m]$.
- $A \in [15,33 - 24,52] [m^2]$.
- $Ex_T \in [0,00 - 24,42] [%]$.
- $Ex_S \in [5,43 - 7,35] [%]$.
- $Ex_A \in [70,14 - 94,86] [%]$.
- $FC \in [1,71 - 4,09] [Kg ANFO/m^3]$.
- $UCS \in [130,00 - 177,15] [MPa]$.

El error de ajuste del modelo en la predicción de los parámetros de Gaudin-Schuhmann son (los detalles se muestran en la tabla 4.23):

- $m = 16,51 \%$
- $K = 15,37 \%$

“m” original	“m” modelado	Error de ajuste “m” [%]	“K” original	“K” modelado	Error de ajuste “K” [%]
1,52	1,71	12,29	0,56	0,38	31,52
1,19	1,53	29,38	0,34	0,38	13,67
1,50	1,69	12,11	0,48	0,39	19,13
1,94	1,77	8,46	0,37	0,40	7,59
1,07	1,49	38,43	0,44	0,38	14,62
2,11	1,64	21,97	0,32	0,38	16,26
1,45	1,69	16,89	0,36	0,38	5,09
1,25	1,29	2,57	0,44	0,37	14,94
1,56	1,46	5,87	0,36	0,37	3,94
1,61	1,69	5,29	0,30	0,38	28,78
1,98	1,71	13,50	0,35	0,38	10,01
2,15	2,07	3,45	0,33	0,38	15,34
1,27	1,53	20,97	0,33	0,38	15,76
1,97	1,70	13,87	0,31	0,38	22,91
2,10	1,71	18,39	0,30	0,38	26,32
2,03	1,69	16,81	0,40	0,38	3,99
1,34	1,83	36,62	0,46	0,40	12,62
1,61	2,01	24,90	0,45	0,38	16,12
1,28	1,53	19,79	0,43	0,38	10,41
1,61	1,69	4,96	0,37	0,37	1,72
1,86	1,96	5,55	0,44	0,40	8,25
2,02	1,83	9,40	0,33	0,37	13,18
2,09	1,69	19,27	0,34	0,38	11,12
2,26	2,22	1,86	0,41	0,39	3,62
1,93	1,53	20,90	0,46	0,37	17,94
2,31	2,06	10,73	0,38	0,38	0,50
1,62	1,84	13,53	0,48	0,38	21,95
1,35	1,53	13,74	0,48	0,38	20,35
1,83	1,48	19,14	0,26	0,38	46,51
2,33	1,70	27,24	0,39	0,38	1,71
1,42	1,80	26,25	0,34	0,40	15,82
1,73	1,87	7,78	0,24	0,39	61,04
1,82	1,53	15,89	0,40	0,38	5,09
1,47	1,61	9,81	0,43	0,38	12,77
1,05	1,53	46,05	0,31	0,38	23,46
	Promedio	16,51		Promedio	15,37

Tabla 4.23: Detalles de cálculo del error de ajuste del modelo.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1 Validación del Modelo

Para la validación del modelo se apartaron 13 sets de datos –tabla 5.1– a los cuales se aplicará el modelo obtenido, de manera de observar el error de validación del modelo.

Cabe destacar que entre los 13 sets de datos, 4 se excluyen debido a que al menos alguno de sus parámetros se clasifica según el criterio de valor atípico (se detallan en color rojo de la tabla 5.1), y por lo tanto no corresponde a los rangos válidos para la utilización de modelo.

m	K [m]	LA [m]	B [m]	S [m]	A [m ²]	Ex_T [%]	Ex_S [%]	Ex_A [%]	FC [Kg/m ³]	UCS [MPa]
1,51	0,44	3,40	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,77	171,00
2,16	0,32	3,40	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	3,02	171,00
1,75	0,37	3,80	0,67	0,74	21,02	7,81	6,24	85,95	2,63	166,90
1,38	0,34	3,40	0,69	0,71	22,42	9,90	8,43	81,67	2,12	171,00
2,00	0,29	3,40	0,69	0,71	22,42	7,81	6,24	85,95	2,75	171,00
2,46	0,24	4,60	0,69	0,71	22,42	14,44	6,15	79,41	2,15	171,00
2,44	0,24	3,40	0,69	0,71	22,42	16,03	6,83	77,14	2,73	171,00
1,41	0,47	3,40	0,69	0,71	22,42	14,49	5,79	79,72	3,01	171,00
2,08	0,30	3,40	0,69	0,71	22,42	9,95	7,95	82,10	2,11	171,00
1,78	0,30	3,40	0,69	0,71	22,42	14,49	5,79	79,72	3,01	171,00
2,72	0,28	1,00	0,69	0,71	22,42	78,97	21,03	0,00	3,61	171,00
1,58	0,52	3,80	0,67	0,60	15,33	7,78	6,63	85,59	3,62	171,00
1,74	0,54	3,20	0,69	0,71	22,42	7,78	6,63	85,59	2,94	171,00

Tabla 5.1: Set de datos para validación.

A continuación se presenta, a modo de ejemplo, 1 de los 9 casos restantes de validación. Dichos parámetros experimentales son:

- $m = 1,51$ (experimental).
- $K = 0,44$ [m] (experimental).
- $LA = 3,40$ [m].
- $B = 0,69$ [m].
- $S = 0,71$ [m].
- $A = 22,42$ [m²].
- $Ex_T = 7,78$ %.

- $Ex_S = 6,63 \%$.
- $Ex_A = 85,59 \%$.
- $FC = 2,77 [Kg ANFO/m^3]$.
- $UCS = 171,00 [MPa]$.

Mientras que si se utiliza el modelo para predecir los parámetros de Gaudin-Schuhmann, en este ejemplo en particular, se obtiene:

- $m = 1,69$ (modelado).
- $K = 0,38 [m]$ (modelado).

Existe diferencia entre los parámetros de Gaudin-Schuhmann obtenidos experimentalmente y aquellos obtenidos mediante la utilización del modelo. Para este ejemplo en particular, los errores porcentuales de estimación son:

- $m = 12,32 \%$
- $K = 13,48 \%$

Así el porcentaje acumulado pasante experimental versus el modelado se presenta en la siguiente tabla.

Malla [mm]	Fu(x) experimental	Fu(x) modelo
2.299	100,00	100,00
1.626	100,00	100,00
1.149	100,00	100,00
813	100,00	100,00
575	100,00	100,00
406	87,99	100,00
287	52,22	61,57
203	30,99	34,26
144	18,39	19,07
102	10,91	10,61
72	6,48	5,90
51	3,84	3,29
36	2,28	1,83
25	1,35	1,02
18	0,80	0,57
13	0,48	0,32

Tabla 5.2: Porcentaje acumulado pasante original versus modelado

A continuación, en la figura 5.1, se presenta de manera gráfica el porcentaje acumulado pasante experimental versus el modelado para el ejemplo expuesto.

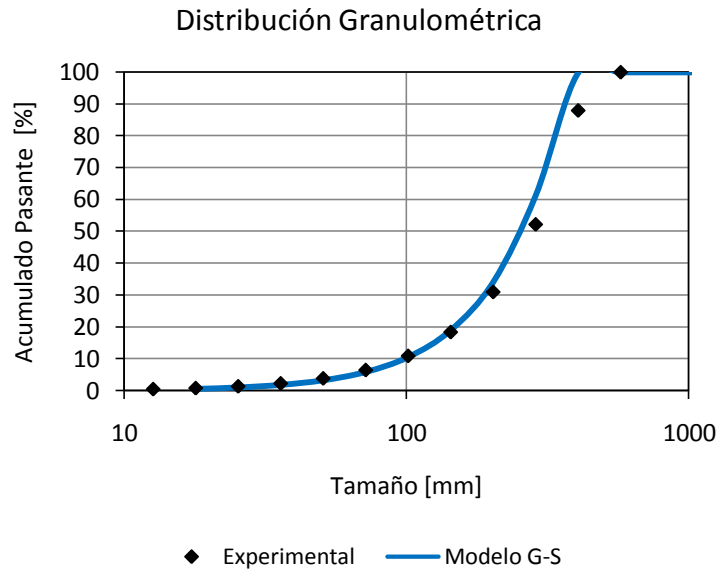


Figura 5.1: Porcentaje acumulado pasante experimental versus modelado

El error de validación para este ejemplo en particular es de un 3,9%. Tal como se observa en la figura 5.1, el modelo es capaz de predecir una distribución granulométrica con un error mínimo, a pesar de que el error de ajuste de los parámetros m y K estén sobre el 10%. Esto es debido a que el 13.48% de error de ajuste en la predicción del parámetro K se traduce a una diferencia de sólo 6 [m], lo cual es una muy buena predicción considerando el tamaño de las partículas.

Ahora bien, el error de validación del modelo, considerando los 9 sets de datos dispuestos para la validación, es de un 7,8%, por lo cual se declara que efectivamente el modelo está validado, y cumple con el objetivo de predecir distribuciones granulométricas, teniendo a su haber un mínimo margen de error.

5.2 Propuesta de Diagrama de Perforación

Conocido y validado el modelo de predicción granulométrica, se busca un diagrama de disparo que presente un mejor escenario para la operación, manteniendo la eficacia del proceso. Es por esto que se utiliza la metodología empírica planteada por Langefors-Holmberg para determinar el burden y espaciamiento de las perforaciones.

Considerando dos tiros de alivios de diámetro 110 [mm], se tiene un diámetro ficticio de alivio de 155,56 [mm]. Además a partir de este diámetro ficticio, la metodología asegura un avance óptimo de 4,50 [m].

Las dimensiones obtenidas para la rainura, según la metodología son:

Cuadrante	Valor Burden [mm]	Lado del cuadrante [mm]
1°	233	330
2°	330	700
3°	700	1.485

Tabla 5.3: Estimación cuadrantes rainura

Para calcular la ubicación y el carguío del resto de los tiros del diagrama se debe calcular la concentración lineal de carga de fondo, tal como se detalla en el subcapítulo “diseño diagrama de perforación” del capítulo de antecedentes. Para el resto de los tiros de la malla se considera como el cartucho de fondo un explosivo tipo tronex 1 1/8x8”, el cual presenta una densidad igual a 1,18[gr/cm³], lo que implica una concentración lineal de carga de fondo de 0,76 [Kg/m].

Es así como la metodología de Langefors-Holmberg propone, para el resto de las perforaciones, los siguientes valores máximos de burden y espaciamiento:

- Burden = 0,80 [m].
- Espaciamiento= 0,88 [m].

A continuación se presenta la propuesta realizada para las galerías de acarreo, con dimensiones de 5,0x4,9 [m²]. No se utilizarán los valores de burden (0,80 [m]) y espaciamiento (0,88 [m]) que propone la metodología de Langefors-Holmberg, ya que están fuera de los rangos válidos para la utilización del modelo, es por este motivo que se utilizarán un burden igual a 0,73 [m] y un espaciamiento de los tiros de 0,74 [m], los cuales se acercan lo más posible al burden y espaciamiento teórico máximo, y que es a la vez operacional para el tamaño de sección.

Por otro lado, a pesar que la metodología asegura un avance óptimo de 4,5 [m] (debido al diámetro ficticio de alivio), se considera un largo de tiro de sólo 3,8 [m] para la propuesta de

diagrama, ya que es la condición de terreno que a la fecha de la realización del presente escrito se utiliza; ahora bien, en caso de tener ventajas en los equipos de perforación que permitan un mayor avance, entonces se recomienda aumentar el largo de la perforación para aumentar la eficiencia del ciclo minero.

Por último se conserva el factor de carga establecido en el diagrama original, igual a 2,32 [Kg ANFO/m³].

Adoptando las consideraciones, se obtiene el siguiente diagrama de perforación (figura 5.2).

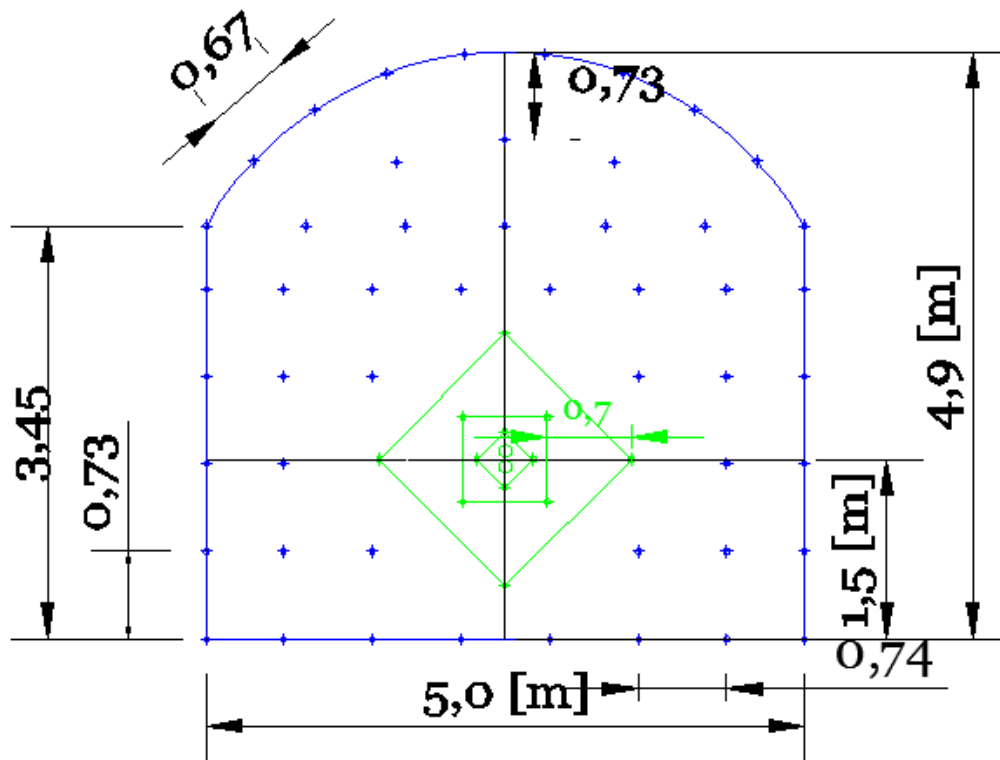


Figura 5.2: Propuesta diagrama de perforación galería 5,0x4,9[m²]

A continuación se presenta las diferencias de diseño entre el diagrama original y la propuesta.

Nivel de Acarreo		
	Original	Propuesta
Sección [m²]	5,0x4,9	5,0x4,9
N° Perforación rainura	12	12
N° Perforación de alivio	2	2
N° Perforación zapatera	8	8
N° Perforación caja	10	10
N° Perforación corona	8	8
N° Perforación auxiliar	28	24
Total perforaciones	66 + 2	62 + 2
Diámetro de perforación [mm]	45	45
Diámetro de pozo de alivio [mm]	110	110
Longitud de perforación [m]	3,8	3,8
Factor de carga [Kg ANFO/m³].	2,32	2,32
Burden perforaciones auxiliares [m]	0,69	0,73
Espaciamiento perforaciones zapatera [m]	0,71	0,74
m G-S modelo	2,05	1,55
K G-S modelo [m]	0,39	0,41

Tabla 5.4: Parámetros diagrama original versus diagrama propuesta

A partir de la tabla 5.4, se observa que el diagrama original presenta 4 tiros más con respecto al diagrama propuesto, debido a la reducción en los parámetros de diseño de perforación, y conservando el largo perforado y el factor de carga empleado.

Además se observa que el máximo tamaño de partícula (K de Gaudin-Schuhmann) se ve aumentado tan sólo en 2 [cm] entre la malla original y el propuesto, por tanto se concluye que es posible obtener un diagrama más eficiente, disminuyendo la cantidad de perforaciones por avance, y sin que esto implique un aumento significativo en la granulometría de la marina resultante.

En la figura 5.3 se presenta una comparación entre el porcentaje acumulado pasante del diagrama de perforación original y el diagrama de perforación propuesto.

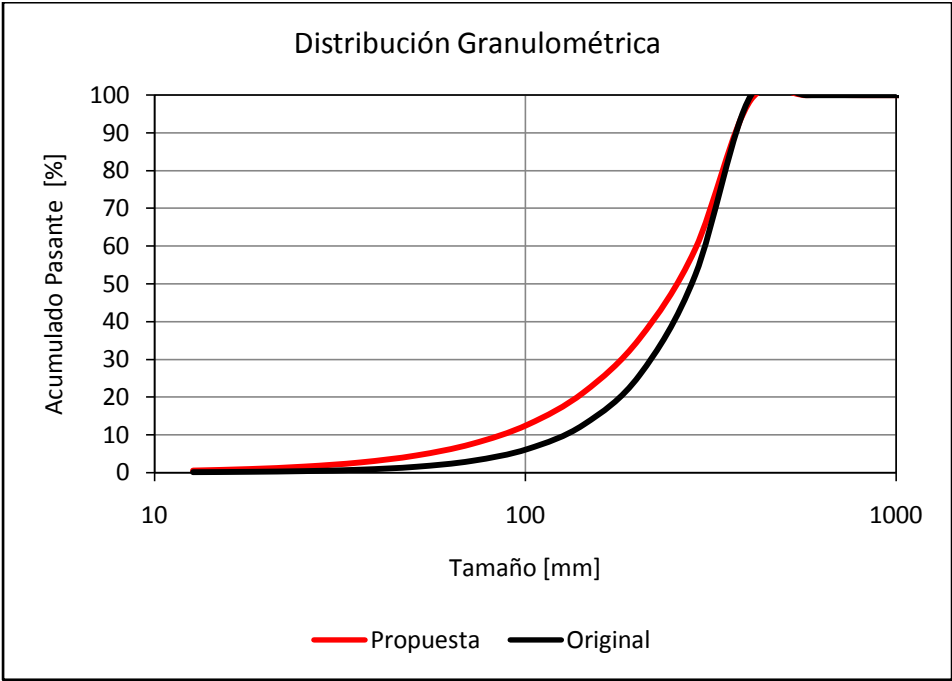


Figura 5.3: Parámetros diagrama original versus diagrama propuesta

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Por medio de la metodología descrita, fue posible lograr el objetivo principal que se perseguía, el cual era crear un modelo de predicción granulométrica post-tronadura, en función de los parámetros de diseño y de las características litológicas, aplicado a túneles de minería de una faena en particular. El modelo construido tiene la particularidad de poseer una formulación simple, frente a otros modelos de predicción utilizados en la actualidad.

Se observa que los parámetros que construyen al modelo tienen sentido físico, es así como el tamaño máximo de partícula (representada por el parámetro K en la ecuación de Gaudin-Schuhmann) está condicionada por los parámetros burden, espaciamiento y largo de avance de los tiros (quienes limitan el volumen del fragmento en sus tres dimensiones), es decir, al aumentar los parámetros geométricos de diseño del diagrama de perforación, se observa un aumento del tamaño máximo de partícula. Por otro lado, se tiene que el parámetro m de la ecuación de Gaudin-Schuhmann, que representa la heterogeneidad de la muestra, está condicionado por el burden y el espaciamiento de los tiros, además del factor de carga, en donde al aumentar cada una de estas variables, se observa un aumento en la heterogeneidad de la muestra, obteniendo así una mayor cantidad de partículas finas en la marina.

La dependencia litológica en la granulometría resultante de la tronadura no se ve reflejada directamente en la estimación de los parámetros del modelo, pero sí está presente en los rangos de valores válidos o admisibles para la utilización de éste mismo. Ocurre de manera análoga con los porcentajes de los distintos tipos de explosivos utilizados. Esto es debido a la poca variabilidad que presenta el parámetro a modelar con estas variables independientes frente a otras. Por lo tanto, si bien no se ven reflejados en forma directa, estos parámetros sí influyen en la distribución granulométrica actuando como restricciones del modelo.

Es necesario realizar un análisis estadístico de cada uno de los datos obtenidos, de manera de descartar aquellos datos aberrantes u *outliers*, para obtener un modelo que presente mayor precisión y exactitud en la estimación; pero a su vez es importante diferenciar cuáles *outliers* son los que deben descartarse (no descartar por conveniencia, sino porque se trata de casos aislados en la operación) y cuáles deben permanecer en el muestreo, ya que eliminarlos puede significar una pérdida de información del muestreo (como es el caso de los parámetros “espaciamiento”, “área” y “UCS”). Así mismo, se demuestra –por medio de las distribuciones de tamaños obtenidas por imágenes– que es importante considerar la marina que se escapa de la frente de avance, ya que en efecto, el no hacerlo implica una pérdida de información en granulometría de menores dimensiones a los fragmentos que reposan en la frente.

Por último cabe destacar que el modelo presenta un error de validación de un 7,8 %, a pesar del alto error de ajuste en la predicción de los parámetros de Gaudin-Schuhmann, siendo de un 16,51 % para el parámetro m , y de un 15,37 % para K . Esto se debe a que el error de ajuste para el parámetro K se traduce en una diferencia promedio de sólo 5 [cm] en la predicción del tamaño máximo de partícula, lo cual es una muy buena predicción considerando el tamaño de los fragmentos resultantes de la tronadura.

La aplicación de esta herramienta trae consigo grandes beneficios para el ciclo minero, ya que permite al ingeniero de perforación y tronadura rediseñar los diagramas de disparo en función de una distribución granulométrica deseada, permitiendo optimizar la cantidad de perforaciones realizadas por avance, lo cual a largo plazo se traduce, no tan sólo en un ahorro de tiempo, sino que además en un cuantioso ahorro de insumos para la operación.

CAPÍTULO 7

RECOMENDACIONES

Para futuros estudios se recomienda realizar investigaciones acerca de la granulometría óptima necesaria para obtener una mayor eficiencia o rendimiento en las operaciones, permitiendo no tan sólo rediseñar un diagrama de disparo, en función de disminuir la cantidad de perforaciones sin alterar la granulometría resultante, sino que rediseñar el diagrama en función a obtener una granulometría deseada que implique el máximo rendimiento en las operaciones.

Así mismo se recomienda muestrear en distintas mallas de perforación, con diversidad en los parámetros litológicos y utilizando diferentes cargas explosivas, de manera de obtener un modelo aún más robusto, válido para un mayor rango de variables.

Una de las grandes limitaciones que presenta el análisis de imágenes es la omisión de información de las partículas finas, menores a $\frac{1}{2}$ ", por lo que se sugiere incluir esta pérdida por medio de una calibración en las imágenes, en caso de que la fracción fina presente importancia para procesos futuros.

La metodología realizada en el presente trabajo es replicable para cualquier otra condición de perforación y tronadura, por lo que se recomienda replicarlo a rocas con diversas propiedades físicas, y aplicando distintos diagramas de disparo, de manera de robustecer el modelo para que sea válido para un mayor rango de valores admisibles. Así mismo incluir otras propiedades físicas (que no se incluyen en este estudio debido a la desinformación de éstas) para observar cómo influyen en la granulometría resultante por tronadura.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bergman, Peter. 2005. Optimization of Fragmentation and Comminution at Boliden Mineral, Aitik Operation, Luleå University of Technology. 22-26.
- [2] Cunningham C.V.B. 2005. The Kuz-Ram fragmentation-20 years on, European Federation of Explosives Engineers. [pdf].
- [3] ENAEX. Ficha Técnica Productos/Dinamitas, Tronex Plus. [pdf]. [en línea] <http://www.enaex.cl/rps_enaex_v60/opensite/Enaex%20Internet/contenido/contenido_20120626121383/sitio/pdf/FICHA_TECNICA_TRONEX%20PLUS.pdf> [consulta: 15 julio 2014].
- [4] ENAEX. Instructivo Fácil para el uso del Softron. [pdf]. [en línea] <http://www.enaex.cl/rps_enaex_v60/opensite/Enaex%20Internet/contenido/contenido_20120626121383/sitio/pdf/FICHA_TECNICA_SOFTRON.pdf> [consulta: 15 julio 2014].
- [5] Finn Ouchterlony, 2004. The Swebrec function, blast fragmentation, the Kuz-Ram and CZM/TCM models, the NBC and crusher breakage, it all ties together, Swedish Blasting Research Centre at Luleå University of Technology. [pdf].
- [6] Finn Ouchterlony. 2005. The Swebrec function: linking fragmentation by blasting and crushing, Mining Technology. [pdf].
- [7] Finn Ouchterlony. 2005. What does the fragment size distribution of blasted rock look like?, European Federation of Explosives Engineers. [pdf].
- [8] Gerencia Recursos Mineros y Desarrollo Superintendencia Geología. Antecedentes Geológico-Geotécnicos entre XC-Acceso 3 y XC-Acceso 4 Mina Esmeralda. Codelco Chile, División El Teniente, Septiembre 2010. [pdf].
- [9] Guzman Ronald V, Perforación y Tronadura en Labores Mineras Subterráneas, Centro de Minería-UC. 2009. [en línea] <http://intrawww.ing.puc.cl/siding/public/ingcursos/cursos_pub/descarga.phtml?id_curso_ic=1781&id_archivo=67332> [consulta: 08 julio 2014].
- [10] Mas Errázuriz. Obras Preparación de Minas Largo Plazo, Codelco Chile – División El Teniente, 2013 [ppt].

- [11] Music A. Diagnóstico y Optimización de Disparos en Desarrollo Horizontal, Mina El Teniente, Universidad de Chile. 2007. [en línea]
<http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2007/music_a/sources/music_a.pdf>
[consulta: 10 julio 2014]. 19-22.
- [12] Norbert H. Maerz. 2001. Automated Online Optical Sizing Analysis. University of British Columbia, Mining and Mineral Process Engineering. 250-255.
- [13] Procesamiento de Minerales. Técnicas Experimentales en el Procesamiento de Minerales. 2012. [en línea]
<http://procesaminerales.blogspot.com/2012/05/tecnicas-experimentales-en_07.html> [consulta: 08 julio 2014].
- [14] Rojas Mariana. 2009. Descripción Cuantitativa de los Procesos de Extracción y Reducción de Mineral en la Minería de Cobre a Cielo Abierto, Memoria (Ingeniero Civil Industrial). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 60-63.
- [15] Universidad de Coruña. Homogeneidad de los errores. Datos atípicos. [pdf]. [en línea]
<http://www.udc.gal/dep/mate/estadistica2/sec4_6.html>
[consulta: 20 julio 2014].
- [16] Universidad Nacional del Sur, Departamento de Ingeniería Química. Propiedades de una Partícula [pdf]. [en línea]
<<http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo2.pdf>> [consulta: 10 julio 2014].
- [17] Uriel Ezequiel, Regresión Lineal Múltiple: Estimación y Propiedades, Universidad de Valencia. 2013. [en línea]
<<http://www.uv.es/uriel/3%20Regresion%20lineal%20multiple%20estimacion%20y%20propiedades.pdf>> [consulta: 20 julio 2014]. 1-6.

ANEXO A

MUESTREO – PORCENTAJE ACUMULADO PASANTE

Imagen 1						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	4	2	0	2.85	93.75	100.00
575	0	0	0	0.00	93.75	100.00
406	5	3	0	3.80	85.42	61.51
287	15	6	0	9.98	63.54	36.26
203	21	13	0	16.15	28.13	21.38
144	7	8	0	7.13	12.50	12.61
102	3	3	0	2.85	6.25	7.43
72	0	2	0	0.95	4.17	4.38
51	0	1	0	0.48	3.13	2.58
36	0	2	0	0.95	1.04	1.52
25	0	1	0	0.48	0.00	0.90
18	0	0	0	0.00	0.00	0.53
13	0	0	0	0.00	0.00	0.31

Imagen 2						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	2	0	0.95	98.65	100.00
575	1	9	0	4.75	91.89	100.00
406	4	8	0	5.70	83.78	75.33
287	7	15	0	10.45	68.92	42.97
203	7	17	0	11.40	52.70	24.51
144	25	9	0	16.15	29.73	13.98
102	18	5	0	10.93	14.19	7.97
72	14	1	0	7.13	4.05	4.55
51	5	0	0	2.38	0.68	2.59
36	1	0	0	0.48	0.00	1.48
25	0	0	0	0.00	0.00	0.84
18	0	0	0	0.00	0.00	0.48
13	0	0	0	0.00	0.00	0.27

Imagen 3						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	6	3	0	4.28	88.89	100.00
406	6	0	0	2.85	81.48	79.76
287	8	6	0	6.65	64.20	49.98
203	11	11	0	10.45	37.04	31.32
144	5	6	0	5.23	23.46	19.62
102	3	4	0	3.33	14.81	12.30
72	2	6	0	3.80	4.94	7.71
51	1	3	0	1.90	0.00	4.83
36	0	0	0	0.00	0.00	3.03
25	0	0	0	0.00	0.00	1.90
18	0	0	0	0.00	0.00	1.19
13	0	0	0	0.00	0.00	0.74

Imagen4						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	1	0	0.48	97.83	100.00
575	4	6	0	4.75	76.09	88.36
406	1	2	0	1.43	69.57	53.48
287	2	7	0	4.28	50.00	32.37
203	2	7	0	4.28	30.43	19.59
144	4	5	0	4.28	10.87	11.86
102	2	1	0	1.43	4.35	7.18
72	1	1	0	0.95	0.00	4.34
51	0	0	0	0.00	0.00	2.63
36	0	0	0	0.00	0.00	1.59
25	0	0	0	0.00	0.00	0.96
18	0	0	0	0.00	0.00	0.58
13	0	0	0	0.00	0.00	0.35

Imagen 5						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	1	1	0	0.95	97.10	100.00
406	6	1	0	3.33	86.96	100.00
287	9	5	0	6.65	66.67	53.89
203	4	4	0	3.80	55.07	28.64
144	10	6	0	7.60	31.88	15.22
102	6	10	0	7.60	8.70	8.09
72	1	3	0	1.90	2.90	4.30
51	1	0	0	0.48	1.45	2.29
36	0	1	0	0.48	0.00	1.21
25	0	0	0	0.00	0.00	0.65
18	0	0	0	0.00	0.00	0.34
13	0	0	0	0.00	0.00	0.18

Imagen 6						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	1	0	0	0.48	99.22	100.00
575	2	2	0	1.90	96.08	100.00
406	2	2	0	1.90	92.95	87.99
287	10	7	0	8.08	79.63	52.22
203	14	13	2	12.93	58.31	30.99
144	16	8	1	11.45	39.42	18.39
102	15	11	5	12.60	18.64	10.91
72	10	5	9	7.58	6.14	6.48
51	1	2	8	1.83	3.13	3.84
36	0	0	13	0.65	2.06	2.28
25	0	0	9	0.45	1.32	1.35
18	0	0	11	0.55	0.41	0.80
13	0	0	5	0.25	0.00	0.48

Imagen 7						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x) [%]	G-S Fu(x) [%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	0	0	0.00	100.00	100.00
406	3	0	0	1.43	97.35	100.00
287	5	1	0	2.85	92.04	100.00
203	8	8	0	7.60	77.88	64.71
144	14	12	0	12.35	54.87	34.36
102	9	10	0	9.03	38.05	18.24
72	5	13	0	8.55	22.12	9.68
51	6	9	0	7.13	8.85	5.14
36	5	4	0	4.28	0.88	2.73
25	0	0	0	0.00	0.88	1.45
18	0	1	0	0.48	0.00	0.77
13	0	0	0	0.00	0.00	0.41

Imagen 8						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x) [%]	G-S Fu(x) [%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	2	1	0	1.43	96.41	100.00
406	2	2	0	1.90	91.61	100.00
287	7	7	5	6.90	74.21	49.17
203	19	7	7	12.70	42.18	21.89
144	8	7	4	7.33	23.71	9.75
102	4	3	6	3.63	14.56	4.34
72	4	7	9	5.68	0.25	1.93
51	0	0	2	0.10	0.00	0.86
36	0	0	0	0.00	0.00	0.38
25	0	0	0	0.00	0.00	0.17
18	0	0	0	0.00	0.00	0.08
13	0	0	0	0.00	0.00	0.03

Imagen 9

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	1	0	0	0.48	98.70	100.00
406	3	2	0	2.38	92.19	100.00
287	4	3	1	3.38	82.93	81.40
203	5	6	2	5.33	68.33	38.54
144	7	7	6	6.95	49.28	18.25
102	5	8	5	6.43	31.67	8.64
72	4	7	8	5.63	16.24	4.09
51	4	6	9	5.20	1.99	1.94
36	1	0	3	0.63	0.27	0.92
25	0	0	1	0.05	0.14	0.43
18	0	0	1	0.05	0.00	0.21
13	0	0	0	0.00	0.00	0.10

Imagen 10

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	1	2	0	1.43	96.16	100.00
406	6	2	1	3.85	85.77	100.00
287	8	5	2	6.28	68.85	63.78
203	8	7	6	7.43	48.82	34.80
144	6	5	6	5.53	33.92	18.98
102	2	7	10	4.78	21.04	10.36
72	0	6	11	3.40	11.87	5.65
51	2	3	3	2.53	5.06	3.08
36	0	3	7	1.78	0.27	1.68
25	0	0	2	0.10	0.00	0.92
18	0	0	0	0.00	0.00	0.50
13	0	0	0	0.00	0.00	0.27

Imagen 11						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	1	0	0.48	98.67	100.00
575	1	4	0	2.38	92.00	100.00
406	2	6	0	3.80	81.33	79.17
287	0	7	0	3.33	72.00	54.02
203	4	10	0	6.65	53.33	36.86
144	5	6	0	5.23	38.67	25.16
102	7	4	0	5.23	24.00	17.17
72	5	2	0	3.33	14.67	11.71
51	6	0	0	2.85	6.67	7.99
36	3	0	0	1.43	2.67	5.46
25	2	0	0	0.95	0.00	3.72
18	0	0	0	0.00	0.00	2.54
13	0	0	0	0.00	0.00	1.73

Imagen 12						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	1	0	0.48	98.40	100.00
406	3	0	0	1.43	93.59	100.00
287	3	8	0	5.23	75.97	72.18
203	7	7	1	6.70	53.37	42.68
144	4	3	8	3.73	40.81	25.24
102	3	5	7	4.15	26.81	14.92
72	1	5	10	3.35	15.51	8.82
51	4	1	4	2.58	6.83	5.22
36	0	2	1	1.00	3.46	3.08
25	0	1	8	0.88	0.51	1.82
18	0	0	3	0.15	0.00	1.08
13	0	0	0	0.00	0.00	0.64

Imagen 13

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	2	1	1	1.48	94.53	100.00
406	2	1	1	1.48	89.05	100.00
287	1	1	2	1.05	85.16	73.66
203	6	9	1	7.18	58.53	37.85
144	4	5	6	4.58	41.56	19.45
102	3	10	8	6.58	17.16	9.99
72	1	4	2	2.48	7.98	5.13
51	1	0	3	0.63	5.66	2.64
36	0	2	0	0.95	2.13	1.36
25	0	1	1	0.53	0.19	0.70
18	0	0	0	0.00	0.19	0.36
13	0	0	1	0.05	0.00	0.18

Imagen 14

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	2	0	0	0.95	90.00	100.00
406	1	0	0	0.48	85.00	79.59
287	2	0	0	0.95	75.00	52.19
203	6	0	0	2.85	45.00	34.23
144	6	0	0	2.85	15.00	22.44
102	3	0	0	1.43	0.00	14.72
72	0	0	0	0.00	0.00	9.65
51	0	0	0	0.00	0.00	6.33
36	0	0	0	0.00	0.00	4.15
25	0	0	0	0.00	0.00	2.72
18	0	0	0	0.00	0.00	1.78
13	0	0	0	0.00	0.00	1.17

Imagen 15

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	0	0	0.00	100.00	100.00
406	0	0	1	0.05	95.00	100.00
287	0	0	3	0.15	80.00	82.85
203	0	0	2	0.10	70.00	54.93
144	0	0	4	0.20	50.00	36.42
102	0	0	6	0.30	20.00	24.15
72	0	0	1	0.05	15.00	16.01
51	0	0	0	0.00	15.00	10.62
36	0	0	2	0.10	5.00	7.04
25	0	0	1	0.05	0.00	4.67
18	0	0	0	0.00	0.00	3.09
13	0	0	0	0.00	0.00	2.05

Imagen 16

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	1	0	0.48	98.52	100.00
575	0	0	0	0.00	98.52	100.00
406	3	4	2	3.43	87.81	77.47
287	2	2	11	2.45	80.16	46.01
203	12	4	8	8.00	55.16	27.32
144	13	4	6	8.38	28.98	16.23
102	5	4	3	4.43	15.16	9.64
72	6	2	1	3.85	3.13	5.72
51	1	0	0	0.48	1.64	3.40
36	1	0	1	0.53	0.00	2.02
25	0	0	0	0.00	0.00	1.20
18	0	0	0	0.00	0.00	0.71
13	0	0	0	0.00	0.00	0.42

Imagen 17

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	1	0	0	0.48	98.63	100.00
406	4	1	1	2.43	91.61	100.00
287	1	7	0	3.80	80.61	78.91
203	12	4	2	7.70	58.32	48.83
144	4	6	3	4.90	44.14	30.22
102	3	0	6	1.73	39.15	18.70
72	5	0	4	2.58	31.69	11.57
51	13	2	10	7.63	9.62	7.16
36	3	1	8	2.30	2.97	4.43
25	1	0	5	0.73	0.87	2.74
18	0	0	6	0.30	0.00	1.70
13	0	0	0	0.00	0.00	1.05

Imagen 18

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	0	0	0.00	100.00	100.00
406	3	0	0	1.43	90.73	100.00
287	6	0	0	2.85	72.20	77.26
203	7	0	3	3.48	49.59	47.15
144	3	0	2	1.53	39.67	28.78
102	4	0	4	2.10	26.02	17.56
72	3	0	3	1.58	15.77	10.72
51	4	0	1	1.95	3.09	6.54
36	1	0	0	0.48	0.00	3.99
25	0	0	0	0.00	0.00	2.44
18	0	0	0	0.00	0.00	1.49
13	0	0	0	0.00	0.00	0.91

Imagen 19

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	0	0	0.00	100.00	100.00
406	3	3	0	2.85	92.45	100.00
287	4	3	0	3.33	83.64	95.63
203	6	7	0	6.18	67.28	47.82
144	14	10	0	11.40	37.09	23.91
102	10	3	4	6.38	20.20	11.95
72	4	5	8	4.68	7.81	5.98
51	0	2	18	1.85	2.91	2.99
36	0	0	14	0.70	1.06	1.49
25	0	0	4	0.20	0.53	0.75
18	0	0	4	0.20	0.00	0.37
13	0	0	0	0.00	0.00	0.19

Imagen 20

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	2	0	0	0.95	97.17	100.00
406	5	1	0	2.85	88.69	100.00
287	6	4	0	4.75	74.55	61.51
203	6	12	4	8.75	48.51	31.45
144	8	6	5	6.90	27.98	16.08
102	3	5	6	4.10	15.77	8.22
72	5	2	4	3.53	5.28	4.20
51	0	2	3	1.10	2.01	2.15
36	0	0	1	0.05	1.86	1.10
25	0	1	2	0.58	0.15	0.56
18	0	0	1	0.05	0.00	0.29
13	0	0	0	0.00	0.00	0.15

Imagen 21						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	1	0	0.48	98.88	100.00
575	0	1	1	0.53	97.64	100.00
406	0	2	2	1.05	95.16	91.28
287	6	2	7	4.15	85.35	62.93
203	12	4	3	7.75	67.04	43.38
144	8	8	6	7.90	48.38	29.91
102	6	7	1	6.23	33.67	20.62
72	5	6	0	5.23	21.32	14.22
51	5	6	0	5.23	8.98	9.80
36	3	3	0	2.85	2.24	6.76
25	0	2	0	0.95	0.00	4.66
18	0	0	0	0.00	0.00	3.21
13	0	0	0	0.00	0.00	2.21

Imagen 22						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	1	0	0.48	97.93	100.00
406	1	0	0	0.48	95.87	100.00
287	4	1	0	2.38	85.54	65.83
203	6	4	1	4.80	64.67	39.43
144	4	8	2	5.80	39.46	23.62
102	7	1	7	4.15	21.41	14.15
72	0	7	7	3.68	5.43	8.47
51	0	1	1	0.53	3.15	5.07
36	0	1	5	0.73	0.00	3.04
25	0	0	0	0.00	0.00	1.82
18	0	0	0	0.00	0.00	1.09
13	0	0	0	0.00	0.00	0.65

Imagen 23

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	0	0	0.00	100.00	100.00
406	0	3	0	1.43	97.34	100.00
287	3	3	0	2.85	92.01	100.00
203	7	9	0	7.60	77.80	72.30
144	11	8	6	9.33	60.37	39.63
102	10	7	10	8.58	44.35	21.72
72	15	6	6	10.28	25.14	11.91
51	6	4	8	5.15	15.51	6.53
36	8	3	5	5.48	5.28	3.58
25	5	0	6	2.68	0.28	1.96
18	0	0	3	0.15	0.00	1.07
13	0	0	0	0.00	0.00	0.59

Imagen 24

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	0	0	0.00	100.00	100.00
406	1	0	0	0.48	98.75	100.00
287	3	1	0	1.90	93.77	100.00
203	9	3	3	5.85	78.43	65.48
144	5	9	1	6.70	60.85	27.90
102	8	5	6	6.48	43.87	11.88
72	10	12	6	10.75	15.67	5.06
51	4	4	9	4.25	4.52	2.16
36	3	0	4	1.63	0.26	0.92
25	0	0	1	0.05	0.13	0.39
18	0	0	1	0.05	0.00	0.17
13	0	0	0	0.00	0.00	0.07

Imagen 25

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	0	0	0.00	100.00	100.00
406	2	3	0	2.38	90.54	100.00
287	5	5	0	4.75	71.61	77.18
203	9	6	3	7.28	42.63	37.17
144	2	6	7	4.15	26.10	17.90
102	3	4	4	3.53	12.05	8.62
72	0	2	3	1.10	7.67	4.15
51	3	0	3	1.58	1.39	2.00
36	0	0	3	0.15	0.80	0.96
25	0	0	2	0.10	0.40	0.46
18	0	0	1	0.05	0.20	0.22
13	0	0	1	0.05	0.00	0.11

Imagen 26

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	3	1	0	1.90	94.37	100.00
406	4	2	0	2.85	85.92	100.00
287	4	1	1	2.43	78.72	70.96
203	6	6	5	5.95	61.08	42.98
144	5	6	10	5.73	44.11	26.03
102	3	8	8	5.63	27.43	15.77
72	4	2	6	3.15	18.09	9.55
51	2	6	4	4.00	6.23	5.78
36	1	2	3	1.58	1.56	3.50
25	0	0	1	0.05	1.41	2.12
18	0	1	0	0.48	0.00	1.29
13	0	0	0	0.00	0.00	0.78

Imagen 27

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	1	0	0.48	99.00	100.00
575	2	1	0	1.43	96.01	100.00
406	2	2	0	1.90	92.02	100.00
287	7	4	0	5.23	81.04	59.04
203	9	8	1	8.13	63.97	33.92
144	11	6	11	8.63	45.85	19.49
102	14	2	6	7.90	29.25	11.20
72	8	7	7	7.48	13.55	6.44
51	4	1	8	2.78	7.72	3.70
36	5	0	4	2.58	2.31	2.13
25	2	0	2	1.05	0.11	1.22
18	0	0	1	0.05	0.00	0.70
13	0	0	0	0.00	0.00	0.40

Imagen 28

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	1	2	0	1.43	96.37	100.00
406	3	4	0	3.33	87.91	90.86
287	6	3	0	4.28	77.04	54.62
203	13	15	2	13.40	42.94	32.83
144	7	9	8	8.00	22.58	19.73
102	3	4	9	3.78	12.98	11.86
72	2	1	10	1.93	8.08	7.13
51	3	0	9	1.88	3.31	4.29
36	1	0	2	0.58	1.84	2.58
25	0	0	4	0.20	1.34	1.55
18	0	0	1	0.05	1.21	0.93
13	0	1	0	0.48	0.00	0.56

Imagen 29

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	1	0	0.48	98.81	100.00
575	1	1	0	0.95	96.42	100.00
406	1	4	1	2.43	90.33	91.48
287	5	4	0	4.28	79.59	59.23
203	4	4	5	4.05	69.41	38.34
144	9	10	2	9.13	46.48	24.82
102	10	5	4	7.33	28.08	16.07
72	8	2	10	5.25	14.89	10.41
51	3	4	9	3.78	5.40	6.74
36	1	0	4	0.68	3.71	4.36
25	1	1	1	1.00	1.19	2.82
18	0	1	0	0.48	0.00	1.83
13	0	0	0	0.00	0.00	1.18

Imagen 30

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	1	0	0	0.48	98.91	100.00
406	1	6	0	3.33	91.27	100.00
287	9	1	2	4.85	80.14	71.34
203	7	11	1	8.60	60.39	41.60
144	9	5	8	7.05	44.20	24.26
102	7	9	9	8.05	25.72	14.15
72	3	6	8	4.68	14.98	8.25
51	3	6	4	4.48	4.71	4.81
36	1	2	3	1.58	1.09	2.81
25	0	0	0	0.00	1.09	1.64
18	0	0	0	0.00	1.09	0.95
13	0	1	0	0.48	0.00	0.56

Imagen 31						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	2	0	0	0.95	98.12	100.00
406	4	2	0	2.85	92.47	100.00
287	9	6	2	7.23	78.16	73.07
203	12	10	1	10.50	57.36	39.07
144	9	10	9	9.48	38.58	20.89
102	9	9	4	8.75	21.25	11.17
72	3	5	2	3.90	13.52	5.97
51	5	3	6	4.10	5.40	3.19
36	1	3	2	2.00	1.44	1.71
25	0	1	3	0.63	0.20	0.91
18	0	0	2	0.10	0.00	0.49
13	0	0	0	0.00	0.00	0.26

Imagen 32						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	2	1	0	1.43	96.94	100.00
406	1	2	0	1.43	93.87	100.00
287	5	5	0	4.75	83.66	74.54
203	6	5	1	5.28	72.33	49.85
144	13	12	5	12.13	46.27	33.34
102	7	11	8	8.95	27.03	22.30
72	5	0	7	2.73	21.17	14.92
51	1	4	12	2.98	14.78	9.98
36	5	6	11	5.78	2.36	6.67
25	1	1	3	1.10	0.00	4.46
18	0	0	0	0.00	0.00	2.98
13	0	0	0	0.00	0.00	2.00

Imagen 33

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	3	0	1.43	96.07	100.00
406	9	3	0	5.70	80.36	92.89
287	7	3	1	4.80	67.13	49.30
203	6	9	6	7.43	46.66	26.17
144	9	9	6	8.85	22.26	13.89
102	8	2	5	5.00	8.48	7.37
72	2	2	6	2.20	2.41	3.91
51	0	0	6	0.30	1.59	2.08
36	0	1	2	0.58	0.00	1.10
25	0	0	0	0.00	0.00	0.59
18	0	0	0	0.00	0.00	0.31
13	0	0	0	0.00	0.00	0.16

Imagen 34

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	0	0	0.00	100.00	100.00
406	3	6	2	4.38	89.89	100.00
287	3	4	1	3.38	82.09	94.70
203	7	6	5	6.43	67.24	54.28
144	11	9	2	9.60	45.06	31.11
102	8	6	5	6.90	29.12	17.83
72	8	4	6	6.00	15.25	10.22
51	6	0	7	3.20	7.86	5.86
36	4	1	10	2.88	1.21	3.36
25	1	0	1	0.53	0.00	1.92
18	0	0	0	0.00	0.00	1.10
13	0	0	0	0.00	0.00	0.63

Imagen 35						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	1	0	0.48	98.60	100.00
406	1	3	0	1.90	93.00	100.00
287	8	4	0	5.70	76.22	70.29
203	9	12	1	10.03	46.69	37.40
144	6	4	5	5.00	31.96	19.90
102	3	2	8	2.78	23.78	10.59
72	4	3	3	3.48	13.55	5.64
51	3	3	4	3.05	4.57	3.00
36	1	0	9	0.93	1.84	1.60
25	0	1	2	0.58	0.15	0.85
18	0	0	1	0.05	0.00	0.45
13	0	0	0	0.00	0.00	0.24

Imagen 36						
Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	3	0	0	1.43	96.72	100.00
406	4	4	0	3.80	87.99	100.00
287	4	1	0	2.38	82.53	71.32
203	8	14	1	10.50	58.39	33.62
144	6	13	5	9.28	37.07	15.85
102	6	9	9	7.58	19.66	7.47
72	3	5	5	4.05	10.34	3.52
51	5	2	7	3.68	1.90	1.66
36	0	1	4	0.68	0.34	0.78
25	0	0	2	0.10	0.11	0.37
18	0	0	1	0.05	0.00	0.17
13	0	0	0	0.00	0.00	0.08

Imagen 37

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	1	2	0	1.43	95.83	100.00
406	4	2	0	2.85	87.49	100.00
287	5	6	1	5.28	72.06	68.48
203	10	7	5	8.33	47.70	34.50
144	4	2	6	3.15	38.48	17.38
102	5	7	3	5.85	21.36	8.76
72	6	0	3	3.00	12.58	4.41
51	5	2	2	3.43	2.56	2.22
36	1	0	3	0.63	0.73	1.12
25	0	0	4	0.20	0.15	0.56
18	0	0	1	0.05	0.00	0.28
13	0	0	0	0.00	0.00	0.14

Imagen 38

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	0	0	0.00	100.00	100.00
406	1	2	2	1.53	96.12	100.00
287	7	7	1	6.70	79.10	100.00
203	9	9	5	8.80	56.73	46.99
144	9	4	5	6.43	40.41	20.14
102	11	3	6	6.95	22.74	8.63
72	3	7	1	4.80	10.55	3.70
51	3	4	3	3.48	1.72	1.58
36	0	1	3	0.63	0.13	0.68
25	0	0	1	0.05	0.00	0.29
18	0	0	0	0.00	0.00	0.12
13	0	0	0	0.00	0.00	0.05

Imagen 39

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	2	0	0	0.95	98.21	100.00
406	0	1	0	0.48	97.32	100.00
287	2	6	0	3.80	90.16	92.32
203	4	13	0	8.08	74.94	64.15
144	9	4	5	6.43	62.84	44.58
102	8	3	6	5.53	52.43	30.98
72	7	3	14	5.45	42.16	21.53
51	6	7	10	6.68	29.58	14.96
36	5	8	5	6.43	17.48	10.39
25	3	15	3	8.70	1.08	7.22
18	1	0	2	0.58	0.00	5.02
13	0	0	0	0.00	0.00	3.49

Imagen 40

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	1	1	0.53	98.65	100.00
406	2	2	0	1.90	93.77	100.00
287	6	3	5	4.53	82.16	73.40
203	7	7	2	6.75	64.83	34.88
144	6	7	5	6.43	48.33	16.58
102	9	8	3	8.23	27.21	7.88
72	6	10	0	7.60	7.70	3.74
51	4	1	1	2.43	1.48	1.78
36	0	1	1	0.53	0.13	0.85
25	0	0	1	0.05	0.00	0.40
18	0	0	0	0.00	0.00	0.19
13	0	0	0	0.00	0.00	0.09

Imagen 41

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	1	0	0	0.48	98.88	100.00
406	0	2	0	0.95	96.65	100.00
287	2	4	0	2.85	89.94	83.68
203	7	5	2	5.80	76.29	53.92
144	11	7	6	8.85	55.47	34.75
102	10	5	8	7.53	37.76	22.39
72	8	7	14	7.83	19.35	14.43
51	1	4	7	2.73	12.94	9.30
36	4	0	9	2.35	7.41	5.99
25	4	1	6	2.68	1.12	3.86
18	1	0	0	0.48	0.00	2.49
13	0	0	0	0.00	0.00	1.60

Imagen 42

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	0	0	0.00	100.00	100.00
406	4	4	1	3.85	88.94	100.00
287	1	5	1	2.90	80.60	100.00
203	7	8	5	7.38	59.41	42.22
144	8	7	6	7.43	38.07	17.81
102	10	5	8	7.53	16.45	7.52
72	4	4	6	4.10	4.67	3.17
51	1	1	1	1.00	1.80	1.34
36	1	0	2	0.58	0.14	0.56
25	0	0	1	0.05	0.00	0.24
18	0	0	0	0.00	0.00	0.10
13	0	0	0	0.00	0.00	0.04

Imagen 43

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	0	0	0.00	100.00	100.00
406	1	1	0	0.95	98.49	100.00
287	5	5	1	4.80	90.87	100.00
203	8	9	0	8.08	78.04	68.58
144	18	11	6	14.08	55.68	29.39
102	10	7	8	8.48	42.22	12.59
72	8	15	14	11.63	23.75	5.40
51	6	14	7	9.85	8.10	2.31
36	3	7	3	4.90	0.32	0.99
25	0	0	3	0.15	0.08	0.42
18	0	0	1	0.05	0.00	0.18
13	0	0	0	0.00	0.00	0.08

Imagen 44

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	1	0	0.48	99.01	100.00
406	3	3	0	2.85	93.09	100.00
287	8	5	0	6.18	80.27	85.32
203	7	6	1	6.23	67.34	43.07
144	8	10	9	9.00	48.65	21.74
102	7	5	3	5.85	36.50	10.97
72	9	7	6	7.90	20.09	5.54
51	8	6	5	6.90	5.76	2.80
36	1	4	1	2.43	0.73	1.41
25	0	0	6	0.30	0.10	0.71
18	0	0	1	0.05	0.00	0.36
13	0	0	0	0.00	0.00	0.18

Imagen 45

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	1	0	0.48	98.80	100.00
575	1	2	0	1.43	95.18	100.00
406	2	2	1	1.95	90.23	81.94
287	7	7	0	6.65	73.37	50.25
203	12	7	5	9.28	49.84	30.81
144	5	14	4	9.23	26.44	18.90
102	5	4	4	4.48	15.09	11.59
72	1	2	3	1.58	11.10	7.11
51	2	2	4	2.10	5.77	4.36
36	2	0	5	1.20	2.73	2.67
25	1	0	8	0.88	0.51	1.64
18	0	0	4	0.20	0.00	1.00
13	0	0	0	0.00	0.00	0.62

Imagen 46

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	0	0	0.00	100.00	100.00
406	1	5	0	2.85	90.88	100.00
287	6	5	0	5.23	74.16	71.90
203	8	6	5	6.90	52.08	32.43
144	11	11	4	10.65	18.00	14.62
102	2	3	7	2.73	9.28	6.59
72	0	4	5	2.15	2.40	2.97
51	0	0	7	0.35	1.28	1.34
36	0	0	5	0.25	0.48	0.60
25	0	0	3	0.15	0.00	0.27
18	0	0	0	0.00	0.00	0.12
13	0	0	0	0.00	0.00	0.06

Imagen 47

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	2	1	1.00	98.25	100.00
406	3	4	0	3.33	92.42	100.00
287	3	3	0	2.85	87.42	89.95
203	10	4	3	6.80	75.50	43.70
144	7	11	9	9.00	59.73	21.23
102	10	20	5	14.50	34.31	10.32
72	11	6	9	8.53	19.37	5.01
51	8	8	6	7.90	5.52	2.44
36	3	3	1	2.90	0.44	1.18
25	0	0	4	0.20	0.09	0.57
18	0	0	1	0.05	0.00	0.28
13	0	0	0	0.00	0.00	0.14

Imagen 48

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	2	0	0.95	97.71	100.00
406	2	1	0	1.43	94.29	100.00
287	2	6	2	3.90	84.91	90.57
203	9	5	1	6.70	68.79	48.92
144	7	3	6	5.05	56.64	26.42
102	8	5	9	6.63	40.71	14.27
72	8	5	8	6.58	24.89	7.71
51	4	6	7	5.10	12.63	4.16
36	2	7	6	4.58	1.62	2.25
25	1	0	3	0.63	0.12	1.21
18	0	0	1	0.05	0.00	0.66
13	0	0	0	0.00	0.00	0.35

Imagen 49

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	2	1	0	1.43	96.71	100.00
406	1	3	0	1.90	92.32	100.00
287	4	6	1	4.80	81.22	75.66
203	6	9	1	7.18	64.64	39.30
144	7	10	7	8.43	45.18	20.41
102	5	8	5	6.43	30.33	10.60
72	10	5	5	7.38	13.29	5.51
51	4	6	5	5.00	1.73	2.86
36	0	0	3	0.15	1.39	1.48
25	0	0	10	0.50	0.23	0.77
18	0	0	2	0.10	0.00	0.40
13	0	0	0	0.00	0.00	0.21

Imagen 50

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	0	0	0.00	100.00	100.00
406	0	3	0	1.43	95.00	100.00
287	2	4	0	2.85	84.99	89.45
203	9	7	1	7.65	58.12	43.24
144	3	12	4	7.33	32.40	20.90
102	6	5	11	5.78	12.12	10.10
72	0	2	14	1.65	6.32	4.88
51	0	2	6	1.25	1.93	2.36
36	0	0	3	0.15	1.40	1.14
25	0	0	5	0.25	0.53	0.55
18	0	0	2	0.10	0.18	0.27
13	0	0	1	0.05	0.00	0.13

Imagen 51

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	1	0	0.48	99.02	100.00
575	1	1	0	0.95	97.06	100.00
406	2	3	0	2.38	92.16	100.00
287	6	2	1	3.85	84.21	51.38
203	6	10	5	7.85	68.01	25.40
144	8	14	6	10.75	45.82	12.56
102	11	7	14	9.25	26.73	6.21
72	11	9	7	9.85	6.40	3.07
51	4	0	10	2.40	1.44	1.52
36	0	0	12	0.60	0.21	0.75
25	0	0	1	0.05	0.10	0.37
18	0	0	1	0.05	0.00	0.18
13	0	0	0	0.00	0.00	0.09

Imagen 52

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	1	0	0	0.48	99.01	100.00
575	0	3	0	1.43	96.06	100.00
406	2	5	0	3.33	89.16	87.35
287	4	11	1	7.18	74.27	42.92
203	6	11	4	8.28	57.11	21.09
144	12	9	4	10.18	36.00	10.37
102	16	10	11	12.90	9.23	5.09
72	5	0	14	3.08	2.85	2.50
51	1	0	5	0.73	1.35	1.23
36	0	0	10	0.50	0.31	0.60
25	0	0	2	0.10	0.10	0.30
18	0	0	1	0.05	0.00	0.15
13	0	0	0	0.00	0.00	0.07

Imagen 53

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	0	0	0.00	100.00	100.00
406	1	3	0	1.90	95.80	100.00
287	7	3	0	4.75	85.29	100.00
203	10	6	4	7.80	68.03	42.90
144	17	12	2	13.88	37.33	16.73
102	8	14	12	11.05	12.89	6.52
72	3	2	13	3.03	6.19	2.54
51	1	3	11	2.45	0.77	0.99
36	0	0	6	0.30	0.11	0.39
25	0	0	1	0.05	0.00	0.15
18	0	0	0	0.00	0.00	0.06
13	0	0	0	0.00	0.00	0.02

Imagen 54

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	1	0	0.48	98.75	100.00
575	0	1	0	0.48	97.49	100.00
406	1	0	1	0.53	96.11	84.73
287	6	3	1	4.33	84.70	53.24
203	10	8	4	8.75	61.61	33.46
144	8	6	5	6.90	43.40	21.02
102	8	10	12	9.15	19.26	13.21
72	3	5	5	4.05	8.58	8.30
51	2	3	6	2.68	1.52	5.22
36	1	0	2	0.58	0.00	3.28
25	0	0	0	0.00	0.00	2.06
18	0	0	0	0.00	0.00	1.29
13	0	0	0	0.00	0.00	0.81

Imagen 55

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	1	0	0.48	98.54	100.00
406	5	0	0	2.38	91.24	83.96
287	10	9	0	9.03	63.52	48.11
203	12	7	1	9.08	35.64	27.56
144	0	11	6	5.53	18.66	15.79
102	4	3	10	3.83	6.91	9.05
72	0	1	5	0.73	4.69	5.18
51	0	1	2	0.58	2.92	2.97
36	1	1	0	0.95	0.00	1.70
25	0	0	0	0.00	0.00	0.98
18	0	0	0	0.00	0.00	0.56
13	0	0	0	0.00	0.00	0.32

Imagen 56

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	1	1	0	0.95	96.69	100.00
575	0	0	0	0.00	96.69	100.00
406	2	4	0	2.85	86.76	74.64
287	7	4	0	5.23	68.55	38.25
203	5	6	5	5.48	49.48	19.60
144	9	4	10	6.68	26.22	10.04
102	3	7	11	5.30	7.75	5.15
72	2	1	6	1.73	1.74	2.64
51	0	0	5	0.25	0.87	1.35
36	0	0	3	0.15	0.35	0.69
25	0	0	2	0.10	0.00	0.35
18	0	0	0	0.00	0.00	0.18
13	0	0	0	0.00	0.00	0.09

Imagen 57

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	1	1	0.53	98.06	100.00
575	0	0	2	0.10	97.69	100.00
406	1	0	0	0.48	95.94	93.78
287	0	3	0	1.43	90.68	60.17
203	7	2	4	4.48	74.17	38.60
144	7	4	5	5.48	53.97	24.77
102	8	4	9	6.15	31.27	15.89
72	6	4	7	5.10	12.45	10.19
51	2	3	1	2.43	3.51	6.54
36	1	0	0	0.48	1.75	4.20
25	0	1	0	0.48	0.00	2.69
18	0	0	0	0.00	0.00	1.73
13	0	0	0	0.00	0.00	1.11

Imagen 58

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	1	1	2	1.05	95.99	100.00
406	0	1	0	0.48	94.18	100.00
287	3	3	1	2.90	83.11	66.05
203	7	4	5	5.48	62.21	37.81
144	6	0	4	3.05	50.57	21.65
102	10	4	8	7.05	23.66	12.40
72	6	4	8	5.15	4.01	7.10
51	1	0	1	0.53	2.00	4.06
36	1	0	1	0.53	0.00	2.33
25	0	0	0	0.00	0.00	1.33
18	0	0	0	0.00	0.00	0.76
13	0	0	0	0.00	0.00	0.44

Imagen 59

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	2	0	0.95	96.57	100.00
575	1	1	0	0.95	93.14	100.00
406	2	3	1	2.43	84.39	87.01
287	2	6	0	3.80	70.67	45.66
203	3	6	4	4.48	54.51	23.97
144	6	4	4	4.95	36.64	12.58
102	4	2	11	3.40	24.37	6.60
72	4	5	9	4.73	7.31	3.46
51	2	1	8	1.83	0.72	1.82
36	0	0	3	0.15	0.18	0.95
25	0	0	1	0.05	0.00	0.50
18	0	0	0	0.00	0.00	0.26
13	0	0	0	0.00	0.00	0.14

Imagen 60

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	1	1	0	0.95	97.51	100.00
406	1	0	0	0.48	96.27	100.00
287	4	4	0	3.80	86.31	76.56
203	7	6	3	6.33	69.74	38.06
144	13	8	8	10.38	42.57	18.92
102	8	2	8	5.15	29.08	9.41
72	9	3	9	6.15	12.97	4.68
51	5	3	3	3.95	2.62	2.33
36	2	0	0	0.95	0.13	1.16
25	0	0	1	0.05	0.00	0.57
18	0	0	0	0.00	0.00	0.29
13	0	0	0	0.00	0.00	0.14

Imagen 61

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	2	0	0.95	97.82	100.00
406	2	1	0	1.43	94.55	100.00
287	4	3	0	3.33	86.93	73.79
203	14	4	5	8.80	66.74	45.40
144	12	4	10	8.10	48.17	27.93
102	14	6	10	10.00	25.23	17.19
72	3	4	7	3.68	16.80	10.57
51	4	4	13	4.45	6.59	6.51
36	0	4	7	2.25	1.43	4.00
25	1	0	3	0.63	0.00	2.46
18	0	0	0	0.00	0.00	1.52
13	0	0	0	0.00	0.00	0.93

Imagen 62

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	3	0	1.43	96.52	100.00
406	2	4	0	2.85	89.55	100.00
287	6	5	0	5.23	76.77	68.39
203	13	1	1	6.70	60.39	33.09
144	13	8	4	10.18	35.51	16.01
102	11	5	5	7.85	16.32	7.75
72	5	1	10	3.35	8.13	3.75
51	2	1	21	2.48	2.08	1.81
36	0	0	12	0.60	0.61	0.88
25	0	0	4	0.20	0.12	0.42
18	0	0	1	0.05	0.00	0.21
13	0	0	0	0.00	0.00	0.10

Imagen 63

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	1	2	0	1.43	94.46	100.00
406	1	5	0	2.85	83.37	99.61
287	8	7	0	7.13	55.64	45.52
203	6	5	5	5.48	34.34	20.80
144	5	3	9	4.25	17.80	9.51
102	1	2	13	2.08	9.73	4.34
72	1	2	6	1.73	3.02	1.99
51	0	1	5	0.73	0.19	0.91
36	0	0	1	0.05	0.00	0.41
25	0	0	0	0.00	0.00	0.19
18	0	0	0	0.00	0.00	0.09
13	0	0	0	0.00	0.00	0.04

Imagen 64

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	1	0	0.48	98.64	100.00
575	3	3	0	2.85	90.45	100.00
406	2	5	0	3.33	80.89	80.13
287	1	10	0	5.23	65.88	41.05
203	16	2	2	8.65	41.02	21.03
144	3	3	9	3.30	31.54	10.77
102	3	6	16	5.08	16.95	5.52
72	6	1	13	3.98	5.53	2.83
51	3	0	5	1.68	0.72	1.45
36	0	0	4	0.20	0.14	0.74
25	0	0	1	0.05	0.00	0.38
18	0	0	0	0.00	0.00	0.19
13	0	0	0	0.00	0.00	0.10

Imagen 65

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x) [%]	G-S Fu(x) [%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	1	0	0.48	98.13	100.00
575	0	1	0	0.48	96.25	100.00
406	5	4	0	4.28	79.39	68.11
287	4	9	0	6.18	55.03	39.44
203	6	1	2	3.43	41.52	22.84
144	5	2	5	3.58	27.42	13.23
102	4	4	17	4.65	9.07	7.66
72	2	0	10	1.45	3.35	4.44
51	0	0	11	0.55	1.18	2.57
36	0	0	6	0.30	0.00	1.49
25	0	0	0	0.00	0.00	0.86
18	0	0	0	0.00	0.00	0.50
13	0	0	0	0.00	0.00	0.29

Imagen 66

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x) [%]	G-S Fu(x) [%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	1	0	0	0.48	98.79	100.00
813	0	2	0	0.95	96.38	100.00
575	2	0	0	0.95	93.96	100.00
406	3	4	0	3.33	85.51	60.08
287	3	7	0	4.75	73.43	32.86
203	10	7	0	8.08	52.89	17.97
144	9	8	5	8.33	31.72	9.83
102	9	8	3	8.23	10.81	5.38
72	1	4	9	2.83	3.62	2.94
51	1	0	9	0.93	1.27	1.61
36	0	0	6	0.30	0.51	0.88
25	0	0	3	0.15	0.13	0.48
18	0	0	1	0.05	0.00	0.26
13	0	0	0	0.00	0.00	0.14

Imagen 67

Tamaño malla [mm]	Frecuencia Imagen 1	Frecuencia Imagen 2	Frecuencia Imagen 3	Frecuencia Combinada	Experimental Fu(x)[%]	G-S Fu(x)[%]
2299	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1626	0	0	0	0.00	100.00	100.00
1149	0	0	0	0.00	100.00	100.00
813	0	0	0	0.00	100.00	100.00
575	0	2	0	0.95	96.85	100.00
406	9	1	0	4.75	81.11	100.00
287	6	6	0	5.70	62.22	50.92
203	7	6	7	6.53	40.60	22.88
144	2	7	6	4.58	25.43	10.28
102	2	8	12	5.35	7.71	4.62
72	0	2	7	1.30	3.40	2.07
51	0	1	7	0.83	0.66	0.93
36	0	0	3	0.15	0.17	0.42
25	0	0	0	0.00	0.17	0.19
18	0	0	1	0.05	0.00	0.08
13	0	0	0	0.00	0.00	0.04