

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



FACTIBILIDAD DEL USO DE EMULSIÓN A GRANEL EN MINERÍA

SUBTERRÁNEA: RESULTADOS DE PRUEBAS EMULTEX PDBG

Tesis para obtener el título profesional de INGENIERO DE MINAS

AUTOR:

Tom Kevin Valdivia Zanabria

ASESOR:

Elmer Alberto Vidal Sánchez

Lima, febrero del 2022

RESUMEN

El presente estudio busca demostrar la factibilidad del uso de emulsión a granel en minería subterránea a través de los beneficios obtenidos mediante el desarrollo de pruebas en la Unidad Minera Dacar, minera polimetálica en etapa de preparación ubicada en el distrito de Huachocolpa en la ciudad de Huancavelica a 4680 m.s.n.m., con el producto Emultex PDBG, emulsión especialmente recomendada para perforaciones horizontales y perforaciones descendentes de hasta 15 metros de profundidad.

Basado en los antecedentes, características, y performance de la emulsión a granel, se obtiene beneficios técnicos, económicos, operativos y en gestión de seguridad que en comparación con el uso de ANFO como columna de carga suman valor a la operación, lo cual será demostrado en la presente investigación.

Con este propósito, se desarrolló las pruebas de carguío con emulsión a granel Emultex PDBG en voladuras de desarrollo horizontal cuyos resultados serán comparados con una línea base levantada en campo, en la cual se utilizaba como columna de carga explosiva al ANFO. Los parámetros que sirvieron para comparar el performance de ambos productos fueron el tiempo de carguío, eficiencia de disparo, factor de carga equivalente en ANFO, sobrerotura, análisis de fragmentación y monitoreo de gases post voladura.

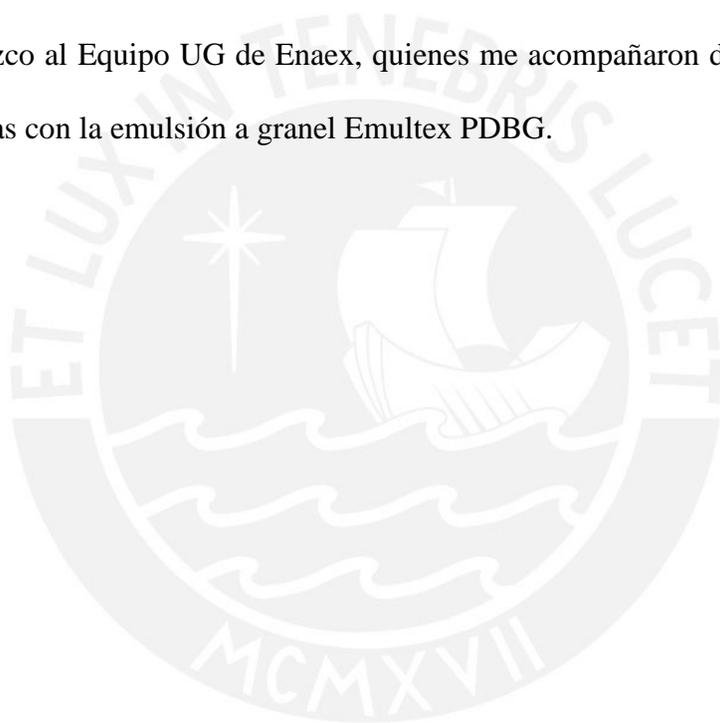
Tras realizar las pruebas con emulsión a granel Emultex PDBG, se hizo el análisis comparativo correspondiente y se demostró la factibilidad del uso de emulsión a granel a través de los beneficios generados en temas económicos, operativos y de seguridad. Tal fue el impacto generado por los beneficios obtenidos que la Unidad Minera Dacar decidió realizar la implementación de carguío con emulsión a granel Emultex PDBG en el 100% de voladuras en desarrollo horizontal.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mi asesor, el ingeniero Elmer Vidal, quien a través de su guía y enseñanza me motivó a desarrollar una investigación que busca ejercer un cambio en la minería subterránea.

Un agradecimiento especial, al ingeniero Giancarlo Rivera, quien me brindo las herramientas técnicas necesarias para poder realizar las pruebas con emulsión a granel Emultex PDBG en campo.

Finalmente, agradezco al Equipo UG de Enaex, quienes me acompañaron durante el proceso de desarrollo de pruebas con la emulsión a granel Emultex PDBG.



DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de realizar esta investigación.

A mi esposa Rosario e hijo Benjamin, quienes son mi principal motivación y por quienes siempre trataré de ser una mejor persona.

A mis padres Carmen y David, quienes con esfuerzo y sacrificio hicieron posible que hoy sea un gran profesional. Gracias por haber confiado.

A mi hermana Pamela, por su perseverancia en los estudios y cariño, lo cual me impulsa a ser perseverante en mis planes y ser un buen hermano mayor.

Finalmente, a mis profesores Juana, Richard, Miguel y Elmer que me han acompañado en mi etapa estudiantil y universitaria, sumando a mi formación tanto profesional como personal.

TABLA DE CONTENIDO

I. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Hipótesis	1
1.3 Objetivos.....	1
1.3.1 Objetivo principal	1
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Plan de Trabajo	2
II. ANTECEDENTES	4
2.1 Caso Sullivan Mine 1984 (Canada):.....	4
2.2 Enaex 1991 (Chile)	5
2.3 ICI Explosives 1994 (Canada)	6
2.4 ICI Explosives 1997 (Hong Kong)	6
2.5 DynoConsult 2001 (Australia).....	7
2.6 DynoConsult 2004 (Canada)	7
2.7 Dyno Nobel 2007 (Asia).....	8
2.8 Austin Powder – University of Leoben 2012 (Austria)	9
2.9 BME 2015 (Sudáfrica).....	10
2.10 AEL Mining Services 2018 (Zimbabwe).....	12
III. MARCO TEÓRICO	15
3.1 Explosivos	15
3.2 Altos explosivos	16
3.2.1 Dinamita	16
3.2.2 Emulsión sensibilizada	17
3.3 Agentes de voladura	19
3.3.1 ANFO	19
3.3.2 Emulsión a granel	22
3.4 Emulsión Emultex PDBG.....	24
3.5 KPI de los explosivos	25
3.6 Equipo UBT-XS	26
3.7 Sistema SCE	27
IV. GENERALIDADES – PRUEBAS DE EMULTEX PDBG	28
4.1 Unidad Minera “Dacar”	28
4.1.1 Alcance del desarrollo de pruebas con Emultex PDBG.....	28
4.1.2 Parámetros de perforación en la U.M. Dacar	28
4.1.3 Explosivos y accesorios de voladura utilizados en la U.M. Dacar	29

V. MÉTODOS DE MEDICIÓN	30
5.1 Tiempo de carguío	30
5.2 Eficiencia del disparo	31
5.3 Factor de carga equivalente en ANFO.....	32
5.4 Sobrerotura	32
5.5 Análisis de fragmentación	33
5.6 Monitoreo de gases	34
VI. RESULTADOS	36
6.1 Línea base ANFO	36
6.1.1 Diseño de malla de voladura con ANFO	37
6.1.2 Tiempo de carguío	38
6.1.3 Eficiencia de avance	39
6.1.4 Factor de carga equivalente ANFO.....	40
6.1.5 Sobrerotura	41
6.1.6 Análisis de fragmentación	42
6.1.7 Monitoreo de gases	42
6.2 Pruebas Emultex PDBG	45
6.2.1 Diseño de malla de voladura con ANFO	47
6.2.2 Tiempo de carguío	48
6.2.3 Eficiencia de avance	48
6.2.4 Factor de carga equivalente ANFO.....	49
6.2.5 Sobrerotura	49
6.2.6 Análisis de fragmentación	50
6.2.7 Monitoreo de gases	50
VII. ANÁLISIS	51
7.1 Indicadores claves de rendimiento pre voladura	51
7.1.1 Total tiempo de carguío en frentes:	51
7.2 Indicadores claves de rendimiento post voladura	52
7.2.1 Eficiencia de disparo.....	52
7.2.2 Factor de carga equivalente	53
7.2.3 Sobrerotura	54
7.2.4 Análisis de fragmentación	55
7.2.5 Monitoreo de gases	55
7.3 Análisis económico.....	58
7.3.1 Costos unitarios de la operación minera	58
7.3.2 Programa mensual de avances	58
7.3.3 Costos operativos.....	60
7.3.4 Ahorros generados	66
VIII. CONCLUSIONES	67

IX. BENEFICIOS ADICIONALES GENERADOS	71
X. RECOMENDACIONES.....	72
XI. BIBLIOGRAFÍA.....	73
XII. ANEXOS	75
ANEXO A	75
ANEXO B	81
ANEXO C	90
ANEXO D	92



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plan de trabajo desarrollado por Enaex y la unidad minera.	2
Figura 2. Diseño de perforación en abanico.	4
Figura 3. Registro de VOD de emulsión a granel.	7
Figura 4. Concentraciones de gas respecto a las voladuras realizadas con ANFO y emulsión a granel Titan 7000.	9
Figura 5. Obtención de medias cañas post voladura.	10
Figura 6. Carguío con el equipo Portable Charging Unit.	10
Figura 7. Comparación teórica de la energía liberada por la emulsión a granel vs emulsión encartuchada en taladros de 36 mm de diámetro.	11
Figura 8. Esquema de carguío de taladros con el Mobile Charging Unit (MCU).	13
Figura 9: Línea de tiempo del uso de la emulsión a granel.	14
Figura 10. Clasificación general de los explosivos industriales.	16
Figura 11. Presentaciones del producto Emulnor.	18
Figura 12. Ingredientes en proporción de peso del ANFO.	19
Figura 13. Energía y Velocidad de Detonación (VOD) vs contenido de combustible en el ANFO.	20
Figura 14. VOD óptimo del ANFO vs diámetro del taladro.	21
Figura 15. Vista microscópica del agente oxidante y la fase combustible de la emulsión.	23
Figura 16. Componentes de la emulsión a granel Emultex PDBG.	24
Figura 17. Carguío con emulsión Emultex PDBG.	24
Figura 18. Equipo UBT-XS.	26
Figura 19: Pantalla del sistema SCE.	27
Figura 20. Presentación del frente de voladura.	31
Figura 21. Fórmula para el cálculo del tiempo de carguío.	31
Figura 22. Fórmula para el cálculo de la eficiencia del disparo.	31
Figura 23. Fórmula de cálculo del factor de carga equivalente en ANFO.	32
Figura 24. Fórmula de cálculo de la sobrerotura obtenida en el frente de voladura.	33
Figura 25. Ejemplo de análisis de fragmentación obtenido con el software Split Demo.	34
Figura 26. Malla de perforación para secciones de 3.0 m x 3.5 m.	37
Figura 27. Malla de perforación para secciones de 4.5 m x 4.3 m.	37
Figura 28. Tiempo de carguío promedio por tipo de sección.	38
Figura 29. Longitud de perforación vs avance de las voladuras realizadas con ANFO.	39
Figura 30. Eficiencia de avance obtenido en las voladuras realizadas con ANFO.	40
Figura 31. Factor de carga lineal de las voladuras realizadas con ANFO por cada tipo de sección.	40
Figura 32. Sobrerotura promedio obtenida por tipo de sección con el uso de ANFO.	41
Figura 33. Resultados de monitoreo del gas CO.	43
Figura 34. Resultados de monitoreo del gas NO ₂	43
Figura 35. Resultados de monitoreo del gas O ₂	44
Figura 36. Resultados de monitoreo del gas CO ₂	44
Figura 37. Malla de perforación para secciones de 3.0 m x 3.5 m con Emultex PDBG.	47
Figura 38. Malla de perforación para secciones de 4.5 m x 4.3 m con Emultex PDBG.	47
Figura 39. Tiempo de carguío con el uso de Emultex PDBG por tipo de sección.	48
Figura 40. Eficiencia de disparo obtenida con el uso de Emultex PDBG por tipo de sección.	48
Figura 41. Factor de carga equivalente de las voladuras realizadas con Emultex PDBG por tipo de sección.	49
Figura 42. Sobrerotura obtenida con el uso de Emultex PDBG por tipo de sección.	49
Figura 43. Comparativo de tiempos de carguío por tipo de sección.	51
Figura 44. Comparativo de eficiencia de disparo según tipo de sección.	52
Figura 45. Comparativo de factor de carga equivalente por tipo de sección.	53
Figura 46. Comparativo de sobrerotura obtenida por tipo de sección.	54
Figura 47. Evidencia de medias cañas post voladura.	54
Figura 48. Comparativo de resultados de fragmentación.	55
Figura 49. Comparativo de concentración de gas post voladura CO.	56
Figura 50. Comparativo de concentración de gas post voladura NO ₂	56

Figura 51. Comparativo de concentración de gas post voladura O ₂	57
Figura 52. Comparativo de concentración de gas post voladura CO ₂	57
Figura 53. Representación gráfica de ahorros generados por el uso de Emultex PDBG.	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ahorros generados por el uso de emulsión a granel.	5
Tabla 2. Parámetros de perforación en la U.M. Dacar.....	29
Tabla 3. Explosivos y accesorios de voladura utilizados en la U.M. Dacar.	29
Tabla 4. Límites Máximos Permisibles de los gases CO, NO ₂ , O ₂ y CO ₂ según la normativa peruana.	35
Tabla 5. Proporción de voladuras de línea base realizadas con ANFO.	36
Tabla 6. Voladuras realizadas con el uso de ANFO.	36
Tabla 7. Datos generales de voladuras realizadas con ANFO.....	38
Tabla 8. Eficiencia de avance de voladuras realizadas con ANFO.....	39
Tabla 9. Sobrerotura obtenida en las voladuras realizadas con ANFO.....	41
Tabla 10. Fragmentación obtenida de las voladuras realizadas con ANFO.....	42
Tabla 11. Monitoreo de gases de la RP_9662.....	42
Tabla 12. Voladuras primarias realizadas con Emultex PDBG.	45
Tabla 13. Voladuras de desquinche realizadas con Emultex PDBG.	46
Tabla 14. Fragmentación obtenida con el uso de Emultex PDBG.....	50
Tabla 15. Resultados de monitoreo de gases post voladura Emultex PDBG.	50
Tabla 16. Costos aceros, personal y equipos en la U.M. Dacar.	58
Tabla 17. Cumplimiento de avances para sección de 3.0 m x 3.5 m.	59
Tabla 18. Cumplimiento de avances para sección de 4.5 m x 4.3 m.	59
Tabla 19. Costo de perforación para secciones de 3.0 m x 3.5 m.	60
Tabla 20. Costo de perforación para secciones de 4.5 m x 4.3 m.	61
Tabla 21. Costo de explosivos y accesorios para secciones de 3.0 m x 3.5 m.	61
Tabla 22. Costo de explosivos y accesorios para secciones de 4.5 m x 4.3 m.	62
Tabla 23. Costo de extracción de material adicional para secciones de 3.0 m x 3.5 m.	63
Tabla 24. Costo de extracción de material adicional para secciones de 4.5 m x 4.3 m.	63
Tabla 25. Costo de transporte de material adicional para secciones de 3.0 m x 3.5 m.	64
Tabla 26. Costo de transporte de material adicional para secciones de 4.5 m x 4.3 m.	64
Tabla 27. Costo total de carguío por cada tipo de explosivo.	65
Tabla 28. Ahorros mensuales generados por el uso de Emultex PDBG.	66

I. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

Hoy en día, las operaciones de minería subterránea utilizan como columna de carga explosiva en el desarrollo de voladuras en taladros horizontales tanto altos explosivos como agentes de voladura, dependiendo de las condiciones que presente el macizo rocoso y la presencia de agua en el terreno.

Asimismo, la aplicación de emulsión a granel ha ido evolucionando y obteniendo una mayor aplicación en las principales regiones mineras del mundo debido a los beneficios operativos que este producto ofrece en comparación con los productos encartuchados y el ANFO.

Es por ello, que en la búsqueda de la adición de valor agregado a la operación, Enaex desarrolló la emulsión a granel Emultex PDBG, la cual busca generar una optimización de costos a través de su aplicación en minería subterránea, por lo cual se llevó a cabo pruebas con este producto en la Unidad Minera Dacar, mediante las cuales se demostró su factibilidad, la cual será sustentada en la presente investigación.

1.2 Hipótesis

Se plantea que el uso de emulsión a granel en minería subterránea es factible, ya que ofrece beneficios técnicos, económicos, operativos y en la mejora de gestión de seguridad que en comparación con el uso del ANFO brinda un mayor valor agregado a la operación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo principal

Demostrar la factibilidad del uso de emulsión a granel en minería subterránea a través de los beneficios técnicos, operativos, económicos y en gestión de seguridad que brinda su aplicación en

comparación con el uso de uno de los explosivos convencionalmente usados en minería subterránea (ANFO) mediante los resultados de pruebas con emulsión Emultex PDBG.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar la factibilidad del uso de emulsión a granel como columna de carga en frentes de desarrollo
- Demostrar los beneficios técnicos, económicos y operativos de la emulsión a granel en comparación con el uso del ANFO
- Demostrar los beneficios de gestión de seguridad que se alcanzan a través del uso de emulsión a granel

1.4 Plan de Trabajo

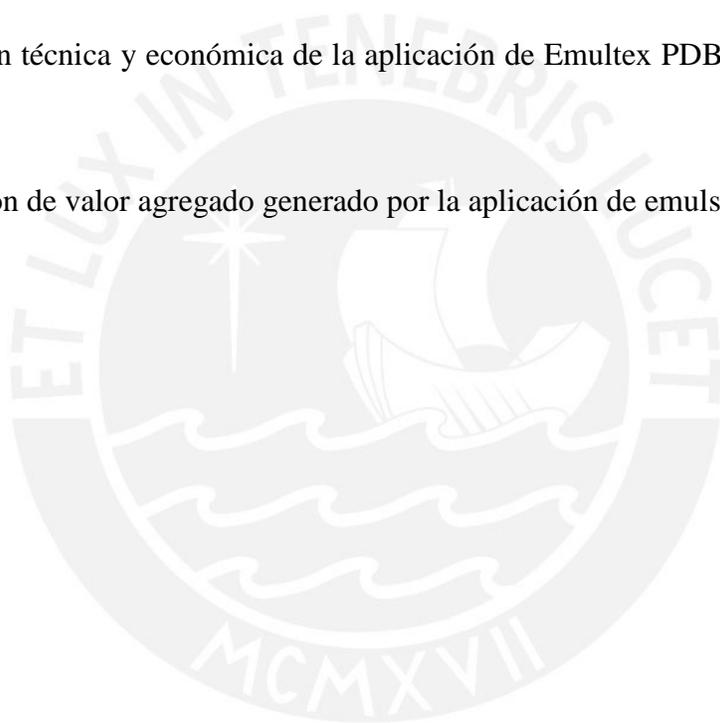
El plan de trabajo aplicado durante el desarrollo de pruebas con la emulsión a granel Emultex PDBG, el cual fue acordado entre Enaex y la unidad minera en la cual se desarrollaron las pruebas fue el siguiente:



Figura 1. Plan de trabajo desarrollado por Enaex y la unidad minera.

Tomando en cuenta el desarrollo de las pruebas de emulsión a granel Emultex PDBG y la metodología aplicada en estas, con el fin de desarrollar los objetivos planteados en la presente investigación, se tendrá en cuenta el siguiente plan de trabajo:

1. Revisión de antecedentes de aplicación de emulsión a granel
2. Realización de pruebas con Emultex PDBG en la Unidad Minera Dacar
3. Análisis de resultados de pruebas con Emultex PDBG
4. Comparación técnica y económica de la aplicación de Emultex PDBG respecto al uso de ANFO
5. Demostración de valor agregado generado por la aplicación de emulsión a granel Emultex PDBG



II. ANTECEDENTES

La emulsión a granel es un explosivo que ha ido evolucionando a lo largo de sus años de aplicación en diferentes unidades mineras subterráneas alrededor del mundo, esto debido a sus beneficios que agregan valor a la operación minera. Para el desarrollo de la presente investigación se ha revisado destacadas aplicaciones de la emulsión a granel en minería subterránea mediante las cuales se puede apreciar los beneficios que este producto brinda como valor agregado a la operación minera:

2.1 Caso Sullivan Mine 1984 (Canada):

En este caso se utilizó la emulsión a granel para voladuras de pilares de dimensiones de 36x15x21m, en los cuales se realizó una perforación en abanico con ángulos contenidos entre 50° y 90°. Las condiciones del terreno no permitían realizar la voladura con ANFO, ya que la mayoría de los taladros tenían presencia de agua; por lo cual se decidió realizar dichas voladuras con emulsión a granel debido a su característica de buena resistencia al agua en comparación con el ANFO, logrando obtener resultados de voladura óptimos y una baja emisión de gases post voladuras.

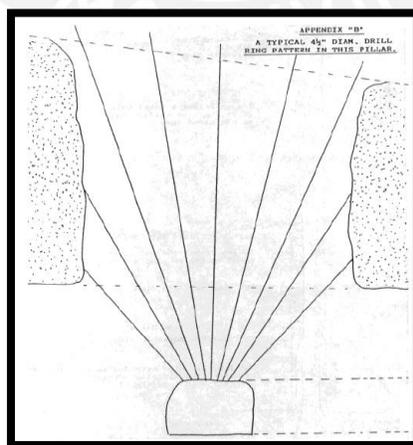


Figura 2. Diseño de perforación en abanico.

Tomado de “*Underground Pillar Blasting with Bulk Emulsion explosives*”, por H. Russell, 1984.

2.2 Enaex 1991 (Chile)

En este caso Enaex desarrolló pruebas de una emulsión a granel con un equipo de carguío mecanizado en 2 minas subterráneas chilenas, en las cuales comparó la aplicación de dicha emulsión con el uso del ANFO en voladuras de frentes de desarrollo, de dicha comparación se resaltó que las voladuras realizadas con emulsión a granel dieron excelentes resultados, ya que el producto demostró tener una excelente resistencia al agua, altos valores de VOD que se tradujeron en la obtención de una buena fragmentación y la expansión de la malla de perforación. Asimismo, se obtuvo ahorros generados por el uso de la emulsión a granel, se puede apreciar dicho ahorro en una de las minas chilenas en la Tabla 1.

Tabla 1. Ahorros generados por el uso de emulsión a granel.

TABLE 1.-	MINE: A : MANTOS BLANCOS S.A.			
	TUNNELING BLASTS		CUT AND FILL STOPING BLASTS	
	WITH ANFO	WITH EMULSION	WITH ANFO	WITH EMULSION
BLAST HOLE DIAMETER (MM)	51		51	
CROSS SECTION DIMENSIONS (M)	6,0 x 3,8		10 x 6,5	
HOLE DEPTH (M)	3,2		4,5	
TOTAL NUMBER OF HOLES	50	41	27	23
TOTAL DRILLED METERS (M)	160	131,2	121,5	103,5
TOTAL EXPLOSIVE CONSUMPTION (KG.)	125,3	145,0	108,5	87,8
POWDER FACTOR (GRAMS/TON)	709,5	821	185	150
SPECIFIC CHARGE (KG/M ³)	1,85	2,13	0,48	0,39
TOTAL COST OF DRILLING AND BLASTING PER BLAST (US\$)	446,6	401,8	364,5	341,7
PERCENTAGE OF SAVINGS (DRILLING AND BLASTING) %	---	10,0	---	6,3

Tomado de "Case Study – Pumpable Emulsion Trials in Tunneling and Stopping", por Eduardo Berger, 1991.

2.3 ICI Explosives 1994 (Canada)

En este caso se utilizó la emulsión a granel como columna de carga para voladuras en taladros largos con longitudes de hasta 24 metros, logrando demostrar la generación de valor en la realización de voladuras de taladros largos con el uso de emulsión a granel en carguíos descendentes y ascendentes en taladros de diámetros de 54 mm, 76 mm y 89 mm. La aplicación de dicho producto generó beneficios a través de la reducción de tiempos de carguío en comparación con el uso del ANFO y productos encartuchados, además de la eliminación de desperdicios generados por el uso de explosivos, ya que la emulsión es transportada en todo momento mediante bines y los equipos mecanizados de carguío.

2.4 ICI Explosives 1997 (Hong Kong)

En este caso, la emulsión a granel fue utilizada en proyectos de tunelería en la ciudad de Hong Kong, ciudad en la cual el transporte y almacenamiento de los explosivos encartuchados es controlado por la entidad gubernamental llamada Departamento de Minas, por lo cual todo explosivo encartuchado debe ser almacenado obligatoriamente en la isla Stonecutters en donde la tarifa se encontraba en el año 1997 a 54USD por cada 100 kilogramos; asimismo, todo explosivo que se retiraba de dichos almacenes no podía retornar al mismo.

Gracias a la aplicación de emulsión a granel en estas obras de tunelería es que en este caso se logró obtener ahorros considerables para el transporte y almacenamiento de dicha emulsión, ya que esta es considerada como un agente oxidante no explosivo; asimismo, el valor agregado que dicho producto le brinda a sus operaciones se traduce en la mejora de fragmentación de roca debido al 100% de acoplamiento entre el taladro y la emulsión a granel, la disponibilidad de densidades variables de la emulsión para distintos tipos de roca, buena resistencia al agua, altos ratios de avance por encima del 95% y la reducción de tiempos de carguío debido al uso de equipos

mecanizados para la realización de carguío de los frentes de voladura.

2.5 DynoConsult 2001 (Australia)

En este caso, la aplicación de emulsión a granel es parte de un estudio de modelamiento de mediciones de voladuras dinámicas con la finalidad de explorar la relación existente entre el tipo de roca, las propiedades del explosivo y la eficiencia del proceso de minado, por lo cual la elección de un explosivo a granel es parte importante del proceso. Este modelamiento toma en cuenta parámetros técnicos de la emulsión a granel como sus altos valores de VOD, resistencia al agua, variación de densidad, fragmentación producida y sus beneficios generados como expansión de mallas de perforación y beneficios generados aguas abajo en planta (*Mine to Mill*).

2.6 DynoConsult 2004 (Canada)

En este caso la aplicación de emulsión a granel fue desarrollada a través de un nuevo equipo de carguío mecanizado para minería subterránea, con el cual se realizó carguíos con emulsión a granel en una voladura de banco bajo condiciones de terreno complejas. Durante esta aplicación se utilizó un total de 9 toneladas de emulsión a granel a través de la cual se obtuvo beneficios como control de vibraciones, control de sobrerotura, menores tiempos de carguío y buena fragmentación.

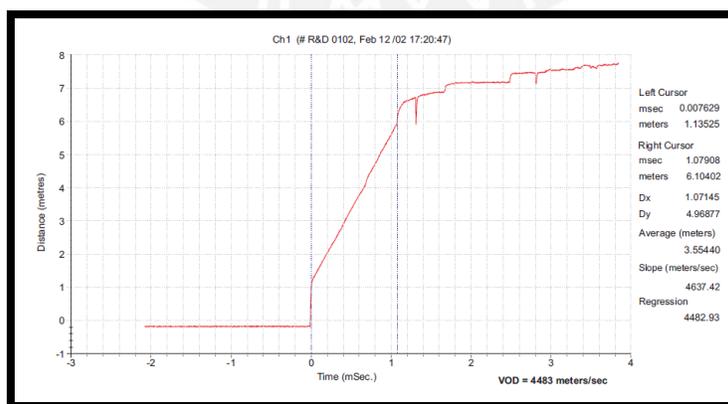


Figura 3. Registro de VOD de emulsión a granel.

Tomado de “*DynoMiner APS Underground Explosive Loading System*”, por D. Roy, 2004.

2.7 Dyno Nobel 2007 (Asia)

En este caso se analizó los beneficios que genera el uso de emulsión a granel en comparación con el ANFO, derivados del ANFO y productos encartuchados. Los beneficios resaltados fueron:

- Resistencia al agua debido a su composición de agua en aceite de la emulsión a granel
- 100% de acoplamiento de la emulsión a granel en los taladros debido a su comportamiento de fluido
- Proceso de carguío String para taladros de contorno, este tipo de carguío permite que se obtenga un cuidado de la sobrerotura generada
- Ratios de avance mayores al 93%
- Reducción de gases post voladura, haciendo posible la reducción de tiempo de reingreso a la operación
- Altos niveles de VOD, lo cual se traduce en una mejora en la fragmentación obtenida del material post voladura
- Optimización de la cara del frente post voladura
- Menores tiempos de carguío
- Transporte, almacenamiento y carguío más seguro
- Expansión de mallas de perforación

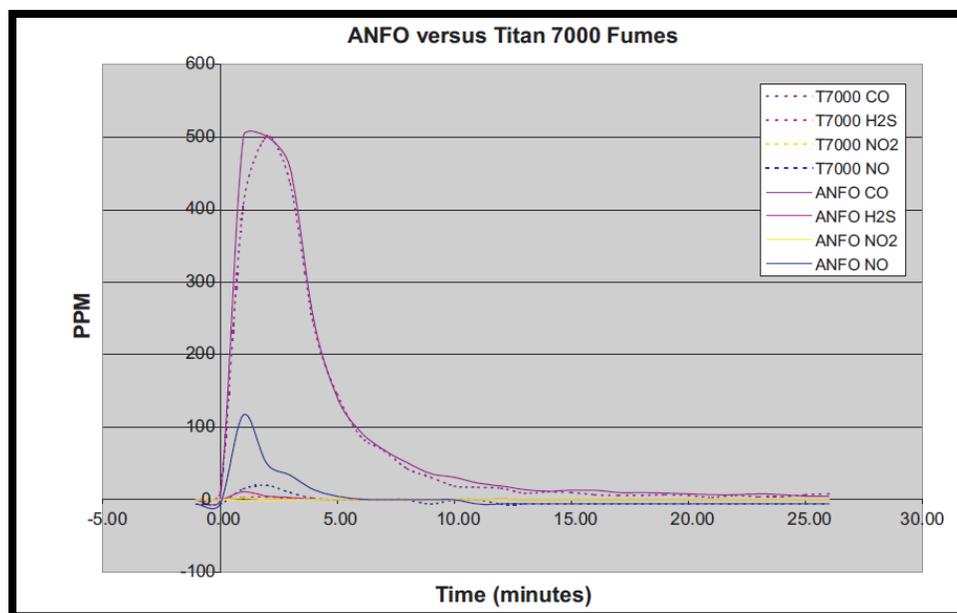


Figura 4. Concentraciones de gas respecto a las voladuras realizadas con ANFO y emulsión a granel Titan 7000.

Tomado de “*The Benefits of Bulk Emulsion Explosives in Underground Development Mining*”, por S. Parsons and N Bennett, 2007.

2.8 Austin Powder – University of Leoben 2012 (Austria)

En este caso, la emulsión a granel fue utilizada como aplicación de voladura controlada mediante una técnica de carguío que genera un desacoplamiento de la columna de carga para un mejor control del contorno en la sección del frente de voladura. Esta aplicación brindó beneficios a la operación en la obtención de contornos más estables y generación de ahorros debido al menor daño ocasionado al contorno.

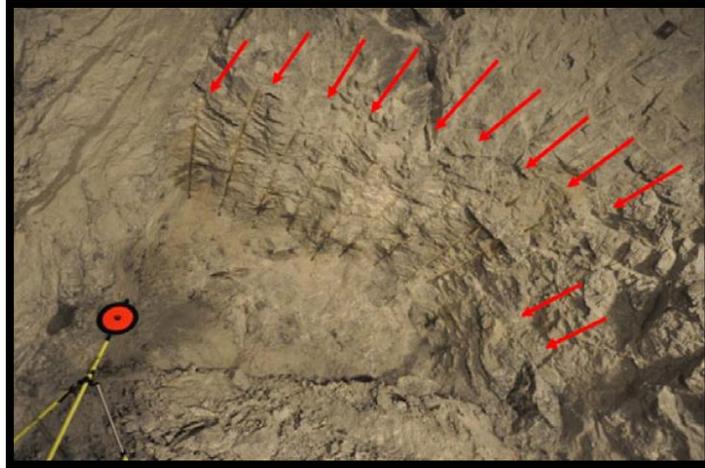


Figura 5. Obtención de medias cañas post voladura.

Tomado de “*Development of a New Contour Blasting System using Bulk Emulsions*”, por Radoslava Ivanova, 2012.

2.9 BME 2015 (Sudáfrica)

En este caso, la aplicación de emulsión a granel es en voladuras de vetas angostas en una mina aurífera de Sudáfrica; esta aplicación se realizó a través de equipos denominados *Portable Charging Unit* (PCU), los cuales son equipos que fueron diseñados por la empresa BME para su aplicación en entornos de secciones pequeñas como se observa en la Figura 6.



Figura 6. Carguío con el equipo Portable Charging Unit.

Tomado de “*The Application of Pumpable Emulsions in Narrow Reef Stopping*”, por Selwyn Pearton, 2015.

Gracias a este equipo que se adapta a la necesidad del entorno en voladuras de vetas angostas es que se puede utilizar los beneficios técnicos y de seguridad que ofrece la emulsión a granel.

De acuerdo al estudio realizado en este caso se resaltó que existen tres factores muy importantes en la operación diaria y estos son el avance por disparo alcanzado, la fragmentación del mineral obtenida y la sobrerotura generada en cada voladura; por lo cual se concluye que la emulsión a granel es una de las mejores soluciones como explosivo para el control de estos tres factores indicados, gracias a sus características propias:

- 100 % de acoplamiento, lo cual permite que la energía liberada por la emulsión a granel sea absorbida en una mayor proporción por el macizo rocoso y por lo cual su utilización es óptima en comparación con explosivos encartuchados, dicho comparativo se puede apreciar en la Figura 7.

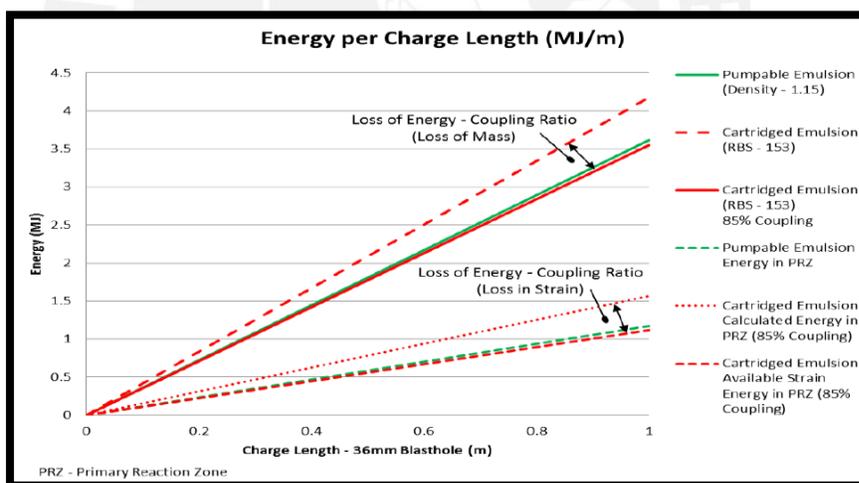


Figura 7. Comparación teórica de la energía liberada por la emulsión a granel vs emulsión encartuchada en taladros de 36 mm de diámetro.

Tomado de “*The Application of Pumpable Emulsions in Narrow Reef Stoping*”, por Selwyn Pearton, 2015.

- Altos valores de VOD, los cuales influyen directamente en el poder rompedor del explosivo, es decir, el daño que este le ocasiona al macizo rocoso.
- El beneficio de las dos características anteriormente mencionadas (VOD y 100% de

acoplamiento) tiene una incidencia directa en la fragmentación de la roca, considerando también las propiedades geológicas de la roca y el uso de una malla de perforación apropiada según el tipo de voladura que se realice. Gracias a esto es que se pudo optimizar la obtención de una fragmentación correcta que no genere sobrecostos por la obtención de un material muy fino o muy grueso.

Asimismo, el uso de emulsión a granel brinda beneficios a la operación en temas de seguridad debido a su clasificación de agente oxidante (UN Class 5.1), lo cual mejora la gestión de seguridad de este producto durante su transporte y almacenamiento. Además, gracias a su insensibilidad en comparación con los productos encartuchados pre-sensibilizados, es que el robo de estos no presenta una amenaza ante atentados en contra de cajeros automáticos, ya que se necesita un equipo especializado para su fabricación.

2.10 AEL Mining Services 2018 (Zimbabwe)

En este caso, el uso de emulsión a granel fue aplicado en minas cuyo método de minado es Cámaras y Pilares, las cuales extraen platino del “Great Dyke” en Zimbabwe, dicha aplicación consistía en la realización de voladuras de control de contorno mediante el uso de tubos de polietileno especialmente diseñados para esta aplicación. El carguío de esta emulsión se llevaba a cabo por equipos móviles de carguío denominados MCU (*Mobile Charging Unit*) y los tubos utilizados eran de un radio interno de 33 mm y radio externo de 34 mm mientras que el diámetro de taladro era de 45 mm, por lo cual existía un desacoplamiento entre el taladro y el tubo de polietileno para los taladros de contorno.

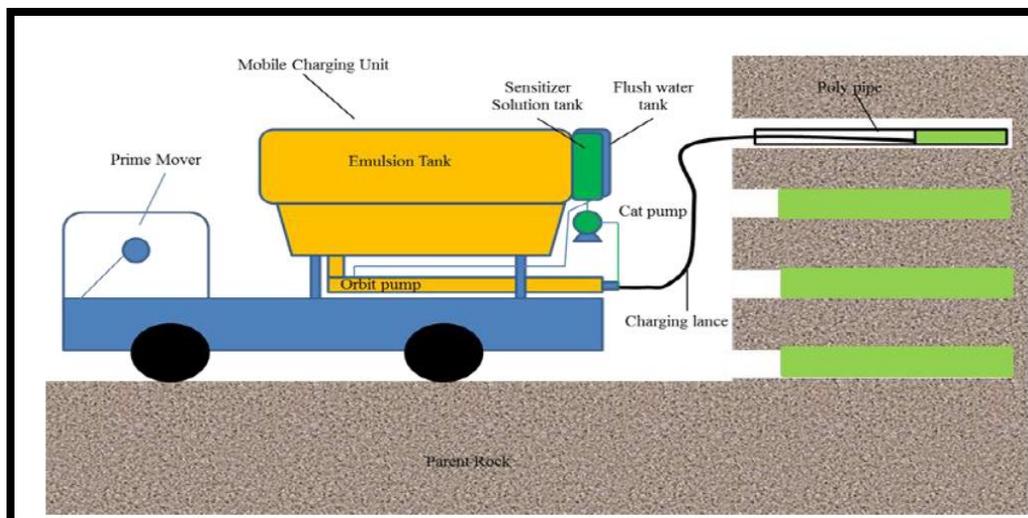


Figura 8. Esquema de carguío de taladros con el Mobile Charging Unit (MCU).

Tomado de “*Application of Underground Bulk Explosives in Polyethylene Pipes for Perimeter Control*”, por

Moshen Jena, 2018

Dicha aplicación tuvo resultados muy exitosos, de los cuales se resaltan los siguientes:

- Se obtuvo un factor de Half Cast Factor (factor de medias cañas obtenidas post voladura) de 54 %, lo cual es un indicio clave que demuestra el éxito de la realización de voladuras controladas con el uso de emulsión a granel en tubos de polietileno
- La sobrerotura generada por el uso de emulsión a granel en tubos de polietileno fue de 1.18 cm.
- Se obtuvo una fragmentación (P97) de 400 mm cuando el objetivo trazado era obtener una fragmentación (P95) de 400 mm.
- Se obtuvo una reducción de costos de explosivos por tonelada en un 11%, lo cual se traducía en un ahorro anual aproximado de 1 millón de dólares.

Es así que este estudio concluyó que la aplicación de la emulsión a granel mediante tubos de polietileno, los cuales generaban un desacoplamiento de la columna de carga explosiva hicieron factible el desarrollo de voladuras de contorno en las minas de platino en Zimbabwe.

Tomando en cuenta todos los casos anteriormente mencionados se presenta en la Figura 9 un resumen de estos a través de una línea de tiempo, en la cual se aprecia la evolución acerca del uso de emulsión a granel en minería subterránea y los beneficios que su aplicación sumó a cada operación.

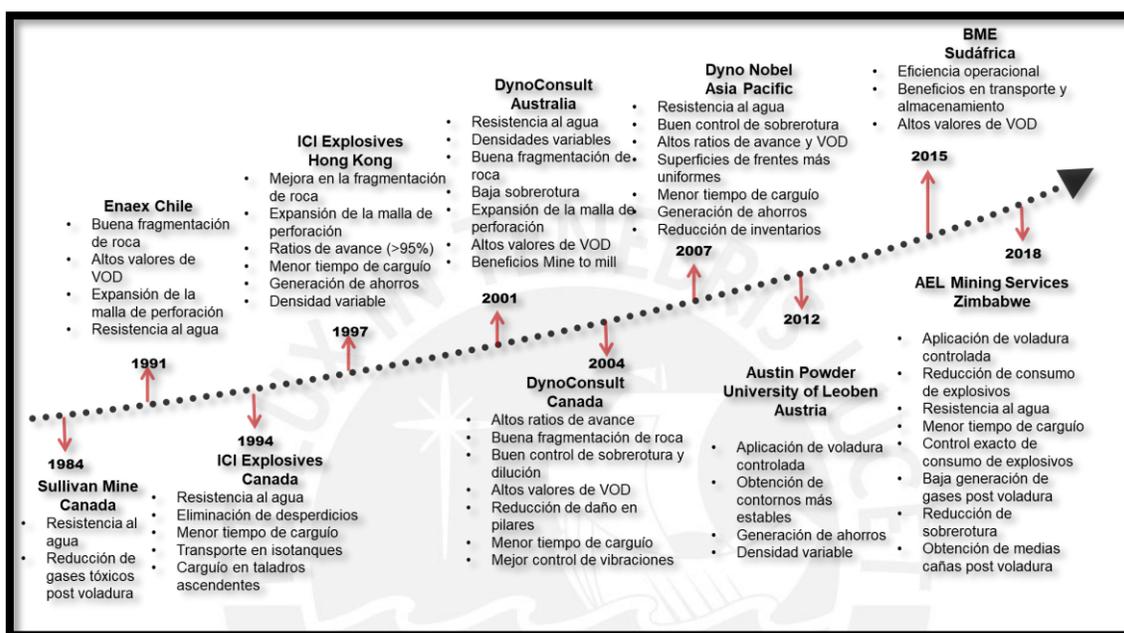


Figura 9: Línea de tiempo del uso de la emulsión a granel.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Explosivos

Un explosivo es aquella mezcla o compuesto químico, cuya función principal es realizar una explosión, la cual se cataloga como una reacción exotérmica, ya que en un instante de tiempo libera toda la energía contenida en forma de gases, sonido, calor, etc. Parte de esta energía liberada es utilizada para la fragmentación de rocas en el rubro minero, convirtiéndose de esta forma en la opción más viable para llevar a cabo la extracción de minerales contenidos en formaciones rocosas en las diferentes unidades mineras alrededor del mundo mediante el proceso denominado Voladura.

Para la realización del proceso de voladura en minería, es importante seleccionar de la forma más óptima y conveniente el tipo de explosivo con el cual se llevará a cabo dicho proceso, por lo cual es importante conocer las características y propiedades de cada explosivo antes de ser utilizado. Una sola propiedad o característica del explosivo no garantizará el correcto desarrollo de una voladura en un determinado escenario, por lo cual todas sus propiedades deben tomarse en cuenta.

Para el desarrollo de esta investigación, con el fin de realizar un análisis a profundidad de los beneficios obtenidos por la emulsión a granel se presenta en la Figura 10 la clasificación de explosivos de uso industrial, los cuales son utilizados en minería subterránea.



Figura 10. Clasificación general de los explosivos industriales.

Tomado de “Manual Práctico de Voladura”, por EXSA, 2019.

Debido al desarrollo de la investigación, se procederá a brindar mayor detalle de los explosivos como el ANFO, Dinamita y Emulsión encartuchada conocidos como explosivos convencionales y de la Emulsión a granel, la cual es compuesta en más de 90% de proporción por emulsión a granel no sensibilizada.

3.2 Altos explosivos

3.2.1 Dinamita

Explosivo encartuchado usado convencionalmente en minería y cuyo carguío es realizado de forma manual. La primera dinamita fue resultado de que Alfred Nobel descubrió que altas cantidades de nitroglicerina pueden ser absorbidas por kieselguhr (diatomita) haciendo más seguro su transporte y uso. En 1869 Nobel presentó su primera presentación de la dinamita, la cual sería usada principalmente como explosivo comercial hasta el día de hoy (ISSE Blaster’s Handbook 18va edición, 2011, p.231).

En la actualidad, el consumo de dinamita en minería subterránea es algo que se está tratando de reemplazar con otros productos explosivos, esto debido a los componentes que la conforman, de los cuales el más peligrosos es la nitroglicerina; asimismo, el precio de la dinamita en el mercado es muy alto a comparación de otros productos explosivos.

La energía varía según el grado o tipo de dinamita, pero generalmente tienden a generar un alto brillo durante su explosión. La energía o denominación variará según la empresa que lo fabrique. Dentro de las propiedades físicas de la dinamita, las más importantes son su densidad y resistencia al agua, las cuales varían respecto al grado o denominación de la dinamita. Cuatro importantes características de la dinamita son la energía, VOD, sensibilidad y clase de humos. La selección de una dinamita para una aplicación específica requiere saber el tipo de roca y entorno presente en el que estas se desarrollarán, con dicha información se podrá escoger un grado correcto de dinamita y asimismo su tipo de empaquetadura

3.2.2 Emulsión sensibilizada

Explosivo encartuchado formado por la emulsión ya sensibilizada con micro esferas huecas en su composición; en la actualidad son de gran uso en la minería subterránea debido a su gran resistencia al agua; asimismo, sus presentaciones son variadas respecto a sus propiedades físicas (diámetros y densidades) y de performance (VOD y energía), lo cual permite que se utilicen según el escenario que se presenta en la operación (tipo de roca). Un ejemplo de estas presentaciones de la emulsión se aprecia en la Figura 11.

		EMULNOR® 500	EMULNOR® 1000	EMULNOR® 3000	EMULNOR® 5000
DENSIDAD RELATIVA (g/cm ³)		0,90	1,13	1,14	1,16
VELOCIDAD DE DETONACIÓN (m/s)	CONFINADO *	4 400	5 800	5 700	5 500
	S/CONFINAR **	3 500	4 500	4 400	4 200
PRESIÓN DE DETONACIÓN (kbar)		44	95	93	88
ENERGÍA (kcal/kg)		628	785	920	1010
VOLUMEN NORMAL DE GASES (L/kg)		952	920	880	870
POTENCIA RELATIVA EN PESO *** (%)		63	85	100	105
POTENCIA RELATIVA EN VOLUMEN *** (%)		75	120	145	155
SENSIBILIDAD AL FULMINANTE		N° 8	N° 8	N° 8	N° 8
RESISTENCIA AL AGUA		Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
CATEGORÍA DE HUMOS		Primera	Primera	Primera	Primera

Figura 11. Presentaciones del producto Emulnor.

Tomado de Famesa Explosivos, <http://www.famesa.com.pe/en/products/high-explosives/emulnor/>.

La energía varía según el grado o tipo de emulsión encartuchada. Dentro de las propiedades físicas de la emulsión, las más importantes son su densidad y resistencia al agua, las cuales varían respecto al grado o denominación de la emulsión. Cuatro importantes características de la emulsión son la energía, VOD, sensibilidad y clase de humos; siendo las primeras dos muy altas en comparación con el ANFO.

3.3 Agentes de voladura

3.3.1 ANFO

El ANFO y sus subproductos son los materiales explosivos más utilizados desde su introducción al mercado en 1950 (ISSE Blaster's Handbook 18va edición, 2011, p.231). Su principal beneficio está relacionado a su precio y su conveniencia de uso. Las dos mayores limitaciones de este producto son la nula resistencia al agua y la baja densidad que posee. El ANFO es una mezcla de prills de nitrato de amonio y combustible (generalmente usado diesel) estos son mezclados teniendo en cuenta un ratio de peso de 94:6 como se observa en la Figura 12.

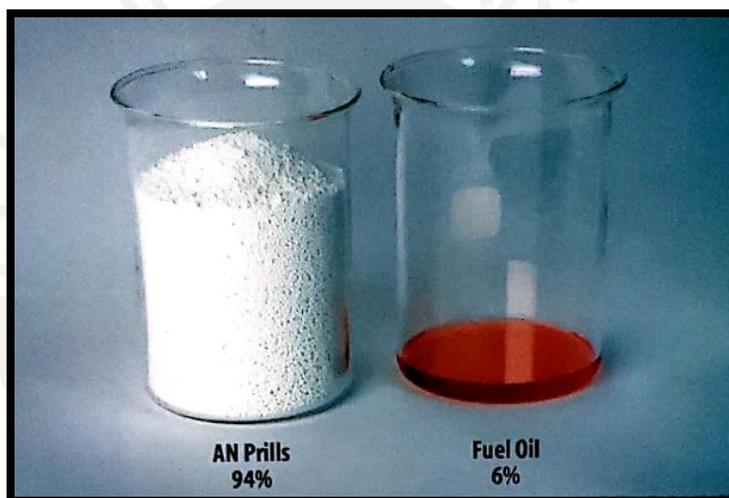


Figura 12. Ingredientes en proporción de peso del ANFO.

Tomado de "ISEE Blaster Handbook 18va edición", por International Society of Explosives Engineers, 2011.

La cantidad de combustible en su preparación es de gran importancia, ya que afecta a sus características de performance: energía, velocidad de detonación (VOD), sensibilidad y producción de gases. El ANFO en ciertas oportunidades es modificado para obtener subproductos que cuentan con otras características de energía y densidad, esto es logrado mediante la adición de sustancias como partículas de aluminio y materiales de carbón en conjunto, o mediante el empaquetamiento del ANFO para ser resistente al agua.

La energía producida por el ANFO es convertida en su totalidad en gases y agua sin la producción de ningún residuo sólido. Asimismo, la máxima energía teórica y velocidad de detonación son alcanzadas cuando existe una correcta proporción de insumos en su mezcla. Si el contenido de combustible excede el 6% en peso de la mezcla, el proceso producirá monóxidos de carbono (CO); si por el contrario su contenido está por debajo del 6% se producirán óxidos de nitrógeno (NOx), conocidos como gases nitrosos. En la Figura 13 se puede apreciar cómo es que la variación de combustible dentro de su composición puede afectar su producción de energía y su velocidad de detonación.

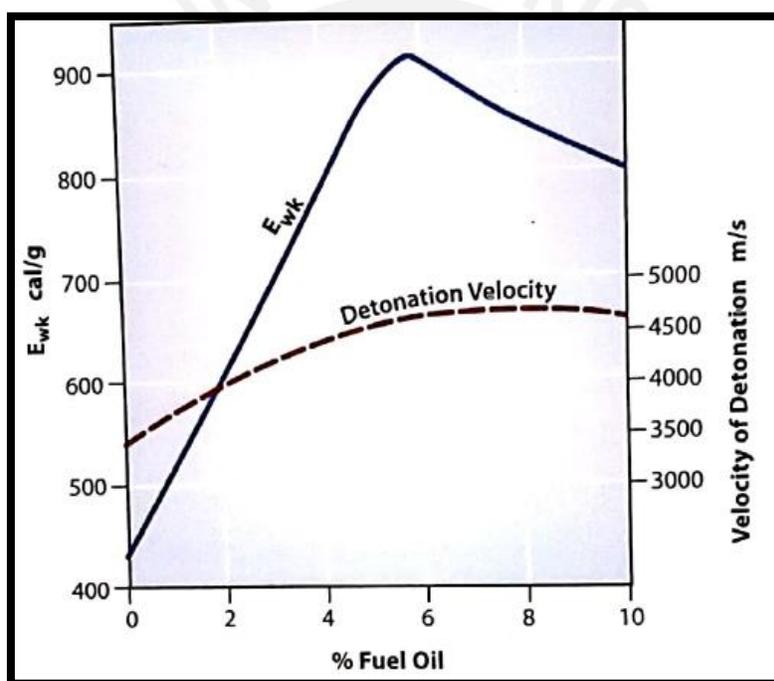


Figura 13. Energía y Velocidad de Detonación (VOD) vs contenido de combustible en el ANFO.

Tomado de "ISEE Blaster Handbook 18va edición", por International Society of Explosives Engineers, 2011.

En base al tipo de roca y las condiciones que pueden presentarse en el frente de carguío, el uso del ANFO puede ser afectado durante su carguío y performance de voladura, dentro de las condiciones más importantes para su correcto uso está la presencia de agua estática y dinámica en la operación, así como también la densidad de la roca.

La densidad del ANFO comúnmente se encuentra entre 0.77 Kg/L y a.90 Kg/L (ISSE Blaster's Handbook 18va edición, 2011, p.224); sin embargo, durante el proceso de carguío, el ANFO eleva su densidad dentro del taladro debido al confinamiento que se produce por el desarrollo de carguío neumático que comúnmente es usado en minería subterránea con el fin de darle agilidad a la operación de carguío. Es por ello que es importante conocer a que densidad el ANFO empieza a insensibilizarse, dicha densidad es 1.2 gr/cc (ISSE Blaster's Handbook 18va edición, 2011, p.225).

Un parámetro importante que afecta directamente el performance de las voladuras con ANFO es el diámetro del taladro, ya que mientras mayor sea el diámetro la velocidad de detonación también incrementará, dicha relación se puede apreciar en la Figura 14.

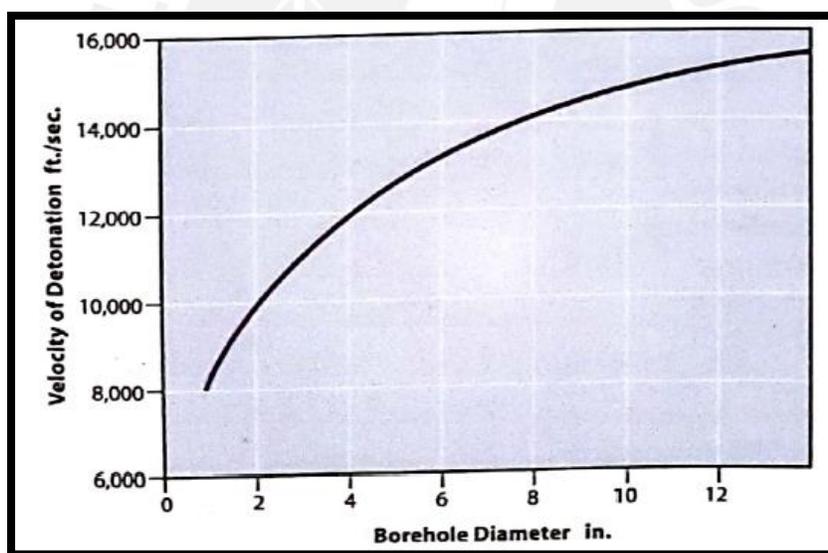


Figura 14. VOD óptimo del ANFO vs diámetro del taladro.

Tomado de "ISSE Blaster Handbook 18va edición", por International Society of Explosives Engineers, 2011.

Respecto a la producción de humos post voladura, con una correcta mezcla de materiales para la producción del ANFO en conjunto con su correcta aplicación genera humos de Clase I, como está designado por el Institute of Makers of Explosives en su "Safety Library Publication (SLP) N° 12". Esta clasificación significa humos de buenas características. Por el contrario, una

mala preparación de la mezcla del ANFO produce cantidades de humos tóxicos como NO_x y CO. En las voladuras donde existe una presencia de humos naranjas es signo de existencia de gases tóxicos de NO_x. Parte de los posibles factores que pueden haber contribuido a dicha generación de gases se listan a continuación (ISSE Blaster's Handbook 18va edición, 2011, p.226):

- Insuficiente o excesiva cantidad de combustible en la mezcla
- Densidad cercana a 1.2 gr/cc
- Cebo incorrecto o de muy baja potencia para la columna de carga con ANFO
- Presencia de material rocoso suave y/o fracturado
- Confinamiento pobre en el taladro
- Exposición o mezcla del ANFO con agua en el taladro

3.3.2 Emulsión a granel

Los explosivos de emulsión tuvieron sus inicios en 1961 cuando Richard Egly y Albert Neckar presentaron una patente para la aplicación para un agente de voladura compuesto por una mezcla de una emulsión de agua en aceite y un agente oxidante sólido de nitrato de amonio, dicha patente les fue concebida en 1964 (ISEE Handbook 18va edición).

Posteriores desarrollos de la emulsión permitieron su uso eficiente y seguro, el contenido de la emulsión es una mezcla de ingredientes inmiscibles, los cuales son separados mediante un ingrediente conocido como emulsificante como se aprecia en la Figura 15.

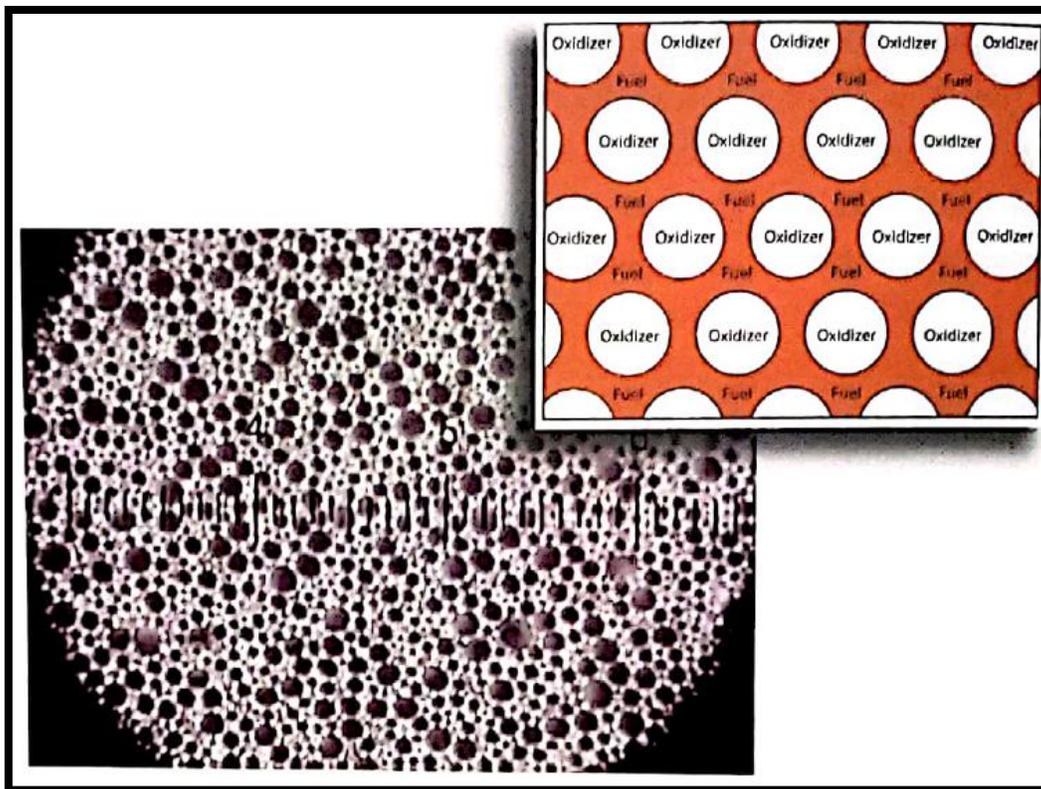


Figura 15. Vista microscópica del agente oxidante y la fase combustible de la emulsión.

Tomado de "ISEE Blaster Handbook 18va edición", por International Society of Explosives Engineers, 2011.

La propiedad física más importante de las emulsiones es su buena resistencia al agua, lo cual es favorable en comparación con el uso de ANFO, ya que en labores donde existe presencia de agua su uso es ideal.

3.4 Emulsión Emultex PDBG

La emulsión a granel Emultex PDBG, consiste en la mezcla de una emulsión matriz (emulsión UG-06, emulsión insensible e incapaz de detonar en su estado natural, categorizada como agente oxidante), y aditivos especialmente diseñados para su fabricación (nitrito de sodio – L4 y ácido acético - N17), esta es sensibilizada a través de una gasificación química ocasionada por la reacción de los componentes anteriormente mencionados, el tiempo de dicha gasificación varía respecto a las proporciones de los aditivos utilizados en su fabricación. Por lo general el tiempo promedio de gasificación ideal para la fabricación del Emultex PDBG es de 15 minutos. Este tipo de emulsión es especialmente recomendado para perforaciones horizontales y perforaciones descendentes de hasta 15 metros de profundidad.



Figura 16. Componentes de la emulsión a granel Emultex PDBG.

Las características técnicas principales de la emulsión a granel emultex PDBG son las siguientes:

- Densidad: $1.15 \pm 5\%$ (g/cc)
- VOD: 4,000 – 4,500 (m/s)
- Energía: 2,877 (Kj/Kg)
- Diámetro crítico: 1 ½ (pulg)
- Resistencia al agua: Buena



Figura 17. Carguío con emulsión Emultex PDBG

3.5 KPI de los explosivos

Dentro de los KPIs (Key Performance Indicators) analizados para el desarrollo de la presente investigación se tienen en cuenta los siguientes:

- Fragmentación de roca: El nivel de fragmentación de roca obtenido por las voladuras realizadas basado en el porcentaje de pasante respecto a una malla.
- Avance por voladura: Es el indicador de la eficiencia de avance en una voladura respecto a la longitud total del taladro.
- Sobrerotura: Es el daño ocasionado por voladura en el contorno de la labor en donde se realizó la voladura.
- Factor de carga: Es la cantidad de explosivos utilizada por la cantidad de roca volada en una determinada labor.
- Tiempo de carguío: Es el tiempo utilizado en la operación de carguío de frentes de voladura.
- Monitoreo de gases post voladura: Es el indicador que mide la concentración de los gases post voladura obtenidos en una determinada labor.

3.6 Equipo UBT-XS

El equipo conocido como Unidad Bombeable para Túneles (UBT-XS) es aquel equipo que tiene por tarea principal mecanizar el carguío de frentes, siendo su función principal la preparación de la emulsión Emultex PDBG mediante la mezcla de sus tres componentes (emulsión matriz UG-06, ácido acético y nitrito de sodio) sus características principales son:

- Capacidad de carguío de hasta 35 Kg/min.
- Capacidad de carguío de taladros descendentes hasta 15 metros como máximo.
- Cuenta con la tecnología de control SCE (sistema de control de carguío de emulsión bombeable/gasificado por medio de un sistema electrónico), especialmente diseñado para un control exacto de la dosificación de emulsión y aditivos, asegurando una emulsión gasificada balanceada para no emitir gases nitrosos post-voladura.
- Bajo centro de gravedad por su diseño para la minimización de riesgo de volcadura.
- Este equipo permite realizar carguíos en dimensiones de secciones mínimas de 3.0 m x 3.0 m.
- Permite realizar los carguíos de manera autónoma por 3.5 horas gracias a las baterías de litio que posee el modulo.
- 400 Kg de capacidad de almacenamiento de emulsión matriz UG-06



Figura 18. Equipo UBT-XS.

3.7 Sistema SCE

SCE es un sistema electrónico de control de emulsiones instalado en las Unidades Bombeables para Túneles que ofrece una estación de control mediante una pantalla denominada Fuerza y Control que cuenta con botones para la selección de las fórmulas, el monitor LCD montado en la cabina del UBT-XS sirve como interface para controlar todas las funciones de carguío de taladros (todas las operaciones se hacen desde esta pantalla denominada PLC).

Cuenta con controles eléctricos en los módulos diseñados para trabajo pesado en mina, pudiéndose operar el equipo de forma automática según los datos ingresados en el PLC o de forma manual a través del uso de un botón de inicio y parada de carguío. El manejo de las bombas de aditivos, bomba de agua, gasificación y bombas para carguío de taladros son estrictamente controlados mediante un monitoreo continuo realizado por sensores. Los dispositivos asociados son:

- Bombas: partida, parada y descarga de proceso
- Selector: On/Off/Carga de baterías
- Dispositivos de Seguridad: Discos de Ruptura, sensores de presión y temperatura, parada de emergencia, sistema cortafuegos Anzul
- Sensores de presión, temperatura e inductivo

Asimismo, el equipo cuenta con una impresora, en la cual se puede imprimir los reportes de alarmas y de carguíos realizados con el UBT-XS.



Figura 19: Pantalla del sistema SCE.

IV. GENERALIDADES – PRUEBAS DE EMULTEX PDBG

4.1 Unidad Minera “Dacar”

La mina en la cual se desarrolló las pruebas con la emulsión a granel Emultex PDBG se encuentra localizada en las cercanías del distrito de Huachocolpa en la ciudad de Huancavelica; dicha unidad minera presenta una mineralización polimetálica y se encuentra ubicada a 4680 m.s.n.m.

Debido al acuerdo de confidencialidad entre Enaex y sus clientes no se brindará el nombre de la unidad minera, pero en la investigación será referenciada como la U.M. Dacar.

Respecto a la U.M. Dacar, se tiene la siguiente información que ha sido utilizada para el desarrollo de esta investigación:

4.1.1 Alcance del desarrollo de pruebas con Emultex PDBG

La U.M. Dacar es un proyecto que se encuentra en una etapa de preparación, por lo cual el desarrollo de galerías, cruceros, subniveles y chimeneas era su principal objetivo con el fin de ir preparando la mina para su explotación mediante el método de Corte y Relleno ascendente.

Las voladuras de desarrollo en la unidad minera contaban con secciones de 4.5 m x 4.3 m para rampas, 3.0 m x 3.5 m para galerías y cruceros, labores en las cuales se llevaría a cabo el desarrollo de pruebas con la emulsión a granel Emultex PDBG, por lo cual las voladuras a realizarse serían en material estéril en su mayoría.

4.1.2 Parámetros de perforación en la U.M. Dacar

En la U.M. Dacar se contaba con dos equipos de perforación, uno de ellos de la marca Sandvik modelo DD210 y el otro de la marca resein modelo Muki FF; a continuación, se presenta los parámetros de perforación para las perforadoras mencionadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de perforación en la U.M. Dacar.

PARÁMETROS DE PERFORACIÓN SECCIÓN 4.5 M X 4.3 M		PARÁMETROS DE PERFORACIÓN SECCIÓN 3.0 M X 3.5 M	
Equipo	Sandvik DD210	Equipo	Resemin Muki FF
Mineralización	Estéril	Mineralización	Estéril
RMR	70 - 80	RMR	70 - 80
Longitud de barra (pies)	14	Longitud de barra (pies)	10
Diámetro taladro de producción (mm)	45 (1 ¾ pulg)	Diámetro taladro de producción (mm)	38 (1 ½ pulg)
Diámetro taladro de alivio (mm)	102 (4 pulg)	Diámetro taladro de alivio (mm)	102 (4 pulg)
Rendimiento de perforación (mperf/hr)	50	Rendimiento de perforación (mperf/hr)	50

4.1.3 Explosivos y accesorios de voladura utilizados en la U.M. Dacar

Durante el desarrollo de pruebas con emulsión a granel Emultex PDBG como columna de carga reemplazando al ANFO convencionalmente utilizado se utilizaron en el desarrollo de voladuras los explosivos y accesorios mencionados en la Tabla 3.

Tabla 3. Explosivos y accesorios de voladura utilizados en la U.M. Dacar.

EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA	
Columna de carga explosiva	Emulsión a granel Emultex PDBG y ANFO Premium Enaex
Iniciador de columna de carga explosiva	Emulsión encartuchada Ibegel 1 ¼" x 16"
Detonador	Detonador no eléctrico Brinel
Cordón detonante	Britacord BG (5 gr/m)
Mecha de seguridad	Ensamble de mecha lenta con fulminante N°8 (2.4 m de longitud)

V. MÉTODOS DE MEDICIÓN

Para el desarrollo de la presente investigación se tiene en cuenta la medición de los siguientes parámetros:

- Tiempo de carguío
- Eficiencia de disparo
- Factor de carga equivalente en ANFO
- Sobrerotura
- Análisis de fragmentación
- Monitoreo de gases

Estos parámetros serán comparados durante el desarrollo de la presente investigación, en la cual dicho comparativo se centrará en el uso de emulsión Emultex PDBG y ANFO.

5.1 Tiempo de carguío

El tiempo de carguío es aquel tiempo en el cual se realiza el proceso de carguío del frente de desarrollo, en el cual se realizará su posterior voladura. El inicio del control de este tiempo de carguío es cuando se empieza a realizar el carguío del primer taladro del frente de voladura posterior a la presentación del frente (Figura 20), es decir, cuando todos los taladros están preparados para ser cargados; y finaliza cuando todos los taladros del frente de voladura están completamente cargado.



Figura 20. Presentación del frente de voladura.

La fórmula para el cálculo del tiempo de carguío es la que se aprecia en la Figura 21.

$$\text{TIEMPO DE CARGUÍO (minutos)} = \text{Hora fin de carguío} - \text{Hora inicio de carguío}$$

Figura 21. Fórmula para el cálculo del tiempo de carguío.

5.2 Eficiencia del disparo

La eficiencia del disparo obtenido en frentes de voladura es la medición del avance lineal obtenido en la voladura respecto al total de metros lineales perforados en dicho frente, la fórmula de dicho parámetro se observa en la Figura 22.

$$\text{EFICIENCIA DEL DISPARO (\%)} = \left[\frac{\text{Total de metros lineales perforados (m)} - \text{Total de metros lineales obtenidos post voladura(m)}}{\text{Total de metros lineales perforados (m)}} \right] \times 100$$

Figura 22. Fórmula para el cálculo de la eficiencia del disparo.

5.3 Factor de carga equivalente en ANFO

Para una correcta comparación de la cantidad de explosivo por metro de avance lineal utilizada en el desarrollo de voladuras es necesario utilizar un explosivo como patrón, con lo cual se logra realizar dicha comparación entre diferentes tipos de explosivos. Para el desarrollo de la presente investigación se tomará como explosivo patrón el ANFO, para lo cual se tendrá que transformar el factor de carga de emulsión Emultex PDBG hacia un factor de carga equivalente en ANFO, dicha transformación se realiza a través de la fórmula indicada en la Figura 23.

$$\text{FACTOR DE CARGA EQUIVALENTE EN ANFO (Kg/metro lineal)} = \frac{\text{Carga de emulsión Emultex PDBG (Kg)} \times \text{Peso relativo en ANFO (RWS)}}{\text{Total de metros lineales avanzados post voladura (metro lineal)}}$$

Figura 23. Fórmula de cálculo del factor de carga equivalente en ANFO.

Para el caso de la emulsión Emultex PDBG su peso relativo en ANFO (RWS) tiene un valor de 0.79 según indica la ficha técnica del producto.

5.4 Sobrerotura

La sobrerotura es aquel parámetro relacionado a la variación del área contenida por el contorno de sección en el frente de voladura, lo cual permite conocer que tanto de material ha sido extraído fuera de lo planificado según el estándar del tipo de sección, el cálculo de dicho parámetro se rige bajo la fórmula descrita en la Figura 24.

$$\text{SOBREROTURA (\%)} = \frac{\text{Área del frente de sección post voladura (m}^2\text{)} - \text{Área del frente de sección pre voladura (m}^2\text{)}}{\text{Área del frente de sección pre voladura (m}^2\text{)}} \times 100$$

Figura 24. Fórmula de cálculo de la sobrerotura obtenida en el frente de voladura.

5.5 Análisis de fragmentación

El análisis de fragmentación es el estudio que se realiza al material estéril o mineral post voladura para conocer el nivel de fragmentación alcanzado a través del uso de un explosivo específico, lo cual brinda como resultado un análisis del porcentaje de material pasante obtenido de la voladura analizada.

En el desarrollo de esta investigación, para poder analizar la fragmentación obtenida post voladura se utilizó el software Split Demo, el cual permite obtener una curva granulométrica del material volado mediante el análisis de los registros fotográficos que han sido procesados en dicho software. El análisis obtenido por el software permite conocer la cantidad de material pasante en porcentaje respecto a su tamaño.

Para el desarrollo de esta tesis se tiene como dato que el porcentaje de material pasante P80 no debe superar un tamaño de 8 pulgadas, por lo que el análisis de fragmentación del material volado permitirá conocer dichos resultados y si se está cumpliendo con dicho parámetro.

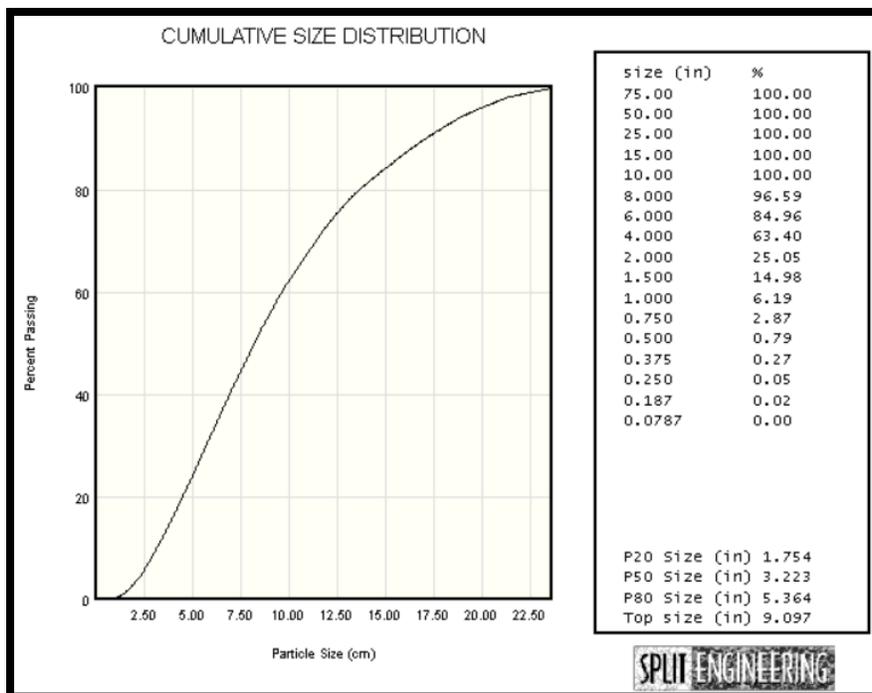


Figura 25. Ejemplo de análisis de fragmentación obtenido con el software Split Demo.

5.6 Monitoreo de gases

Para la realización del monitoreo de gases post voladura es necesario el uso de detectores y/o monitores de gases, ya que estos permiten tener una lectura en un determinado tiempo o lapso de tiempo definido de las concentraciones de los gases post voladura obtenidos en la labor a monitorear. Para el desarrollo de la presente investigación se ha utilizado el detector de gases Altair 5X MSA, el cual permite detectar la concentración de los gases presentes en interior mina como:

- Monóxido de carbono (CO)
- Dióxido de nitrógeno (NO₂)
- Oxígeno (O₂)
- Dióxido de carbono (CO₂)

Asimismo, según el DS N° 010-2016-EM se tuvo en cuenta los límites máximos permisibles (LMP) según lo estipula la legislación vigente en la norma peruana para realizar un análisis comparativo con los gases obtenidos post voladura, dichos valores se aprecian en la Tabla 4.

Tabla 4. Límites Máximos Permisibles de los gases CO, NO₂, O₂ y CO₂ según la normativa peruana.

Gas	CO (PPM)	NO ₂ (PPM)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)
LMP	25	5	19.5	0.5

Tomado del DS N° 010-2016-EM, por Ministerio de Energía y Minas, 2016.



VI. RESULTADOS

6.1 Línea base ANFO

Durante el levantamiento de línea base para el desarrollo de pruebas con emulsión a granel, se realizó seguimiento a un total de 8 voladuras realizadas con ANFO según la proporción especificada en la Tabla 5.

Tabla 5. Proporción de voladuras de línea base realizadas con ANFO.

Labor	N° Voladuras
RP 9662 (-)	7
CX 476 (CAUCA)	1

Este seguimiento se realizó con el fin de realizar la recolección de datos y evaluación de los resultados obtenidos para un posterior análisis y comparación. A continuación, se detalla las voladuras realizadas con el uso de ANFO como columna de carga explosiva en la Tabla 6.

Tabla 6. Voladuras realizadas con el uso de ANFO.

N° Muestra	Guardia	Nivel	Labor	Material	Fase	RMR	Sección
1	día	4650	RP_9662(-)	estéril	desarrollo	70-80	4.5 x 4.3
2	día	4650	RP_9662(-)	estéril	desarrollo	70-80	4.5 x 4.3
3	día	4650	RP_9662(-)	estéril	desarrollo	70-80	4.5 x 4.3
4	día	4650	RP_9662(-)	estéril	desarrollo	70-80	4.5 x 4.3
5	día	4650	RP_9662(-)	estéril	desarrollo	70-80	4.5 x 4.3
6	día	4650	RP_9662(-)	estéril	desarrollo	70-80	4.5 x 4.3
7	día	4650	RP_9662(-)	estéril	desarrollo	70-80	4.5 x 4.3
8	día	4650	CX_476	estéril	desarrollo	70-80	3.0 x 3.5

6.1.1 Diseño de malla de voladura con ANFO

A continuación, se detallan los tipos de malla estándar utilizados en la unidad minera para ambos tipos de sección, en los cuales se realizó el seguimiento al uso de ANFO:

Sección 3.0 m x 3.5 m

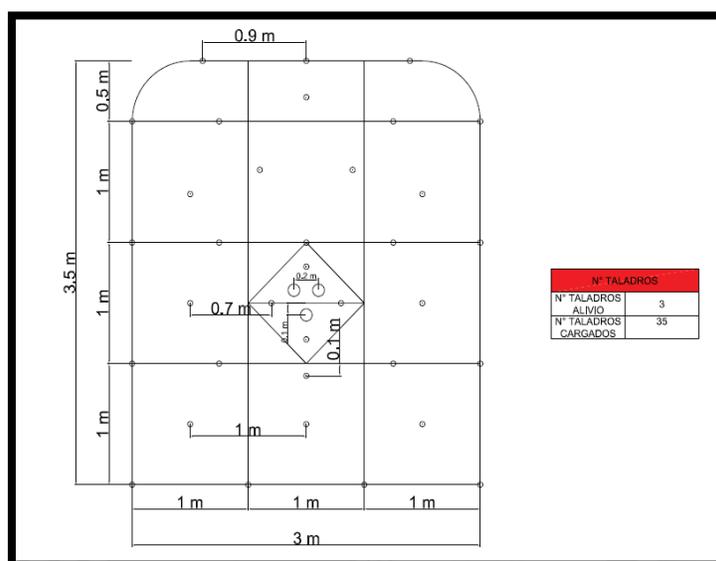


Figura 26. Malla de perforación para secciones de 3.0 m x 3.5 m.

Sección 4.5 m x 4.3 m

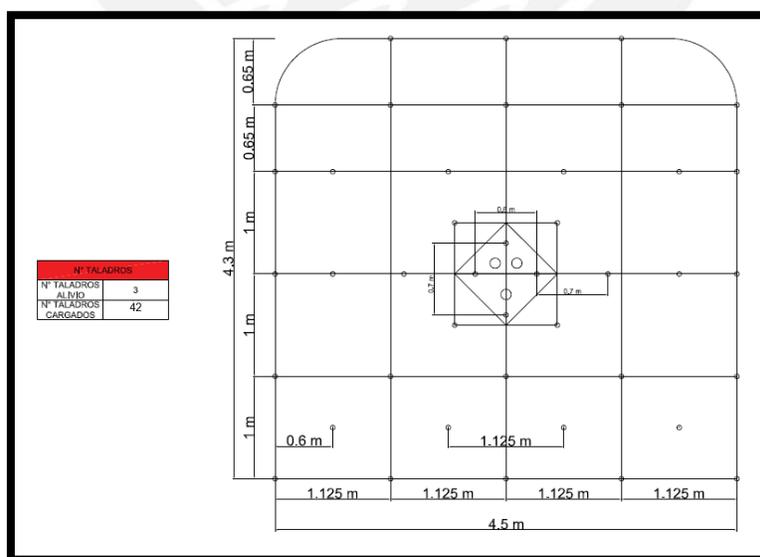


Figura 27. Malla de perforación para secciones de 4.5 m x 4.3 m.

Asimismo, se tiene la siguiente información de las voladuras realizadas con ANFO:

Tabla 7. Datos generales de voladuras realizadas con ANFO

N° Voladura	1	2	3	4	5	6	7	8
Fecha	31/10	01/11	01/11	02/11	03/11	04/11	05/11	08/11
Sección	4.5 X 4.3							3.0 X 3.5
RMR	70-80							70-80
N° Tal. Perforados	42	42	39	41	42	42	42	35
N° Tal. Cargados	42	41	38	41	42	42	42	35
N° Tal. De Alivio	3	3	3	2	2	4	3	6
Tipo De Arranque	Rimado en Y							
Factor De Carga Eq X Metro Lineal	55.6	57.5	48.3	51.2	54.5	58.8	48.5	41.8
Factor De Carga Eq En Anfo	133.5	133.5	120.7	129.0	111.6	182.2	126.1	79.5

6.1.2 Tiempo de carguío

En la Figura 28 se puede apreciar el tiempo de carguío promedio obtenido para los distintos tipos de sección en los cuales se realizó seguimiento al uso del ANFO.

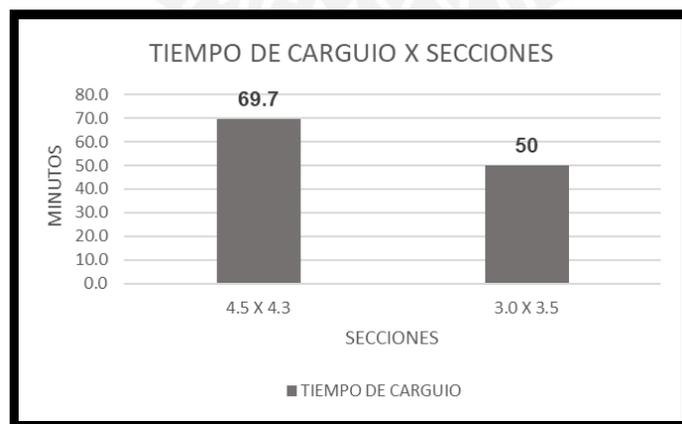


Figura 28. Tiempo de carguío promedio por tipo de sección.

6.1.3 Eficiencia de avance

De las 8 voladuras realizadas con ANFO se tiene la siguiente información levantada en campo:

Tabla 8. Eficiencia de avance de voladuras realizadas con ANFO.

Labor	Long. de perforación (metros)	Avance (metros)	Eficiencia de avance
RP_9662(-)	2.87	2.4	84%
RP_9662(-)	2.6	2.32	89%
RP_9662(-)	2.6	2.5	96%
RP_9662(-)	2.77	2.52	91%
RP_9662(-)	2.85	2.05	72%
RP_9662(-)	3.82	3.1	81%
RP_9662(-)	3.1	2.6	84%
CX 476 (CAUCA)	2.5	1.9	76%

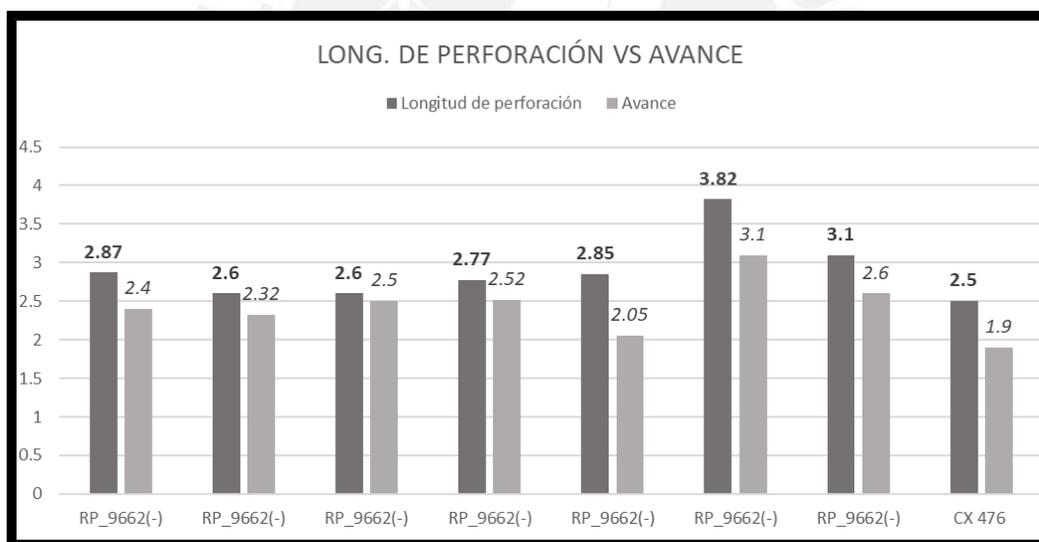


Figura 29. Longitud de perforación vs avance de las voladuras realizadas con ANFO.

Es así que se obtiene en la Figura 30 el promedio de eficiencia de avance promedio para ambos tipos de sección.

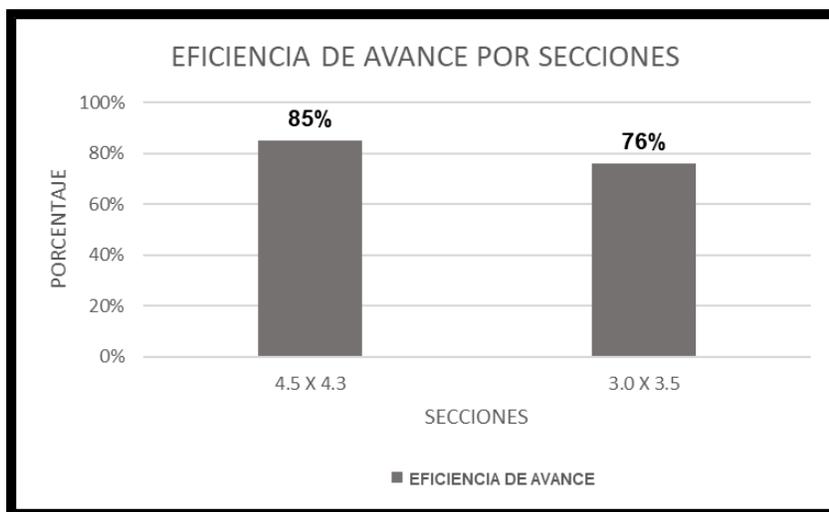


Figura 30. Eficiencia de avance obtenido en las voladuras realizadas con ANFO.

6.1.4 Factor de carga equivalente ANFO

De las voladuras realizadas durante el desarrollo de pruebas, el factor de carga equivalente ANFO obtenido en las voladuras realizadas con ANFO se observa en la Figura 31.

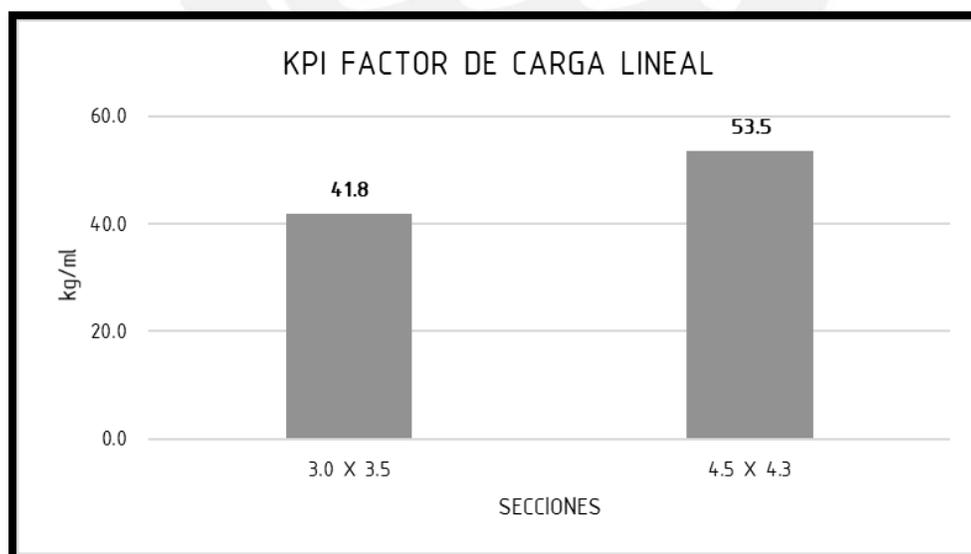


Figura 31. Factor de carga lineal de las voladuras realizadas con ANFO por cada tipo de sección.

6.1.5 Sobrerotura

De las voladuras realizadas durante el desarrollo de pruebas, la sobrerotura obtenida en las voladuras realizadas con ANFO se observa en la Tabla 9.

Tabla 9. Sobrerotura obtenida en las voladuras realizadas con ANFO.

Labor	Sección	Ancho Sección (Real)	Alto Sección (Real)	Sobrerotura
RP_9662(-)	4.5 X 4.3	4.7	5	21%
RP_9662(-)	4.5 X 4.3	4.3	5.2	16%
RP_9662(-)	4.5 X 4.3	5.6	4.8	39%
RP_9662(-)	4.5 X 4.3	4.7	4.5	9%
RP_9662(-)	4.5 X 4.3	4.9	4.1	4%
RP_9662(-)	4.5 X 4.3	4.7	4.2	2%
RP_9662(-)	4.5 X 4.3	4.5	4.5	5%
CX_476	3.0 X 3.5	3.4	3.4	10%

Es así que se observa en la Figura 32 el promedio de sobrerotura obtenido por cada tipo de sección.

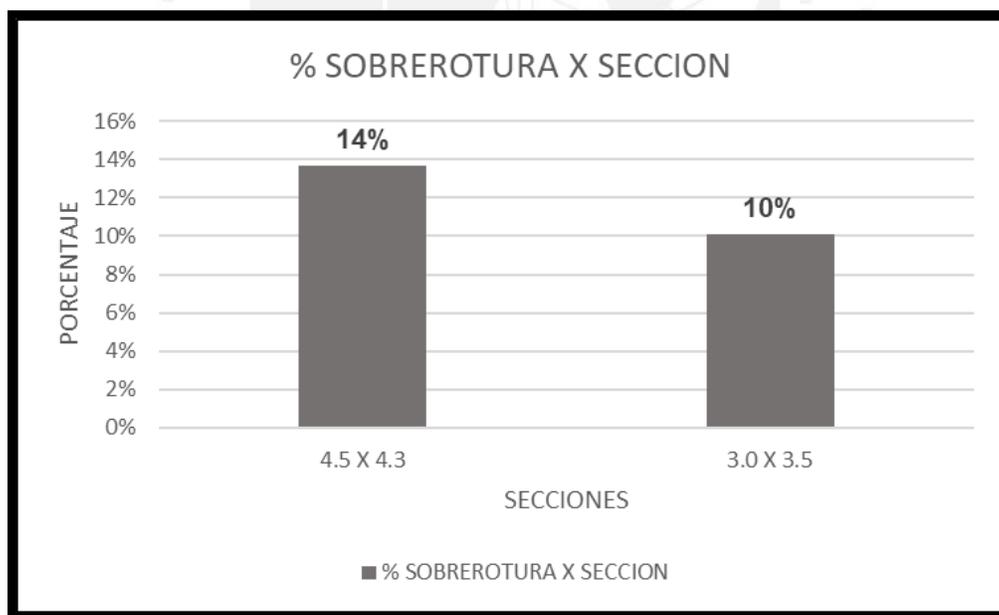


Figura 32. Sobrerotura promedio obtenida por tipo de sección con el uso de ANFO.

6.1.6 Análisis de fragmentación

De las voladuras realizadas durante el desarrollo de pruebas, la fragmentación obtenida en las 6 mediciones realizadas (Anexo A) se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Fragmentación obtenida de las voladuras realizadas con ANFO.

Labor	Nivel	Material	Fecha	Fase	P80 (Pulgadas)
RP_9662(-)	4650	ESTÉRIL	1/11/2021	DESARROLLO	16.8
RP_9662(-)	4650	ESTÉRIL	2/11/2021	DESARROLLO	6.39
RP_9662(-)	4650	ESTÉRIL	3/11/2021	DESARROLLO	13.49
RP_9662(-)	4650	ESTÉRIL	4/11/2021	DESARROLLO	20.2
RP_9662(-)	4650	ESTÉRIL	5/11/2021	DESARROLLO	7.17
CX_476	4650	ESTÉRIL	8/11/2021	DESARROLLO	11.56
Promedio					12.60

6.1.7 Monitoreo de gases

Para el monitoreo de gases post voladura se utilizó el equipo medidor de gases Altair 5X MSA; durante el desarrollo de voladuras con el uso de ANFO se realizó 3 mediciones (Anexo C) a los 30 minutos de ventilación de la labor RP_9662(-), los resultados de estas mediciones se pueden apreciar en la Tabla 11.

Tabla 11. Monitoreo de gases de la RP_9662.

LABOR	NIVEL	FECHA	CO (PPM)	NO2 (PPM)	O2 (%)	CO2 (%)
RP_9662(-)	4650	11/1/2021	29	14	20.8	0.09
RP_9662(-)	4650	11/2/2021	21	8.2	21.4	0.1
RP_9662(-)	4650	11/3/2021	108	20	20.4	0.24

A continuación, se aprecia los resultados de medición obtenidos comparados con el límite máximo permisible de cada tipo de gas:

Monóxido de carbono

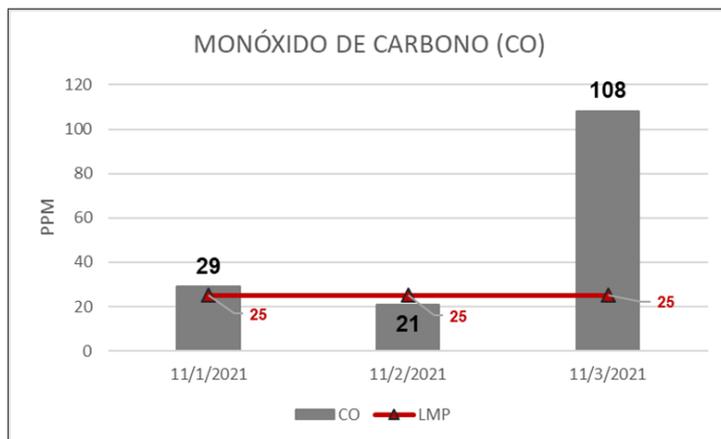


Figura 33. Resultados de monitoreo del gas CO.

Dióxido de nitrógeno

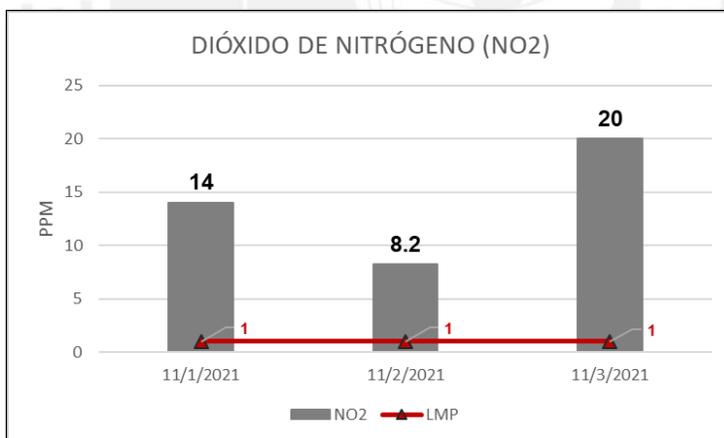


Figura 34. Resultados de monitoreo del gas NO2.

Oxígeno

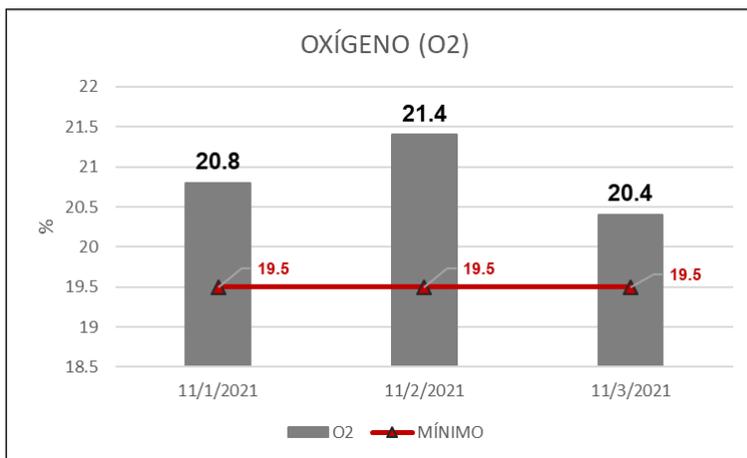


Figura 35. Resultados de monitoreo del gas O2.

Dióxido de carbono

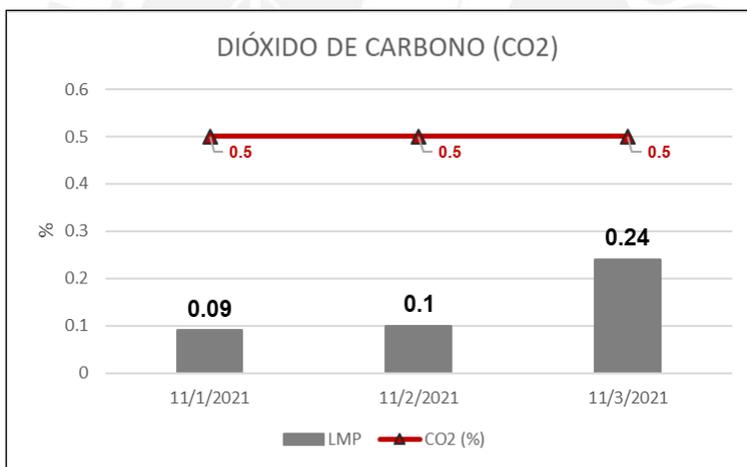


Figura 36. Resultados de monitoreo del gas CO2.

6.2 Pruebas Emultex PDBG

Durante el desarrollo de pruebas con emulsión a granel Emultex PDBG se realizó un total de 23 voladuras primarias en frentes, las cuales fueron realizadas en secciones de 3.0 m x 3.5 m y 4.5 m x 4.3 m; y 23 voladuras de desquinche que fueron realizadas según el requerimiento de la operación.

Voladuras primarias:

Tabla 12. Voladuras primarias realizadas con Emultex PDBG.

DATOS GENERALES DE VOLADURA							RESULTADOS			
FECHA	TIPO	LABOR	NIVEL	GUARDIA	RMR	LONG PROM PERF	AVANCE	EFICIENCIA DE AVANCE	SOBRE ROTURA	FACTOR DE CARGA EQUIV. X METRO LINEAL
11/18/2021	FRENTE	CX 9491	4650	DÍA	70-80	2.6	2.6	100%	3%	26.4
11/18/2021	FRENTE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	2.5	2.5	100%	2%	49.0
11/19/2021	FRENTE	CX 9491	4650	DÍA	70-80	3	2.95	98%	3%	27.3
11/19/2021	FRENTE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	3.2	3.2	100%	5%	51.2
11/20/2021	FRENTE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	2.2	2.2	100%	0%	50.4
11/20/2021	FRENTE	CX 9491	4650	DÍA	70-80	2.5	2.5	100%	0%	27.2
11/21/2021	FRENTE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	3.8	3.6	95%	2%	50.9
11/22/2021	FRENTE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	3.3	3.2	97%	2%	49.5
11/24/2021	FRENTE	CX 9491	4650	DÍA	70-80	3.5	3.45	99%	1%	35.0
11/24/2021	FRENTE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	3.8	3.7	97%	2%	41.1
11/25/2021	FRENTE	CX 9491	4650	DÍA	70-80	3.6	3.6	100%	6%	45.1
11/25/2021	FRENTE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	2.6	2.6	100%	2%	53.5
11/25/2021	FRENTE	RP_9662(-)	4650	NOCHE	70-80	2.6	2.55	98%	0%	52.2
11/26/2021	FRENTE	RP_9662(-)	4650	NOCHE	70-80	3.1	3.05	98%	2%	55.4
11/27/2021	FRENTE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	3.8	3.75	99%	2%	54.8
11/27/2021	FRENTE	CX 9491	4650	NOCHE	70-80	3.5	3.5	100%	3%	38.8
11/27/2021	FRENTE	RP_9662(-)	4650	NOCHE	70-80	3.5	3.45	99%	2%	53.4
11/28/2021	FRENTE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	3.5	3.4	97%	2%	51.1
11/28/2021	FRENTE	CX 9491	4650	DÍA	70-80	3	2.9	97%	3%	44.9
11/28/2021	FRENTE	CX 9491	4650	NOCHE	70-80	3	2.9	97%	3%	45.3
11/28/2021	FRENTE	RP_9662(-)	4650	NOCHE	70-80	3.5	3.5	100%	2%	49.9
11/29/2021	FRENTE	CX 9491	4650	DÍA	70-80	2.4	2.35	98%	3%	49.4
11/29/2021	FRENTE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	4	4	100%	2%	60.1

Voladuras de desquinche:

Tabla 13. Voladuras de desquinche realizadas con Emultex PDBG.

DATOS GENERALES DE VOLADURA						CONSUMO
FECHA	TIPO	LABOR	NIVEL	GUARDIA	RMR	EMULTEX PDBG
11/17/2021	DESQUINCHE	CA BOMBEO	4650	DÍA	70-80	70
11/20/2021	CA BOMBEO	CA BOMBEO	4650	DÍA	70-80	57.9
11/22/2021	DESQUINCHE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	59.3
11/22/2021	DESQUINCHE	CX 9491	4650	DÍA	70-80	87.8
11/23/2021	REFUGIO	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	71.4
11/25/2021	CA BOMBEO	RP_9662(-)	4650	NOCHE	70-80	71.4
11/26/2021	DESQUINCHE	CAUCA	4650	DÍA	70-80	70
11/26/2021	DESQUINCHE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	210
11/26/2021	DESQUINCHE	RP_9662(-)	4650	NOCHE	70-80	94
11/26/2021	DESQUINCHE	RP_9662(-)	4650	NOCHE	70-80	31
11/27/2021	DESQUINCHE	CAUCA	4650	DÍA	70-80	122
11/27/2021	DESQUINCHE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	122
11/27/2021	DESQUINCHE	REFUGIO	4650	NOCHE	70-80	84
11/27/2021	DESQUINCHE	CAUCA	4650	NOCHE	70-80	80
11/27/2021	DESQUINCHE	RP_9662(-)	4650	NOCHE	70-80	158.3
11/28/2021	DESQUINCHE	CAUCA	4650	DÍA	70-80	120
11/28/2021	DESQUINCHE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	76.6
11/28/2021	REFUGIO	CX 9491	4650	NOCHE	70-80	68.6
11/28/2021	DESQUINCHE	CAUCA	4650	NOCHE	70-80	80
11/28/2021	DESQUINCHE	RP_9662(-)	4650	NOCHE	70-80	70
11/29/2021	DESQUINCHE	RP_9662(-)	4650	DÍA	70-80	191.5
11/29/2021	DESQUINCHE	RP_9662(-)	4650	NOCHE	70-80	60
11/29/2021	DESQUINCHE	CAUCA	4650	NOCHE	70-80	260

6.2.1 Diseño de malla de voladura con ANFO

A continuación, se detallan los tipos de malla utilizados durante el desarrollo de pruebas con emulsión Emultex PDBG, en los cuales se redujo la cantidad de taladros respecto a las mallas de ANFO:

Sección 3.0 m x 3.5 m

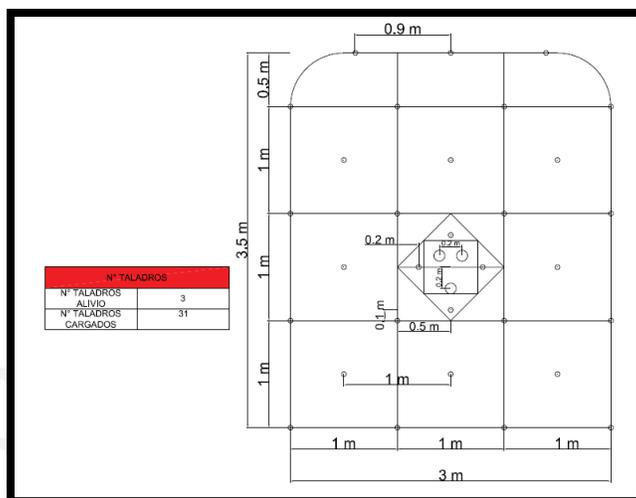


Figura 37. Malla de perforación para secciones de 3.0 m x 3.5 m con Emultex PDBG.

Sección 4.5 m x 4.3 m

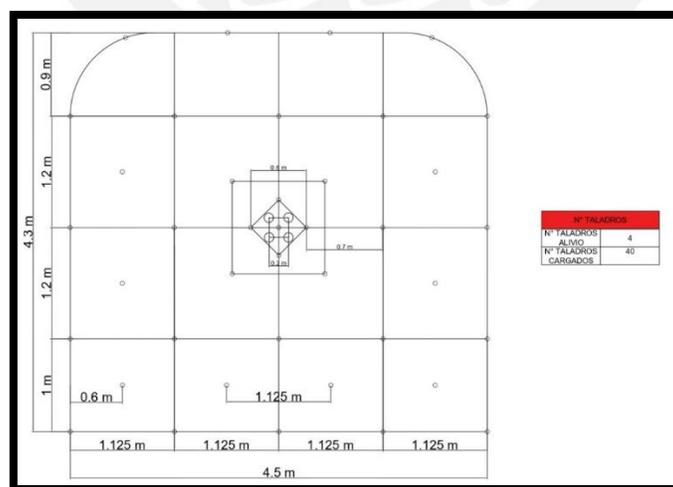


Figura 38. Malla de perforación para secciones de 4.5 m x 4.3 m con Emultex PDBG.

6.2.2 Tiempo de carguío

En la Figura 39 se puede apreciar el tiempo de carguío promedio obtenido para los distintos tipos de sección en los cuales se realizó voladuras con el uso de emulsión Emultex PDBG.

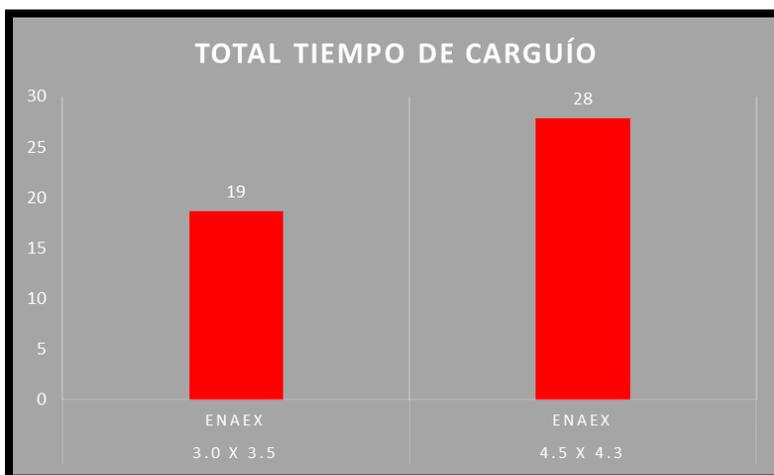


Figura 39. Tiempo de carguío con el uso de Emultex PDBG por tipo de sección.

6.2.3 Eficiencia de avance

De las 23 voladuras realizadas con emulsión Emultex PDBG se tiene el resultado promedio de su avance obtenido para ambos tipos de sección en la Figura 40.

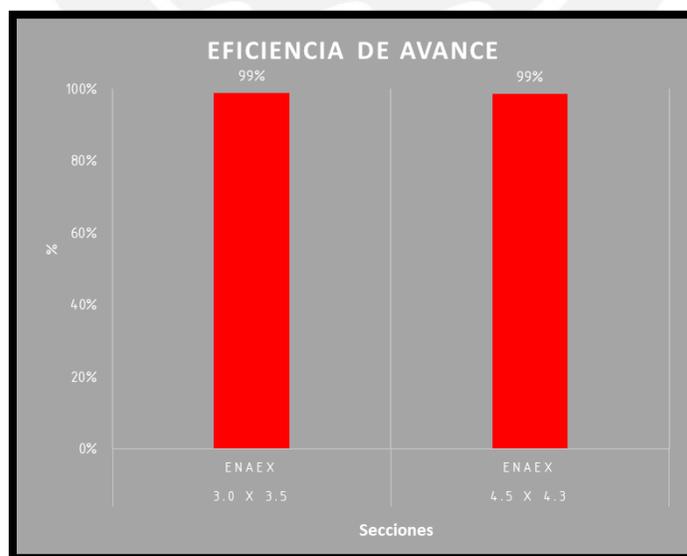


Figura 40. Eficiencia de disparo obtenida con el uso de Emultex PDBG por tipo de sección.

6.2.4 Factor de carga equivalente ANFO

De las voladuras realizadas durante el desarrollo de pruebas, el factor de carga equivalente en ANFO obtenido en las voladuras realizadas con emulsión Emultex PDBG se observa en la Figura 41.

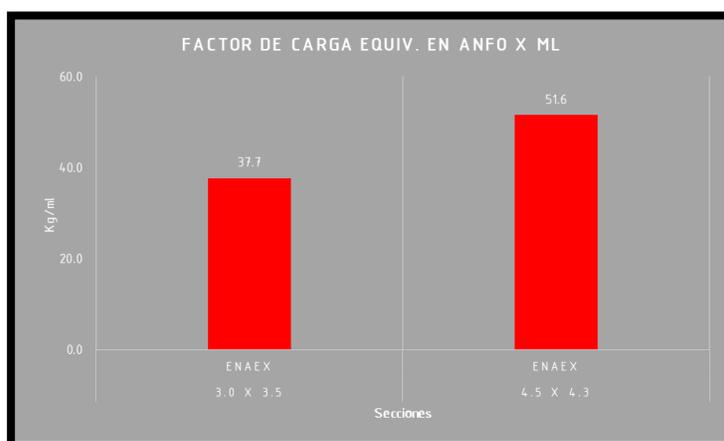


Figura 41. Factor de carga equivalente de las voladuras realizadas con Emultex PDBG por tipo de sección

6.2.5 Sobrerotura

De las voladuras realizadas durante el desarrollo de pruebas, la sobrerotura obtenida en las 23 voladuras primarias realizadas con emulsión Emultex PDBG se obtuvo los promedios por sección en la Figura 42.

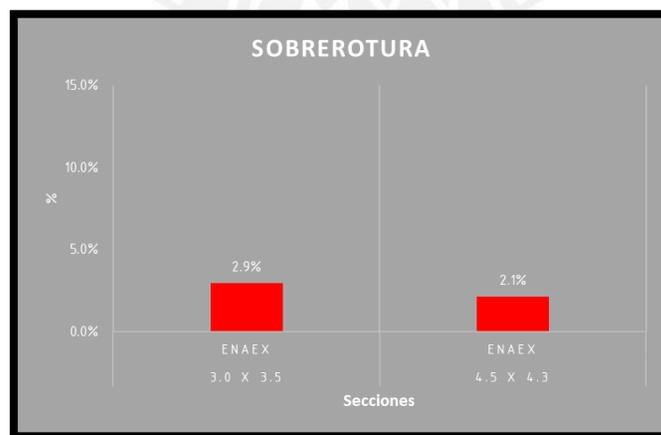


Figura 42. Sobrerotura obtenida con el uso de Emultex PDBG por tipo de sección.

6.2.6 Análisis de fragmentación

De las voladuras realizadas durante el desarrollo de pruebas, la fragmentación obtenida en las 9 mediciones realizadas (Anexo B) se observa en la Tabla 14.

Tabla 14. Fragmentación obtenida con el uso de Emultex PDBG.

Labor	Nivel	Material	Fecha	Fase	P80 (Pulgadas)
RP 9662(-)	4650	estéril	18/11/2021	desarrollo	7.844
CX 9491	4650	estéril	20/11/2021	desarrollo	7.903
RP 9662(-)	4650	estéril	21/11/2021	desarrollo	7.681
RP 9662(-)	4650	estéril	22/11/2021	desarrollo	5.884
CX 9491	4650	estéril	24/11/2021	desarrollo	4.704
CX 9491	4650	estéril	25/11/2021	desarrollo	3.852
RP 9662(-)	4650	estéril	26/11/2021	desarrollo	5.540
CX 9491	4650	estéril	28/11/2021	desarrollo	5.364
RP 9662(-)	4650	estéril	29/11/2021	desarrollo	5.536
PROMEDIO					5.764

6.2.7 Monitoreo de gases

Para el monitoreo de gases post voladura se utilizó el equipo medidor de gases Altair 5X; asimismo, se tomó como muestra el monitoreo de 2 voladuras realizadas (Anexo D) en la RP 9662(-) 30 minutos después de la voladura, de las cuales se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 15. Resultados de monitoreo de gases post voladura Emultex PDBG.

Labor	Nivel	Fecha	CO (ppm)	NO2 (ppm)	O2 (%)	CO2 (%)
RP_9662(-)	4650	18/12/2021	60	2.3	20.8	0.08
RP_9662(-)	4650	24/12/2021	42	0.5	20.8	0.08

VII. ANÁLISIS

En esta sección de la investigación se procederá a realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos durante el levantamiento de línea base en donde se realizaron voladuras con ANFO y el desarrollo de pruebas en voladuras con el uso de emulsión Emultex PDBG.

El análisis que se llevarán a cabo en esta sección serán de los indicadores claves de rendimiento pre y post voladura técnicos, así como también un análisis económico en el cual se podrá evaluar la factibilidad del uso de la emulsión Emultex PDBG en comparación con el uso del ANFO.

7.1 Indicadores claves de rendimiento pre voladura

Dentro de los indicadores claves de rendimiento pre voladura se tiene el análisis de tiempos de carguío de los frentes de sección de 3.0 m x 3.5 m y 4.5 m x 4.3 m.

7.1.1 Total tiempo de carguío en frentes:

En la Figura 43 se tiene el resultado comparativo para ambos tipos de sección respecto al tiempo de carguío de los frentes de desarrollo en los cuales se realizó carguíos tanto con ANFO como con emulsión Emultex PDBG.

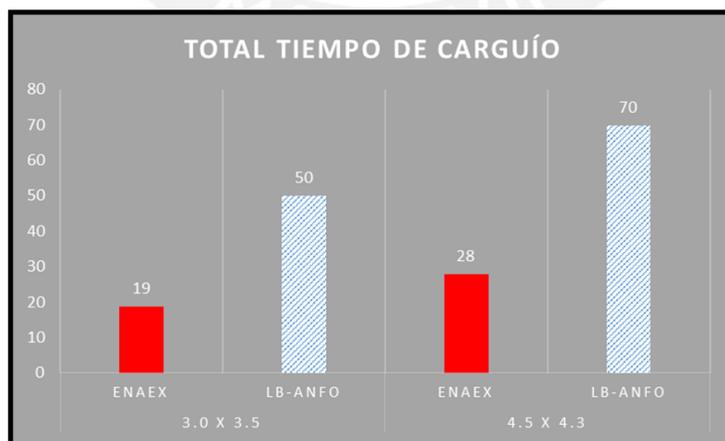


Figura 43. Comparativo de tiempos de carguío por tipo de sección.

En base a los resultados obtenidos se observa que se tiene una diferencia de tiempo de carguío entre el carguío realizado con ANFO y emulsión Emultex PDBG de 31 y 42 minutos para secciones de 3.0 m x 3.5 m y 4.5 m x 4.3 m respectivamente.

7.2 Indicadores claves de rendimiento post voladura

Dentro de los indicadores claves de rendimiento post voladura se tiene el análisis de eficiencia de disparo, factor de carga equivalente, sobrerotura, análisis de fragmentación y monitoreo de gases en los frentes de sección de 3.0 m x 3.5 m y 4.5 m x 4.3 m.

7.2.1 Eficiencia de disparo

En la Figura 44 se tiene el resultado comparativo para ambos tipos de sección respecto a la eficiencia de disparo en los frentes de desarrollo en los cuales se realizó voladuras tanto con ANFO como con emulsión Emultex PDBG.

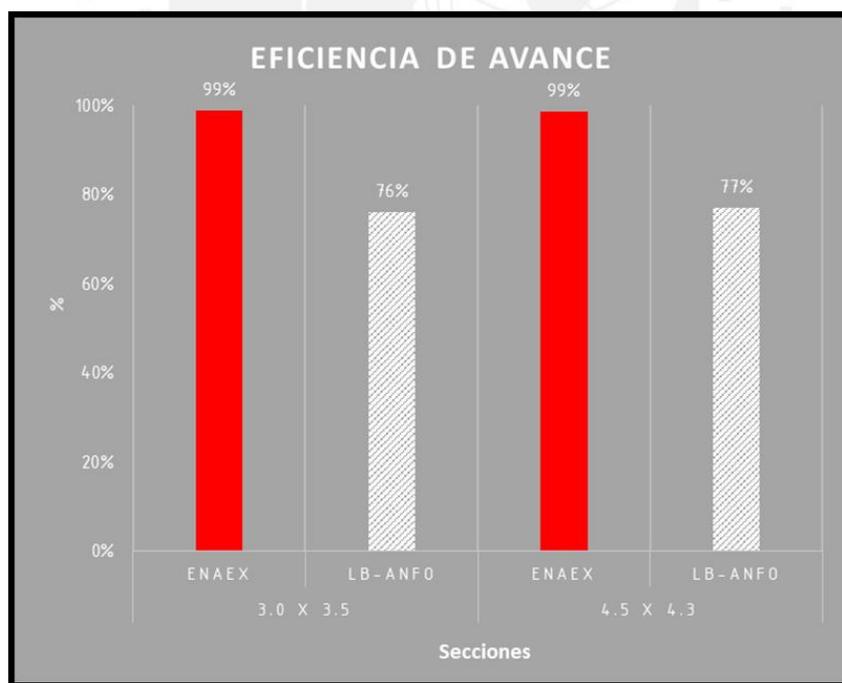


Figura 44. Comparativo de eficiencia de disparo según tipo de sección.

En base a los resultados obtenidos se observa que la eficiencia de disparo obtenida con emulsión Emultex PDBG es mayor en comparación con la eficiencia obtenida con el uso del ANFO, pasando de un 76% y 77% de eficiencia de avance para secciones de 3.0 m x 3.5 m y 4.5 m x 4.3 m respectivamente a un 99%, lo cual implica que se obtuvo cero tacos o restos de taladros post voladura.

7.2.2 Factor de carga equivalente

En la Figura 45 se tiene el resultado comparativo para ambos tipos de sección respecto a la eficiencia de disparo en los frentes de desarrollo en los cuales se realizó voladuras tanto con ANFO como con emulsión Emultex PDBG.

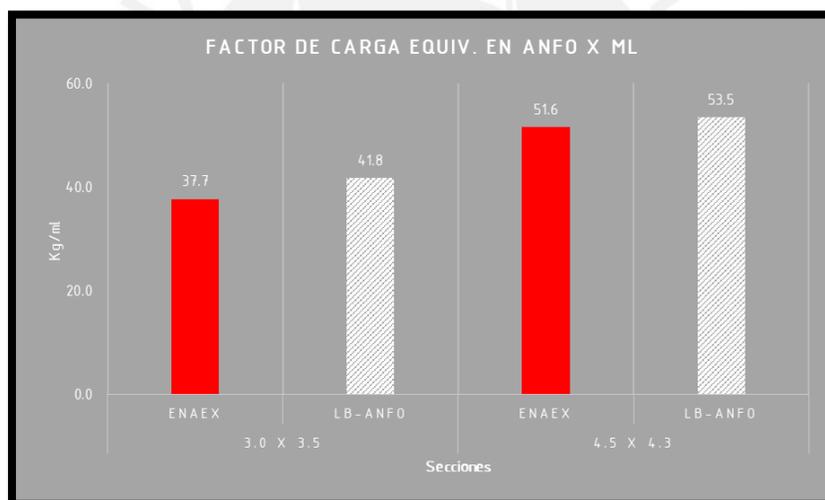


Figura 45. Comparativo de factor de carga equivalente por tipo de sección.

En base a los resultados obtenidos se observa que el factor de carga equivalente en ANFO obtenido con emulsión Emultex PDBG es menor en comparación con los resultados obtenidos con ANFO, pasando de un 41.8 Kg/ml y 53.5 Kg/ml de factor de carga equivalente en ANFO para secciones de 3.0 m x 3.5 m y 4.5 m x 4.3 m respectivamente a un factor de 37.7 Kg/ml y 51.6 Kg/ml, lo cual implica que la cantidad de explosivo requerido para obtener un avance de un metro lineal es menor con el uso de emulsión Emultex PDBG.

7.2.3 Sobrerotura

En la Figura 46 se tiene el resultado comparativo para ambos tipos de sección respecto a la sobrerotura obtenida en los frentes de desarrollo en los cuales se realizó voladuras tanto con ANFO como con emulsión Emultex PDBG.

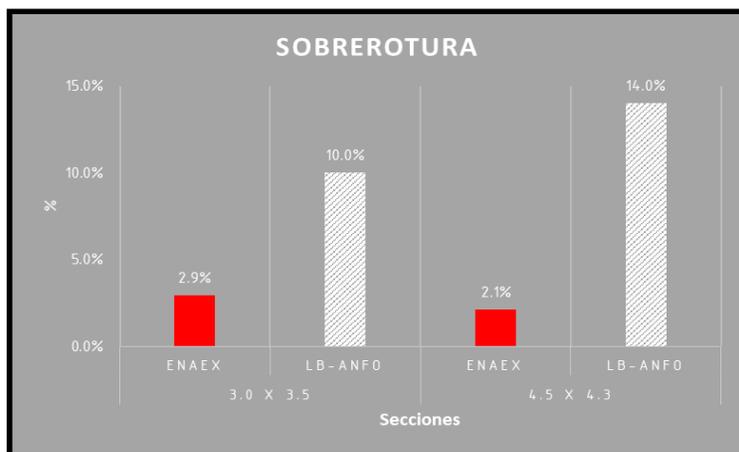


Figura 46. Comparativo de sobrerotura obtenida por tipo de sección.

En base a los resultados obtenidos se observa que la sobrerotura obtenida con emulsión Emultex PDBG es menor en comparación con la sobrerotura obtenida con el uso del ANFO, pasando de un 10% y 14% de eficiencia de avance para secciones de 3.0 m x 3.5 m y 4.5 m x 4.3 m a un 2.9% y 2.1% respectivamente. Como resultado de esta baja sobrerotura obtenida con la aplicación de emulsión Emultex PDBG se obtuvieron medias cañas después de las voladuras, dichas marcas se observan en la Figura 47.



Figura 47. Evidencia de medias cañas post voladura.

7.2.4 Análisis de fragmentación

En la Figura 48 se tiene el resultado comparativo respecto a la fragmentación del material volado obtenido de los frentes de desarrollo en los cuales se realizó voladuras tanto con ANFO como con emulsión Emultex PDBG.

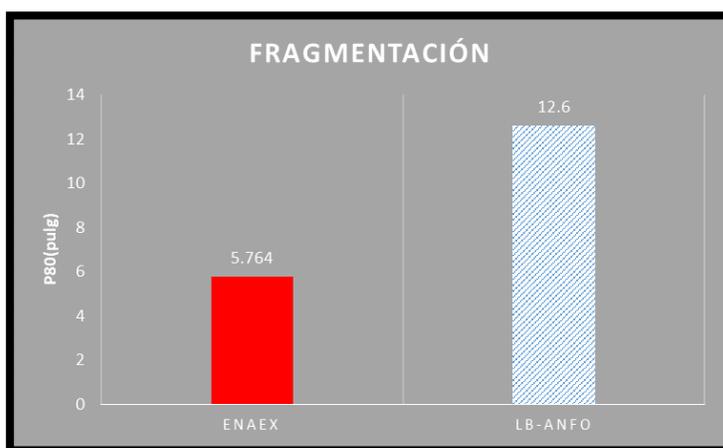


Figura 48. Comparativo de resultados de fragmentación.

Tal como se observó en la imagen anterior (Figura xxx), la fragmentación obtenida con el uso de emulsión Emultex PDBG es de 5.764 pulgadas, valor que se encuentra muy por debajo de la fragmentación obtenida con el uso de ANFO.

7.2.5 Monitoreo de gases

Para el monitoreo de gases post voladuras realizado a la media hora después del disparo mediante el uso del medidor de gases Altair 5X MSA, se tiene los siguientes resultados comparativos por tipo de gas:

Monóxido de carbono (CO):

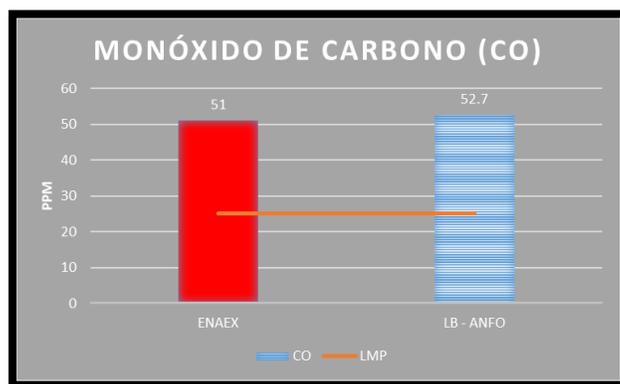


Figura 49. Comparativo de concentración de gas post voladura CO.

Se puede apreciar que respecto a la presencia del gas monóxido de carbono post voladura con emulsión bombeable Emultex PDBG es menor por 1.7 ppm respecto a las voladuras realizadas con ANFO.

Dióxido de nitrógeno (NO₂):

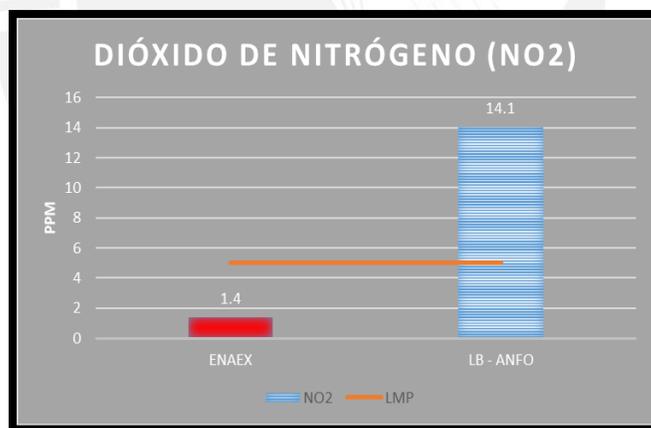


Figura 50. Comparativo de concentración de gas post voladura NO₂.

Se puede apreciar que respecto a la presencia del gas dióxido de nitrógeno post voladura con emulsión bombeable Emultex PDBG es mucho menor respecto a las voladuras con ANFO, logrando acercarse al LMP de este gas en solo media hora.

Oxígeno (O₂):



Figura 51. Comparativo de concentración de gas post voladura O₂.

Se puede apreciar que respecto a la presencia de oxígeno post voladura con emulsión bombeable Emultex PDBG es igual a la que se obtiene con las voladuras de ANFO, superando la mínima cantidad necesaria de oxígeno en minería subterránea.

Dióxido de carbono (CO₂):

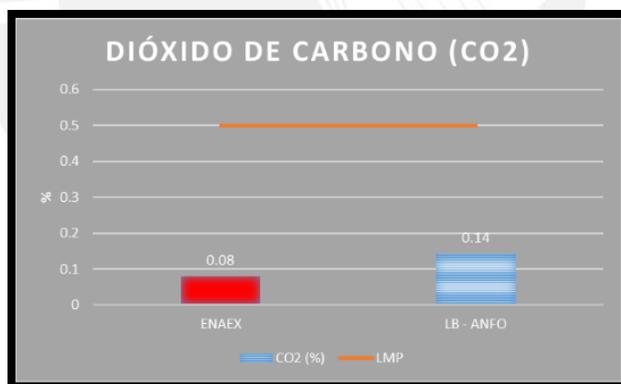


Figura 52. Comparativo de concentración de gas post voladura CO₂.

Se puede apreciar que respecto a la presencia del gas dióxido de carbono post voladura con emulsión bombeable Emultex PDBG es menor al que se obtiene con las voladuras de ANFO, encontrándose en ambos casos por debajo del LMP.

7.3 Análisis económico

Dentro del análisis económico se tomó en cuenta los parámetros técnicos obtenidos tanto con el uso de ANFO como de emulsión a granel Emultex PDBG, con los cuales se calculó el valor agregado generado por el uso de la emulsión Emultex PDBG para un programa mensual de avances de 710 m y 40 m para secciones de 3.0 m x 3.5 m y 4.5 m x 4.3 m respectivamente. A continuación, se detalla los datos y resultados de dicho cálculo.

7.3.1 Costos unitarios de la operación minera

Los costos unitarios de la operación en la cual se desarrolló voladuras tanto con ANFO como con emulsión Emultex PDBG fueron los siguientes:

Costos aceros, personal y equipos:

Tabla 16. Costos aceros, personal y equipos en la U.M. Dacar.

COSTOS UNITARIOS ACEROS, PERSONAL Y EQUIPOS		
PROCESO	UNIDAD	PRECIO
Perforación Ø=41 mm.	USD/M	-
Perforación Ø=45 mm.	USD/M	4.00
Perno swellex c/instal.	USD/und.	0.00
Shotcrete c/instal	USD/M2	0.00
Malla c/instal.	USD/M2	0.00
Costo extracción (scoop+operator)	USD/HR	96.00
Costo Transporte (Dumper c/Operator)	USD/t	1.67
Costo Promedio Minero	USD/HR	4.30
Rendimiento Scoop 6 yd3	m3/hr	32.14
Rendimiento de Perforación	mperf./hr	50.00
Rendimiento Dumper	ton/Hr	36.00

7.3.2 Programa mensual de avances

Para el cálculo de valor agregado se está tomando en cuenta un programa mensual de avance en frentes de desarrollo de 710 m para secciones de 3.0 m x 3.5 y 40 m para secciones de 4.5 m x 4.3 m.

Tomando en cuenta el programa descrito anteriormente, se procede a comparar los resultados que se obtienen con el uso de ANFO y con el uso de la emulsión Emultex PDBG. Los siguientes cuadros muestran la cantidad de voladuras que serían necesarias con cada producto para cumplir con el programa de avances.

Cumplimiento de avance de 3.0 m x 3.5 m:

Tabla 17. Cumplimiento de avances para sección de 3.0 m x 3.5 m.

DESARROLLO HORIZONTAL		3.0 M X 3.5 M	PROGRAMA MENSUAL	710
Parámetros	Unidad		ANFO	EMULTEX PDBG
Sección	m. x m.		3.0 x 3.5	3.0 x 3.5
Área sección	m ²		10.22	10.22
Perímetro Sección	m.		12.79	12.79
Sobrerotura	%		10%	3%
Densidad roca	g/cc		2.80	2.80
Longitud de perforación promedio	m.		3.50	3.50
Longitud de avance promedio	und.		2.66	3.45
Eficiencia de avance	%		76%	99%
Número de voladuras para cumplimiento	und.		267	206
Diferencia Voladuras	und.			61

Cumplimiento de avance de 4.5 m x 4.3 m:

Tabla 18. Cumplimiento de avances para sección de 4.5 m x 4.3 m.

DESARROLLO HORIZONTAL		4.5 M X 4.3 M	Programa Mensual	40
Parámetros	Unidad		ANFO	EMULTEX PDBG
Sección	m. x m.		4.5 x 4.3	4.5 x 4.3
Área sección	m ²		18.83	18.83
Perímetro Sección	m.		17.36	17.36
Sobrerotura	%		14%	2%
Densidad roca	g/cc		2.80	2.80
Longitud de perforación promedio	m.		3.80	3.80
Longitud de avance promedio	und.		2.93	3.76
Eficiencia de avance	%		77%	99%
Número de voladuras para cumplimiento	und.		14	11
Diferencia Voladuras	und.			3

Se observa que según la proyección de avances para desarrollar el programa de 710 m en secciones de 3.0 m x 3.5 m y 40 para secciones 4.5 m x 4.3 m, la aplicación de la emulsión Emultex PDBG permite realizar 61 y 3 voladuras menos respectivamente para cada tipo de sección, lo cual generará ahorros en los costos globales operativos.

7.3.3 Costos operativos

Tomando en cuenta el programa de avances designado para cada tipo de sección se procedió a calcular el total de costos asociados a la operación tanto para el uso de ANFO como para el uso de la emulsión Emultex PDBG.

Costos de perforación:

El costo de perforación es aquel costo asociado al uso de la maquinaria e insumos de las perforados que se utilizan en el proceso de perforación de los frentes de desarrollo, en la operación se contaba con los siguientes equipos a los cuales corresponden los costos de perforación:

- Perforadora Sandvik DD210
- Perforadora Muki FF

Tabla 19. Costo de perforación para secciones de 3.0 m x 3.5 m.

DESARROLLO HORIZONTAL		3.0 M X 3.5 M	
Perforación	Unidad	ANFO	Emultex PDBG
Diametro de perforacion	mm	45	45
Longitud de perforacion	m	3.5	3.5
N° Taladros rimados	und.	4	3
N° Taladros Arranque	und.	4	4
N° Taladros Producción (ayudas, cuadrado)	und.	18	16
N° Taladros arrastres	und.	4	4
N° Taladros hastiales	und.	4	4
N° Taladros corona	und.	5	5
Total taladros cargados x voladura	und.	35	33
Rendimiento de perforacion	mperf./hr	50	50
Tiempo Perforacion	hr/frente	2.7	2.5
Costo Unitario Perforacion	USD/m	4.00	4.00
Costo Perforación		USD 145,782.00	USD 103,824.00
Ahorro Perforación			USD 41,958.00

Se observa en la Tabla 19 que se obtuvo un costo total de perforación para el programa de avance de 710 m para la sección de 3.0 m x 3.5 m de 145,782 USD con el uso de ANFO y 103,824 USD con el uso de Emultex PDBG; obteniendo como resultado un ahorro en el costo de perforación de 41,958 USD debido al uso de emulsión Emultex PDBG.

Tabla 20. Costo de perforación para secciones de 4.5 m x 4.3 m.

DESARROLLO HORIZONTAL		4.5 M X 4.3 M	
Perforación	Unidad	ANFO	Emultex PDBG
Diametro de perforacion	mm	45	45
Longitud de perforacion	m	3.8	3.8
N° Taladros rimados	und.	4	4
N° Taladros Arranque	und.	5	4
N° Taladros Producción (ayudas, cuadrado)	und.	23	23
N° Taladros arrastres	und.	5	5
N° Taladros hastiales	und.	4	4
N° Taladros corona	und.	5	3
Total taladros cargados x voladura	und.	42	39
Rendimiento de perforacion	mperf./hr	75	75
Tiempo Perforacion	hr/frente	2.3	2.2
Costo Unitario Perforacion	USD/m	4.00	4.00
Costo Perforación		USD 9,788.80	USD 7,189.60
Ahorro Perforación			USD 2,599.20

Se observa en la Tabla 20 que se obtuvo un costo total de perforación para el programa de avance de 40 m para la sección de 4.5 m x 4.3 m de 9,788.8 USD con el uso de ANFO y 7,189.6 USD con el uso de Emultex PDBG; obteniendo como resultado un ahorro en el costo de perforación de 2,599.2 USD debido al uso de emulsión Emultex PDBG.

Costo de explosivos y accesorios:

El costo de explosivos y accesorios es aquel costo asociado al consumo de explosivos y accesorios de voladura utilizados durante las voladuras realizadas para el cumplimiento del programa de avances designado por tipo de sección.

Tabla 21. Costo de explosivos y accesorios para secciones de 3.0 m x 3.5 m.

DESARROLLO HORIZONTAL		3.0 M X 3.5 M	
Explosivos y Accesorios	Unidad	ANFO	Emultex PDBG
Tipo Explosivo		ANFO	EMULTEK PDBG
Tipo de detonador		No eléctrico	No eléctrico
Tipo de Cebo		IBEGEL 1 1/2 X 16	IBEGEL 1 1/2 X 16
Tipo explosivo perimetral (Corona)		ANFO	EMULTEK PDBG
Densidad a granel (Arranque, prod, Arrastr)	g/cc	0.85	1.15
Densidad a granel (contorno)	g/cc	0.85	1.15
Densidad de carga lineal (Arranque, prod, A)	kg/m	1.35	1.83
Densidad de carga lineal (Contorno)	kg/m	1.35	1.83
Explosivo encartuchado x voladura	kg/voladura	37.6	6.2
Explosivo EMULFRAG x voladura	kg/voladura		150.0
Explosivo ANFO x voladura	kg/voladura	100.0	
Total de explosivos x voladura	kg/voladura	137.6	156.2
Total detonadores no eléctricos x voladura	und/voladura	35.0	33.0
total Famer corte E20 x voladura	kg/voladura		0.0
Cordón detonante x voladura	m/voladura	20.0	20.0
Mecha de seguridad	und/voladura	2.0	2.0
Explosivo a granel x programa	tn		30.9
Emulsión Encartuchada x programa	tn	36.75	1.27
Detonadores No Electricos x programa	und.	9345.00	6798.00
Costo x voladura	USD/voladura	284	370
Ahorro Explosivos x voladura	USD/voladura		-86
Costo Explosivos & Accesorios		USD 75,895.23	USD 76,236.29
Ahorro Explosivos			USD -341.06

Se observa en la Tabla 21 que se obtuvo un costo total de explosivos y accesorios para el programa de avance de 710 m para la sección de 3.0 m x 3.5 m de 75,895.23 USD con el uso de ANFO y 76,236.29 USD con el uso de Emultex PDBG; obteniendo como resultado una diferencia en el costo de explosivos y accesorios de 341.06 USD debido al uso de emulsión Emultex PDBG.

Tabla 22. Costo de explosivos y accesorios para secciones de 4.5 m x 4.3 m.

DESARROLLO HORIZONTAL 4.5 M X 4.3 M			
Explosivos y Accesorios	Unidad	ANFO	Emultex PDBG
Tipo Explosivo		ANFO	EMULTEX PDBG
Tipo de detonador		No eléctrico	No eléctrico
Tipo de Cebo		IBEGEL 1 1/2 X 16	IBEGEL 1 1/2 X 16
Tipo explosivo perimetral (Corona)		ANFO	EMULTEX PDBG
Densidad a granel (Arranque, prod, Arrast)	g/cc		1.11
Densidad a granel (contorno)	g/cc		1.11
Densidad de carga lineal (Arranque, prod,	kg/m		1.77
Densidad de carga lineal (Contorno)	kg/m		1.77
Explosivo encartuchado x voladura	kg/voladura	172.1	15.7
Explosivo EMULFRAG x voladura	kg/voladura		192.0
Total de explosivos x voladura	kg/voladura	172.1	207.7
Total detonadores no eléctricos x voladura	und/voladura	42.0	39.0
total Famer corte E20 x voladura	kg/voladura		0.0
Cordón detonante x voladura	m/voladura	65.0	65.0
Mecha de seguridad	und/voladura	2.0	2.0
Explosivo a granel x programa	tn		2.1
Emulsión Encartuchada x programa	tn	2.41	0.17
Detonadores No Electricos x programa	und.	588.00	429.00
Costo x voladura	USD/voladura	608	499
Ahorro Explosivos x voladura	USD/voladura		109
Costo Explosivos & Accesorios		USD 8,510.97	USD 5,493.46
Ahorro Explosivos			USD 3,017.51

Se observa en la Tabla 22 que se obtuvo un costo total de explosivos y accesorios para el programa de avance de 40 m para la sección de 4.5 m x 4.3 m de 8,510.97 USD con el uso de ANFO y 5,493.46 USD con el uso de Emultex PDBG; obteniendo como resultado un ahorro en el costo de explosivos y accesorios de 3,017.51 USD debido al uso de emulsión Emultex PDBG.

Costo de extracción de material adicional:

El costo de extracción de material adicional es aquel costo asociado a la extracción de material adicional generado por la sobrerotura obtenida en los frentes de desarrollo, el equipo que desarrollaba dicha tarea era un CAT R1600H de 6 yardas cúbicas.

Tabla 23. Costo de extracción de material adicional para secciones de 3.0 m x 3.5 m.

DESARROLLO HORIZONTAL 3.0 M X 3.5 M			
Extracción material adicional	Unidad	ANFO	Emultex PDBG
Volumen Teórico a remover x programa mensual	m3	7254	7254
Volumen adicional sobreexcavacion x programa	m3/programa	725	210
Rendimiento del LHD 6yd3	m3/hr	32.14285714	32.14285714
Tiempo adicional extracción x voladura	hr/programa	22.57	6.54
Costo extracción (scoop+operator)	USD/hr	96	96
Costo Extracción Material Adicional		USD 2,166.44	USD 628.27
Ahorros extraccion			USD 1,538.17

Se observa en la Tabla 23 se obtuvo un costo total de extracción de material adicional para el programa de avance de 710 m para la sección de 3.0 m x 3.5 m de 2,166.44 USD con el uso de ANFO y 628.27 USD con el uso de Emultex PDBG; obteniendo como resultado un ahorro en el costo de extracción de material adicional de 1,538.17 USD debido al uso de emulsión Emultex PDBG.

Tabla 24. Costo de extracción de material adicional para secciones de 4.5 m x 4.3 m.

DESARROLLO HORIZONTAL 4.5 M X 4.3 M			
Extracción material adicional	Unidad	ANFO	Emultex PDBG
Volumen Teórico a remover x programa mensual	m3	753	753
Volumen adicional sobreexcavacion x programa	m3/programa	105	16
Rendimiento del LHD 6yd3	m3/hr	32.14285714	32.14285714
Tiempo adicional extracción x voladura	hr/programa	3.28	0.49
Costo extracción (scoop+operator)	USD/hr	96	96
Costo Extracción Material Adicional		USD 314.90	USD 47.23
Ahorros extraccion			USD 267.66

Se observa en la Tabla 24 que se obtuvo un costo total de extracción de material adicional para el programa de avance de 710 m para la sección de 4.5 m x 4.3 m de 314.9 USD con el uso de ANFO y 47.23 USD con el uso de Emultex PDBG; obteniendo como resultado un ahorro en el costo de extracción de material adicional de 267.66 USD debido al uso de emulsión Emultex PDBG.

Costo de transporte de material adicional:

El costo de transporte de material adicional es aquel costo asociado al transporte de material adicional generado por la sobrerotura obtenida en los frentes de desarrollo, el equipo que desarrollaba dicha tarea era un Dumper de 10 toneladas de capacidad.

Tabla 25. Costo de transporte de material adicional para secciones de 3.0 m x 3.5 m.

DESARROLLO HORIZONTAL		3.0 M X 3.5 M	
Transporte Material Adicional	Unidad	ANFO	Emultex PDBG
Volumen Teórico a remover x voladura	m3	7254	7254
Volumen adicional x sobreexcavacion	m3 / programa	725	210
Tonelaje adicional	tn/programa	2031	589
Capacidad Camion	tn/viaje	30	30
Viajes x programa	viaje/programa	68	20
Tiempo transporte x viaje	hr/ viaje	1	1
Tiempo Adicional transporte	hr/programa	68	20
Costo Transporte (Camion c/Operator)	USD/hr	2	2
Costo Transporte Material Adicional		USD 3,391.84	USD 983.63
Ahorros Transporte			USD 2,408.20

Se observa en la Tabla 25 que se obtuvo un costo total de transporte de material adicional para el programa de avance de 710 m para la sección de 3.0 m x 3.5 m de 3,391.84 USD con el uso de ANFO y 983.63 USD con el uso de Emultex PDBG; obteniendo como resultado un ahorro en el costo de extracción de material adicional de 2,408.20 USD debido al uso de emulsión Emultex PDBG.

Tabla 26. Costo de transporte de material adicional para secciones de 4.5 m x 4.3 m.

DESARROLLO HORIZONTAL		4.5 M X 4.3 M	
Transporte Material Adicional	Unidad	ANFO	Emultex PDBG
Volumen Teórico a remover x voladura	m3	753	753
Volumen adicional x sobreexcavacion	m3 / programa	105	16
Tonelaje adicional	tn/programa	295	44
Capacidad Camion	tn/viaje	30	30
Viajes x programa	viaje/programa	10	1
Tiempo transporte x viaje	hr/ viaje	1	1
Tiempo Adicional transporte	hr/programa	10	1
Costo Transporte (Camion c/Operator)	USD/hr	2	2
Costo Transporte Material Adicional		USD 16.70	USD 1.67
Ahorros Transporte			USD 15.03

Se observa en la Tabla 26 que se obtuvo un costo total de transporte de material adicional para el programa de avance de 40 m para la sección de 4.5 m x 4.3 m de 16.70 USD con el uso de ANFO y 1.67 USD con el uso de Emultex PDBG; obteniendo como resultado un ahorro en el costo

de extracción de material adicional de 15.03 USD debido al uso de emulsión Emultex PDBG.

Costo de sostenimiento:

El análisis del costo de sostenimiento no se considera dentro de este análisis debido a que las condiciones de la unidad minera en la cual se realizó la investigación contaba con una calidad de roca buena con RMR de 70 – 80, por lo cual el sostenimiento en los frentes de desarrollo era de forma puntual cuando existía alguna presencia de cuñas.

Costo de personal por carguío:

Para el cálculo de este costo se consideró la cantidad de personal de carguío y el tiempo de carguío usado durante el proceso de carguío, el costo total de carguío se aprecia en la Tabla 27.

Tabla 27. Costo total de carguío por cada tipo de explosivo.

Costo personal por carguío	Unidad	ANFO	EMULTEX PDBG
Personal involucrado	unidades	4	2
Voladuras requeridas x programa	voladuras/programa	281	217
Tiempo de Carguío	hr	1	0.387666667
Tiempo de ventilacion	hr	1.0	0.5
Tiempos perdidos x Evento	hr/voladura	2.00	0.89
Diferencia	hr/voladura		1.1
Tiempo perdido	hr/programa	120.0	53.3
Costo Promedio Minero	USD/hr	4.3	4.3
Costo total de personal por carguío	USD/mes	6,670.2	1,754.1
Ahorros costo de personal por carguío	USD/mes		4,916.1

Se observa en la Tabla 27 que se obtuvo un costo total de personal de carguío para el programa total de 750 m para ambas secciones es de 6,670.2 USD con el uso de ANFO y 1,754.1 USD con el uso de Emultex PDBG; obteniendo como resultado un ahorro en el costo de personal de carguío de 4,916.1 USD debido al uso de emulsión Emultex PDBG.

7.3.4 Ahorros generados

Los ahorros generados totales por cada costo operativo se observan en la Tabla 28.

Tabla 28. Ahorros mensuales generados por el uso de Emultex PDBG.

AHORROS		
ACTIVIDAD	UNIDAD	AHORRO
Ahorro Perforación	USD/mes	44,557
Ahorro Explosivos	USD/mes	2,676
Ahorros Sostenimiento	USD/mes	NA
Ahorros extracción	USD/mes	1,806
Ahorros Transporte	USD/mes	2,423
Ahorros costo de personal por carguío	USD/mes	4,916
AHORRO TOTAL	USD/mes	56,379

Se observa que mediante el uso de emulsión Emultex PDBG se logra obtener un ahorro mensual de 56,379 USD para un programa de avances mensuales de 710 m y 40 m para secciones de 3.0 m x 3.5 m y 4.5 m x 4.3 m respectivamente.

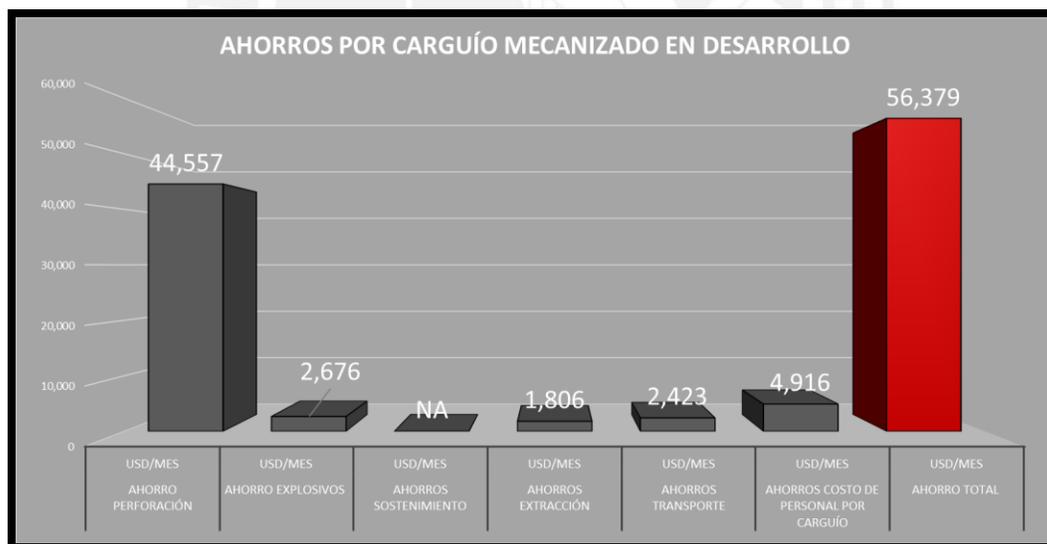


Figura 53. Representación gráfica de ahorros generados por el uso de Emultex PDBG.

De los ahorros obtenidos se observa que el ahorro obtenido más significativo es el de perforación, ya que este representa el 79% del ahorro total obtenido; esto debido principalmente a la reducción de taladros obtenida mediante el uso de la emulsión Emultex PDBG.

VIII. CONCLUSIONES

- Se demostró que la aplicación de emulsión a granel Emultex PDBG como columna de carga para voladuras en frentes de desarrollo es factible; además, con su aplicación se generan beneficios económicos, operativos y en gestión de seguridad. Asimismo, la Unidad Minera Dacar quedó conforme con la demostración de valor generado con el uso de emulsión a granel Emultex PDBG, por lo cual decidió implementar dicho producto tecnológico al 100% en su operación para voladuras de desarrollo horizontal.
- Respecto a los beneficios que ofrece el uso de emulsión a granel que hicieron factible su aplicación se tiene los siguientes:
 - Se obtuvo un tiempo de carguío en secciones de 3.0 m x 3.5 m y 4.5 m x 4.3 m de 19 y 28 minutos respectivamente con el Equipo UBT-XS, lo cual representa una reducción de tiempo de carguío respecto a los carguíos desarrollados con ANFO en 62% y 60%, esto gracias a los beneficios que representa el uso de un equipo de carguío mecanizado que en este caso fue el UBT-XS.
 - Se obtuvo una eficiencia de avance de 99% para secciones de 3.0 m x 3.5 m y 4.5 m x 4.3 m con el uso de emulsión a granel Emultex PDBG, lo cual representa un mayor avance obtenido respecto al uso de ANFO en un 30% para ambas secciones anteriormente mencionadas, este beneficio suma valor a la operación, ya que reduce los costos globales de la operación, para este caso estudiado con la aplicación de Emultex PDBG se realizaron voladuras en material estéril por lo cual los costos asociados son los del ciclo de minado; para casos de voladuras en mineral se tendría que evaluar adicionalmente el valor agregado generado en planta.

- Se obtuvo un factor de carga equivalente en ANFO de 37.7 Kg/ml y 51.6 Kg/ml para secciones de 3.0 m x 3.5 m y 4.5 m x 4.3 m con el uso de emulsión a granel Emultex PDBG, lo cual representa un menor factor de carga equivalente obtenido respecto al uso de ANFO en un 10% y 4% respectivo a las secciones mencionadas; esta reducción de factor de carga es posible gracias a las características de la emulsión a granel (alta energía y poder rompedor) y su aprovechamiento en el desarrollo de voladuras, ya que gracias a su 100% de acoplamiento en el taladro es posible maximizar la utilización de energía que este produce durante la voladura.
- De las voladuras realizadas con Emultex PDBG se obtuvo una sobrerotura de 2.9% y 2.1 % en secciones de 3.0 m x 3.5 m y 4.5 m x 4.3 m respectivamente, lo cual representa una reducción de la sobrerotura en un 71% y 85% respecto a las voladuras realizadas con ANFO; asimismo, el hecho de producir una menor cantidad de material en el frente facilita y agiliza el carguío y acarreo de dicho material.
- Respecto a la fragmentación del material post voladura realizado con emulsión bombeable, se obtuvo un P80 de 5.764 pulgadas, lo cual se traduce a una reducción de 54% respecto a la fragmentación obtenida con el uso de ANFO. Esto mismo garantiza una correcta granulometría según es requerido en planta, dicho parámetro es 8 pulgadas. Para este caso analizado en la investigación esta fragmentación obtenida demostró que la emulsión brinda una granulometría (P80) por debajo de lo que planta requiere (8 pulgadas), por lo cual de haberse aplicado este explosivo en mineral no se tendría problemas con el sobretamaño de rocas.

- Respecto a los gases post voladura obtenidos con la emulsión a granel Emultex PDBG, se produjo un 90% menos de dióxido de nitrógeno (NO₂), un 43% menos de dióxido de carbono (CO₂) y 3% menos de monóxido de carbono (CO); esto hace posible y garantiza que no exista presencia de gases post voladura posterior a 35 minutos de ventilada la labor, lo cual genera una disminución de tiempo de reingreso del personal respecto a los gases generados por el ANFO.
- Se demostró que la aplicación de la emulsión a granel puede generar un ahorro total anual de 676,546 USD para un programa de avances de 750 m programados para labores de desarrollo de sección de 3.0 m x 3.5 m (710 m) y 4.5 m x 4.3 m (40 m). Los costos asociados beneficiados por el uso de emulsión a granel fueron los costos de perforación, explosivos & accesorios, extracción de material adicional, transporte de material adicional y personal de carguío. Para esta investigación no se consideró los costos de sostenimiento debido a que no existía un sostenimiento continuo en la unidad minera por el tipo de roca que esta presentaba y tampoco el costo asociado a la planta, ya que el material en donde se realizó las voladuras fue material estéril en su mayoría. Esto implica que aún se pueden generar más ahorros en la operación una vez su calidad de roca disminuya.
- Se demostró que la aplicación de emulsión a granel mejora la gestión de seguridad en la operación de la siguiente forma:
 - Reducción del tiempo de exposición del personal durante el carguío de frentes de desarrollo.
 - Reducción de exposición del personal a los gases post voladura debido a una menor concentración de gases generados por la emulsión Emultex PDBG en comparación con el ANFO.

- Eliminación del manipuleo y control de pérdida de explosivos, ya que la emulsión bombeable Emultex PDBG se transforma en explosivo en boca de taladro, antes de ello es transportada como una emulsión matriz no sensibilizada (agente oxidante).
- Eliminación de remanentes en el frente de voladura, debido a que el Equipo UBT-XS fabrica el explosivo requerido exacto por frente.



IX. BENEFICIOS ADICIONALES GENERADOS

Luego de haber sido demostrada la factibilidad de la aplicación de emulsión a granel, se obtuvieron los siguientes beneficios adicionales respecto al uso de este tipo de emulsión:

- Cero generaciones de residuos sólidos peligrosos, es decir, cajas y envolturas de explosivos. Esto debido a que la emulsión matriz es transportada en todo momento mediante bines reutilizables de 1.25 toneladas de capacidad.
- Control exacto de la cantidad de explosivo utilizado en las voladuras realizadas con emulsión a granel, esto gracias a los reportes generados por el PLC del equipo UBT-XS que almacena toda la información de carguío de frentes.
- Mecanización del proceso de traslado de explosivos, ya que la emulsión matriz es transportada en todo momento en los bines y el equipo UBT-XS, eliminando así la estiba y desestiba convencionalmente realizada para el desarrollo de voladuras ya sea con ANFO o productos encartuchados.

X. RECOMENDACIONES

Con el fin de enriquecer el conocimiento acerca del uso de emulsión a granel y qué otros beneficios asociados podrían generar, se recomienda los siguientes estudios que complementarían a la presente investigación desarrollada:

- Realizar el comparativo del uso de emulsión a granel respecto al uso de productos encartuchados convencionalmente usados (emulsión encartuchada).
- Realizar un estudio, en el cual se varíe el diámetro de perforación hacia un diámetro menor, y analizar la factibilidad de este escenario y cómo impacta en los indicadores claves de rendimiento.
- Realizar el análisis de factibilidad del uso de emulsión a granel en el carguío de taladros ascendentes, escenario que representa un reto para la aplicación de emulsión a granel, debido a que la gran minería actual desarrolla voladuras masivas a través de la perforación de taladros tanto negativos como positivos.
- Realizar un estudio de vibraciones generadas por la emulsión a granel y si esta tiene un menor impacto en la generación de caída de rocas respecto al desarrollo de voladuras con productos convencionales (ANFO, productos encartuchados), ya que en la minería subterránea del Perú, el mayor porcentaje de accidentes fatales es debido a la caída de rocas.
- Realizar un estudio del Factor de Mercado en el Perú para el uso de emulsión a granel en minería subterránea, ya que se emplea una cantidad significativa de ANFO y productos encartuchados, los cuales podrían ser reemplazados por la emulsión a granel como se demostró en la presente investigación.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Stiehr, J.F. (2011). *ISEE Blaster Handbook 18th Edition*. Cleveland, OH: *International Society of Explosives Engineers*.
- Russell H. (1984). *Underground Pillar Blasting with Bulk Emulsions Explosives*, pp 1-7.
- Berger E. (1991). *Case Study – Pumpable Emulsion Trials in Tunneling and Stopping*, pp 1-7.
- Thorpe R. (1994). *Productivity Improvements in Longhole Stopping with Repumpable Emulsions*, pp 1-4.
- Ngai W., Scovira S., Kennedy B. (1997). *Chemically Sensitised Bulk Emulsions and Pump Systems Used in Hong Kong Underground Civil Works*, pp 1-9.
- Adamson W.R., Lund A.S. (2001). *On the Use of Mechanistic Blast-Outcome Measurement and Modelling for Optimisation of Explosive Selection in Underground Mining*, pp 1-8.
- Roy D. (2004). *Dino Miner TM APS Underground Explosive Loading System*, pp 1-10.
- Parsons S., Bennett N. (2007). *The Benefits of Bulk Emulsion Explosives in Underground Development Mining*, pp 1-5.
- Ivanova R., Ganster M., Moser P., Bauer F. (2012). *Development of a New Contour Blasting System using Bulk Emulsions*, pp 1-11.
- Pearton S. (2015). *The Application of Pumpable Emulsions in Narrow Reef Stopping*, pp 1-10.
- Jena M. (2018). *Application of Underground Bulk Explosives in Polyethylene Pipes for Perimeter Control*, pp 1-11.
- EXSA (s.f.). *Manual Práctico de Voladura. Edición Especial*.

- Famesa Explosivos. (s.f). Ficha Técnica Emulnor, de <http://www.famesa.com.pe/en/products/high-explosives/emulnor/>.



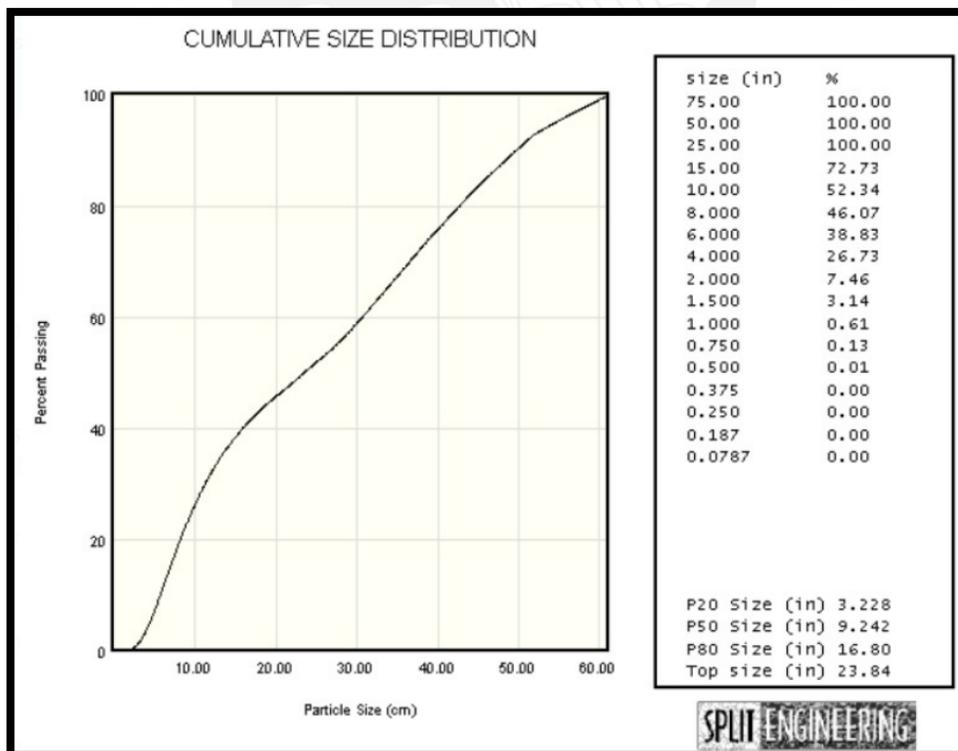
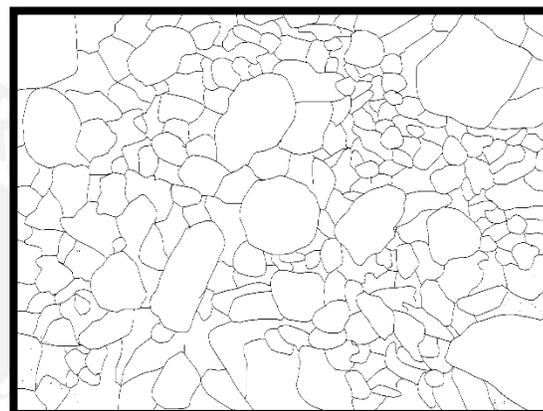
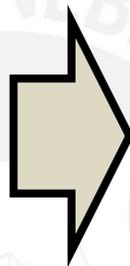
XII. ANEXOS

ANEXO A

Análisis de Fragmentación realizados para el levantamiento de línea base, en donde se utilizó como columna de carga explosiva al ANFO.

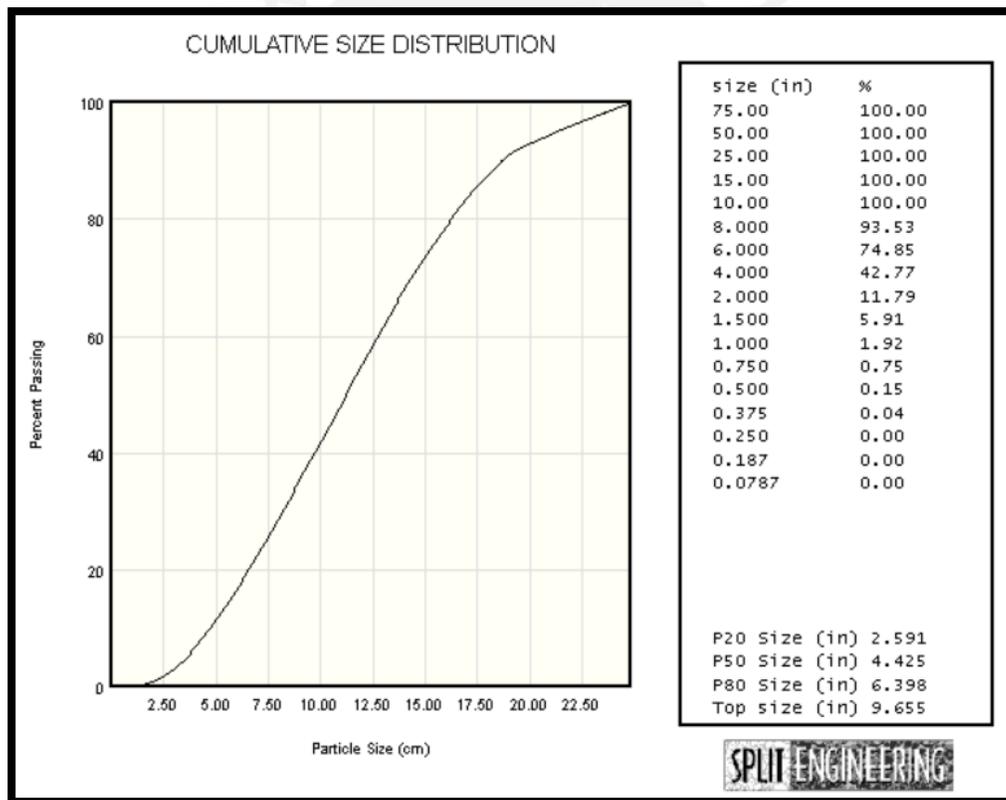
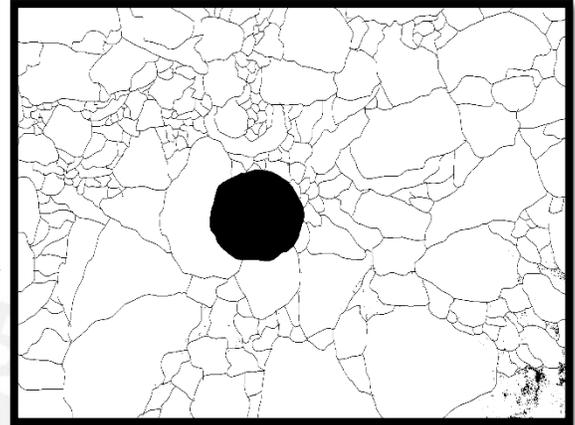
Voladura 01/11/2021:

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering



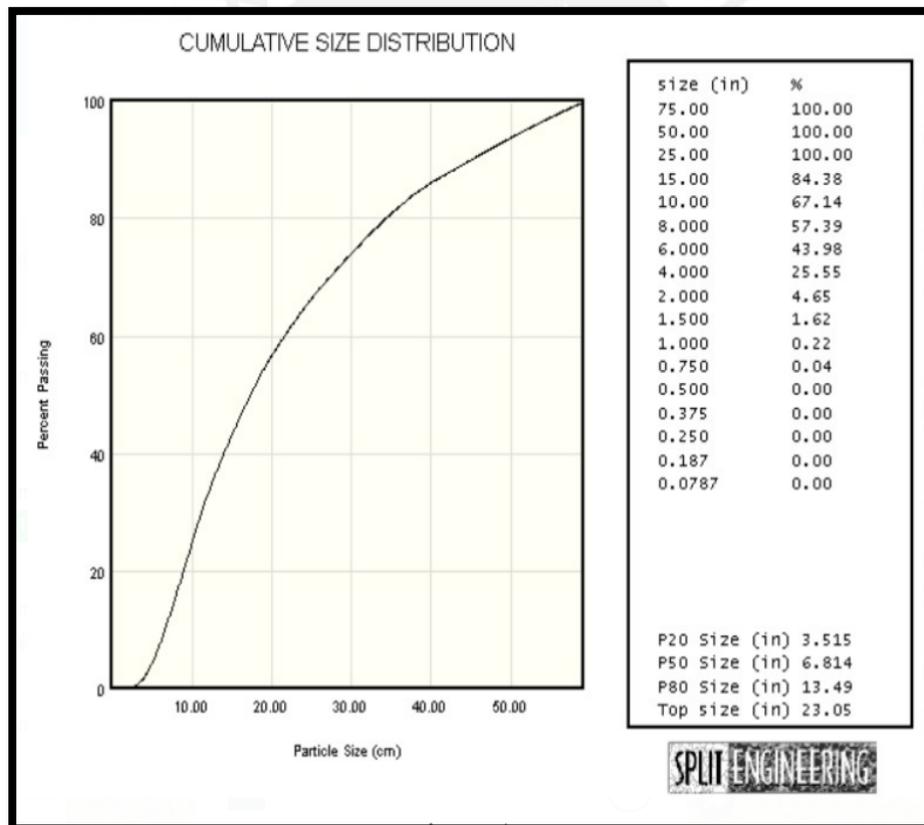
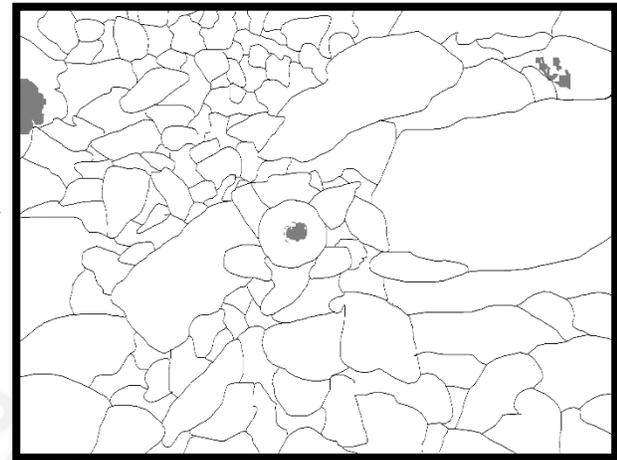
Voladura 02/11/2021

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering



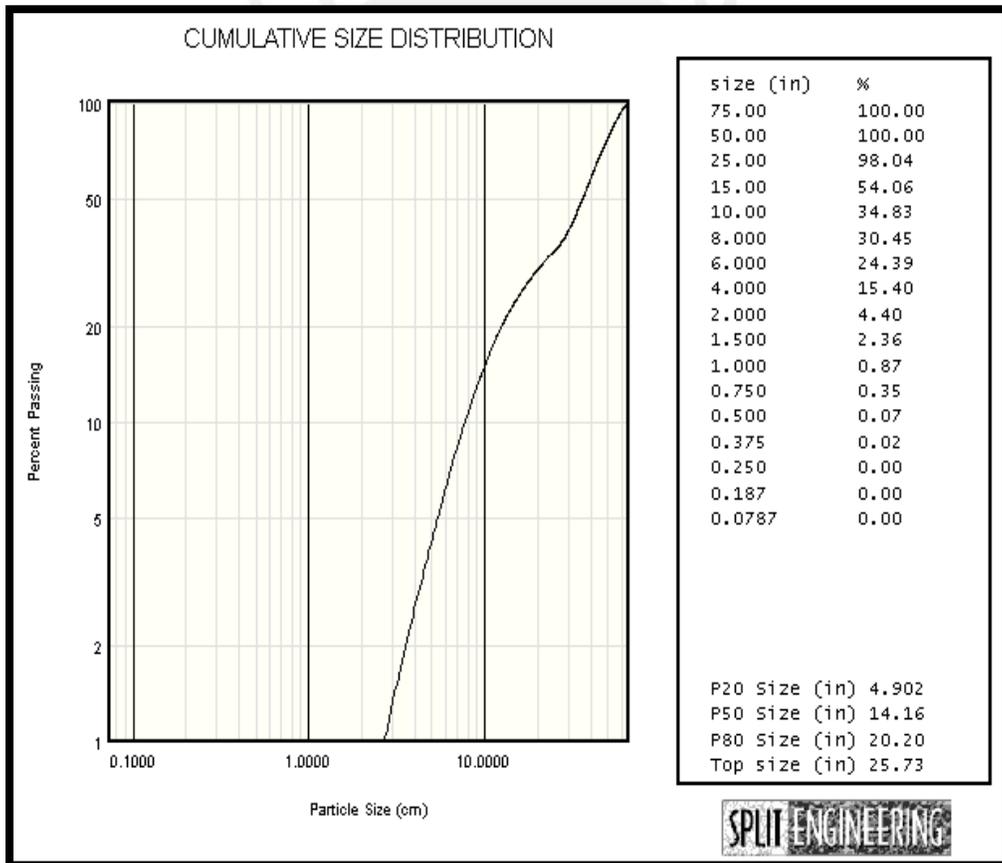
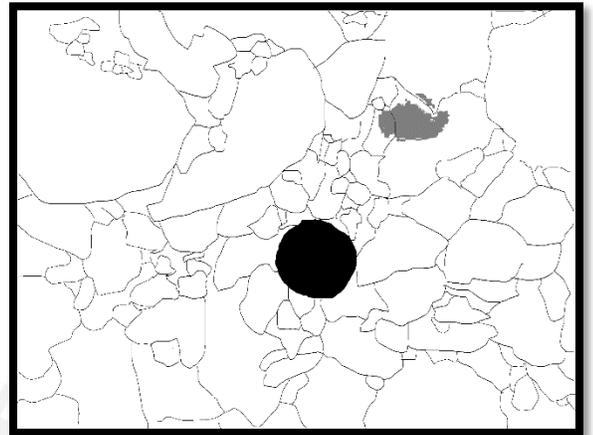
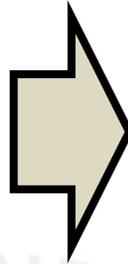
Voladura 03/11/2021

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering



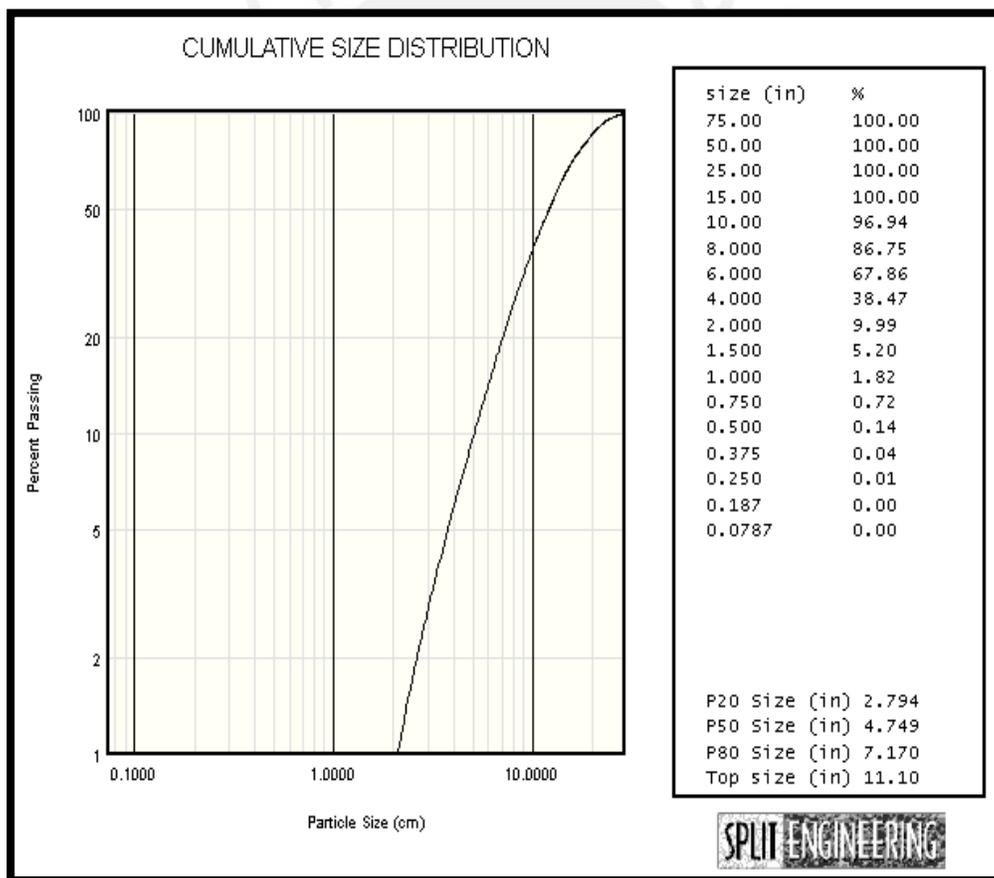
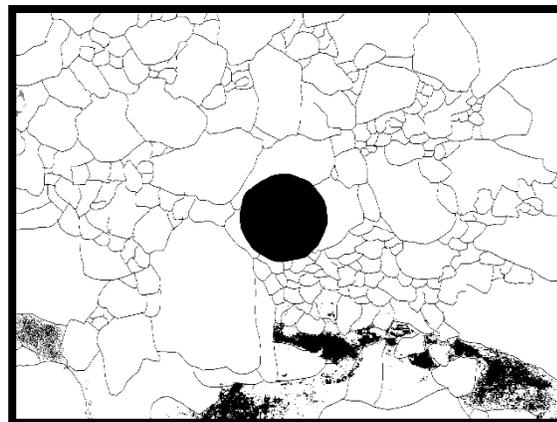
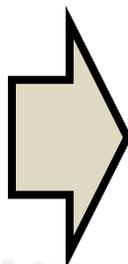
Voladura 04/11/2021

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering



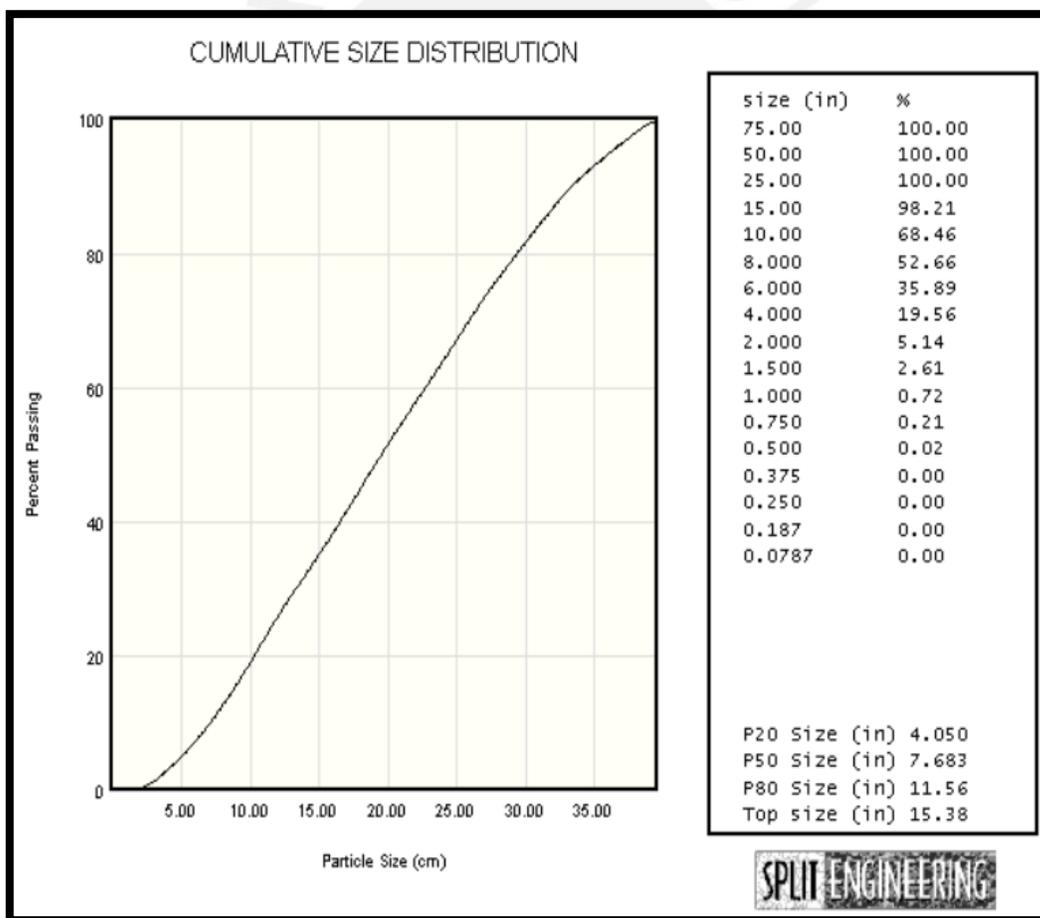
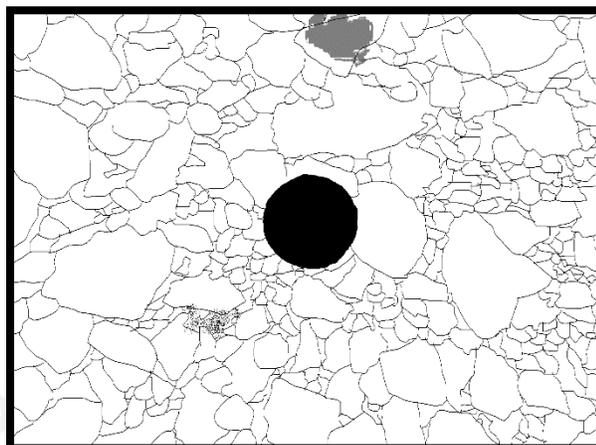
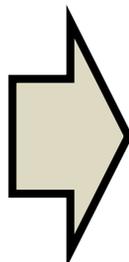
Voladura 05/11/2021

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering



Voladura 08/11/2021

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering

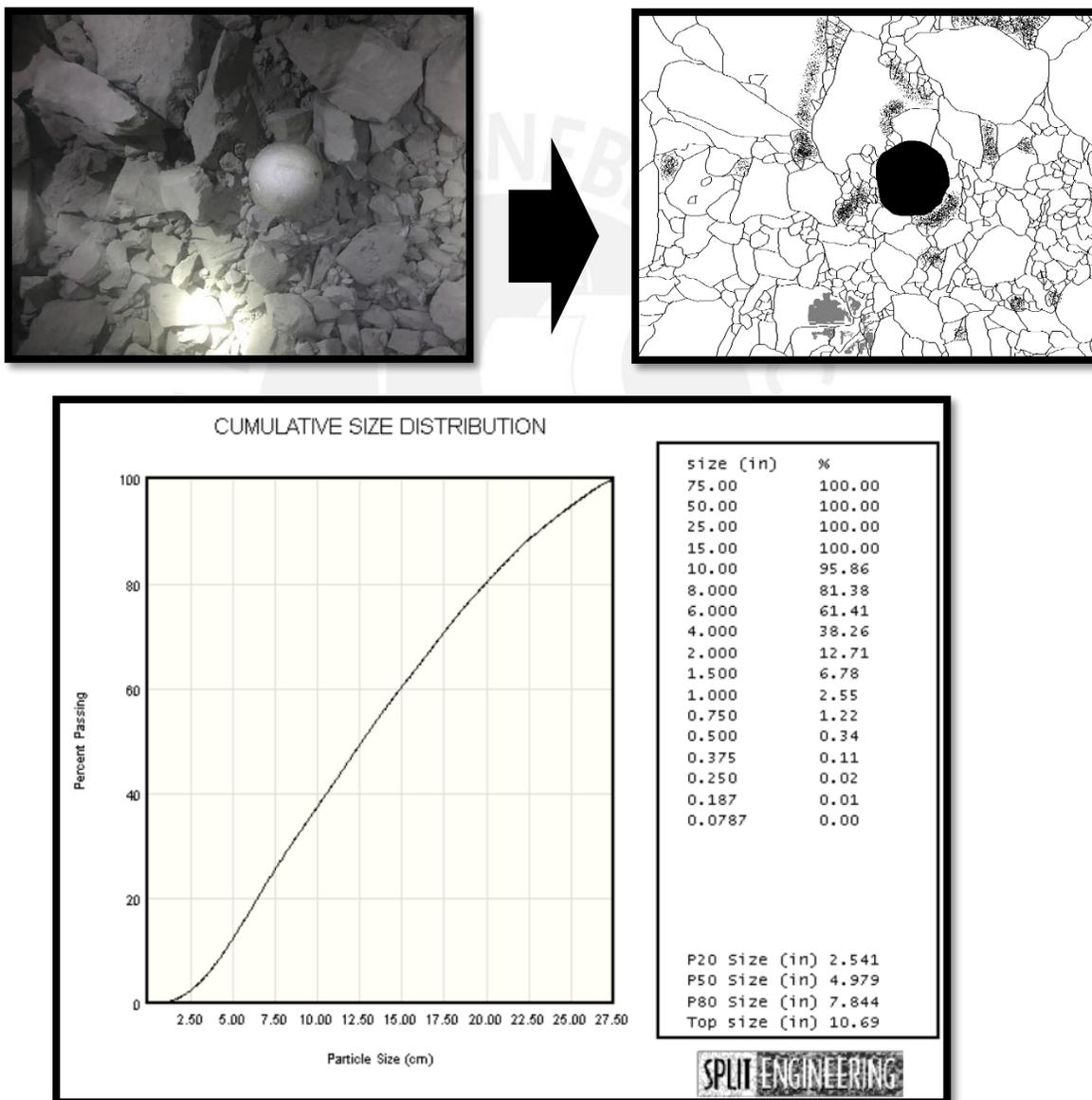


ANEXO B

Análisis de Fragmentación realizados para el levantamiento de línea base, en donde se utilizó como columna de carga explosiva al ANFO.

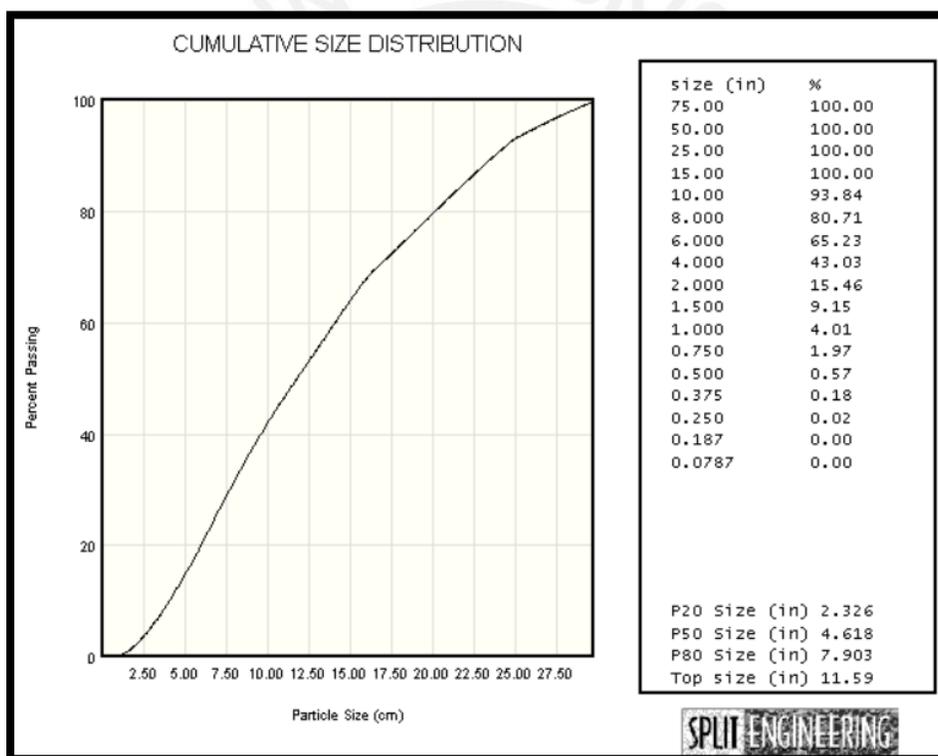
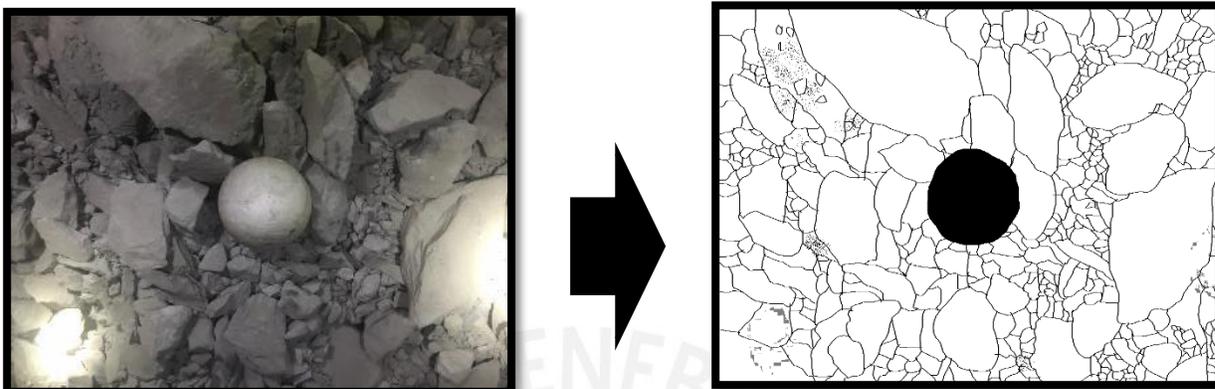
Fragmentación 18/11/2021

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering



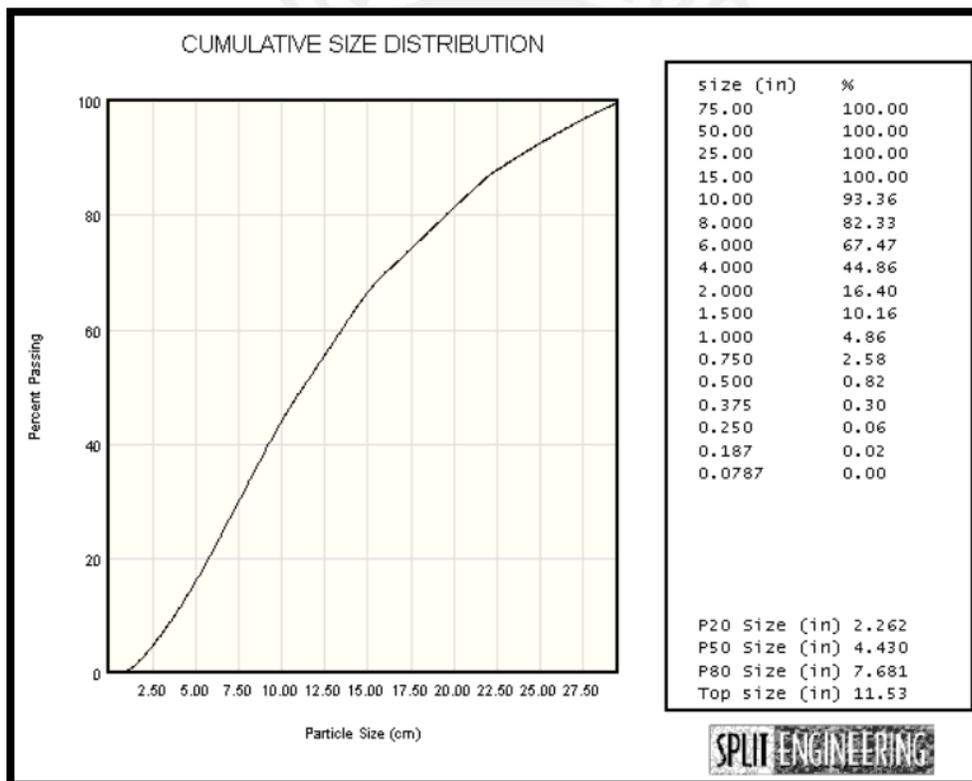
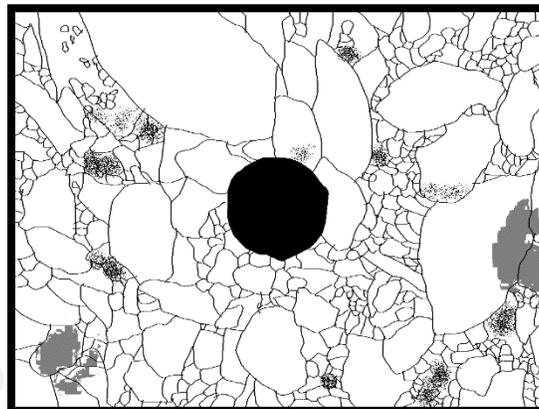
Fragmentación 20/11/2021

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering



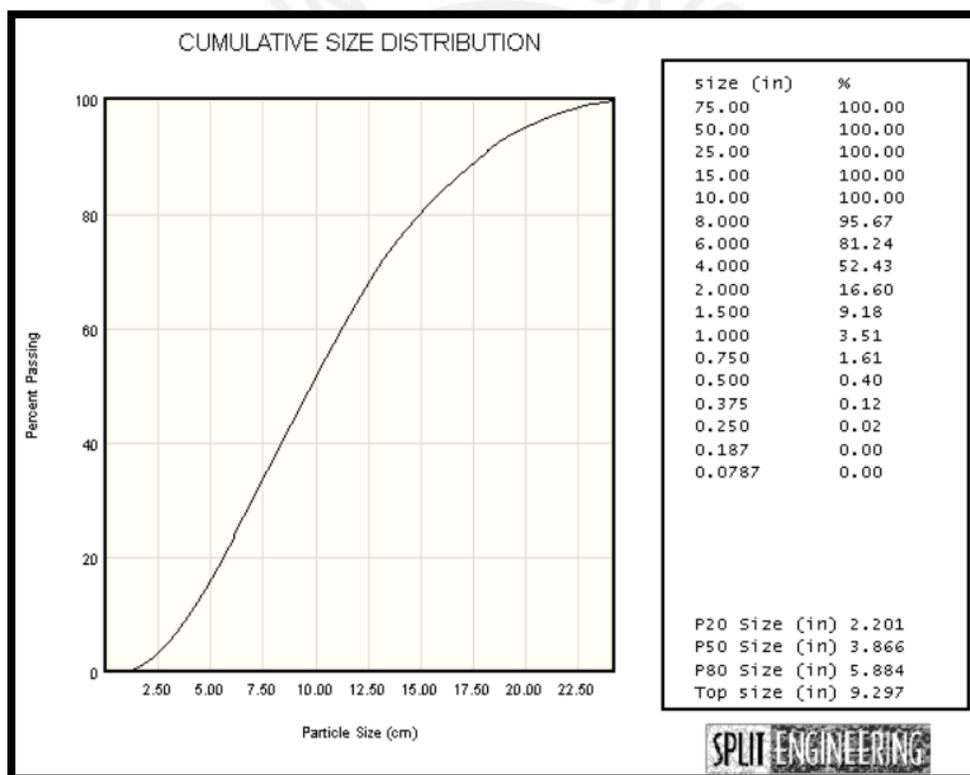
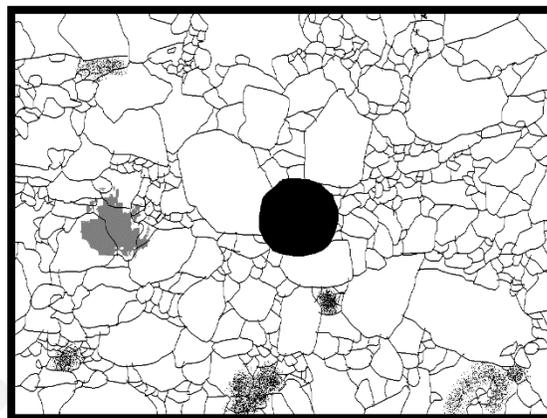
Fragmentación 21/11/2021

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering



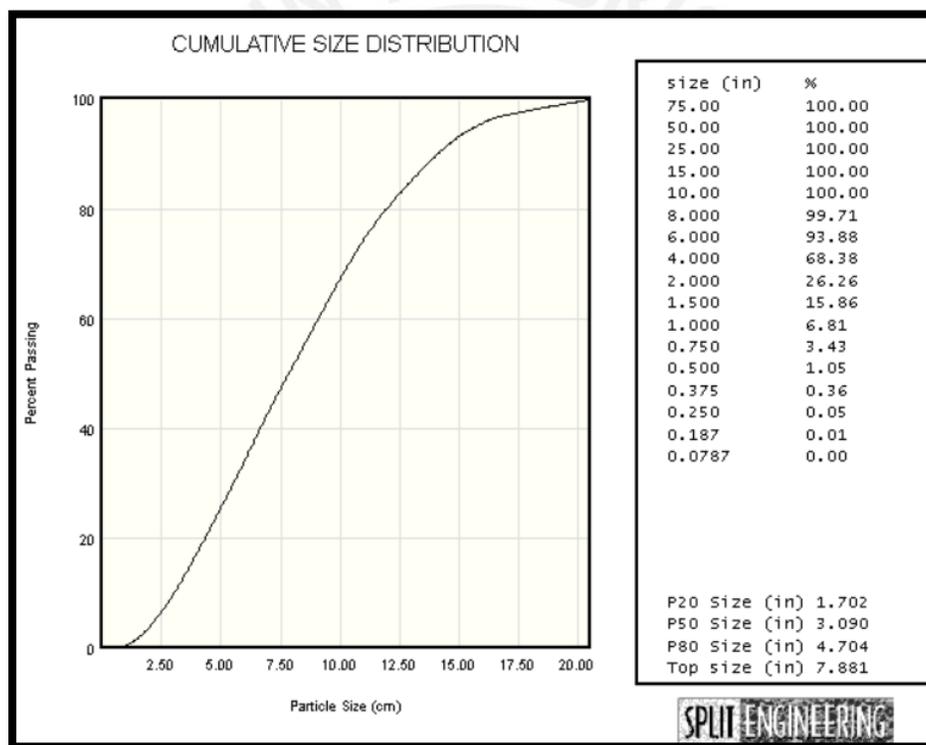
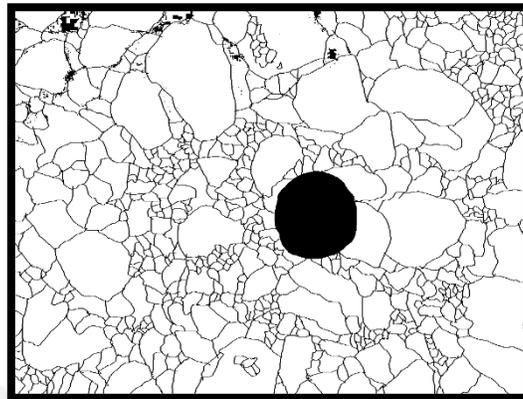
Fragmentación 22/11/2021

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering



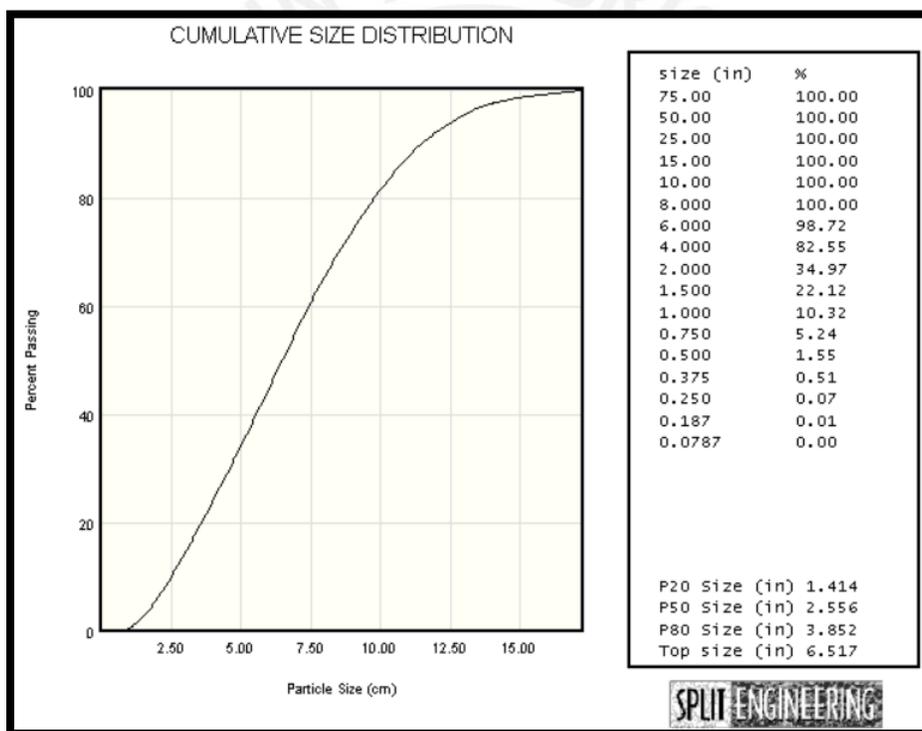
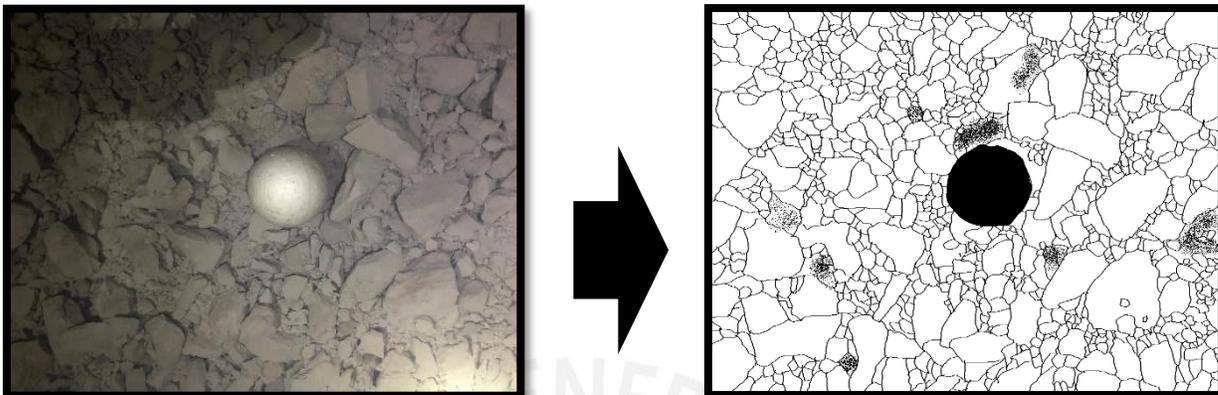
Fragmentación 24/11/2021

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering



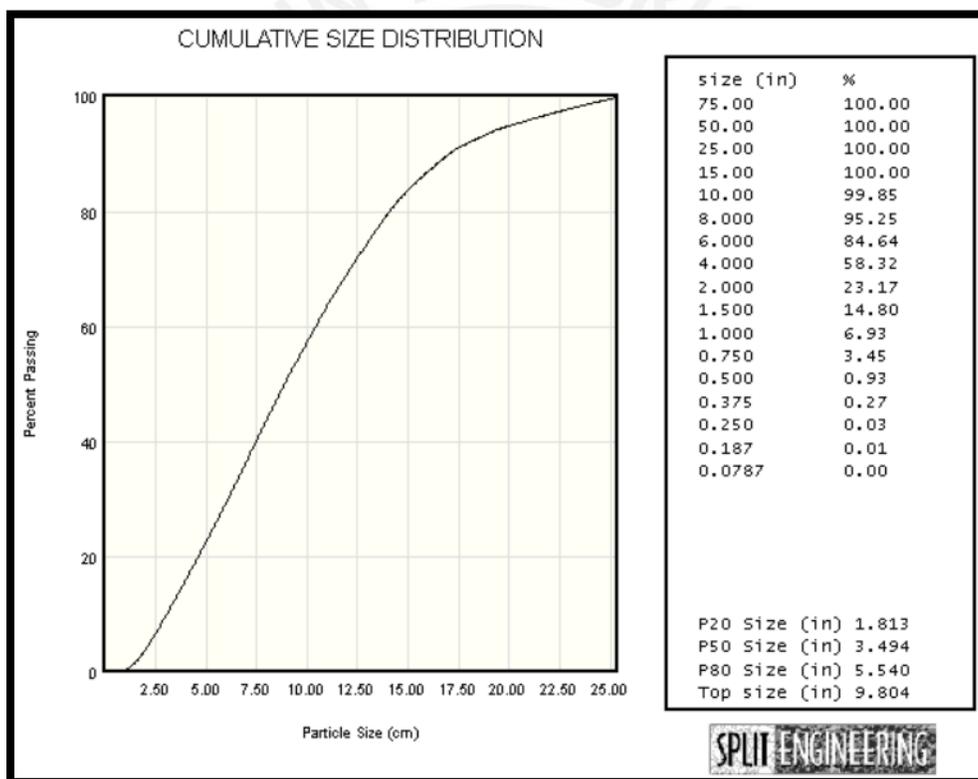
Fragmentación 25/11/2021

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering



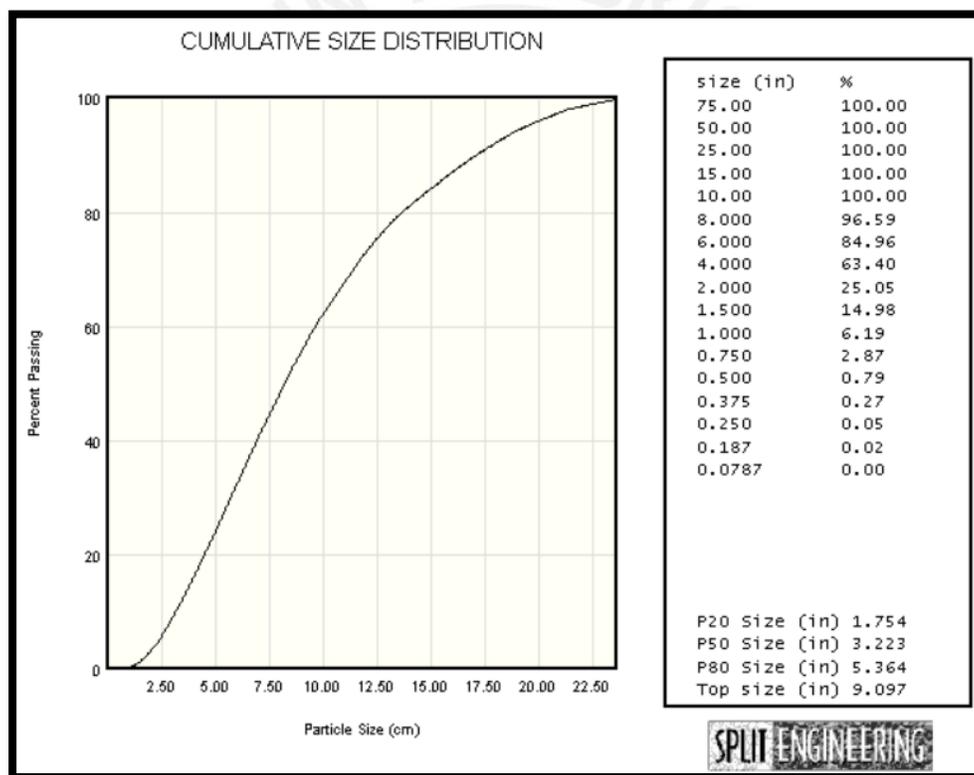
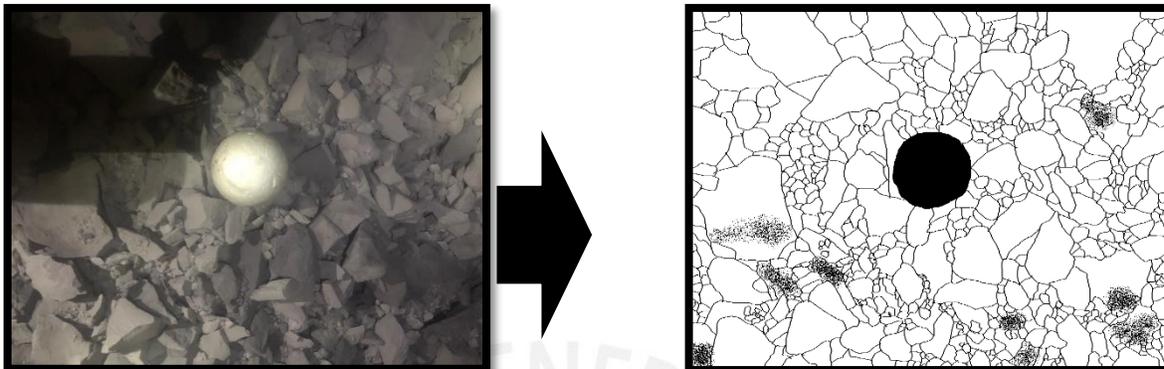
Fragmentación 26/11/2021

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering



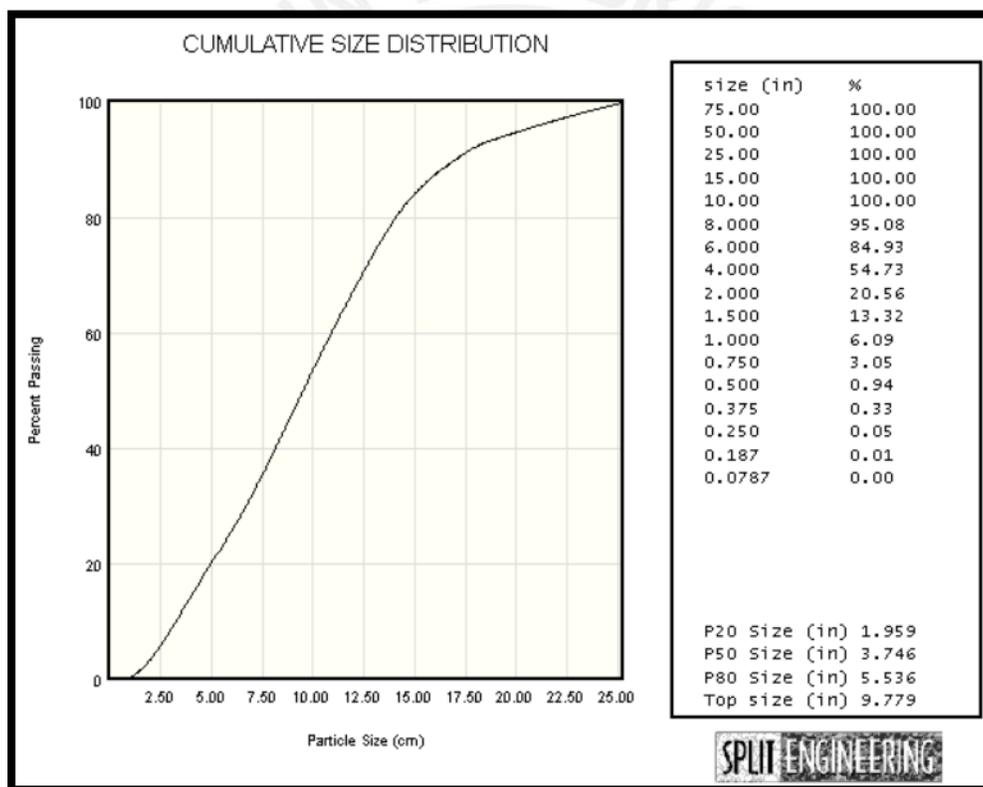
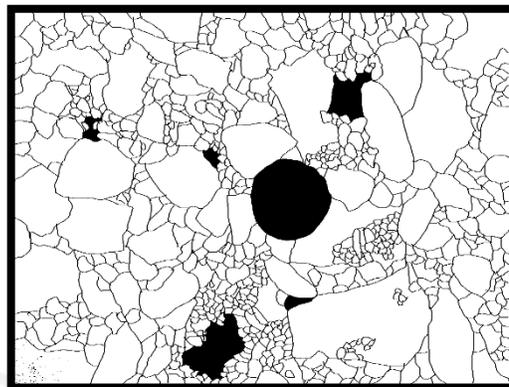
Fragmentación 28/11/2021

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering



Fragmentación 29/11/2021

Imágenes y resultados procesados mediante el programa Split Engineering



ANEXO C

Monitoreo de gases realizados para el levantamiento de línea base, en donde se utilizó como columna de carga explosiva al ANFO.

Voladura 01/11/2021

Resultados de medición con equipo Altair 5X MSA



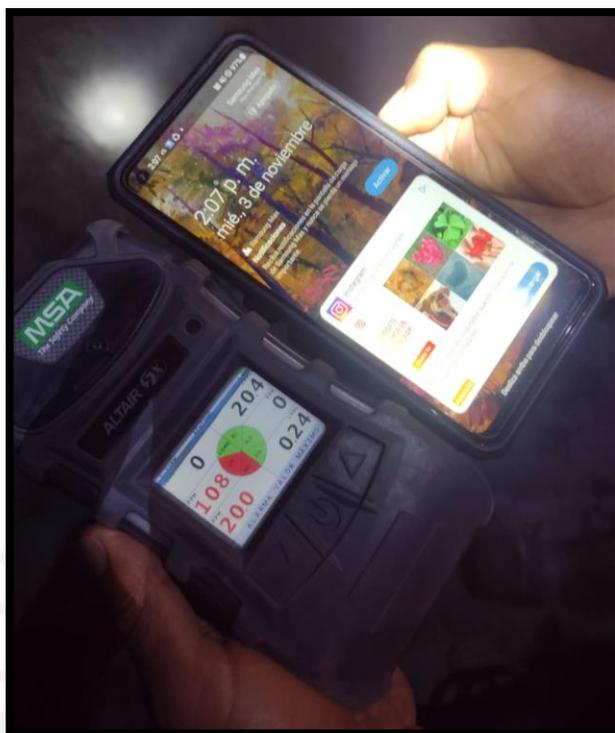
Voladura 02/11/2021

Resultados de medición con equipo Altair 5X MSA



Voladura 03/11/2021

Resultados de medición con equipo Altair 5X MSA



ANEXO D

Monitoreo de gases realizados para el desarrollo de pruebas, en donde se utilizó como columna de carga la emulsión a granel Emultex PDBG.

Voladura 18/11/2021

Resultados de medición con equipo Altair 5X MSA



Voladura 24/11/2021

Resultados de medición con equipo Altair 5X MSA

