

CÁLCULO DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN MACIZO ROCOSO CASO
CANTERA CACHIBÍ

Ing. DIANA ANDREA SALDARRIAGA CANTILLO



UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
2019

CÁLCULO DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN MACIZO ROCOSO CASO
CANTERA CACHIBÍ

Ing. DIANA ANDREA SALDARRIAGA CANTILLO

PROYECTO DE GRADO

Director
Ing. MANOLO ADOLFO GALVÁN CEBALLOS
PhD Ingeniería Geotécnica



UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
2019

Agradecimientos

Primero agradezco a Dios, creador de la vida y gestor de todo proyecto, gracias a su voluntad divina es posible la realización de este logro.

Agradezco a mi familia y amigos, por su paciencia, apoyo y comprensión durante este proceso académico.

Mis más sinceros agradecimientos a la Universidad del Valle y todos mis profesores, que con su apoyo, confianza, enseñanzas y orientación permitieron la realización de este trabajo.

Finalmente, Muchas gracias a Agregados y Mezclas Cachibi, por permitir realizar la investigación dentro de su planta, y por todo el apoyo, confianza e información suministrada para llevar a cabo esta investigación.

Esta tesis de maestría fue realizada por la Ing. Diana Andrea Saldarriaga Cantillo, bajo la dirección del Doctor Manolo Adolfo Galván Ceballos. Fue revisada y aprobada por el siguiente Comité Revisor y Jurado examinador, para obtener el título de Master en Ingeniería .

Nota de aceptación:

Firma del jurado
Ing. Jorge Ivan Preciado Romero
Doctor en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Firma del jurado
Ing. Isabel Cristina Gomez Gutierrez.
Geóloga, Msc en Geotécnia, PhD en Ingeniería Civil

SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA FEBRERO DE 2019

Resumen

El presente trabajo muestra los resultados de los esfuerzos y deformaciones, realizados a través de una modelación en elementos finitos en el software Midas GTS NX para una cantera dedicada a la extracción de agregados pétreos mediante el sistema de minería a cielo abierto.

Para realizar esta modelación, se realizaron los ensayos de laboratorio necesarios para obtener las propiedades físicas del macizo rocoso a estudiar, siendo necesario un estudio detallado de la geología del sector a través de información suministrada por la cantera para realizar la correcta caracterización de la zona de estudio.

Debido a la creciente demanda de agregados pétreos en la ciudad de Cali, inducido por diversos factores, se ha reportado un significativo aumento en la explotación minera en ciertos puntos de la cordillera occidental, los cuales cuentan con permisos de la agencia minera para tal fin. Teniendo en cuenta esta condición y el limitado conocimiento del sector minero referente a las herramientas de análisis en elementos finitos, se ha desarrollado este proyecto, tomando como caso puntual, la cantera Agregados y Mezclas Cachibí, donde se realizó la caracterización del macizo rocoso y el respectivo análisis de esfuerzos y deformaciones del mismo, dando como resultados las zonas donde hay más sensibilidad a los riesgos por desprendimientos y derrumbes debido a las voladuras que allí se ejecutan.

El resultado de esta investigación, es un mapa de la zona donde nos muestra los sectores más propensos a riesgos por debilitamiento del macizo rocoso, a partir de esta información es fácil escoger los sitios donde se realizarán posteriores voladuras que representen menos riesgos, diseñar obras de mitigación que permita evitar desprendimientos y análisis de direccionamiento de banqueos que optimicen la producción de manera segura.

Se recomienda el análisis de zonas sensibles de riesgo por desprendimientos para el diseño de las actividades mineras en las canteras a cielo abierto de la ciudad, ya que las condiciones de seguridad aumentarían notablemente.

Palabras clave:

Caracterización del macizo rocoso, Cálculo de esfuerzos y deformaciones del macizo rocoso, Midas GTS NX.

Abstract

This work shows the results of the efforts and deformations made through a modelling in finite elements on Midas GTS NX software for a quarry dedicated to an extraction of stone aggregates by the opencast mining system.

To make this model, need to use the corresponding laboratory test to get the physics properties of the rock mass, being necessary a detailed study of geology sector through the information of the quarry to make the correct characterization of the study zone.

Due the growing demand of the stony aggregates of the Cali city, induced by many factors, has been reported a significant mining increase on certain points on the occidental mountain range. Having the mining license for that. Considering this condition and the limited knowledge of the mining sector related to modelling in finite elements tools analysis, we've developed this Project, taking the case of the quarry aggregates and mixes Cachibí, where are made the characterization of the rock mass and the corresponding stress and deformation analysis, and the respective stress analysis and deformations of the same one, giving like proved the zones where there is more sensibility to the risks for detachments and collapse due the blasting that's executed.

The result of this investigation, it is a map of the zone where it shows the sectors most inclined to risks for weakening of the rock mass, from this information it's easy to choose the places that represent fewer risks, to design mitigation works to avoid future detachments, and analysis of addressing of the banking who optimize the production of a sure way.

There is recommended the analysis of sensitive zones of risk by detachments for the design of the mining activities in the quarries to sky opened of the city, since the safety conditions would increase notably.

Keywords:

Midas GTS NX Software, Rock mass characterization, Rock mass stresses and deformations Calculation.

Tabla de Contenidos

Introducción	1
Capítulo 1 Planteamiento del Problema.....	6
1.1 Descripción del Problema	6
1.2 Formulación	8
1.3 Objetivos	8
1.3.1 Objetivo General	8
1.3.2 Objetivos Específicos.....	8
1.4 Justificación	9
Capítulo 2 Marco de referencia.....	11
2.1 Antecedentes	11
2.2 Marco Teórico.....	13
2.2.1 Geomecánica.....	13
2.2.2 Método de Elementos Finitos	13
2.2.3 Análisis Modal	18
2.2.4 Modelo Constitutivo	20
2.2.5 Criterio de rotura lineal de Mohr – Coulomb	23
2.2.6 Función Presión de Detonación	26
Capítulo 3 Metodología	29
Capítulo 4 Propiedades Índice del Macizo Rocosó	32
4.1 Propiedades índice descriptivas	32
4.2 Propiedades índice de clasificación	34
4.2.1 Densidad	34
4.2.2 Resistencia	37
4.3 Propiedades Índice de Diseño	50
Capítulo 5 Caracterización del macizo rocosó.....	54
5.1 Unidad Basaltos y diabasas (Zona Norte).....	54
5.2 Unidad Lavas Almohadillas (Zona Sur)	56
5.3 Zona central (Fallas)	57
6.1 Clasificación RMR.....	59
6.1.1 Zona Norte	59
6.1.2 Zona Central.....	59
6.1.3 Zona Sur.....	61
6.2 Índice geológico de resistencia (GSI)	61
6.2.1 GSI Zona Norte	61
6.2.2 GSI Zona Sur	60
6.2.3 GSI Zona Centro	60
6.3 Criterio de falla generalizado Hoek - Brown.....	63
6.3.1 Hoek Brown Zona Norte.....	66
6.3.2 Hoek Brown Zona Sur	67
6.3.3 Hoek Brown Zona Centro.....	68
6.4 Parámetros de Mohr – Coulomb	69
6.4.1 Mohr – Coulomb Zona Norte	70

	viii
6.4.2 Mohr – Coulomb Zona Sur	70
6.4.3 Mohr – Coulomb Zona Centro.....	71
6.5 Ángulo de dilatación	71
6.5.1 Ángulo de Dilatación Zona Norte	70
6.5.2 Ángulo de Dilatación Zona Sur.....	74
6.5.3 Ángulo de Dilatación Zona Centro	74
6.6 Factor de perturbación	74
Capítulo 7 Modelación numérica y calibración del macizo rocoso a través del programa MIDAS	
GTS NX	77
7.1 Modelación 3d del terreno y simulación de voladuras sobre el macizo rocoso.....	77
7.2 Calibración del macizo rocoso.....	80
Capítulo 8 Resultados	87
8.1 Zona Norte	87
8.1.1 Análisis de impacto sobre el área de estudio con voladura Anfo y Centra.....	87
8.2 Zona Sur.....	90
8.2.1 Análisis de impacto sobre el área de estudio con voladura Anfo y Centra.....	90
8.3 Zona Centro	98
8.3.1 Análisis de impacto sobre el área de estudio con voladura Anfo y Centra.....	98
8.4 Análisis de impacto puntual con voladura Anfo y Centra	105
8.4.1 Zona Norte:	105
8.4.2 Zona Sur:.....	108
8.4.3 Zona Centro	109
Conclusiones.....	112
Recomendaciones	115
Lista de referencias	117
Apéndices.....	119

Lista de Tablas

Tabla 1. Títulos Mineros Cantera Agregados y Mezclas Cachibí S.A	2
Tabla 2. Ensayos realizados en laboratorio.....	30
Tabla 3. Resultados laboratorio de ensayo de gravedad específica	36
Tabla 4. Cálculos de humedades, densidad y porosidad.....	36
Tabla 5. Datos del espécimen prueba velocidad sónica.....	38
Tabla 6. Ecuaciones requeridas para el ensayo de velocidad sónica.	39
Tabla 7. Resumen de parámetros dinámicos de la roca obtenidos mediante el ensayo de velocidad ultrasónica	40
Tabla 8. Mediciones realizadas con el esclerómetro	42
Tabla 9. Cálculo de rebote a partir del martillo Schmidt.....	43
Tabla 10. Referencia de la Probeta empleada en la práctica.....	44
Tabla 11. Existencia de Componentes Arcillosos liberables (Dusseault).....	47
Tabla 12. Descripción del deterioro de la muestra (Dusseault).	49
Tabla 13. Resultados ensayo de Dusseault.	50
Tabla 14. Resultados propiedades índice de Clasificación obtenidas en el laboratorio.	53
Tabla 15. Características de las discontinuidades.....	58
Tabla 16. Características de las discontinuidades según Brown.....	60
Tabla 17. Índices GSI de las 3 zonas	63
Tabla 18. Valores de los esfuerzos dado el criterio de Hoek y Brown generalizado de la zona norte	67
Tabla 19. Valores de los esfuerzos dado el criterio de Hoek y Brown generalizado de la zona sur	68
Tabla 20. Valores de los esfuerzos dado el criterio de Hoek y Brown generalizado de la zona sur	69
Tabla 21. Resumen información para Simulación en Midas GTS NX.....	76
Tabla 22. Zonificación de estratos cantera Cachibí.	78
Tabla 23. Valores de desplazamientos y esfuerzos asociados a voladura con explosivos Anfo y centra sobre área de estudio	104
Tabla 24. Esfuerzos y desplazamientos en puntos ubicados en cada una de las zonas de estudio.	111

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación general de los títulos mineros 13129,03 - 034 y HF8 - 151 Adaptado de Google Earth, 2015.	3
Figura 2. Mapa topográfico del área de estudio. Elaboración Propia	5
Figura 3. Voladuras para extracción del material en canteras a cielo abierto. Tomado de: Joshep, A. (2012) [En línea].	10
Figura 4. Coordenadas nodales (i, j, k) y desplazamiento de los nodos. Tomado de: Frías, F. (2004).	16
Figura 5. Representación del criterio de rotura de Hoek & Brown en el espacio de tensiones normal y tangencial. Tomado de: Hoek & Brown, (1980)	21
Figura 6. Representación de la envolvente de Mohr - Coulomb en el espacio de tensiones tangencial y normal. Tomado de: Melentijevic, (2006).	26
Figura 7. Descripción del comportamiento temporal de una voladura por explosivo ANFO según la International Society of Explosive Engineers a través del software MIDAS GTS NX. Fuente: Elaboración propia	28
Figura 8. Basalto. Elaboración Propia	32
Figura 9. Zona de falla con relleno de carbonatos y roca meteorizada. Elaboración propia	33
Figura 10. Muestra de basalto empleada para el ensayo. Adaptado de Laboratorio de Geología y Mecánica de rocas (MERO), Universidad del Valle.	34
Figura 11. Muestra de roca para ensayo y montaje respectivo. Adaptado de Laboratorio Geología y Mecánica de Rocas (MERO), Universidad del Valle.	38
Figura 12. Onda P en Roca. Realización Propia.	39
Figura 13. Velocidad P en Roca. Realización Propia.	40
Figura 14. Configuración Probeta – Esclerómetro. Realización Propia.	42
Figura 15. Roca fallada por carga axial. Adaptado de Laboratorio Geología y Mecánica de Rocas (MERO), Universidad del Valle.	46
Figura 16. Gráfica Esfuerzo - Deformación. Realización Propia.	48
Figura 17. Diaclasas en la unidad de Basaltos – Diabasas. Realización Propia	55
Figura 18. Roca muerta en perfil de meteorización. Realización Propia.	56
Figura 19. Afloramiento de lavas almohadilla. Realización Propia	57
Figura 20. Valores estimados de la constante de roca intacta m_i . Adaptado de Hoek & Brown, 1980.	65
Figura 21. Comportamiento macizo rocoso de buena calidad geotécnica. Adaptado de Hoek & Brown 1980.	72
Figura 22. Comportamiento de Ángulos de dilatación de siete diferentes tipos de rocas como función de la deformación plástica. Adaptado de Arzúa, 2015	70
Figura 23. Clasificación de terrenos según el factor de perturbación. Adaptado de Hoek et al, 2002.	75
Figura 24. Zonificación de la Estratigrafía en la Cantera Cachibí. Elaboración propia.	77
Figura 26. Resultados desplazamientos en Z para realizar calibración, MIDAS GTS NX. Elaboración propia	82
Figura 27. Resultados desplazamientos en Z para realizar calibración, MIDAS GTS NX. Elaboración propia.	80

Figura 28. Datos extraídos del nodo 6184, correspondientes a la ubicación del sensor.....	84
Figura 29. Ubicación del nodo donde se hallaba el acelerómetro dentro de la cantera – MIDAS GTS NX. Elaboración propia.....	86
Figura 30 .Desplazamientos totales por voladura utilizando explosivo Anfo en zona norte – Midas GTS NX. Elaboración propia.....	88
Figura 31. Desplazamientos totales por voladura utilizando explosivo centra en zona norte – Midas GTS NX. Elaboración propia.....	88
Figura 32 Esfuerzos de Von Mises producidas por la voladura con explosivo Anfo en zona norte – Midas GTS NX. Elaboración propia.....	90
Figura 33. Esfuerzos de Von Mises producidas por la voladura con explosivo centra en zona norte – Midas GTS NX. Elaboración propia	90
Figura 34. Factor de seguridad producido por voladura en la zona norte con explosivo Anfo – Midas GTS NX. Elaboración propia.....	92
Figura 35. Factor de seguridad producido por voladura en la zona norte con explosivo centra– Midas GTS NX. Elaboración propia.....	92
Figura 36.. Desplazamientos totales por voladura en zona sur usando explosivo Anfo – Midas GTS NX. Elaboración propia.....	90
Figura 37. Desplazamientos totales por voladura en zona sur usando explosivo centra – Midas GTS NX. Elaboración propia.....	94
Figura 38. Esfuerzos de Von Mises producidas por la voladura en zona sur usando explosivo Anfo – Midas GTS NX. Elaboración propia	95
Figura 39. Esfuerzos de Von Mises producidas por la voladura en zona sur usando explosivo centra – Midas GTS NX. Elaboración propia.....	95
Figura 40. Factor de seguridad producido por voladura en la zona sur usando explosivo Anfo – Midas GTS NX. Elaboración propia.....	97
Figura 41. Factor de seguridad producido por voladura en la zona sur usando explosivo centra – Midas GTS NX. Elaboración propia.....	97
Figura 42. Desplazamientos totales por voladura en zona centro utilizando explosivo Anfo– Midas GTS NX. Elaboración propia.....	98
Figura 43. Desplazamientos totales por voladura en zona centro utilizando explosivo centra– Midas GTS NX. Elaboración propia.....	99
Figura 44. Esfuerzos de Von Mises producidas por la voladura en zona centro utilizando explosivo Anfo – Midas GTS NX. Elaboración propia.....	100
Figura 45. Esfuerzos de Von Mises producidas por la voladura en zona centro utilizando explosivo centra– Midas GTS NX. Elaboración propia	100
Figura 46. Factor de seguridad producido por voladura en la zona centro utilizando explosivo Anfo – Midas GTS NX. Elaboración propia	102
Figura 47. Factor de seguridad producido por voladura en la zona centro utilizando explosivo centra – Midas GTS NX. Elaboración propia.....	102
Figura 48. Esfuerzo y desplazamiento usando explosivo centra en zona norte.....	105
Figura 49. Esfuerzo y desplazamiento usando explosivo Anfo en zona norte	106
Figura 50. Esfuerzo y desplazamiento usando explosivo centra en zona sur	108
Figura 51. Esfuerzo y desplazamiento usando explosivo Anfo en zona sur.....	108
Figura 52. Esfuerzo y desplazamiento usando explosivo centra en zona central	109
Figura 53. Esfuerzo y desplazamiento usando explosivo Anfo en zona central.....	110

Introducción

Desde inicios del siglo XX, la ciudad de Cali empezó a crecer de manera significativa, haciendo necesario la creación de empresas dedicadas a abastecer la demanda de materia prima para la construcción de estructuras e infraestructuras de la ciudad en desarrollo, entre ellos los agregados pétreos. Inicialmente estos se extraían de los ríos cercanos a la ciudad, hasta que en el año 1945 es fundada en Cali la primera empresa de extracción de agregados pétreos provenientes del macizo rocoso que hace parte de la cordillera Occidental llamada Triturados el Chocho.

Desde los años 50' el crecimiento de la ciudad no se ha detenido y en los últimos 10 años el incremento de obras civiles ha traído como consecuencia el aumento de los niveles en la producción de agregados pétreos para abastecer las exigencias de una demanda creciente de productos.

Debido al aumento significativo de la demanda de agregados pétreos se hace necesario el estudio de las zonas de explotación mineras con miras a obtener la mayor productividad teniendo en cuenta la mitigación de daños ambientales y la seguridad de las personas que laboran en la cantera, así como el bienestar del entorno circundante.

La cantera Agregados y Mezclas Cachibí S.A, es una empresa que se dedica a la extracción, procesamiento y comercialización de rocas ígneas tipo basaltos, los cuales se utilizan en la elaboración de mezclas de mortero, concreto rígido, asfaltos rellenos etc.

Esta empresa fue constituida en el año 1979, está ubicada en la antigua vía Cali – Yumbo. Cuenta con 3 títulos mineros, de los cuales solo dos son explotados en el

momento (13-129 y 03-034). El título HF8-151 está ubicado en la zona de acopio del material explotado, talleres y oficinas, razón por la cual no está proyectada explotación en esta zona. Las características de cada título están detalladas en la Tabla 1.

Tabla 1. Títulos Mineros Cantera Agregados y Mezclas Cachibí S.A

<i>Nombre del Título</i>	<i>Área (Has)</i>	<i>Estado Jurídico Actual</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Municipio</i>
13-129	83.96	Registro Minero	Zona norte	Yumbo
03-034	11.81	Contrato de concesión	Zona sur	Yumbo
HF8-151	18.02	Contrato de concesión	Patios de almacenamiento	Yumbo

Nota. Elaboración propia

Del mismo modo, la Figura 1 muestra la localización de la cantera Agregados y Mezclas Cachibí S.A, así como la distribución de los títulos que la constituyen. Se puede observar la zona de explotación actual, la cual corresponde a 20 Has aproximadamente y representa la principal área de estudio del presente proyecto.

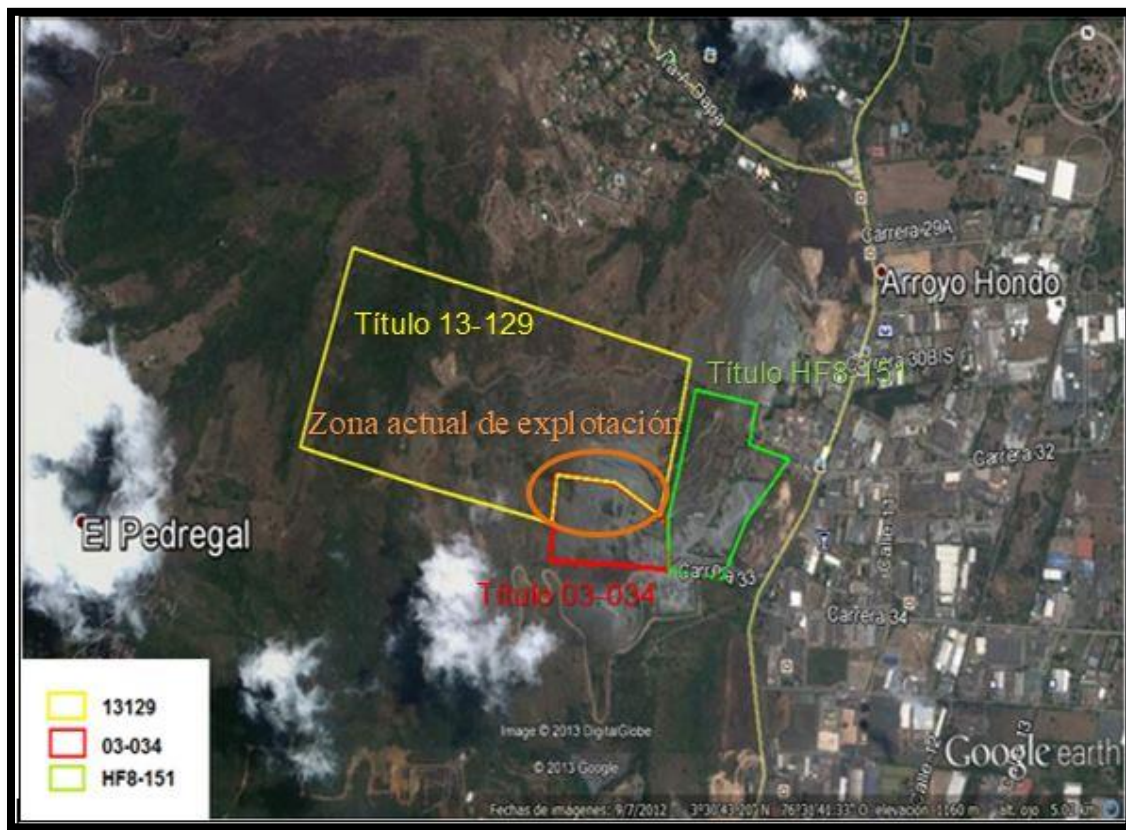


Figura 1. Ubicación general de los títulos mineros 13129, 03 - 034 y HF8 - 151 Adaptado de Google Earth, 2015.

Del mismo modo, La Figura 2 muestra el mapa topográfico de la zona de estudio, donde encontramos un terreno con pendientes naturales que varían entre 20° y 50°. Este sector tiene una topografía escarpada, la cual es ideal para el desarrollo de un sistema de explotación tipo terrazas, donde se puede optimizar el volumen de material explotado.

La zona de estudio está constituida por un basamento tipo basalto, el cual permite que sea el lugar indicado para la extracción de materia prima de materiales pétreos, ya que la dureza y las características físico-químicas del material permiten procesar productos que cumplen con la normatividad impuesta por nuestra legislación para materiales áridos y pétreos usados en construcción.

En la figura 2, se evidencian los sectores en que es dividida la explotación (Sector norte y Sector sur), del mismo modo, es claramente visible la zona de explotación actual, que corresponde al área bajo estudio.

El siguiente estudio se realiza con el propósito de profundizar en la dinámica del comportamiento de los macizos rocosos de la ciudad de Cali que son sometidos a voladuras para la extracción de agregados pétreos.

Como caso de estudio, se tomará la cantera Agregados y mezclas Cachibí, donde a través de la caracterización geotécnica del macizo rocoso, se obtendrán los parámetros necesarios para realizar el modelo numérico, que arroja como resultado los esfuerzos y deformaciones resultantes debido a la carga de voladura a la cual será sometida la roca.

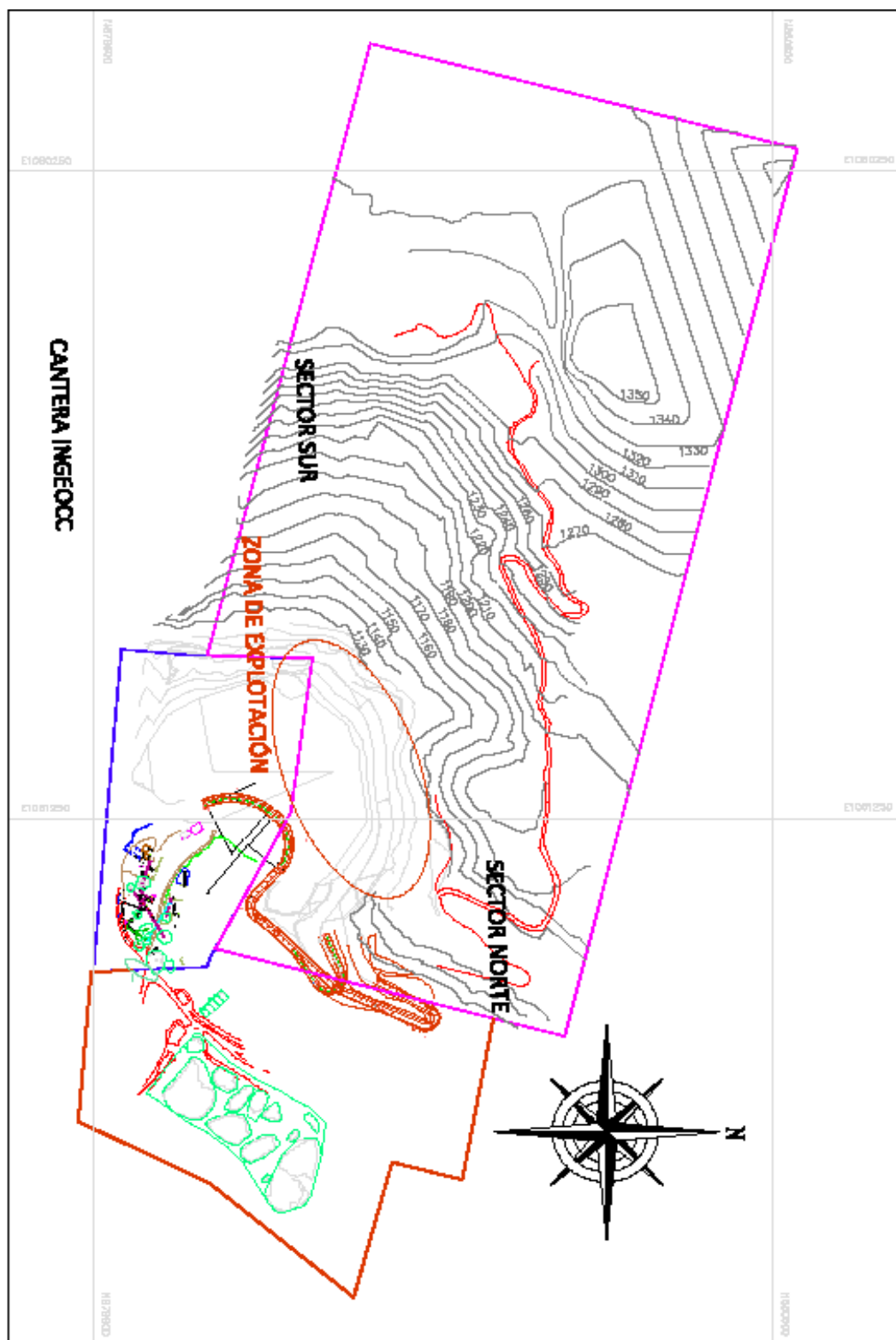


Figura 2. Mapa topográfico del área de estudio. Elaboración Propia

Capítulo 1

Planteamiento del Problema

1.1 Descripción del Problema

En la actualidad, las canteras a cielo abierto ubicadas en la ciudad de Cali realizan sus explotaciones sin tener profundo conocimiento de los macizos que están interviniendo, esto se evidencia en parte por los deslizamientos ocasionales de material dentro de la zona de explotación, sumado a los pobres requerimientos de estudios geotécnicos que exige la legislación minera para conceder las licencias de explotación de materiales pétreos.

Debido a que en las canteras a cielo abierto la extracción del material se realiza utilizando explosivos, es importante analizar la incidencia de la onda generada por la detonación en la estabilidad del macizo rocoso. Este parámetro se obtiene realizando el cálculo de esfuerzos y deformaciones a los que es sometido la zona de estudio debido a las cargas dinámicas que lo afectan.

Esta clase de análisis geo dinámicos se puede realizar a través de una simulación matemática por el método de elementos finitos, donde se crea un modelo que permite incluir las características propias del material obtenidas a través de la clasificación geo mecánica y después se introducen las cargas que soporta a causa de las voladuras, arrojando como resultado final el estado de esfuerzos y deformaciones en cada punto del área analizada.

La caracterización del macizo rocoso y posterior simulación numérica del mismo debería ser un requisito básico para las canteras de la ciudad.

Con el presente estudio se pretende tomar como proyecto piloto la cantera Agregados y Mezclas Cachibí, realizar la caracterización geotécnica y modelación numérica donde se evidencia la afectación de la zona de estudio debido a los procesos de voladura que allí se realizan e implementar esta metodología en los proyectos de minería a cielo abierto existentes en zonas urbanas.

1.2 Formulación

El siguiente enunciado corresponde al interrogante al que se busca dar respuesta con el desarrollo de esta investigación:

¿Cuáles son los esfuerzos y las deformaciones producidos por voladuras en la actual zona de explotación perteneciente al macizo rocoso de la cantera Agregados y Mezclas Cachibí?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Realizar el cálculo de esfuerzos y deformaciones en la actual zona de explotación del macizo rocoso ubicado en la cantera Agregados y Mezclas Cachibí S.A por medio de elementos finitos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Obtener las propiedades índice del macizo rocoso Agregados y Mezclas Cachibí en cada una de sus zonas.
- Realizar la caracterización del macizo rocoso Agregados y Mezclas Cachibí.
- Modelar numéricamente el macizo rocoso caracterizado y simular la carga dinámica a la que es sometido debido a las voladuras.
- Realizar la calibración del modelo matemático macizo rocoso Agregados y Mezclas Cachibí a través de programa Midas GTNX.
- Realizar el Cálculo de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos correspondientes al macizo rocoso.

1.4 Justificación

Debido al reciente crecimiento minero en la ciudad, el cual está influenciado por el ascendente desarrollo en el área de la construcción, se hace necesario encontrar metodologías que permitan ampliar los conocimientos para desarrollar técnicas eficientes y seguras en la explotación de agregados pétreos en las canteras de nuestra región.

La cantera Agregados y Mezclas Cachibí, realiza la explotación del macizo rocoso teniendo en cuenta las necesidades de producción requerida por el área comercial. Las voladuras se realizan en los sitios donde hay acceso para los equipos de perforación y limpieza, mas no existe una planeación minera que tenga en cuenta la caracterización del material que se va a extraer, el avance de las bancas y el desarrollo de vías para llegar a los sitios alejados de la zona de trituración del material integrado a la necesidad de abastecimiento del mismo para el área comercial y el desarrollo de la cantera para llegar al diseño final.

Es de gran interés para la planeación del proceso de extracción de material, procesar la información geotécnica, geométrica y caracterizar el macizo rocoso en un modelo tridimensional a fin de realizar un desarrollo minero eficiente y seguro. Teniendo en cuenta esta necesidad se desarrolla el presente estudio, donde a través del método de elementos finitos se definirán las zonas susceptibles a deformaciones debido a las voladuras que se ejecutan para la extracción de material, para lo cual se utilizará el programa MIDAS GTS NX que permitirá estudiar la influencia de las voladuras en el comportamiento interno del macizo rocoso, resultado que dará pautas para evaluar la conveniencia del sistema de voladuras actualmente implementado.

Adicionalmente la caracterización geomecánica del macizo rocoso, así como la modelación tridimensional de la topografía de la cantera sirve como base para la implementación de programas de desarrollo minero que en un momento dado van a ser adquiridos por la cantera para sistematizar su proceso productivo.



Figura 3. Voladuras para extracción del material en canteras a cielo abierto. Tomado de: Joshep, A. (2012) [En línea].

Capítulo 2

Marco de referencia

2.1 Antecedentes

Dentro de la revisión bibliográfica se encontró el estudio realizado por Elberg et al. (2011) titulado: Análisis numérico de las discontinuidades del macizo rocoso de la autopista Rafael Caldera en Venezuela, en el cual se hace el reconocimiento de campo y análisis de muestras de laboratorio del macizo rocoso para obtener parámetros geomecánicos que más tarde serán utilizados en la simulación numérica utilizando el método de elementos finitos. Se realizan modelos elásticos en dos y tres dimensiones con geometrías y características físico – naturales obtenidas durante el trabajo de campo. Se obtienen distribuciones de esfuerzo – deformaciones en la zona de estudio, determinando las características geológico – estructurales del área junto con la clasificación geomecánica y se estima el comportamiento de las discontinuidades, así como posibles anomalías y eventuales colapsos. A través de las anteriores actividades se permitió determinar los valores de esfuerzos, desplazamientos y deformaciones para este macizo rocoso.

Los investigadores concluyen que las deformaciones en este macizo rocoso de tipo granítico son elásticas sin incursionar en rangos plásticos, esto es debido a la resistencia del material el cual no llega a presentar deformaciones permanentes. Los mayores desplazamientos ocurren en sentido vertical lo cual evidencia la acción de la carga litostática suprayacente y la carga por gravedad, ya que las deformaciones que pueden ocurrir son por el debilitamiento del macizo debido a las discontinuidades

presentes al estar sometido solamente a la fuerza vertical causada por la gravedad y el peso propio del material en estado saturado.

Para la presente investigación es importante la metodología utilizada en el proyecto mencionado, debido a que describe el procedimiento necesario para realizar el cálculo de esfuerzos y deformaciones de un macizo rocoso.

En la etapa del modelado hay puntos clave como son la partición del macizo y los apoyos usados. Aunque en la modelación que se pretende realizar se tienen en cuenta no solo cargas estáticas sino también las dinámicas este proyecto es útil para identificar los parámetros que se deben tener en cuenta al modelar un macizo rocoso.

Suarez (2014) desarrolla una metodología para la descripción y caracterización del macizo rocoso en el libro llamado Descripción del macizo rocoso: introducción a la ingeniería de rocas de superficie y subterráneas. 2 edición, en el cual se dan las pautas para realizar la caracterización del macizo, se enumera de manera clara que información es necesaria para dicho fin, como se debe procesar, con qué criterio se debe analizar los datos para obtener óptimos resultados. Junto a este libro se encontró otro texto que complementa esta información cuyos autores son Hoek & Brown (1980) titulado: Excavaciones subterráneas en roca, en el cual se describe los diferentes sistemas de clasificación del macizo rocoso, cuáles son los criterios para la recolección de muestras y datos geológicos, análisis de esfuerzos y resistencia de las rocas. Para la presente investigación esta información es de vital importancia para la fase de caracterización del macizo rocoso.

2.2 Marco Teórico

A continuación, se detallan los conceptos y las teorías matemáticas que sirven de soporte para la presente investigación:

2.2.1 Geomecánica

La geomecánica es el conjunto de disciplinas relacionadas con geología, ingeniería civil, ingeniería de minas y geofísica para el estudio de las condiciones de estabilidad, deformación y resistencia del macizo rocoso. (Mecánica de rocas, s.f)

Entre las ramas de la geomecánica se encuentra la mecánica de rocas, que se encarga del estudio teórico y práctico de las propiedades y comportamiento mecánico de los materiales rocosos y de su respuesta ante la acción de fuerzas aplicadas en su entorno físico. Su finalidad es conocer y predecir el comportamiento de los materiales rocosos ante la actuación de fuerzas internas y externas que sobre ellos se ejercen. Rosas, J. (2013).

2.2.2 Método de Elementos Finitos

El Método de Elementos Finitos (MEF) es un método numérico para la solución de ecuaciones diferenciales utilizados en diversos problemas de ingeniería y física.

Se basa en dividir el dominio sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema en una serie de dominios no intersectantes entre sí denominados elementos finitos.

Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. El conjunto de nodos, considerando sus relaciones de adyacencia se conoce como malla.

Estas relaciones de adyacencia permiten relacionar el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad.

El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistemas de ecuaciones lineales o no linealizadas, la matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema, donde el número de ecuaciones del sistema es proporcional al número de nodos.

En ingeniería civil el Método de Elementos Finitos ha sido usado con frecuencia en la solución de problemas estructurales, solo en los últimos años esta metodología ha sido implementada al desarrollo de problemas geotécnicos y particularmente de mecánica de rocas debido a la dificultad que existe para caracterizar el dominio de cálculo, que corresponde en este caso al macizo rocoso, teniendo en cuenta la heterogeneidad de sus componentes, discontinuidades existentes, flujos de agua presentes, procesos naturales y antrópicos a los que es sometido el macizo etc. Estas condiciones obligan a un sin número de ecuaciones que deben considerarse y el mallado a realizar tiene que ser más denso con respecto a los problemas de estructuras. El uso de esta herramienta para fines geotécnicos se implementa a partir de la década de los 70's y ha logrado grandes avances hasta la actualidad, de tal manera que los programas especializados tienen entradas y módulos que tienen en cuenta todas las variables antes descritas dentro del macizo rocoso.

En la actualidad existen diferentes programas de computación que permiten desarrollar modelos geotécnicos en 2 y 3 dimensiones. Para el presente proyecto se utilizará el programa Midas GTS NX con el cual se desarrollará el proyecto en las siguientes fases:

- **Modelado:** Es la visualización de las secciones del proyecto. Este incluye: Creación de la geometría, definición de bordes, definición de material, generación de mallas, asignación de cargas, asignación de condiciones de contorno.
- **Análisis:** Se refiere al análisis de las ondas explosivas en el macizo rocoso.
- **Resultados:** Los resultados que podemos obtener a partir de este análisis numérico son: Deformación (asentamientos, desplazamientos horizontales), Tensión (presión de rocas y tensiones principales), Estado del suelo (superficie de falla), Factor de seguridad

La presentación de estos resultados se realiza de forma gráfica, diagramas y resultados tabulares. (Northamerica.midasuser.com, (2016))

2.2.2.1 Aplicación del método de elementos finitos

Un elemento finito “ e ” viene dado por sus nodos (i, j, m) y por su contorno formado por las líneas que los unen. Los desplazamientos u de cualquier punto del elemento se aproximan por un vector columna $\bar{u}$, como lo muestra la ecuación 1.

$$\bar{U} = \sum N_i a_i^e = N a^e \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde N son funciones de posición dadas (Funciones de forma) y ae es un vector formado por los desplazamientos nodales de los elementos considerados como se muestra en la figura 4.

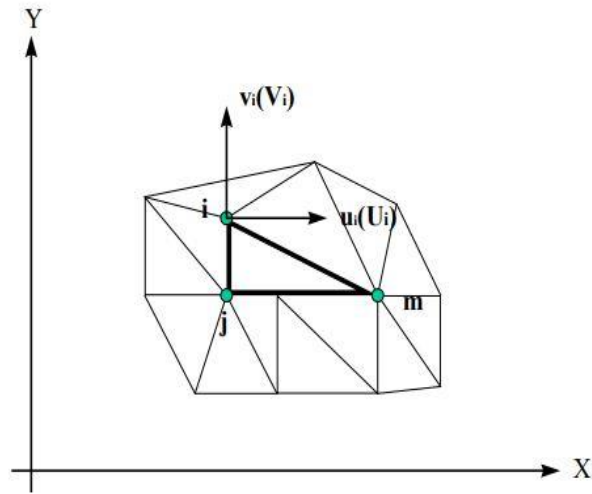


Figura 4. Coordenadas nodales (i, j, k) y desplazamiento de los nodos. Tomado de: Frías, F. (2004)

Las funciones N_i , N_j , N_m se deben escoger de tal forma que al sustituir las coordenadas nodales en la ecuación 1 se obtengan desplazamientos nodales.

Conocidos los desplazamientos de todos los puntos del elemento, se pueden determinar las deformaciones (ϵ) en cualquier punto, las cuales vienen dadas por la ecuación 2:

$$\epsilon = S_N * u \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde S_n es un operador lineal.

En este orden de ideas, la relación entre tensiones y deformaciones viene dada por la ecuación:

$$\sigma = D^*(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

D : Matriz de elasticidad que contiene las propiedades del material

ε_0 : Deformación inicial

σ_0 : Tensiones internas residuales

Las fuerzas que actúan sobre los nodos, las cuales son estáticamente equivalentes, las tensiones en el contorno y las fuerzas distribuidas que actúan sobre cada elemento se definen en la ecuación 4:

$$q^e = \begin{matrix} q_i^e \\ q_j^e \end{matrix} \quad \text{Ecuación 4}$$

Cada fuerza q_e^i debe tener el mismo número de componentes que el desplazamiento nodal q_i correspondiente y debe ordenarse en las direcciones adecuadas.

La relación entre las fuerzas nodales, las tensiones en el contorno y fuerzas distribuidas se determinan mediante la ecuación 5:

$$q^e = \int_{V^e} B^t \sigma dV - \int_{V^e} N^t b dV \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

b : Fuerzas distribuidas

V^e : Volumen del elemento e .

Una vez obtenidos los desplazamientos nodales por resolución de ecuaciones, se puede calcular las tensiones en cualquier punto del elemento así:

$$\sigma = DB^a - D\varepsilon_0 - \sigma_0 \quad \text{Ecuación 6}$$

2.2.3 Análisis Modal

Este consiste en plantear la ecuación del movimiento del sistema, suponer una forma de respuesta e imponer que esta cumpla la ecuación que gobierna el movimiento del sistema. Para obtener dicha ecuación, es necesario calcular las matrices de masa, rigidez y los factores de amortiguamiento.

La ecuación básica del movimiento dependiendo del tiempo bajo la influencia de una carga dinámica está dada por la ecuación 7.

$$F = M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

M = Masa de la matriz (Geometría del macizo rocoso con todas sus propiedades)

C = Amortiguamiento de la matriz (Amortiguamiento del material el cual es obtenido mediante ensayos de laboratorio)

K = Rigidez de la matriz (Matriz del sistema de ecuaciones que relaciona el valor de una determinada variable entre los nodos)

F = Vector carga

La velocidad $\dot{u}$ y la aceleración $\ddot{u}$ varían con el tiempo.

Para estudios dinámicos lineales y no lineales, el amortiguamiento está formulado en función de la masa y la rigidez, según la ecuación de coeficientes de Rayleigh:

$$C = \alpha M + \beta R \quad \text{Ecuación 8}$$

Los límites que determinan la matriz de amortiguamiento son los coeficientes α el cual es proporcional a la masa y β el cual es proporcional a la rigidez

Para esta investigación se utiliza el análisis tiempo - historia, el cual calcula la solución de equilibrio dinámico para el comportamiento del macizo aplicando una carga en función del tiempo. Los métodos de integración usados en este análisis son de tipo directo y de superposición modal.

En el método directo, la matriz de rigidez y las ecuaciones de los elementos que relacionan las fuerzas y desplazamientos nodales son obtenidas utilizando las condiciones de equilibrio de fuerzas para un elemento básico.

Para el método de superposición modal permite desacoplar el sistema de ecuaciones diferenciales, para ello se trabaja con la matriz modal Φ , la misma que viene a ser una matriz de transformación de coordenadas. Para este desacoplamiento se considera que la matriz de amortiguamiento C , es del tipo Rayleigh.

En el análisis es importante considerar el tiempo de integración, el cual se compone del time - step (paso), que es el parámetro que condiciona cada cuanto se realiza el análisis de la voladura sobre el macizo y el tiempo total que va a durar el análisis.

El tiempo de integración implícito, el cual es usado en el MEF, está basado en los esquemas de Newmark y las ecuaciones que definen este parámetro son:

$$U^{t+\Delta t} = U^t \dot{U}^t \Delta t + \left(\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{U}^t + \alpha U^{t+\Delta t} \right) \frac{\Delta t}{2} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\dot{U}^{t+\Delta t} = \dot{U}^t + \left((1-\beta)\ddot{U}^t + \beta\ddot{U}^{t+\Delta t} \right) \Delta t \quad \text{Ecuación 10}$$

En estas ecuaciones se expresa el desplazamiento y la velocidad en un punto en un tiempo $t + \Delta t$, donde Δt es el paso del tiempo y los coeficientes α y β determinan la exactitud del método de integración. Hay que tener en cuenta que estos no son los mismos coeficientes Rayleigh y su rango de valores se encuentra bajo las siguientes desigualdades expresadas en la ecuación 11.

$$B \geq 0.5 \quad a \geq \frac{1}{4} \left(\frac{1}{2} + \beta \right)^2 \quad \text{Ecuación 11}$$

Los valores usuales para α es 0.25 y β es 0.5. La ecuación básica del movimiento con la integración implícita del tiempo es la expresión mostrada en la ecuación 12.

$$F^{t+\Delta t} = M\ddot{u}^{t+\Delta t} + C\dot{u}^{t+\Delta t} + Ku^{t+\Delta t} \quad \text{Ecuación 12}$$

2.2.4 Modelo Constitutivo

Se llama modelo constitutivo a una formulación matemática capaz de describir el comportamiento físico macroscópico de un sólido ideal.

El modelo constitutivo a utilizar en la presente investigación es Hoek & Brown Generalizado. Este modelo es el indicado para evaluar el comportamiento en macizos rocosos expuestos a esfuerzos externos debido a que evalúa el decrecimiento de la resistencia del macizo rocoso debido a sus discontinuidades además de cargas externas a las que se ve sometido.

La ley de Hoek modela el comportamiento isotrópico lineal elástico, mientras el criterio de falla de Hoek & Brown caracteriza el comportamiento no lineal de los esfuerzos en rocas. El modelo Hoek & Brown generalizado adicionalmente incorpora criterios geológicos empíricos y esquemas de clasificación de macizos rocosos existentes.

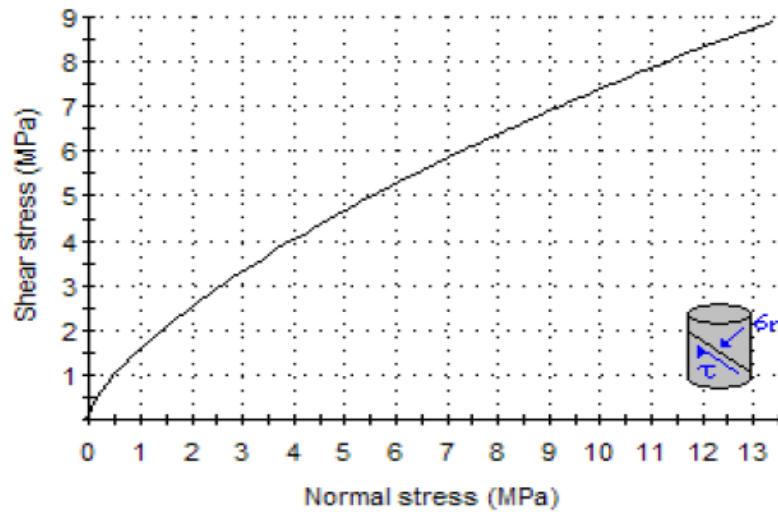


Figura 5. Representación del criterio de rotura de Hoek & Brown en el espacio de tensiones normal y tangencial. Tomado de: Hoek & Brown, (1980)

La figura 5 representa las tensiones de rotura del criterio Hoek & Brown, donde se aprecia que la función que define el dominio elástico es no lineal. Los estados de tensiones que están por encima de la curva se encuentran en rotura mientras que los que se encuentran en el interior se hallan en el dominio elástico.

Las ecuaciones constitutivas que definen el criterio de Hoek & Brown para materiales elásticos son:

Relación entre los esfuerzos principales mayor y menor, descrito en la ecuación

$$\sigma_1' = \sigma_3' - |\sigma_{ci}|^* \left(m_b - \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)$$

Ecuación 13

Donde:

σ'_1 y σ'_3 : Tensiones principales mayor y menor en el momento de la rotura.

σ_{ci} : Resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta.

s : Constante que representa la medida de la disminución de la resistencia a la compresión simple de la roca debido a la fracturación.

m_b : factor reducido de la constante del material m_i , que está determinado por:

$$m_b = m_i * \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

m_i : Constante que depende del tipo de roca

GSI : Clasificación del macizo rocoso.

D : Factor que depende del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por efectos de excavaciones o voladuras. Su valor varía entre 0 y 1, siendo 0 un macizo inalterado y 1 macizos rocosos muy alterados.

Las funciones normal y tangencial en función de las tensiones principales se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones expresadas en las ecuaciones 15 a la 17.

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \left[\frac{\left(\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} - 1 \right)}{\left(\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} + 1 \right)} \right] \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\tau = (\sigma_1' + \sigma_3') \left[\frac{\left(\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} \right)}{\left(\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} + 1 \right)} \right] \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} = 1 + am_b \left(\frac{\sigma_1'}{\sigma_{ci} + s} \right)^{a-1} \quad \text{Ecuación 17}$$

2.2.5 Criterio de rotura lineal de Mohr – Coulomb

Para el desarrollo de esta investigación se utiliza el criterio de rotura de Mohr Coulomb para hallar los valores de cohesión y ángulo de fricción del material.

El procedimiento para hallar estos valores consiste en simular una serie de ensayos triaxiales a escala natural. Los resultados de estos ensayos se generan utilizando la ecuación 18.

$$\sigma_1' = \sigma_3' - |\sigma_{ci}| * \left(m_b - \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \text{Ecuación 18}$$

Una vez obtenidos los esfuerzos principales, se utiliza el método gráfico de círculos de Mohr y se halla la pendiente de la relación lineal entre σ_1 y σ_3 , luego se ajustan nuevamente los valores de esfuerzos principales teniendo con la siguiente ecuación:

$$\sigma_1 = \sigma_{ci} + k\sigma_3 \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde k es la pendiente de la relación lineal entre σ_1 y σ_3

El criterio Mohr - Coulomb se define en función de la tensión tangencial y la tensión normal en un plano. La expresión matemática que lo define es la mostrada en la ecuación 20.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \Phi \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde

c : Cohesión, la cual es constante y representa la tensión cortante que puede ser resistida sin que haya ninguna tensión normal aplicada.

Φ : Ángulo de fricción

τ : Tensión tangencial que actúa en el plano de rotura

σ_n : Tensión normal que actúa en el plano de rotura

La figura 6 muestra los círculos de falla obtenidos a partir de los ensayos triaxiales simulados, junto con la envolvente de falla linealizada para finalmente hallar la cohesión como la intersección de la recta con el plano vertical y el ángulo de fricción como el valor formado entre esta recta y el plano horizontal.

En este gráfico se puede observar que la ecuación de la superficie de rotura es la misma de la recta tangente a todos los círculos de falla y que los puntos del macizo con estado tensional por debajo de la envolvente se encuentran en estado elástico y los que se sitúan por encima están en rotura.

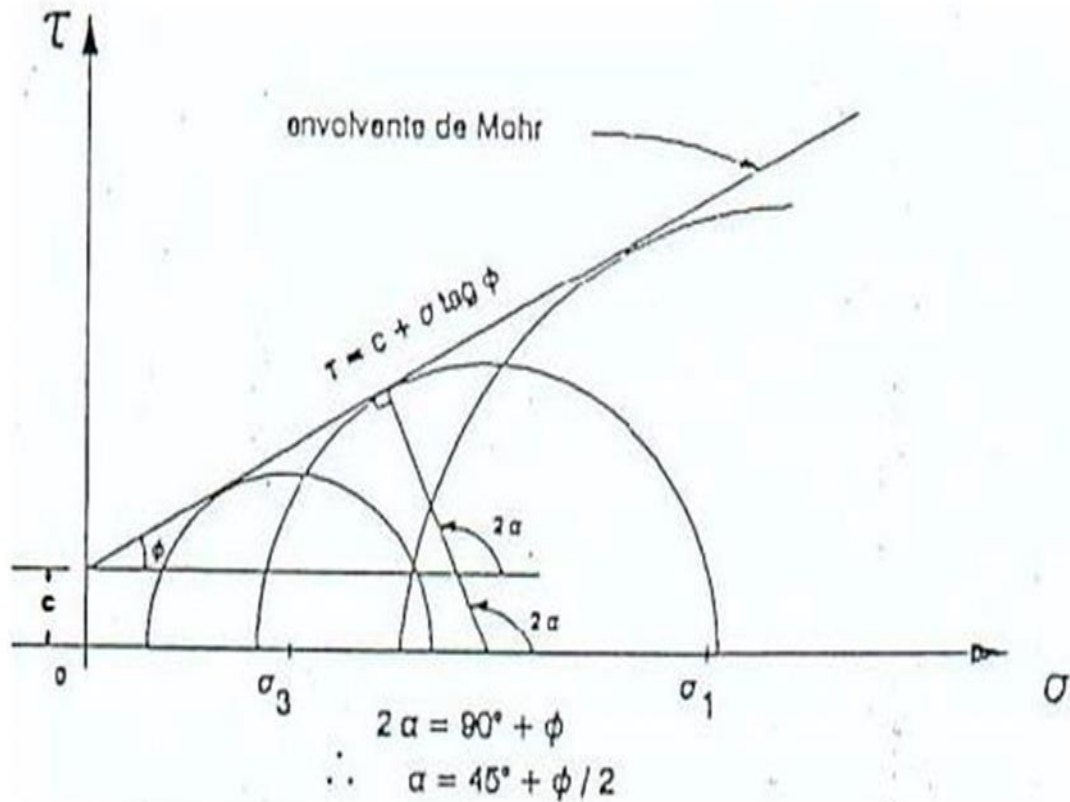


Figura 6. Representación de la envolvente de Mohr - Coulomb en el espacio de tensiones tangencial y normal. Tomado de: Melentijevic, (2006)

2.2.6 Función Presión de Detonación

La presión de detonación es la propiedad que tiene un explosivo para romper una roca. A partir de esta función se realiza el análisis dinámico sobre el macizo rocoso caracterizado.

Esta función define la carga externa aplicada al macizo rocoso, a partir de la cual, integrada a las propiedades del mismo, se evaluará los esfuerzos y deformaciones de

Aunque existen varias fórmulas expresadas por distintos investigadores, en el presente estudio se trabaja con la ecuación determinada por la organización International

Society of Explosive Engineers, la cual se expresa en los términos relacionados en la ecuación 21.

$$P_d = 2.5 * S * V^2 * 10^{-6} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde,

P_d = Presión de detonación (Kbar)

V = Velocidad de detonación (Pies/s)

S = Densidad del explosivo (g/cm³)

El explosivo que se usará en las voladuras a analizar es Anfo, el cual tiene una densidad de 0.89 g/cm³ y una velocidad de detonación de 10.83 Pies/s, aunque por propósitos comparativos de la investigación, también se empleara el explosivo Centra.

La gráfica que se obtiene evidenciada en la figura 7, es una función con que refleja la onda de sobrepresión, la cual se caracteriza por un aumento súbito de la presión seguido por un descenso de la misma hasta alcanzar valores por debajo de la presión atmosférica local.

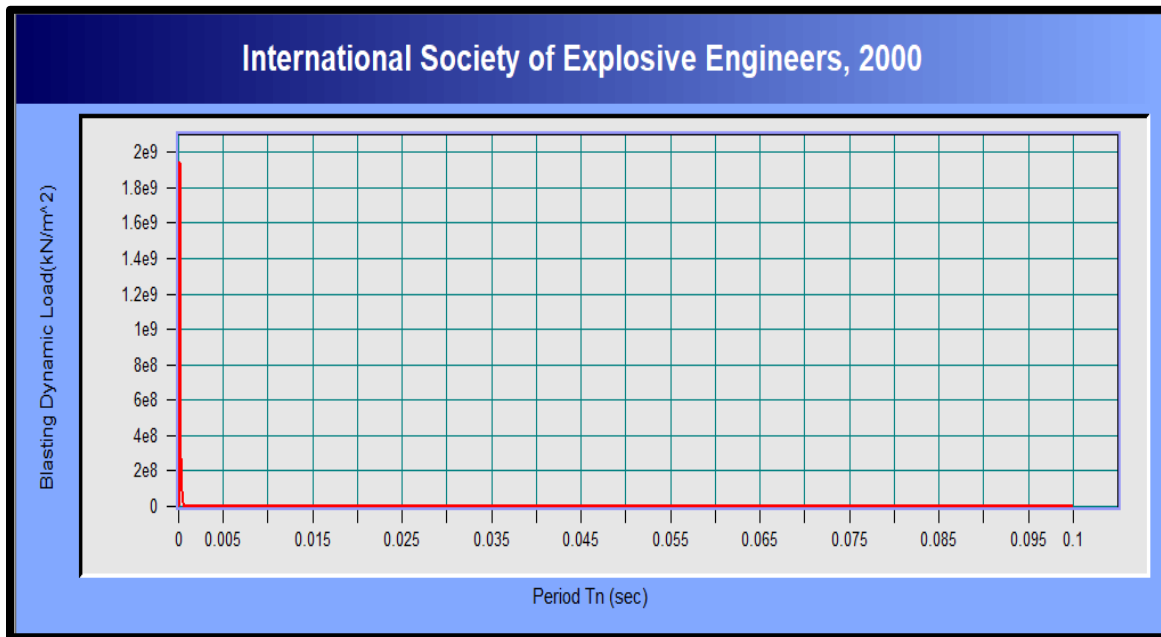


Figura 7. Descripción del comportamiento temporal de una voladura por explosivo ANFO según la International Society of Explosive Engineers a través del software MIDAS GTS NX. Fuente: Elaboración propia

La presión de detonación originada por la energía cinética de las partículas resulta ser proporcional a la densidad y al cuadrado de la velocidad de detonación. En la figura anterior también se puede apreciar que la liberación de energía cinética se desarrolla en un pequeño periodo de tiempo, esta es la clave que proporciona al explosivo un singular poder expansivo.

Capítulo 3

Metodología

El presente capítulo describe cronológicamente los procedimientos que se llevan a cabo para alcanzar el objetivo general propuesto en la investigación, brindando una fundamentación del por qué, para qué y cómo se realizó cada actividad.

Una vez concordado el objetivo general de la investigación se inició el desarrollo del anteproyecto que dio forma y bases para el desarrollo del presente estudio, se definió que la investigación sería de tipo cuantitativo ya que consta de procesos de experimentación que desembocan en la generación de un modelo tridimensional del macizo rocoso sometido a cargas externas y finalmente resultados de esfuerzos y deformaciones en la zona de explotación.

Inicialmente se realiza la revisión de la información existente en la cantera Agregados y Mezclas Cachibí, ya que existen datos geológicos y topográficos que sirven como base para crear parte del modelo tridimensional de la zona de estudio.

Posteriormente se realizan las pruebas que permitirán conocer las propiedades índice de los testigos de roca, los cuales fueron tomadas en el área de estudio y remoldeadas en el laboratorio.

Los ensayos y las normatividades con la que fueron realizados son detalladas a continuación en la tabla 2:

Tabla 2. Ensayos realizados en laboratorio

<i>Nombre del Ensayo</i>	<i>Normatividad</i>	<i>Parámetros Obtenidos</i>
Gravedad específica absorción de agregados gruesos.	INV E-223	Gravedad específica, humedad, densidad y porosidad
Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock.	ASTM D2845	Velocidad P, velocidad S, módulo cortante, módulo de compresibilidad, módulo de Young
Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method.	ASTM D5873-00	Resistencia a la compresión simple
Propiedades mecánicas de las rocas- Ensayos para determinación de la resistencia	UNE 22950-90	Resistencia a la compresión simple
Slake durability test	ASTM D4644	Alteración de la roca a la inmersión

Nota. Elaboración propia

Además de los ensayos normalizados se realizaron mediciones en campo con acelerómetro TEK Model 130-SM, a partir de las cuales se calcularon el periodo fundamental y el amortiguamiento de la roca.

A continuación, se realiza la clasificación del macizo rocoso por el método de Bieniawski (Rock Mass Rating) y luego se analizará este macizo con el criterio de Hoek & Brown, en el cual van incluidos criterios del GSI (Geological Strength Index) enunciado por Hoek.

Recopilada la información de los ensayos y la clasificación del macizo rocoso, se organiza y procesa usando el software Midas GTS NX. Para esta modelación se toman los datos de topografía existentes en la cantera y se le ingresan los nuevos parámetros

obtenidos mediante ensayos y correlaciones, adicionalmente se hace el análisis de voladuras ingresando los resultados de las ondas generadas por las explosiones.

Concluida la generación del modelo geotécnico y dinámico del macizo rocoso se hace la respectiva calibración buscando que las características del producto sean lo más ajustadas a la realidad.

Finalmente se presenta la información de manera ordenada por medio de recursos visuales como tablas, gráficos y modelos matemáticos a partir de lo cual se da respuesta a los objetivos de la investigación y se contribuye al desarrollo del conocimiento, aportando conclusiones prácticas y metodológicas además de recomendaciones para futuras investigaciones.

Capítulo 4

Propiedades Índice del Macizo Rocosó

Las propiedades índice permiten describir las rocas de una manera sencilla y predecible con respecto a su comportamiento ingenieril. Para realizar la recolección de información del macizo rocoso de Cachibí, se emplearon las propiedades índice descriptivas, de clasificación y de diseño las cuales se encuentran descritas a continuación:

4.1 Propiedades índice descriptivas



Figura 8. Basalto. Elaboración Propia

- Nombre de la roca: Basalto.
- Color: Presenta variaciones entre el negro grisáceo y el gris verdoso.
- Textura: Presenta variaciones en el tamaño de los cristales pasando de afanítica (tamaño de grano fino a muy fino) a finogranular.

- Grado de meteorización: En la zona de estudio se encontró roca fresca, donde ya se han realizado trabajos de limpieza para retirar la capa orgánica y la roca muerta. En la zona de falla se presenta alto grado de meteorización mientras que, en el resto del sector el grado de meteorización es bajo.
- Grado de esfuerzo: Se encontraron zonas de fracturas de espesor variable que pueden alcanzar hasta 1,10 m, donde la roca se encuentra altamente fracturada y presenta relleno de carbonatos y epidota como componentes principales; estas fracturas presentan una dirección general N10°-20°E/70°-75°NW. En algunas de estas zonas, las rocas presentan un agrietamiento más intenso, las cuales pueden ser asociadas a zonas de falla.



Figura 9. Zona de falla con relleno de carbonatos y roca meteorizada. Elaboración propia

4.2 Propiedades índice de clasificación

4.2.1 Densidad

Se realizó un ensayo de gravedad específica (definida como el peso unitario del material dividido por el peso unitario del agua destilada a una temperatura de 4 °C) y de absorción de agregados gruesos, siguiendo el procedimiento registrado en la norma INV E-223; la figura 10, muestra el tipo de muestra de basalto empleado para la realización de este ensayo.



Figura 10. Muestra de basalto empleada para el ensayo. Adaptado de Laboratorio de Geología y Mecánica de rocas (MERO), Universidad del Valle.

Procedimiento:

- Se satura la muestra, siendo sumergida por 24 horas de modo que los poros intersticiales queden saturados de agua.
- Se retira la muestra del agua y se seca de forma superficial para ser pesada (es decir el peso de solido más el peso del líquido)
- Se obtiene el volumen de la muestra por el método gravimétrico.

- Se seca la muestra al horno y se determina nuevamente la masa (en este caso se supone que es solo el peso del sólido)
- Se realiza el cálculo de densidad, gravedad específica y absorción.

Posteriormente, para realizar los cálculos de humedad, volumen de vacíos, densidad y porosidad, son tomados los pesos de las muestras en condición saturada, sumergida y seca, donde se emplean las siguientes relaciones para la obtención de los resultados requeridos:

$$Humedad = \frac{Peso_{muestra} - Peso_{seco}}{Peso_{muestra}} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$Humedad_{Saturada} = \frac{Peso_{saturado} - Peso_{seco}}{Peso_{saturado}} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$Volumen_{sólidos} = \frac{Peso_{seco}}{Gravedad_{específica}} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$Volumen_{vacío} = Volumen_{total} - Volumen_{sólidos} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$Densidad = \frac{Peso_{seco}}{Volumen_{total}} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$Porosidad = \frac{Volumen_{vacíos}}{Volumen_{sólidos}} * 100\% \quad \text{Ecuación 27}$$

Los datos obtenidos en este laboratorio, al igual que los resultados correspondientes a estos cálculos, se encuentran consignados en las tablas 3 y 4.

Tabla 3. Resultados laboratorio de ensayo de gravedad específica

<i>Muestra</i>	<i>Peso matraz + Agua no enrasada (g)</i>	<i>Peso matraz + Agua no enrasada + solidos (g)</i>	<i>Peso matraz + Agua enrasada + solidos (g)</i>	<i>Temperatura (°F)</i>	<i>Peso matraz + Agua enrasada (g)</i>	<i>Masa solidos (g)</i>	<i>Gs</i>	<i>Promedio Gs</i>
1.1	181,21	233,76	370,5	80	335,95	52,55	2,92	
1.2	183,28	235,57	370,72	80	335,95	52,29	2,99	2,95
1.3	176,47	229,18	370,76	79	336,03	52,71	2,93	
2.1	178,90	234,34	372,81	78	336,12	55,44	2,96	
2.4	176,38	226,85	369,39	76	336,27	50,47	2,91	2,92
2.5	174,15	225,14	369,55	78	336,12	50,99	2,90	

Nota. Elaboración propia

Tabla 4. Cálculos de humedades, densidad y porosidad

<i>Muestra</i>	<i>Peso (g)</i>	<i>Peso Saturado (g)</i>	<i>Peso Sumergido (g)</i>	<i>Peso Seco (g)</i>	<i>Humedad (W%)</i>	<i>Humedad Saturada (W%)</i>	<i>Vol. Total</i>	<i>Vol. Solidos</i>	<i>Vol. Vacíos</i>	<i>Densidad</i>	<i>Porosidad (%)</i>
1	507,10	506,09	333,97	502,60	0,89	0,69	172,10	170,63	1,48	2,92	0,87
2	486,10	486,48	321,45	481,80	0,89	0,96	165,00	164,83	0,19	2,91	0,12

Nota. Elaboración propia

4.2.2 Resistencia

Para la obtención de las propiedades índices de resistencia, se requiere realizar ensayos como dureza, velocidad sónica, carga puntual y resistencia a la compresión simple como se detalla a continuación.

4.2.2.1 Velocidad Ultrasónica

Para la realización de este ensayo, se sigue el procedimiento estipulado en la norma ASTM D2845, conocida como “Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constant of Rock”.

Esta prueba de pulso ultrasónico es un procedimiento sencillo que utiliza la transmisión de ondas a través de un medio, de modo que se puedan calcular las propiedades y parámetros como el caso de las constantes elásticas, especialmente en especialmente en materiales isotrópicos o con ligera anisotropía.

El ensayo consiste en la medición del tiempo de propagación, parámetro con el que se calcula la velocidad de propagación de ondas longitudinales y transversales, obteniendo así algunos parámetros mecánicos del material, como el módulo de elasticidad E , el módulo cortante G , el coeficiente de Poisson, y los parámetros de Lamé.

Si es conocida la distancia entre el transmisor y el receptor, y la diferencia de tiempo entre las dos señales, se puede calcular la velocidad de propagación de la onda, sea por compresión o cortante (ondas primarias o secundarias)

Durante la ejecución de los trabajos en el laboratorio, se empleó el Sistema WAVEME P and S y el software asociado empleado para la configuración de los parámetros de control de señales y para la adquisición de datos durante el ensayo.

Además, cuenta con una interface completa y eficiente para la elaboración de informes y registros de los resultados obtenidos en la prueba. Los datos del espécimen empleado y el montaje requerido para la prueba, se encuentran inscritos en la tabla 5 y figura 11 respectivamente.

Tabla 5. Datos del espécimen prueba velocidad sónica

<i>Datos del espécimen de prueba</i>	
Longitud	11,00 cm
Diámetro	4,80 cm
Volumen	199,05 cm ³

Nota. Elaboración propia con base en los Valores estándar de la probeta.

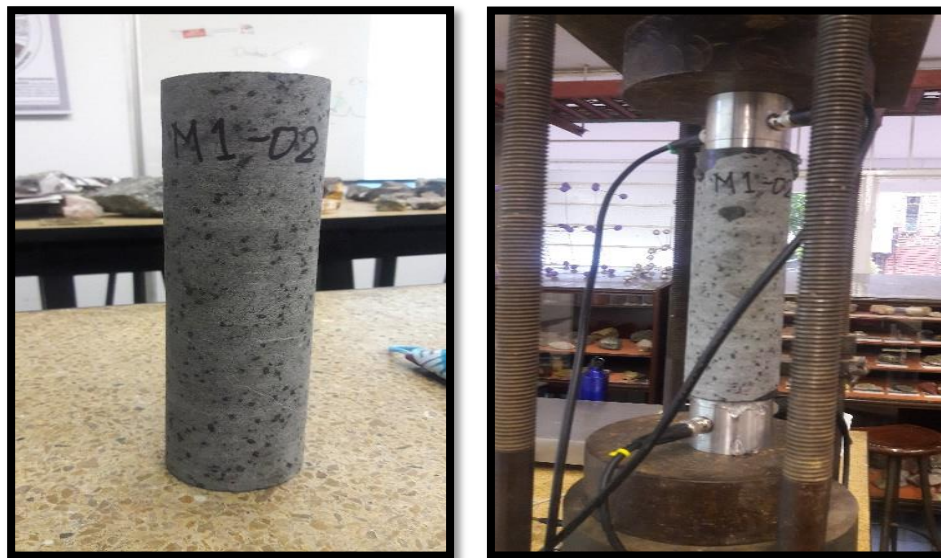


Figura 11. Muestra de roca para ensayo y montaje respectivo. Adaptado de Laboratorio Geología y Mecánica de Rocas (MERO), Universidad del Valle.

Al realizar la prueba como se describió en la figura anterior se tomaron datos, los cuales se encuentran consignados en la figura 12, correspondiente al grafico de la onda longitudinal P en roca.

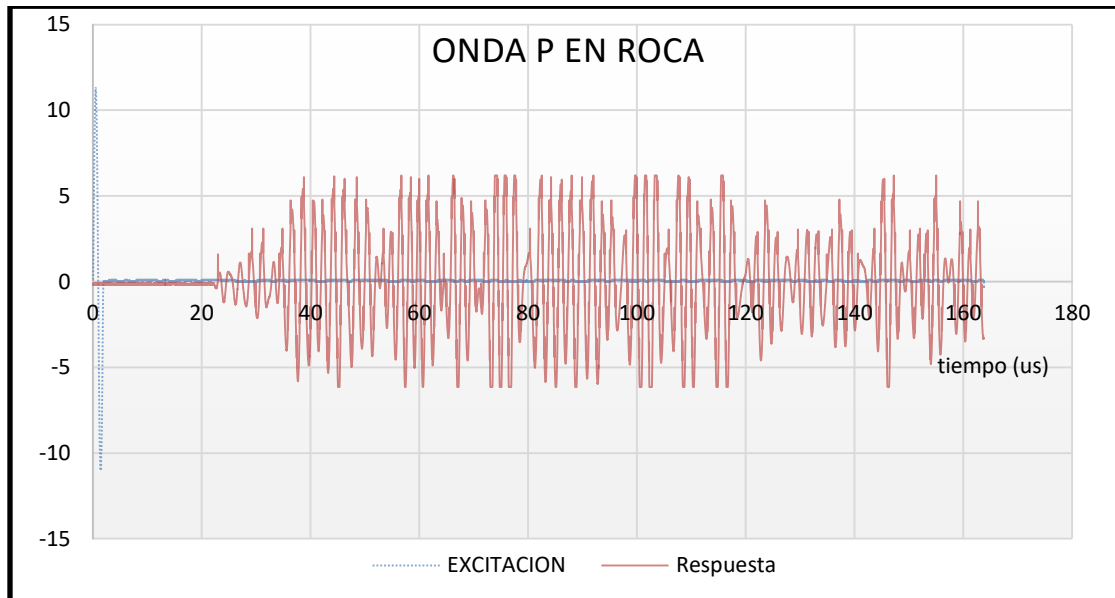


Figura 12. Onda P en Roca. Realización Propia.

Teniendo en cuenta las expresiones dadas en la tabla 6, se procede a realizar los cálculos requeridos para la obtención de los parámetros descritos anteriormente.

Tabla 6. Ecuaciones requeridas para el ensayo de velocidad sónica.

Ecuaciones empleadas	
$Vel\left(\frac{m}{s}\right) = \frac{Longitud_{muestra}(mm)}{Tiempo(\mu s)}$	Siendo el “tiempo” la lectura en donde la curva de respuesta corta el eje 0 por primera vez.
$Modulo_{corte\ max}(G_{max}) = \rho * V_s^2$	Ecuación tiempo promedio Garner V_p : ft/s
$Modulo_{poisson}(v) = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$	Siendo: ρ : Peso específico de la muestra. (Kg/m ³) V_s : Velocidad de la onda de corte. (m/s)
$Modulo_{compresibilidad}(k) = \frac{2G(1+v)}{3(1-2v)}$	V_s : Velocidad de la onda de corte V_p : Velocidad de la onda de compresión
$Modulo_{Young}(E) = 2G(1+v)$	Siendo: G : Modulo. De corte v : Modulo de Poisson

Nota. Elaboración propia.

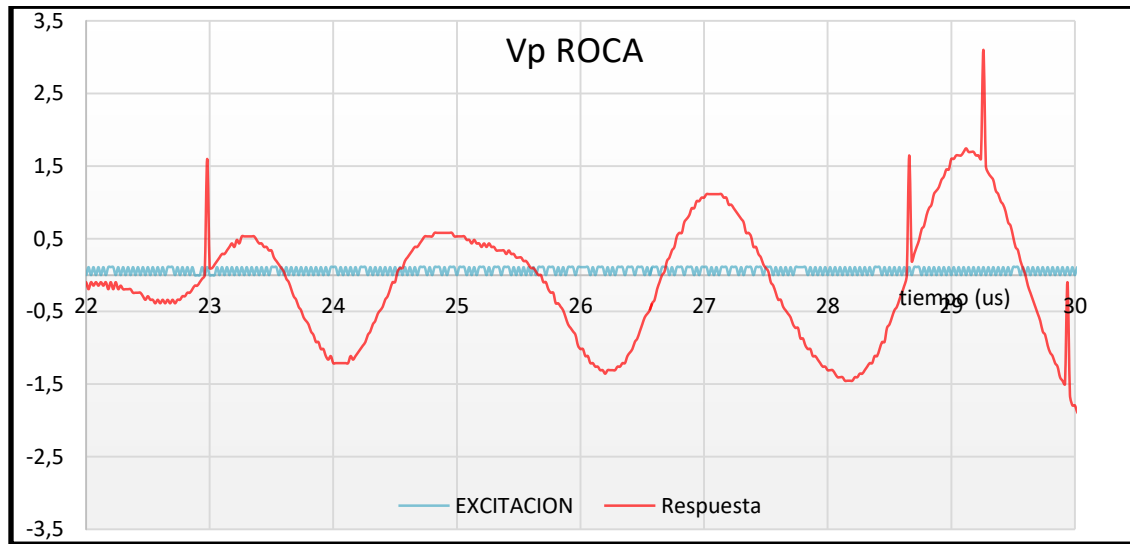


Figura 13. Velocidad P en Roca. Realización Propia.

Se puede apreciar en la figura 13, correspondiente a la excitación y respuesta del basalto a la compresión el tiempo obtenido de 22,96 μs de modo tal que se pueda encontrar el valor de la velocidad de la onda a compresión como lo describe la ecuación 28:

$$V_{pRoca} = \frac{110mm}{22,96\mu s} = 4790 \frac{m}{s} \quad \text{Ecuación 28}$$

A partir de este valor y conociendo que el coeficiente de Poisson del basalto es de 0.29, se determinó el valor de la velocidad de onda secundaria a través de la expresión mostrada en la ecuación 29:

$$v = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} = 0.29 \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde resolviendo la ecuación cuadrática anterior y considerando la raíz solución positiva asociada, se obtuvo un valor para la velocidad de la onda S (V_s) para el

espécimen de roca de 2590 m/s. De este modo los resultados obtenidos en el laboratorio fueron los siguientes:

Tabla 7. Resumen de parámetros dinámicos de la roca obtenidos mediante el ensayo de velocidad ultrasónica

Parámetros del Basalto	
V_p (m/s)	4790
V_s (m/s)	2590
ρ (g/cm ³)	2,30
G (GPa)	15,44
ν	0,29
K (GPa)	31,61
E (GPa)	39,83

Nota. Elaboración propia, Donde V_p = Velocidad de onda P, V_s = Velocidad de onda S, Parámetros dinámicos: E = Módulo de Young, G = Módulo cortante y ν = Relación de Poisson

4.2.2.2 Resistencia a la Compresión Simple

Para la obtención de este parámetro se emplearon la forma directa e indirecta, el método del esclerómetro que es directo y el método por resistencia a la compresión inconfiada que es indirecto, quienes serán detallados a continuación.

4.2.2.2.1 Método del Esclerómetro.

Para la realización de este ensayo, se empleó el método del esclerómetro siguiendo las normas ASTM D5873-00 o “Hardness by Rebound Hammer Method” y la UNE-EN 12504-2 o “determinación del índice de rebote” definida para concreto hidráulico.

Este método de ensayo es empleado para determinar el Índice de Rebote (R) del material de roca usando un martillo de acero accionado por resorte, denominado martillo de rebote. Su uso está muy extendido actualmente, debido a su facilidad, bajo costo y rapidez de utilización.

El método de cálculo de la resistencia de muestras de rocas a partir del empleo del Martillo Schmidt, proporciona un procedimiento no destructivo para la evaluación rápida de la dureza de las rocas; Antes de iniciar las mediciones con el martillo, se deben realizar y registrar lecturas sobre el yunque de calibración del martillo, para asegurar que las lecturas se encuentren dentro del rango recomendado por el fabricante del equipo. En caso de no cumplir dicha condición, el martillo debe ajustarse según las recomendaciones del fabricante.

Para la realización del ensayo se coloca la probeta de roca de manera horizontal y el esclerómetro de manera vertical (formando ángulo recto con la probeta), y a favor de la gravedad como lo evidencia la figura 14.

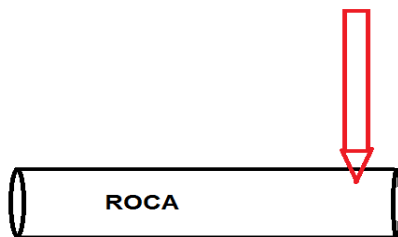


Figura 14. Configuración Probeta – Esclerómetro. Realización Propia.

Del mismo modo, se realizó un total de 10 mediciones a la muestra, consignados en la tabla 8.

Tabla 8. Mediciones realizadas con el esclerómetro

Referencia Muestra	Determinación del Índice de Rebote									
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
M2-01	32	40	42	40	32	41	40	41	41	41

Nota. Elaboración propia.

Con las muestras tomadas, se calculó el valor del rebote medio con estos datos, de modo que de cada 10 valores fueron eliminados los 5 menores, obteniendo así el valor medio con los 5 restantes, como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Cálculo de rebote a partir del martillo Schmidt

Referencia Muestra	Determinación del Índice de Rebote										Valor Medio Rm (*)	Valor Medio Corregido
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10		
M2-01	32	40	42	40	32	41	40	41	41	41	41	41

Nota. Elaboración propia

En función de la inclinación del martillo, se ingresó con el valor del rebote medio como lo especifica el apéndice A, desde el eje de las abscisas hasta alcanzar el valor de la densidad de la roca. A partir de este punto, se trazó una línea horizontal hasta cortar el eje de ordenadas, de esta forma se obtuvo el valor de la resistencia a compresión simple de la roca.

Para la densidad de la roca se tomó el valor obtenido en laboratorios anteriores el cual corresponde a 2.93 gr/cm³ (29.3 KN/m³). De este modo se obtuvo el valor correspondiente a la resistencia de compresión simple, el cual fue de 97 MPa.

4.2.2.2.2 Resistencia a la compresión simple inconfiada

La prueba se encuentra estandarizada correspondiendo a las normas ASTM D7012-04 denominada como “Standard Test Method for Compressive Strength and

Elastic Module of Intact Rock Core Specimens Under Varying States of Stress and Temperatures”, la UNE 22950-90 o “*Propiedades mecánicas de las rocas – Ensayos para la determinación de la resistencia – Parte 1: Resistencia a la compresión uniaxial*”, y la UNE 22950-90 nombrada “*Propiedades mecánicas de las rocas – Ensayos para la determinación de la resistencia*”

La resistencia a la compresión (RCS) es la carga por unidad de área a la que el material falla por fracturación por cizalla o extensional; A continuación, se presenta de manera breve el procedimiento del ensayo que fue ejecutado en la práctica de laboratorio:

- La probeta de roca antes para ser ensayada debía cumplir con una serie de requerimientos:
 - La relación longitud a diámetro debía estar entre 2 y 2.5.
 - El diámetro debía ser superior a 10 veces el tamaño del mayor grano de la roca, y no inferior a 47 milímetros.
 - La probeta debía ser lisa y sus bases paralelas y planas, y perpendiculares al eje de la probeta.

Para la práctica, la información de la probeta empleada al igual que su comprobación de aptitud para la prueba, se encuentran descrita en la tabla 10.

Tabla 10. Referencia de la Probeta empleada en la práctica.

Referencia de Probeta - Roca					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Área (cm²)	Volumen (cm³)	Densidad (kg/cm³)
4.73	12.73	0.609	17.59	223.88	0.0027
Relación Esbeltez (2.5 < E < 3.0)				2.7	OK

Nota. Elaboración propia.

- Se calibró la celda (usando la hoja de calibración del fabricante de la celda).
- Se colocó la probeta en el aparato introduciendo la información solicitada. Se aseguró que la platina apenas haga contacto con el espécimen.
- Se instaló el extensómetro para el registro en sentido longitudinal con un extremo apoyado en la superficie móvil del marco de prueba. El extensómetro fue ajustado en una superficie estable e inmóvil.
- Se instaló la galga para medición de la deformación diametral.
- Se aplicó la carga a una velocidad entre 0.5 y 1.0 MPa por segundo. La velocidad de carga fue aplicada continuamente de tal forma que la rotura se produjera entre los 5 y 10 minutos del inicio de aplicación de carga, de modo que, en ese tiempo, la roca se viese de forma similar a lo que se evidencia en la figura 13.
- Se aplicó la carga axial constantemente hasta que la carga se volviera constante, se redujera, o alcanzara un nivel de deformación predeterminado.
- Se registraron las lecturas de carga aplicada, lecturas del extensómetro y de la galga.
- Fue determinado el contenido de agua de la muestra.



Figura 15. Roca fallada por carga axial. Adaptado de Laboratorio Geología y Mecánica de Rocas (MERO), Universidad del Valle.

Después de realizado el procedimiento, se procedió a realizar los cálculos correspondientes a la deformación axial y horizontal de la roca, la primera correspondiente a un valor de lectura directa de un ensayo y la segunda obtenida a través de un cálculo con un factor de la galga que corresponde a $2.13 \pm 1\%$ más cercano para cada carga de interés.

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta D}{D} \quad \text{Ecuación 31}$$

Aunque la norma no lo indica, se realiza el cálculo el área de la sección transversal corregida y posteriormente el esfuerzo a compresión.

$$\sigma_l = \frac{P}{A}$$

Ecuación 32

De acuerdo con el análisis de los datos obtenidos el valor de resistencia a la compresión inconfiada de la roca es 641.06 kg/cm² (64MPa), que corresponde al valor del esfuerzo de compresión máximo.

Con la realización de los cálculos anteriormente descritos, se realizó un gráfico esfuerzo de compresión (ordenadas) y deformación axial (abscisas), con el fin de visualizar fácilmente este comportamiento, como se evidencia en la figura 16.

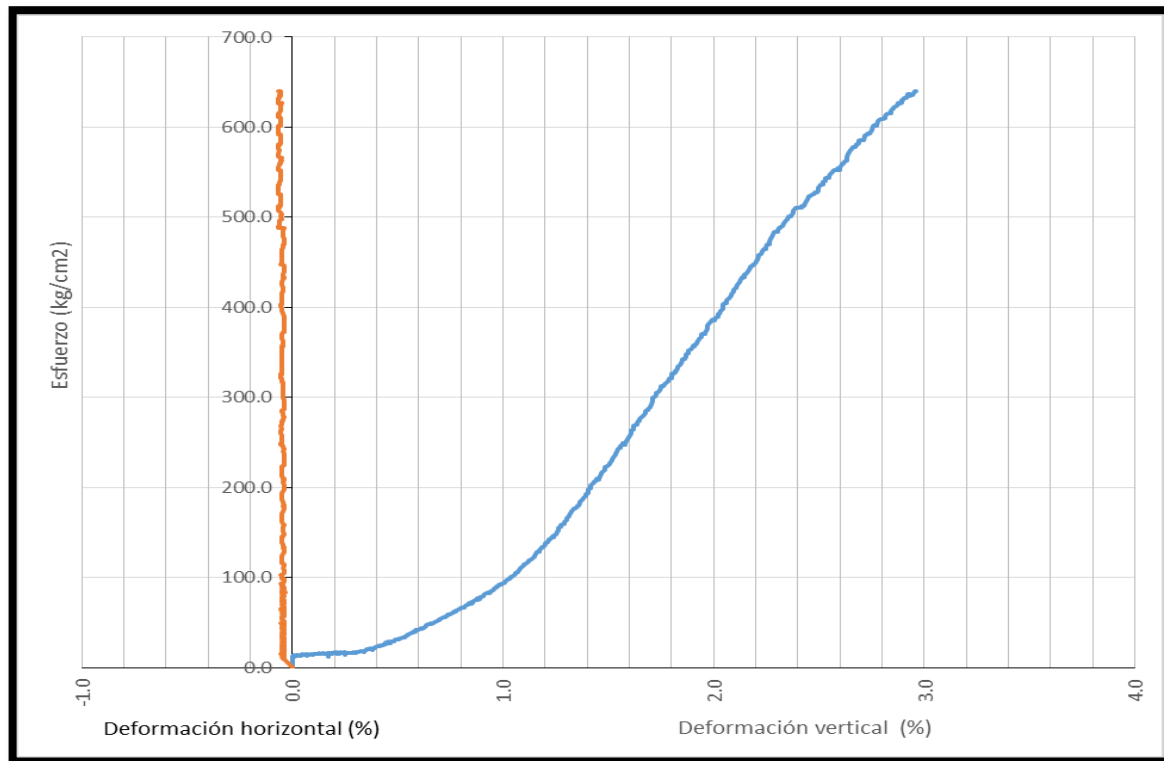


Figura 16. Gráfica Esfuerzo - Deformación. Realización Propia.

4.2.2.3 Durabilidad

Para la realización de esta prueba, se procedió a recrear un ensayo de inmersión estática Dusseault (1893), que comprende la inmersión de una muestra de roca (en este caso basalto) en este caso con la finalidad de evaluar de forma relativamente rápida, representativa y económica, el nivel de alterabilidad o susceptibilidad de un determinado material cuando es sumergido en agua de forma estática, así como su comportamiento a lo largo del tiempo. Mediante este ensayo se pudo evaluar de forma expedita, el comportamiento en servicio del basalto bajo condiciones severas de humedad o drenaje deficiente; hay que tener en cuenta que, a diferencia de los otros ensayos realizados, no cuenta con una norma estandarizada.

Las muestras de los materiales rocosos son introducidas dentro de los recipientes, los cuales deben contener un volumen de agua que garantice una altura de líquido de 5 cm, de modo tal que se puedan sumergir totalmente.

Luego, se procedió a evaluar de forma visual la reacción de las muestras durante intervalos de tiempo determinados (0 min, 1 min, 10 min, 60 min, 300 min y 1440 min) describiendo la reacción de la muestra en cada caso, conforme a las categorías definidas por Dusseault; para este propósito se emplearon las tablas de categorización de durabilidad, propuestas y relacionadas en las tablas 11 y 12 representando gráficamente los resultados teniendo en cuenta la escala del tiempo de forma logarítmica.

Tabla 11. Existencia de Componentes Arcillosos liberables (Dusseault)

Clase	Descripción
C	El agua está limpia (No hay)
M	El agua está turbia (Hay)

Nota. Recuperado de Guías Laboratorio Curso Mecánica de Rocas Universidad del Valle

Tabla 12. Descripción del deterioro de la muestra (Dusseault).

Clase	Descripción
	SIN O CON LIGERO DETERIORO
S (A, B)	Se conserva prácticamente la forma original de la muestra, aunque pueden producirse pequeños fragmentos o esquirlas.
	DETERIORO MEDIO
M (C)	Se han desprendido fragmentos o esquirlas que han alterado la forma original pero todavía puede adivinarse esta
	DETERIORO ALTO
H (D, E)	La muestra se ha deteriorado o desintegrado de tal forma que ni siquiera puede ya adivinar la forma original

Nota. Recuperado de Guías Laboratorio Curso Mecánica de Rocas Universidad del Valle

Después de realizada la respectiva inspección visual a la muestra en los periodos descritos, se consignaron los resultados de la muestra del material bajo estudio en la tabla 13, donde se determinó que la muestra no sufrió ningún tipo de alteración debido a la inmersión (Clase S del Ensayo de Dusseault).

Tabla 13. Resultados ensayo de Dusseault.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Tipo de alteración</i>	<i>Observaciones</i>
0	A	
1	A	
5	A	
10	A	
30	A	
60	A	
300	A	Burbujas en superficie
1440	A	

Nota. Elaboración Propia

4.3 Propiedades Índice de Diseño

Las propiedades de diseño que fueron determinadas son el periodo fundamental y el amortiguamiento de la roca; Para el cálculo de dichas propiedades fueron realizadas mediciones en la cantera con un acelerógrafo de referencia TEK Model 130 – SM, propiedad de la Universidad del Valle, con el objetivo de obtener un registro temporal de las voladuras ejecutadas para la obtención de la materia prima necesaria para la elaboración de los productos que comercializa la cantera. En este caso dichos registros corresponden al día 14 de diciembre del 2015 entre las 3:20 pm y 5:20 pm.

El acelerógrafo tuvo que ser instalado cerca de las trituradoras, esto se debe a que es el único sitio dentro de la zona de estudio donde hay acceso a energía eléctrica, además se encuentra protegido del sol y la lluvia y se halla cerca de las voladuras que se realizan. Al estar en una zona de vibración constante se debe hacer un filtro para que esta interferencia sea minimizada.

Los registros obtenidos por el acelerógrafo fueron procesados a través del software MathWorks MATLAB, el cual inicialmente pasa los datos del dominio temporal al dominio de frecuencias, para de este modo realizar un filtro pasa baja tipo Butterworth con frecuencia de corte de 20 Hz para minimizar la interferencia anteriormente descrita. Una vez realizado este proceso fueron revisadas las gráficas de registro de las voladuras, a partir de estas fueron obtenidos los valores de periodo fundamental y amortiguamiento de la roca presente en la cantera, como lo evidencia el apéndice B.

Basados en las gráficas mencionadas anteriormente, fueron obtenidos los valores correspondientes amortiguamiento y periodo en cada uno de los canales, como lo muestran las ecuaciones 33 hasta la 38.

Canal Vertical:

$$Periodo_{fundamental} = \frac{1}{9.137} = 0.109s \quad \text{Ecuación 33}$$

$$Amortiguamiento = \frac{F_b - F_a}{2F_n} = \frac{9.141 - 9.131}{2 * 9.137} * 100\% = 0.054\% \quad \text{Ecuación 34}$$

Canal Transversal:

$$Periodo_{fundamental} = \frac{1}{9.412} = 0.106s \quad \text{Ecuación 35}$$

$$Amortiguamiento = \frac{F_b - F_a}{2F_n} = \frac{9.419 - 9.408}{2 * 9.412} * 100\% = 0.058\% \quad \text{Ecuación 36}$$

Canal Longitudinal:

$$Periodo_{fundamental} = \frac{1}{9.173} = 0.122s \quad \text{Ecuación 37}$$

$$Amortiguamiento = \frac{F_b - F_a}{2F_n} = \frac{8.176 - 8.164}{2 * 8.173} * 100\% = 0.073\% \quad \text{Ecuación 38}$$

Con los datos de periodo y amortiguamiento de las tres posiciones del acelerógrafo fueron Promediados (Ecuaciones 39 y 40) para de este modo obtener los valores totales correspondientes, que se hallan consignados en la tabla 14.

$$Periodo_{fundamental} = \frac{0.122 + 0.106 + 0.109}{3} = 0.112s \quad \text{Ecuación 39}$$

$$Amortiguamiento = \frac{0.073 + 0.058 + 0.054}{3} = 0.062\% \quad \text{Ecuación 40}$$

Tabla 14. Resultados propiedades índice de Clasificación obtenidas en el laboratorio.

Propiedad	Valor
Gravedad Específica	2.93
Humedad (%)	0.89
Densidad (g/cm ³)	2.92
Porosidad (%)	0.494
Velocidad de onda P (m/s)	4760
Velocidad de onda S (m/s)	2590
Módulo cortante (GPa)	15.44
Módulo de compresibilidad (GPa)	31.61
Módulo de Young (GPa)	39.83
Resistencia a la compresión simple por método de esclerómetro (MPa)	97
Resistencia a la compresión simple compresión inconfiada (MPa)	64
Alteración de la muestra a la inmersión	No alterada
Amortiguamiento longitudinal (%)	0.062
Periodo Fundamental (s)	0.112

Nota. Elaboración Propia

Para determinar el valor de la resistencia a la compresión de la roca con la que se trabajó el modelo, se tuvo en cuenta estudios anteriores realizadas en la cantera por Restrepo Mora (2013), donde fueron tomadas 24 probetas con muestra de roca que fueron sometidas al ensayo de resistencia a la compresión inconfiada.

La media aritmética del valor obtenido en este laboratorio fue de 99.7 MPa, siendo un valor cercano a la resistencia a la compresión simple por el método del esclerómetro, razón por la cual se conservó este valor para cálculos posteriores.

Algunos aspectos que influyen ampliamente en la resistencia de las rocas, incluidas las que se encuentran bajo estudio, son las diaclasas y el respectivo estado de alterabilidad.

Capítulo 5

Caracterización del macizo rocoso

Se ha dividido el área de estudio en 3 unidades, la zona norte conformada por la unidad geológica de basaltos – diabasas, la zona sur por lavas almohadillas y la zona central donde se encuentran las fallas.

Las tres unidades litológicas se correlacionan con lo que en la literatura se denomina Formación Volcánica (Kv), A continuación, se describen las principales características de estas zonas:

5.1 Unidad Basaltos y diabasas (Zona Norte)

En esta unidad se encuentran zonas de fracturas de espesor variable que pueden alcanzar hasta 1,10 m, donde la roca se encuentra altamente fracturada y presenta relleno de carbonatos y epidota como componentes principales, estas fracturas presentan una dirección general N10°-20°E/70°-75°NW.

Esta unidad se encuentra fuertemente fracturada y diaclasada en dos direcciones predominantes N20°-30°E buzando 65°NW y N70°-80°W hasta E-W buzando 75°NE, otra dirección presente en la zona es N65°-75°W buzando 69°NW, esta última es menos constante. Asociándolas a zonas de falla, donde se encuentra con relleno de carbonatos y

salbanda hacia la zona del plano definido por la estructura como se evidencia en la figura 17.



Figura 17. Diaclasas en la unidad de Basaltos – Diabasas. Realización Propia

Estas rocas presentan un perfil de meteorización con espesor variable, en la parte superior a una capa correspondiente a suelo residual con alto contenido de materia orgánica, limo arcilloso y con presencia de raíces que puede alcanzar hasta 2,0 m de espesor; esta capa se encuentra supra yaciendo la roca altamente meteorizada, conformando lo que se denomina roca muerta; seguido de este horizonte se encuentra una zona de transición entre la roca muerta y la roca fresca, en cual la roca se encuentra moderadamente meteorizada y conserva rasgos de la textura original de la roca, entre ambos horizontes pueden alcanzar hasta 15m de espesor, en la parte inferior del perfil de meteorización general para la zona, se encuentra la roca fresca, alcanza espesores mayores a 60,0 m.



Figura 18. Roca muerta en perfil de meteorización. Realización Propia

5.2 Unidad Lavas Almohadillas (Zona Sur)

Esta unidad litológica se identificó en varios sectores de los títulos mineros, hacia la parte sur y centro del título 03-034 definida como una zona en la que afloran lavas almohadilladas limitadas por el sistema de fracturas con dirección N20-30E, en la parte norte del título minero HF8-151 y hacia la parte oeste del título minero 13129.

Litológicamente presenta características similares a la unidad de basaltos-diabasas. Superficialmente se observa que la roca presenta una estructura almohadillada, de donde recibe su nombre; mineralógicamente se encuentra principalmente anfíbol y plagioclasas.

En la zona donde se encuentran aflorando las lavas almohadilladas se hace notable la variación en el tamaño de los cristales siendo finogranular; esta unidad

presenta al menos dos patrones de agrietamiento con direcciones N16E / 79SE y N76W / 84NE.



Figura 19. Afloramiento de lavas almohadilla. Realización Propia

5.3 Zona central (Fallas)

Estructuralmente la zona se encuentra afectada por varios sistemas de esfuerzos exhibiendo un alto nivel de agrietamiento, donde la dirección N20°-30°E se convierte en la principal tendencia del área de estudio, mostrando planos de debilidad en la zona de explotación. Otros sistemas observados presentan direcciones N70°- 80°W hasta E-W y N50°- 60°W. En el área de estudio, la principal estructura corresponde a un sistema de fallas en dirección N20E con altos ángulos de buzamiento (subverticales), que demarcan

una zona con un nivel mayor de agrietamiento en la unidad litológica, que las rocas que se encuentran alrededor.

Se realizó la caracterización del macizo rocoso en la zona de estudio, donde fueron utilizados los sistemas de clasificación RMR y GSI. Del estudio geológico existente realizado por la empresa Gemi (2013), se toman datos de las discontinuidades en los respectivos sectores, como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15. Características de las discontinuidades

Característica	Descripción
Orientación	N20°E / 60°NW, N70°W / 85°NE y N70°E / 67°NW.
Espaciado	Cerrado (60 – 200 mm) a un espacio extremadamente cerrado (< 20 mm).
Dimensiones	Discontinuidades subcontinuas de continuidad pequeña (1-3 m) a una continuidad muy pequeña (<1 m), en casos puntuales se observó una continuidad alta (10 – 20 m).
Rugosidad	Escalonada rugosa y predominio de rugosidades ondulada rugosa teniendo un (JRC) de 6 – 8.
Resistencia de los labios de la discontinuidad	Tipo descolorido debido a que la coloración de la roca (rojiza con pintas blancas) es distinta al que tendría una roca sana (gris verdoso con pintas blancas).
Apertura	5 mm hasta 3 cm, abierta.
Relleno	Limo arenoso de capa vegetal y suelo residual, en otros casos corresponde a carbonatos.
Circulación de agua	Se visualizó la presencia de agua, en casos puntuales asociados a discontinuidades impermeables como diques.
Número de familias de discontinuidades	Dos familias, pero en algunos casos se visualizaban tres o más familias.
Tamaño de bloques	Entre 60 cm hasta 2 mm aprox. Los bloques son de tipo poliédrico.

Nota. Recuperado de Gemi, 2013

6.1 Clasificación RMR

Es un sistema de clasificación del macizo rocoso, que permite la relación entre los índices de calidad como el RQD, (que se valora desde 0 en las rocas muy malas, hasta 100 en las rocas sanas) con los parámetros de diseño. Para este caso particular, debido a que no fue posible realizar perforaciones en estos afloramientos, se partió de la relación ($RQD = 115 - 3,3 * J_v$; donde J_v es el número de discontinuidades encontradas por m³).

6.1.1 Zona Norte

Fueron tomados los datos correspondientes al número de discontinuidades que fueron promediadas para hallar el valor de este índice, que en este caso para la zona norte el coeficiente J_v obtuvo un valor de 6.

Con la información obtenida en campo y complementada con los datos de la tabla de discontinuidades mostrada anteriormente, se realizó la tabla que calcula el valor del índice RMR para esta zona, como lo muestra el apéndice E.

6.1.2 Zona Central

Al igual que para la zona anterior, fueron tomados los datos correspondientes al número de discontinuidades por metro cubico, que luego serían promediados para hallar el valor del índice RQD; para esta zona el coeficiente J_v es de 6

Con la información recolectada en campo y la información de la tabla de discontinuidades, se realizó la tabla que calcula el valor del índice RMR para esta zona, como lo muestra también el apéndice C.

Para estimar en esta zona la resistencia a la compresión uniaxial, se empleó el martillo geológico donde se determinó a partir de la correlación que se encuentra señalada en la tabla 16, que la roca es moderadamente resistente (clase R3 según Brown).

Tabla 16. Características de las discontinuidades según Brown

<i>Clase (a)</i>	<i>Clasificación de la roca según su resistencia</i>	<i>Resistencia Uniaxial (MPa)</i>	<i>Índice de carga puntual (MPa)</i>	<i>Estimación en terreno de la resistencia</i>	<i>Ejemplos</i>
R6	Extremadamente resistente	> 250	> 10	Golpes de martillo geológico solo causan descostramientos superficiales en la roca	Basalto fresco, chert, diabasa, gneis, granito, cuaporita
R5	Muy resistente	100 – 250	4 – 10	Un trozo de roca requiere varios golpes para fracturarse	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, gneis, granodiorita, caliza, mármol, riolita, toba
R4	Resistente	50 – 100	2 – 4	Un trozo de roca requiere más de un golpe con el martillo geológico para fracturarse	Caliza, mármol, filitas, arenisca, esquistos, pizarras
R3	Moderadamente Resistente	25 – 50	1 – 2	Un trozo de roca puede fracturarse con un único golpe de martillo geológico, pero no es posible descostrar la roca con un cortaplumas.	Arcillolita, carbón, concreto, esquistos, pizarras, limolitas
R2	Débil	5 – 25	Resultados poco fiables (25 MPa)	Un golpe con la punta del martillo geológico deja una indentación superficial. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas, pero con dificultad	Creta, sal mineral, potasio
R1	Muy Débil	1 – 5		La roca se disgrega al ser golpeada con la punta del martillo geológico. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas	Roca muy alterada o muy meteorizada
R0	Extremadamente Débil	0.25 – 1		La roca puede ser indentada con la uña del pulgar	Salbanda arcillosa dura

Nota. Recuperado de Estimación en terreno de la resistencia a la compresión uniaxial (Hoek & Brown)

6.1.3 Zona Sur

Fueron tomados los datos correspondientes al número de discontinuidades por metro cubico, que luego serían promediados para hallar el valor del índice RQD con la que se determina el RMR; para esta zona el coeficiente J_v es de 4.

Con la información recolectada en campo y la información consignada en la tabla de discontinuidades, se realizó la tabla que calcula el valor del índice RMR para esta zona, como lo muestra al igual que en las otras zonas el apéndice C

6.2 Índice geológico de resistencia (GSI)

El índice Geológico de Resistencia (GSI) es un sistema de caracterización de macizos rocosos que ha sido desarrollado en la ingeniería de mecánica de rocas para satisfacer la necesidad de datos de entrada confiables relacionados con las propiedades del macizo rocoso requeridos para el análisis numérico o soluciones de diseño para el diseño de túneles, taludes o cimentaciones sobre roca. El carácter geológico del material rocoso, junto con la valoración visual del mismo, son usados directamente como datos de entrada para la selección de los parámetros para predecir la resistencia y deformabilidad del macizo rocoso. (Marinos, P; Marinos, V y Hoek, E. 2007).

De este modo se realizó este índice a las zonas anteriormente descritas, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

6.2.1 GSI Zona Norte

Se presenta la caracterización geotécnica del macizo rocoso correspondiente a esta zona, según el grado de trabazón de bloques o trozos de roca, así como la condición de sus discontinuidades, y de este modo determinar el GSI, teniendo en cuenta que según dicha clasificación esta zona se encuentra fuertemente fracturada en bloques como lo muestra el apéndice D.

Según la clasificación anterior, se procedió a realizar la estimación del índice geológico de resistencia de esta zona (GSI), con una estructura fuertemente fracturada en bloques y condiciones buenas de discontinuidad, lo que le permite tomar un valor entre 50 y 60 como lo muestra también el apéndice D.

6.2.2 GSI Zona Sur

Del mismo modo que con la zona norte, Se presenta la caracterización geotécnica del macizo rocoso correspondiente a la zona sur y la posterior estimación del GSI teniendo en cuenta su caracterización geotécnica del macizo, donde se encontró que en menor medida la zona se halla fracturada levemente en bloques comparado con la zona anterior, tomando un valor GSI de 70 como lo muestra el apéndice D.

6.2.3 GSI Zona Centro

Se presenta la caracterización geotécnica del macizo rocoso correspondiente a la zona centro y la posterior estimación del GSI, donde fue tomada en cuenta su caracterización geotécnica, encontrándose en mayor medida fracturado y adicionalmente

perturbado en bloques comparado con las zonas anteriores, como lo evidencia también el apéndice D.

Al igual que en las zonas anteriores, se realizó la estimación del índice geológico de resistencia de esta zona, donde para este caso se consideró la caracterización geotécnica, la cual es fracturado y perturbado por distintas fallas, al igual que la mala condición de las discontinuidades en la zona (lisas, cizalladas, alteradas con fragmentos granulares) tomando un valor entre 20 y 30, como lo muestra al igual que en las otras zonas el apéndice D.

En la tabla 17 se evidencian los resultados de este índice en cada una de las 3 zonas de la cantera.

Tabla 17. Índices GSI de las 3 zonas

Zona	Estructura del Macizo Rocoso	Condición de las discontinuidades	Valor Nominal	Índice GSI
Norte	Fuertemente fracturado en bloques	Buena	FF/B	55
Centro	Fracturado y Perturbado	Mala	FP/M	30
Sur	Fracturado en bloques	Buena	FB/B	70

Nota. Elaboración Propia

6.3 Criterio de falla generalizado Hoek - Brown

Para obtener los valores de la cohesión y el ángulo de fricción utilizamos el criterio de rotura no lineal de Hoek & Brown, el cual mediante una formulación que relaciona esfuerzos principales, la resistencia a la compresión inconfiada y valores constantes (m_i , s y a) los cuales están relacionados con las características geológicas del

material, realiza una simulación del ensayo triaxial obteniendo las parejas de esfuerzos que permiten graficar los círculos Mohr y la envolvente de falla.

Es necesario realizar ajustes en el de criterio de rotura de Hoek & Brown para obtener la envolvente de rotura de Coulomb equivalente y así resolver la controversia que genera el hecho de que la cohesión y la fricción son funciones de confinamiento y la envolvente de falla de Hoek & Brown es curva. Para este proceso utilizamos las ecuaciones de Balmer (1952) y luego una regresión lineal de la envolvente de falla.

Para determinar el valor de la constante m_i correspondiente a la roca intacta para distintos tipos de material rocoso, se emplea una tabla de estimaciones determinada por Hoek y Brown, donde se obtuvo que el valor de esta constante para basalto es 17 y 4 para el material ubicado en la zona centro, al cual se le asigna el mínimo valor m_i de la tabla debido a su poca resistencia y para evitar sobrevaloración en la calidad del mismo, como lo muestra la figura 20.

Tipo de Roca	Clase	Grupo	Textura			
			Gruesa	Media	Fina	Muy Fina
SEDIMENTARIAS	Clásticas		Conglomerado (22)	Arenisca 19	Limolita 9	Arcillolita 4
			←----- Grauwaca -----> (18)			
	No Clásticas	Orgánicas	←----- Creta -----> 7			
			←----- Carbón -----> (8 – 21)			
		Carbonatos	Brechas (20)	Caliza Esparítica (10)	Caliza Micrítica 8	
	Químicas		Yeso 16	Anhidrita 13		
METAMORFICAS	No Foliadas		Mármol 9	Rocas Córneas (19)	Cuarcita 24	
	Levemente Foliadas		Migmatita (30)	Anfibolita 25 - 31	Milonitas (6)	
	Foliadas		Gneiss 33	Esquistos 4 – 8	Filitas (10)	Pizarras 9
IGNEAS	Intrusivas	Claras	Granito 33		Riolita (16)	Obsidiana (19)
			Granodiorita (30)		Dacita (17)	
		Diorita (28)		Andesita 19		
		Oscuras	Gabbro 27	Dolerita (19)	Basalto (17)	
		Norita 22				
	Extrusivas Pioroclásticas		Aglomerados (20)	Brechas (18)	Tobas (15)	

Figura 20. Valores estimados de la constante de roca intacta m_i . Adaptado de Hoek & Brown, 1980

Posteriormente, aplicando el criterio de falla Hoek & Brown generalizado determinado por la ecuación 41, dados los datos de roca intacta y el GSI de cada zona, donde se obtuvo lo siguiente:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{el} * \left(m_i + \frac{\sigma_3}{\sigma_{el}} + 1 \right)^a \quad \text{Ecuación 41}$$

Donde:

σ_1 y σ_3 : Son los esfuerzos principales

m_i = Constante que depende del tipo de roca

s = Medida de disminución de la resistencia a la compresión simple debido a fracturación.

Hoek & Brown, teniendo en cuenta comprobación con numerosos ensayos triaxiales recomiendan usar valores para σ_3 entre 0 y 0.5 veces el valor de la resistencia a la compresión no confinada σ_{ci} .

6.3.1 Hoek Brown Zona Norte

Dado el valor de la constante de roca intacta del basalto se procedió a calcular el valor de m_b correspondiente a la condición de falla de la zona que es de 3.41 como se evidencia en la ecuación 42.

$$m_b = 17e^{\frac{55-100}{28}} = 3.41 \quad \text{Ecuación 42}$$

En este caso, al tener una zona con un GSI mayor a 25 (55 en esta zona), se aplicó el criterio original de Hoek y Brown para encontrar el parámetro s según la ecuación 43 y determinar el valor de a como 0.5.

$$s = e^{\frac{55-100}{28}} = 0.0673795 \quad \text{Ecuación 43}$$

Aplicando Hoek Brown generalizado utilizando el valor de resistencia a la compresión inconfiada se obtuvieron diversos valores de σ_1 aplicables a la zona, dichos valores están inscritos en la tabla 18.

Tabla 18. Valores de los esfuerzos dado el criterio de Hoek y Brown generalizado de la zona norte

σ_3	σ_1
0	7.96
3	35.48
16	89.16
24	113.42
32	135.16
40	155.26
48.5	175.37

Nota. Elaboración propia

6.3.2 Hoek Brown Zona Sur

Dado el valor de la constante de roca intacta del basalto y el GSI de la zona (70), se calculó el valor de m_b correspondiente a la condición de falla de la zona que es de 5.82 empleando la ecuación 42 mencionada anteriormente.

$$m_b = 17e^{\frac{70-100}{28}} = 5.82$$

Al igual que en la zona norte, al tener un GSI mayor a 25, se aplicó el criterio original de Hoek y Brown para encontrar el parámetro s según la ecuación 43 mencionada anteriormente y del mismo modo determinar el valor de a como 0.5.

$$s = e^{\frac{70-100}{28}} = 0.03567399$$

Aplicando Hoek Brown generalizado en la zona sur, utilizando el valor de resistencia a la compresión inconfiada que es igual en todas las zonas, se obtuvieron diversos valores de σ_1 aplicables a la zona, dichos valores están inscritos en la tabla 19.

Tabla 19. Valores de los esfuerzos dado el criterio de Hoek y Brown generalizado de la zona sur

σ_3	σ_1
0	18.32
8	77.67
16	112.81
24	141.86
32	167.68
40	191.42
48.5	215.02

Nota. Elaboración propia

6.3.3 Hoek Brown Zona Centro

Dado el valor de la constante de roca intacta de brechas en este caso (20) y el GSI de la zona (30), se calculó el valor de m_b correspondiente a la condición de falla de la zona que es de 1.70 empleando la ecuación 42 mencionada anteriormente.

$$m_b = 20 * e^{\frac{70-100}{28}} = 1.70$$

Al igual que en las zonas anteriores, al tener un GSI mayor a 25, se aplicó el criterio original de Hoek y Brown para encontrar el parámetro s según la ecuación 43 mencionada anteriormente e igualmente determinar el valor de a como 0.5.

$$s = e^{\frac{30-100}{28}} = 0.0091188$$

Aplicando Hoek Brown generalizado en la zona centro, utilizando el valor de resistencia a la compresión inconfiada que es igual en todas las zonas, se obtuvieron diversos valores de σ_1 aplicables a esta zona, dichos valores están inscritos en la tabla 20.

Tabla 20. Valores de los esfuerzos dado el criterio de Hoek y Brown generalizado de la zona sur

σ_3	σ_1
0	1.12
3	17.15
6	25.98
9	33.45
12	40.23
15	46.55
18.5	53.54

Nota. Elaboración propia

6.4 Parámetros de Mohr – Coulomb

La mayor parte del software geotécnico se halla escrito en términos de los parámetros de falla de Mohr – Coulomb, donde la resistencia de un determinado macizo rocoso está definida en términos de los esfuerzos efectivos (σ_3 y σ_1) dado que para este parámetro existe una relación lineal entre los esfuerzos efectivos principales, la cohesión y el ángulo de fricción.

Utilizando el criterio de falla Hoek Brown se simula el ensayo triaxial donde se obtienen los esfuerzos efectivos y a partir de estos datos se hallan las tensiones normal y tangencial, las cuales son graficadas dando como resultado la envolvente de falla Mohr Coulomb. Para obtener las tensiones utilizamos las ecuaciones de Balmer (1952):

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} * \frac{\left(\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3}\right)^{-1}}{\left(\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3}\right)^{+1}} \quad \text{Ecuación 44}$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) * \frac{\sqrt{\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3}}}{\left(\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3}\right)^{+1}} \quad \text{Ecuación 45}$$

Una vez graficada la curva que define la envolvente de falla se realiza una regresión lineal, de la cual obtenemos la cohesión identificando el corte con el eje vertical y de dicha recta y el ángulo de fricción calculando el ángulo que forma la recta con el eje horizontal. Este procedimiento se detalla en el apéndice E.

6.4.1 Mohr – Coulomb Zona Norte

El ángulo de fricción se determina como el valor que forma la linealización de la envolvente de falla con el eje horizontal, siendo para la zona norte un ángulo de 50°. Del mismo modo la cohesión del material se determina como el valor del corte de la linealización de la envolvente de falla con el eje vertical, siendo 8 MPa, como lo determina el apéndice E.

La ecuación 46, corresponde a la linealización de la envolvente de falla Mohr Coulomb en esta zona, la cual es:

$$y = 0.608x + 8 \quad \text{Ecuación 46}$$

6.4.2 Mohr – Coulomb Zona Sur

Al igual que en la zona norte, el ángulo de fricción se determina como el valor que forma la linealización de la envolvente de falla con el eje horizontal, siendo para esta zona 35°. La cohesión del material se determina como el valor del corte de la linealización de la envolvente de falla con el eje vertical, siendo 11.05 MPa como lo determina el apéndice E.

La ecuación 47, corresponde a la linealización de la envolvente de falla Mohr Coulomb en esta zona, la cual es:

$$y = 0.70x + 11.05 \qquad \text{Ecuación 47}$$

6.4.3 Mohr – Coulomb Zona Centro

Al igual que en las zonas anteriores, el ángulo de fricción se determina como el valor que forma la linealización de la envolvente de falla con el eje horizontal, siendo para la zona centro un ángulo de 14°; La cohesión del material fue determinado como el valor del corte de la linealización de la envolvente de falla con el eje vertical, siendo 1.49 MPa como se puede apreciar como en las zonas anteriores en el apéndice E.

La ecuación 48, corresponde a la linealización de la envolvente de falla Mohr Coulomb en esta zona, la cual es:

$$y = 0.25x + 1.49 \qquad \text{Ecuación 48}$$

6.5 Ángulo de dilatancia

El ángulo de dilatancia puede tener una influencia significativa en la modelación del comportamiento del suelo y rocas, normalmente este parámetro puede ser

determinado por la evaluación de las deformaciones unitarias volumétricas por medio de un ensayo triaxial, especialmente en suelos de tipo granular, por lo que se tuvo en cuenta para cada una de las zonas bajo estudio.

El ángulo de dilatancia está asociado con el modelo constitutivo Hoek Brown, ya que este parámetro se utiliza al realizar el análisis post-falla del macizo rocoso, el cual es tratado como un criterio de fluencia y el análisis se realiza utilizando la teoría de la plasticidad.

El macizo rocoso analizado puede considerarse de buena calidad geotécnica, por lo tanto, su comportamiento ante la falla es elástico-frágil, como se evidencia en la figura 22.

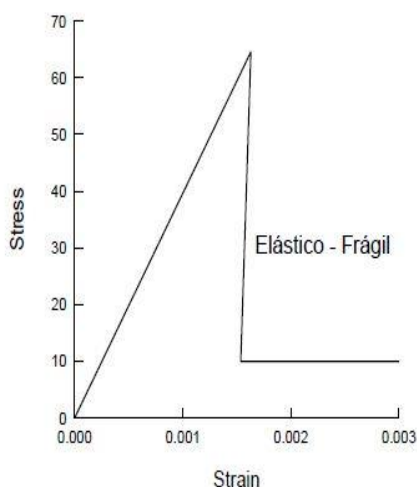


Figura 21. Comportamiento macizo rocoso de buena calidad geotécnica. Adaptado de Hoek & Brown 1980

Cuando la resistencia del material es excedida ocurre una súbita disminución en su resistencia, esto se asocia con una notable dilatancia de los trozos de roca quebrada.

Al no tener los recursos para realizar el ensayo triaxial en la zona de estudio, se tomó como referencia la tesis doctoral “Estudio de Estudio del comportamiento mecánico

de rocas intactas y fisuradas en laboratorio con especial énfasis en la dilatancia” elaborada por Javier Arzúa, donde se obtuvo información que permitió correlacionar el valor del ángulo de dilatancia con la resistencia de la roca. como la que se muestra en la figura 23.

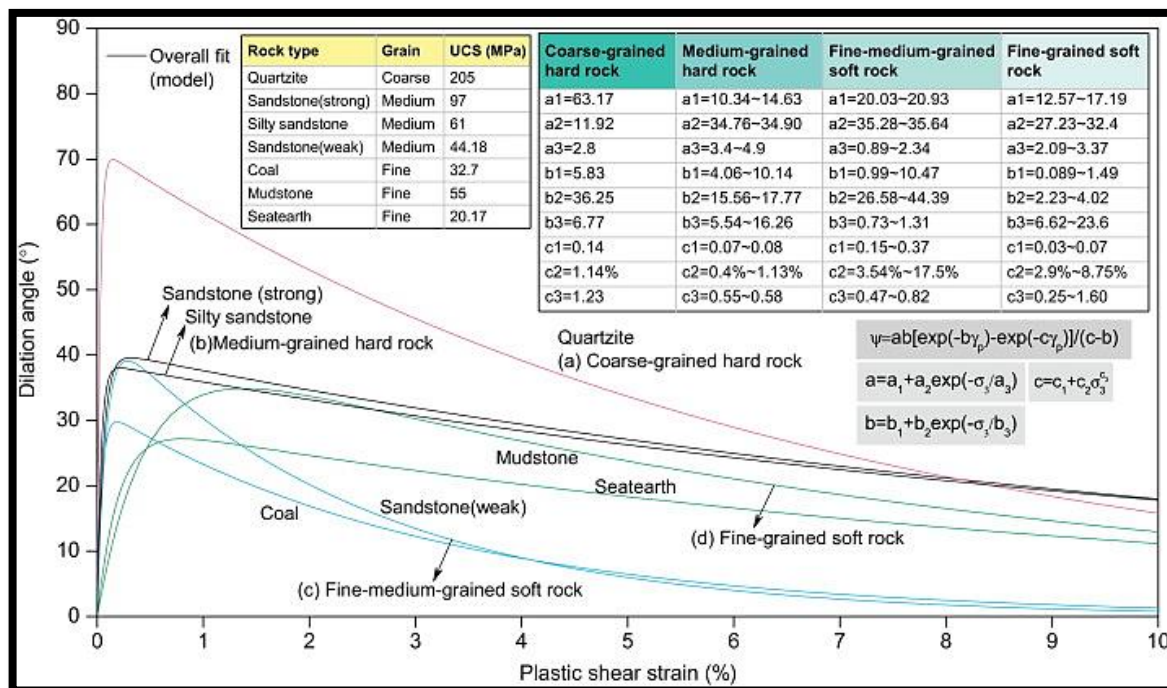


Figura 22. Comportamiento de Ángulos de dilatancia de siete diferentes tipos de rocas como función de la deformación plástica. Adaptado de Arzúa, 2015

6.5.1 Ángulo de Dilatancia Zona Norte

La resistencia a la compresión en esta zona es de 97 MPa, por lo cual puede ser asociado con el tipo de roca Sandstone (strong), cuyos valores del ángulo de dilatancia según la figura 21 varía entre 28 y 40 MPa, de modo tal que se empleó el valor medio que fue 34°.

6.5.2 Ángulo de Dilatancia Zona Sur

La resistencia a la compresión en esta zona es de 97 MPa, por lo cual puede ser asociado con Sandstone (strong), cuyos valores del ángulo de dilatancia según la figura 21 varía entre 28 y 40 MPa, de modo tal que se empleó el valor medio de dicha zona que fue de 34°.

6.5.3 Ángulo de Dilatancia Zona Centro

La resistencia a la compresión en esta zona es de 37 MPa, por lo cual puede ser asociado con Sandstone (weak) y Coal, cuyos valores del ángulo de dilatancia según la figura 21 varía entre 3 y 35 MPa, de modo tal que se empleó el valor medio que fue de 16°.

6.6 Factor de perturbación

Conocido por la letra D, es una calificación que se da a un determinado macizo rocoso, dependiendo de la alteración a la que ha sido sometido. Para rocas intactas este valor es 0 y para macizos rocosos muy perturbados es 1. Puede decirse que se maneja de forma porcentual.

Se puede apreciar en la figura 24 los diferentes tipos de macizos según el valor de este factor.

	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel.	D=0
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo circundante. Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloquen una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la figura.	D=0 D=0.5 No invert
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3m en el macizo rocoso circundante.	D=0.8
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la liberación de tensión resulta en alguna alteración.	D=0.7 Good blasting D=1.0 Poor blasting
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.	D=1.0 Production blasting D=0.7 Mechanical excavation

Figura 23. Clasificación de terrenos según el factor de perturbación. Adaptado de Hoek et al, 2002.

Para este caso, el valor de perturbación D equivale a 1, donde se encuentran minas a cielo abierto que sufren alteraciones significativas debido a grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril del recubrimiento, como lo es el caso de la cantera Cachibí.

Con la información obtenida a partir de ensayos y análisis acerca de las tres zonas de estudio, se resume en la siguiente tabla las propiedades que se van a insertar en el programa Midas GTS NX para la respectiva modelación del terreno, como lo muestra la tabla 21.

Tabla 21. Resumen información para Simulación en Midas GTS NX.

Propiedad	Zona Norte	Zona Centro	Zona Sur
Gravedad Específica	2.93	2.93	2.93
Humedad (%)	0.89	0.89	0.89
Densidad (g/cm ³)	2.92	2.92	2.92
Velocidad de Onda P (Km/s ²)	4.76	4.76	4.76
Velocidad de Onda S (Km/s ²)	2.59	2.59	2.59
Porosidad (%)	0.494	0.494	0.494
Modulo Cortante (GPa)	15.44	15.44	15.44
Módulo de Compresibilidad (GPa)	31.61	31.61	31.61
Resistencia a la Compresión Simple (GPa)	97	37	97
Módulo de Young (GPa)	39.83	39.83	39.83
Alteración de la muestra a la inmersión	No alterada	No alterada	No alterada
Amortiguación longitudinal	0.062	0.062	0.062
Periodo fundamental	0.11	0.11	0.11
RMR	62 (Buena)	47 (Regular)	63(Buena)
GSI	55	30	70
m _i	17	4	17
m _b	3.41	0.33	5.82
a	0.5	0.5	0.5
s	0.00673795	0.0091168	0.003567399
Ángulo de fricción	50	14	35
Cohesión (MPa)	8	1.49	11.05
Ángulo de dilatancia	34	16	34
Factor de perturbación D	1	1	1

Nota. Elaboración propia

Capítulo 7

Modelación numérica y calibración del macizo rocoso a través del programa

MIDAS GTS NX

7.1 Modelación 3d del terreno y simulación de voladuras sobre el macizo rocoso

Para realizar la modelación del macizo en el programa Midas GTS NX, se insertó la topografía y la estratigrafía del terreno de la cantera en el programa. Dicha información (topografía actualizada del terreno, así como información de sondeos realizados) fue suministrada por parte de la cantera.

De acuerdo a la homogeneidad en los sondeos realizados, se clasificaron 10 zonas, las cuales tienen la estratigrafía como lo evidencia la tabla 22; del mismo modo fue establecida la ubicación espacial de estas zonas dentro de la cantera, como lo muestra la figura 24, Con esta información fueron creados los diferentes estratos presentes en la cantera dentro del software.

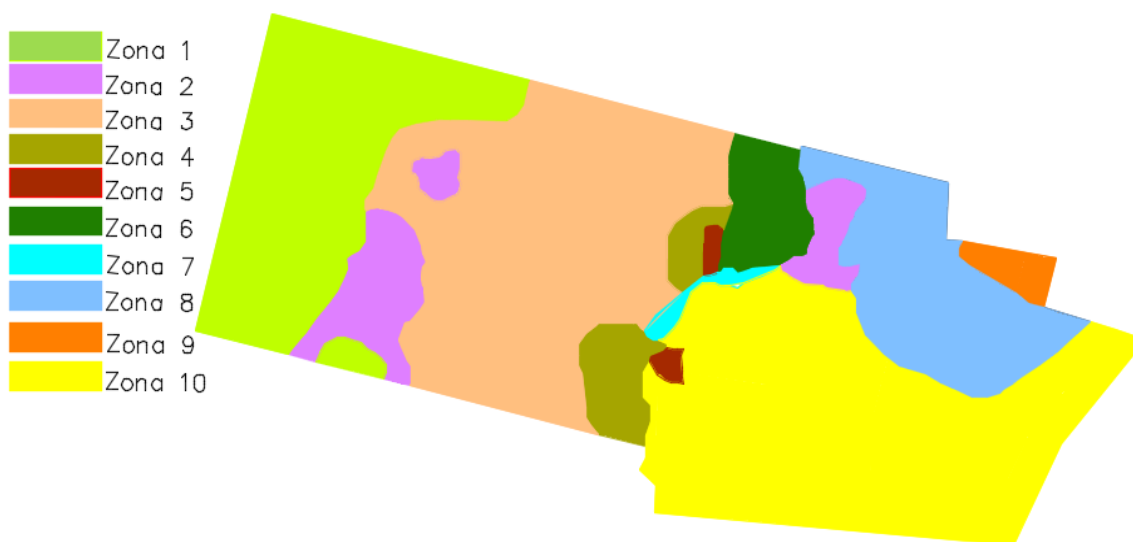


Figura 24. Zonificación de la Estratigrafía en la Cantera Cachibí. Elaboración propia.

Tabla 22. Zonificación de estratos cantera Cachibí.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9	Zona 10
Estéril	1.5 m	0.0 m	1.5 m	1.0 m	1.0 m	1.5 m	1.0 m	0.0 m	0.0 m	0.0 m
Estéril 1	1.5 m	0.0 m	2.0 m	1.0 m	5.0 m	1.0 m	1.0 m	1.0 m	1.0 m	0.0 m
Roca muerta	3.5 m	0.0 m	5.0 m	2.0 m	0.0 m	2.0 m	1.0 m	0.0 m	2.0 m	0.0 m
Transición	6.5 m	3.0 m	5.0 m	1.0 m	0.0 m	15.0 m	6.0 m	2.0 m	3.0 m	0.0 m
Basalto	50.0 m	70.0 m	55.0 m	65.0 m	65.0 m	50.0 m	40.0 m	65.0 m	65.0 m	70.0 m

Nota. Elaboración propia

Con la información de topografía y estratigrafía se procede a realizar la importación de datos, creación de superficie de terreno, caracterización de las propiedades del macizo rocoso y mallado de las zonas de estudio.

El área total del presente estudio comprende 20.73 Has, de las cuales 7.32 Has corresponde a la zona norte, 5.34 Has a la zona sur y 8.07 Has a la zona centro.

Una vez esté modelada y mallada la zona de estudio se procede a crear las voladuras, las cuales están definidas por la función presión de detonación, que involucra la velocidad de detonación y la densidad del explosivo.

Otros factores que influyen en el impacto de la voladura sobre el macizo rocoso están determinados por el área de la zona a explotar, profundidad y diámetro de los barrenos y el tiempo que va a durar la detonación.

En este estudio se evaluará voladuras con dos tipos de explosivo (Anfo y Centra) para luego comparar el impacto de cada uno sobre la zona de estudio.

Después de generarse las funciones de detonación que definen las voladuras, se establecen las cargas y condiciones de frontera del modelo las cuales son: la gravedad y los límites de la zona de estudio respectivamente.

La gravedad es una carga constante en cada uno de los nodos analizados y límites físicos de la zona de estudio actúa como confinamiento para que la onda generada por la voladura no se disperse en el espacio y para limitar el número de operaciones matemáticas y computacionales del programa.

Se asigna en cada zona de estudio (Norte, centro y sur) un grupo de barrenos o malla donde se analizan las voladuras con los dos diferentes tipos de explosivo, estas

mallas son designadas en el modelo como agujeros y contienen la información geotécnica de la zona donde están ubicados.

En total se realizarán seis (6) modelaciones (dos por cada zona de estudio), Posteriormente se crean los casos de análisis, que en este caso fue tiempo-historia lineal y después se procede a ejecutar la simulación.

El paso a paso de la modelación de terreno y creación de zonas de estudio se encuentra detallado en el apéndice F. El mallado del terreno y asignación de voladuras al modelo se encuentra detallado en el apéndice G.

7.2 Calibración del macizo rocoso

Para realizar este proceso de calibración, fue necesario utilizar la información recolectada por el acelerómetro 130-SM cuya hoja de datos se halla en el apéndice H, que se encontraba ubicado en la zona sur de la cantera, donde los datos de las aceleraciones en los 3 ejes a través del software de MATLAB fueron “integrados” en 2 ocasiones a través del comando cumtrapz como se muestra en el Apéndice I o integración por método trapezoidal para de esta forma obtener los desplazamientos correspondientes en esa zona del terreno, como se muestra en la figura 25.

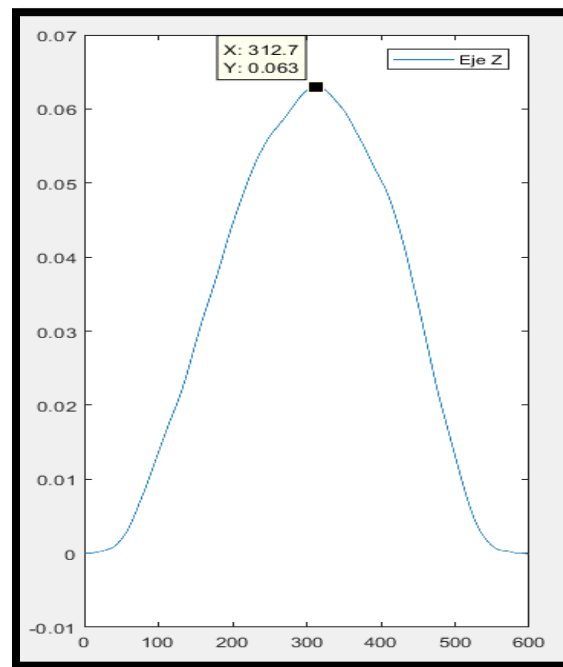


Figura 25. Grafica procesamiento eje Z datos del Acelerómetro 130-SM (m) vs tiempo (s).
Elaboración propia

Los datos obtenidos en las figuras anteriores fueron contrastados con los obtenidos en la simulación, de modo tal que en primer lugar se pudiera comprobar la veracidad de los datos que el software arroja acerca de las variables en estudio y en segundo lugar realizar la calibración del macizo respectiva. Se debe tener en cuenta que, por términos de definición de mallado para la ejecución de los análisis, los resultados obtenidos fueron equivalentes a una aproximación. Se tiene como referencia que el valor máximo obtenido en este proceso fue de 6.3 cm.

Para realizar este proceso, se tomaron los resultados del análisis tiempo – historia, correspondientes a la zona sur donde de los diferentes parámetros que entrega este análisis se requirió el desplazamiento en el eje z, esto debido a que es el único eje donde el sensor empleado registró movimiento, como se muestra en la figura 26.

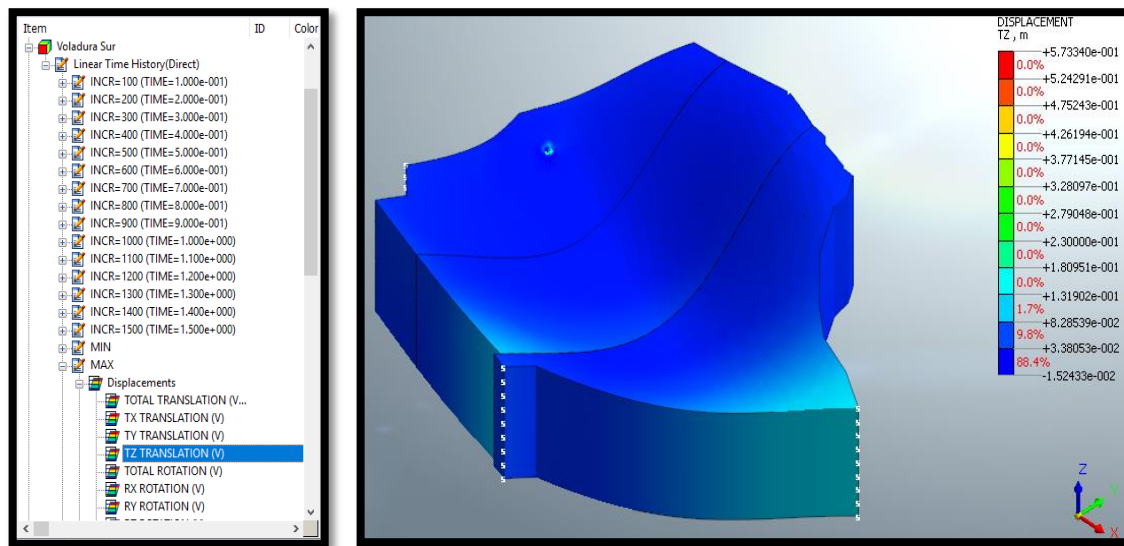


Figura 26. Resultados desplazamientos en Z para realizar calibración, MIDAS GTS NX. Elaboración propia

Al tener estos resultados visibles en pantalla, se pudo extraer el dato correspondiente al nodo donde se encontraba el sensor aproximadamente durante la voladura realizada mediante el comando “*Extract Results*”, ubicado en el área de Resultados en el panel superior del programa como lo evidencia la figura 27.

Este comando permite la extracción de los valores desplazamientos y deformaciones presentes en un determinado nodo o grupo de ellos después de la ejecución de un caso de análisis, permitiendo la selección de estos valores tanto de forma individual como grupal a través de los menús desplegables que la ventana desplegable del comando posee.

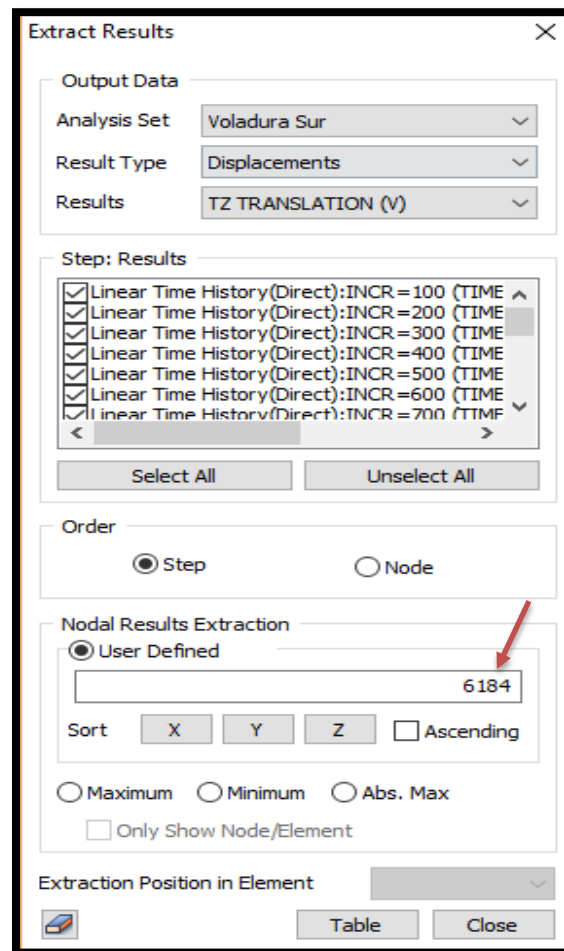


Figura 27. Resultados desplazamientos en Z para realizar calibración, MIDAS GTS NX. Elaboración propia.

Como se muestra en la figura anterior, el nodo correspondiente a la ubicación del sensor es el 6184, ubicado en la zona sur del modelo como se indica en la figura 29, lugar de donde se extraerá la información de este nodo respecto a sus desplazamientos en el eje Z y al presentar los datos en forma de tabla como lo indica la figura 28.

también se puede evidenciar que los datos obtenidos de la simulación son bastante aproximados a los valores arrojados con el proceso realizado con el acelerómetro.

	No	Step	Step Value	Node: 6184 TZ TRANSLATION (V) (m)
	1	Linear Time History(Direct):INCR=1	1.000000e-001	1.035086e-003
	2	Linear Time History(Direct):INCR=2	2.000000e-001	-1.313593e-002
	3	Linear Time History(Direct):INCR=3	3.000000e-001	-1.677716e-002
	4	Linear Time History(Direct):INCR=4	4.000000e-001	-2.271761e-002
	5	Linear Time History(Direct):INCR=5	5.000000e-001	-2.922501e-002
	6	Linear Time History(Direct):INCR=6	6.000000e-001	-3.389719e-002
	7	Linear Time History(Direct):INCR=7	7.000000e-001	-3.640902e-002
	8	Linear Time History(Direct):INCR=8	8.000000e-001	-4.172127e-002
	9	Linear Time History(Direct):INCR=9	9.000000e-001	-4.582651e-002
	10	Linear Time History(Direct):INCR=1	1.000000e+000	-5.033521e-002
	11	Linear Time History(Direct):INCR=1	1.100000e+000	-5.009501e-002
	12	Linear Time History(Direct):INCR=1	1.200000e+000	-5.337869e-002
	13	Linear Time History(Direct):INCR=1	1.300000e+000	-5.510129e-002
	14	Linear Time History(Direct):INCR=1	1.400000e+000	-5.848319e-002
	15	Linear Time History(Direct):INCR=1	1.500000e+000	-6.308305e-002
▶	16	Linear Time History(Direct):MIN	0.000000e+000	-6.308305e-002
	17	Linear Time History(Direct):MAX	0.000000e+000	2.494325e-003
	18	Linear Time History(Direct):ABSOL	0.000000e+000	-6.308305e-002

Figura 28. Datos extraídos del nodo 6184, correspondientes a la ubicación del sensor.

En la figura anterior se encuentra resaltado el valor máximo arrojado en este nodo, que para este caso es de 6.308 cm, dicho valor se halla muy cercano al arrojado por el proceso con el acelerómetro, como se mostró en la figura 26.

Para estimar el error de la simulación respecto de los valores reales obtenidos por el acelerómetro, se procede a determinar el error mediante la ecuación 49.

$$\text{Error} = \frac{\text{Valor medido} - \text{Valor Simulado}}{\text{Valor medido}} \times 100\% \quad \text{Ecuación 49}$$

$$Error = \left| \frac{6.30 \text{ cm} - 6.31 \text{ cm}}{6.30 \text{ cm}} \right| \times 100\% = 0.16\%$$

Se puede apreciar que la simulación tiene un error aproximado al 0.2 %, esto se debe a que como se ha mencionado anteriormente, por términos de recursos computacionales y de tiempo de ejecución de este tipo de análisis se considera una aproximación del suceso respecto a las voladuras a través de la creación de la malla en el modelo por lo que es muy probable que las medidas difieran, en este caso el porcentaje de error es bastante bajo debido a que el nodo ha quedado muy cerca de la ubicación real del sensor en el terreno.

Un aspecto importante a considerar es la orientación del acelerómetro al ser colocado en el terreno, el cual de preferencia debe ser ubicado de la misma forma a como se encuentra el sistema de coordenadas del modelo desarrollado en MIDAS, porque las magnitudes de los desplazamientos pueden ser idénticas a las medidas entregadas por el acelerómetro, pero la dirección o sentido de estas magnitudes no sea el correcto.

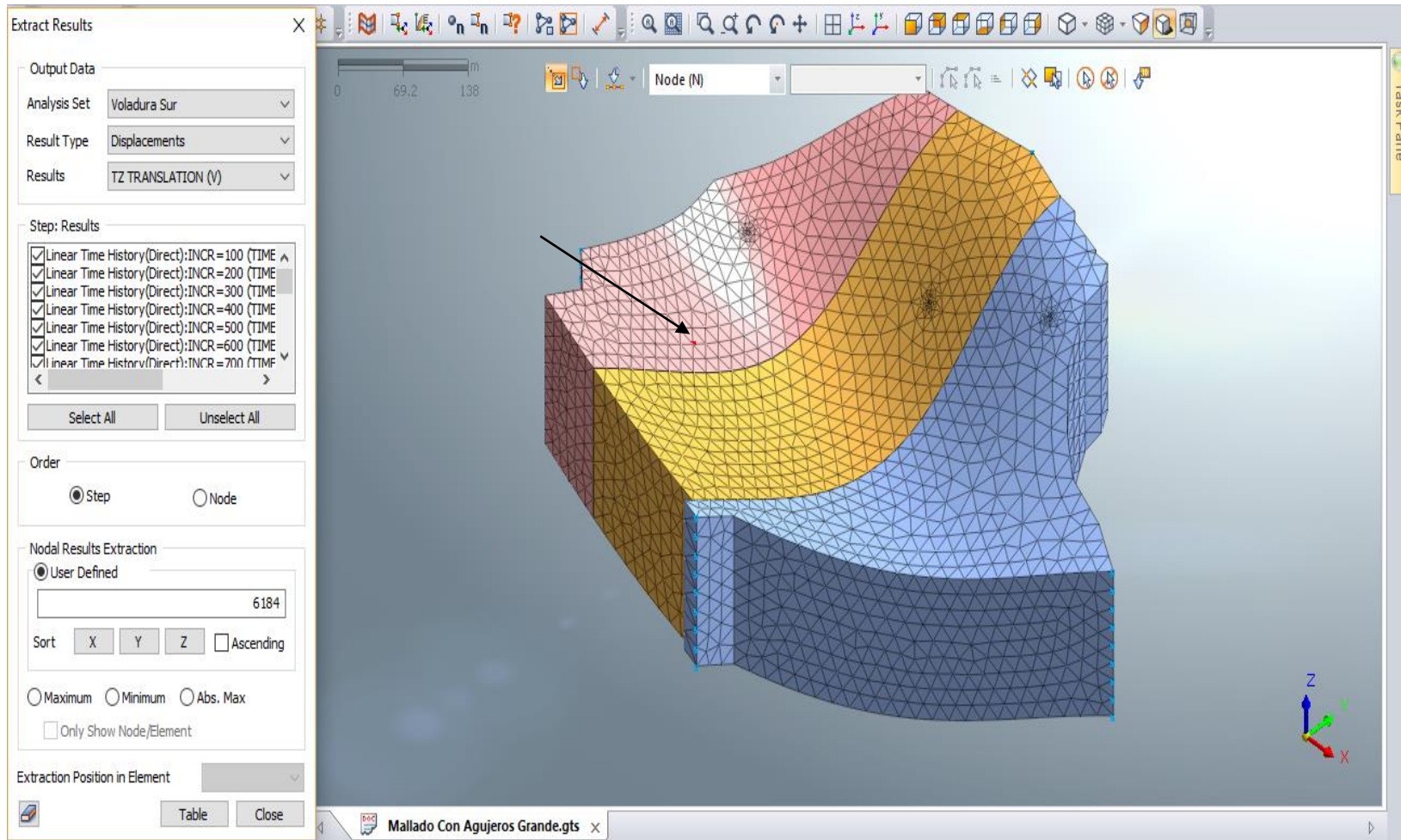


Figura 29. Ubicación del nodo donde se hallaba el acelerómetro dentro de la cantera – MIDAS GTS NX. Elaboración propia

Capítulo 8

Resultados

Después de ejecutarse los 3 casos y la respectiva calibración con el macizo, se obtuvieron una gran cantidad gráficos, de los cuales, para el desarrollo de la presente investigación, se emplearon los desplazamientos totales, los esfuerzos de Von Mises, y el factor de seguridad de cada una de las zonas bajo estudio, esto realizado con los explosivos ANFO y CENTRA, para realizar las respectivas comparaciones de los explosivos con el software.

8.1 Zona Norte

8.1.1 Análisis de impacto sobre el área de estudio con voladura Anfo y Centra

Al realizar la simulación de la voladura en la zona norte con explosivo Anfo se encuentran desplazamientos máximos de 5.4 mm en el área circundante a la detonación (Aproximadamente 207 m²), mientras que con centra los desplazamientos en esta zona están en el rango de 19.5 y 34.6 mm.

Los desplazamientos obtenidos utilizando explosivo centra con respecto al Anfo son aproximadamente 5 veces mayores en la zona aledaña a la detonación.

En zonas más alejadas, correspondientes al 99.4% del área de estudio, los desplazamientos con explosivo Anfo están alrededor de 0.11 mm, mientras que con centra este valor es 0.25 mm, como se ve en las gráficas 30 y 31

Los desplazamientos obtenidos utilizando explosivo centra con respecto al Anfo son aproximadamente 2.5 veces mayores en las zonas más alejadas de la detonación.

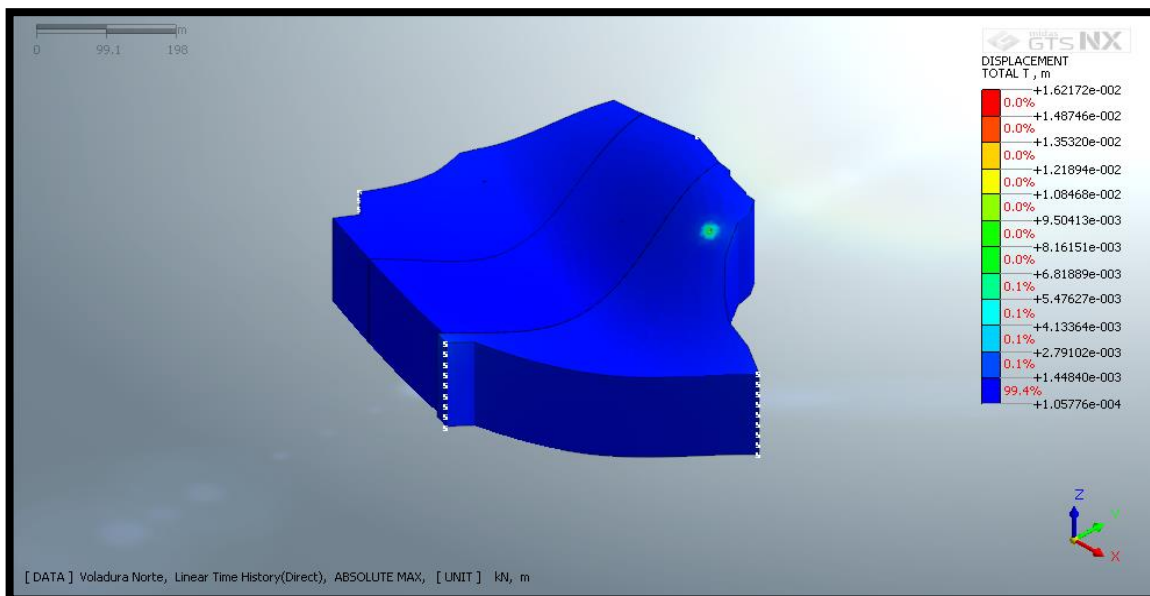


Figura 30 .Desplazamientos totales por voladura utilizando explosivo Anfo en zona norte – Midas GTS NX. Elaboración propia

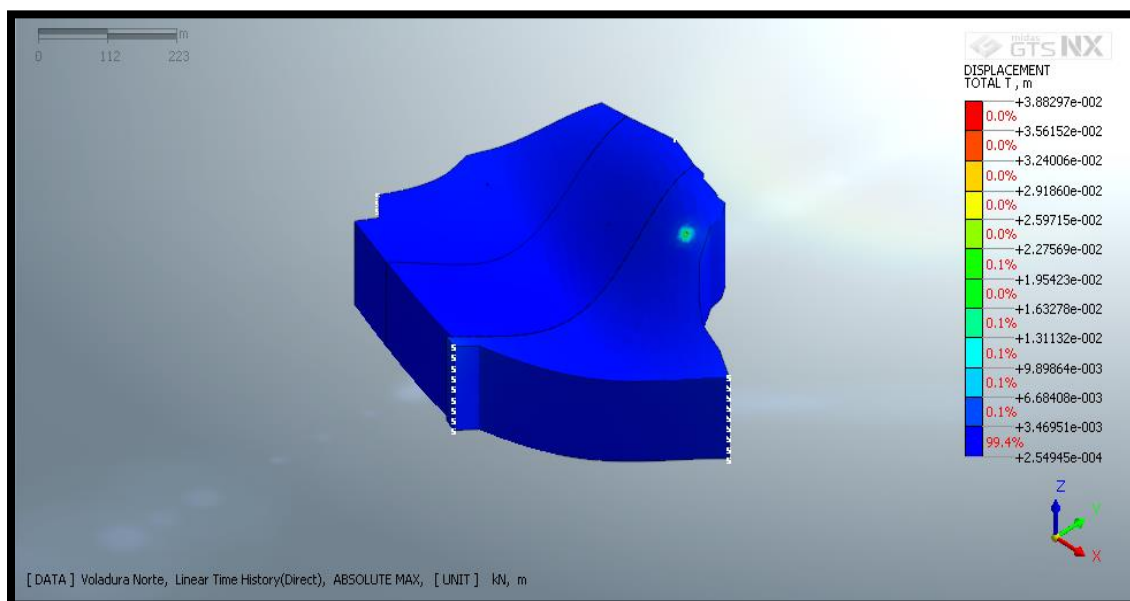


Figura 31. Desplazamientos totales por voladura utilizando explosivo centra en zona norte – Midas GTS NX. Elaboración propia

El análisis de la voladura en la zona norte con explosivo Anfo da como resultado esfuerzos entre 106 y 355 MPa, los cuales logran superar ampliamente el límite elástico del material, deformándolo permanentemente. Esto ocurre en el sector cercano a la detonación (Aproximadamente 3109 m²), mientras que con centra los esfuerzos en esta zona están en el rango de 167 y 753 MPa.

Los esfuerzos obtenidos utilizando explosivo centra con respecto al Anfo son aproximadamente 2 veces mayores en la zona aledaña a la detonación.

En zonas más alejadas, correspondientes al 98.2% del área de estudio, los esfuerzos con explosivo Anfo están en un rango de 0.16 y 71.05 MPa, mientras que con centra este rango es 0.003 y 83.72 MPa.

Los esfuerzos obtenidos utilizando explosivo centra con respecto al Anfo son aproximadamente 1.2 veces mayores en las zonas más alejadas de la detonación-

Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la figura 32 y 33, correspondiente a los esfuerzos de Von Mises como criterio de falla en la zona.

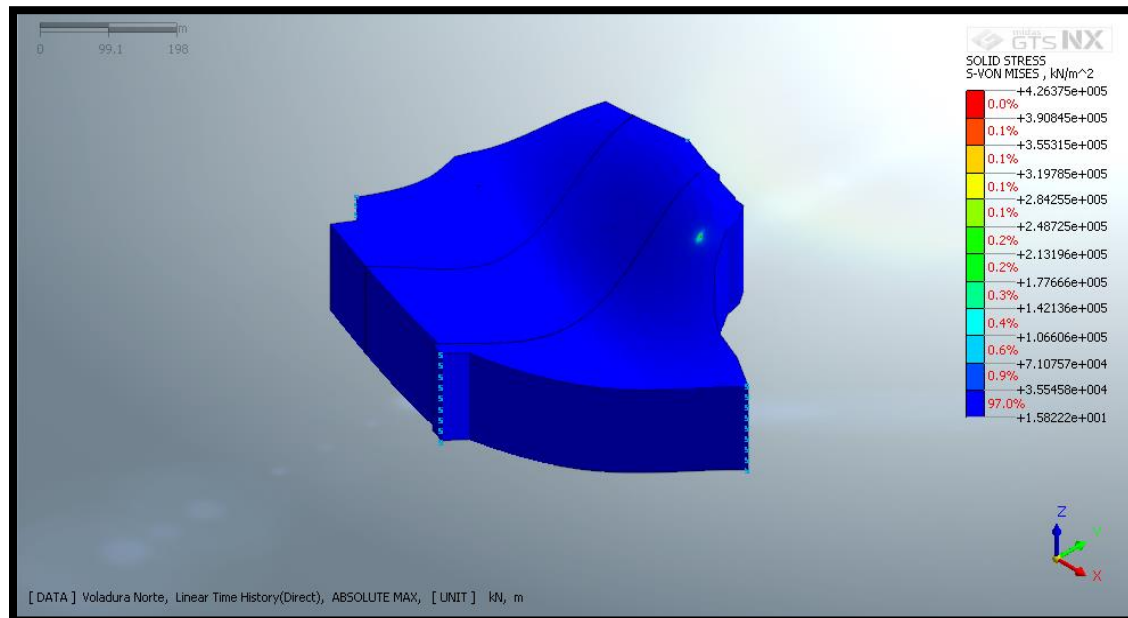


Figura 32 Esfuerzos de Von Mises producidas por la voladura con explosivo Anfo en zona norte – Midas GTS NX. Elaboración propia

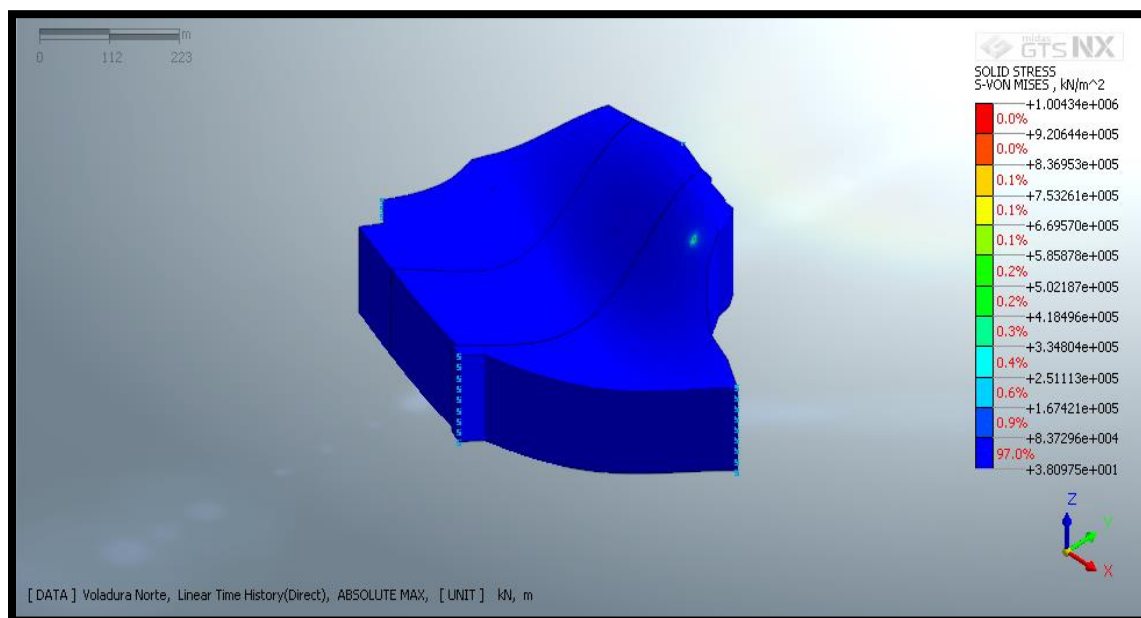


Figura 33. Esfuerzos de Von Mises producidas por la voladura con explosivo centra en zona norte – Midas GTS NX. Elaboración propia

Finalmente, para mostrar un análisis más claro del estado del terreno al ejecutar la voladura en la zona norte con ambos explosivos, se tomó la información arrojada en la

figura 32 y 33, correspondiente al factor de seguridad en esta situación, donde se pudo evidenciar que los valores relativamente cercanos a la explosión e incluso parte de la zona centro vecina a esta voladura (correspondiente al 13.0% del terreno bajo estudio), presentan un factor de seguridad bajo (1.26 con explosivo Anfo y 0.88 con centra). En la zona norte este bajo factor es notorio en la mitad del área y es debido a la cercanía a la detonación. En la zona centro la onda explosiva, debido a la competencia del material, hace que el valor de la resistencia del terreno sea cercano a los esfuerzos a los que es sometido.

En la mitad de la zona norte, la cual está más alejada de la voladura y que corresponde al 20% del área de estudio, el factor de seguridad aumenta significativamente (7.15×10^{18}).

El resto del terreno el cual comprende parte de la zona centro colindante con la zona sur y toda la zona sur se presenta un rango de valores de factor de seguridad muy alto (entre 9.57×10^{18} y 2.87×10^{19} con ambos explosivos), representando la estabilidad de estos sectores del terreno ante voladuras en esta zona, como lo evidencian las figuras 34 y 35.

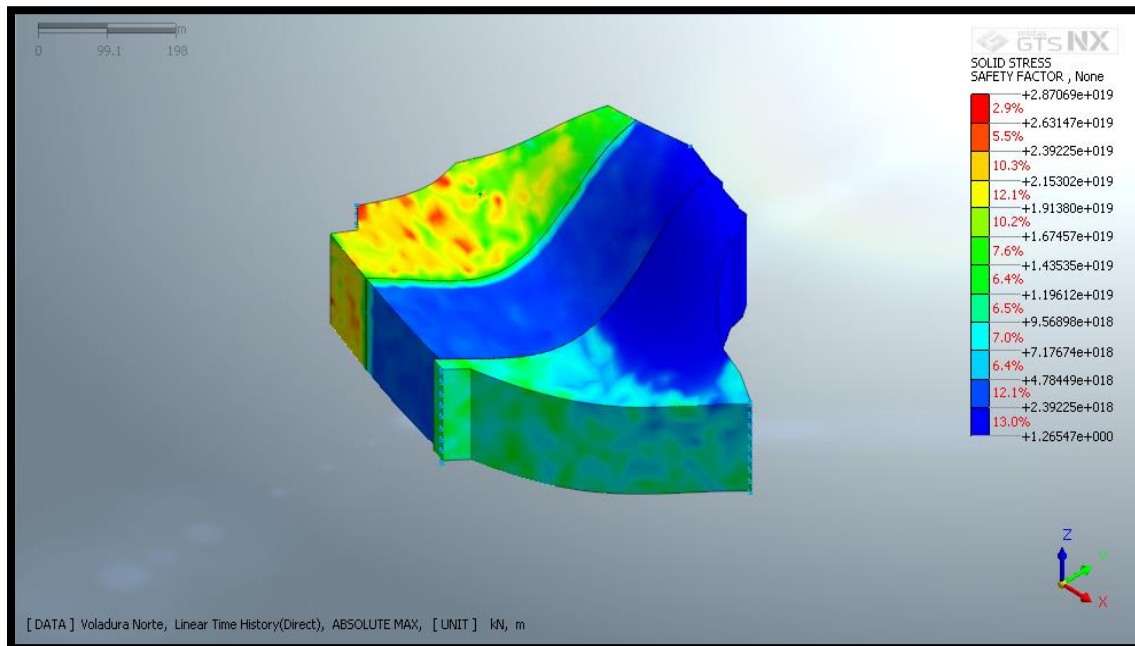


Figura 34. Factor de seguridad producido por voladura en la zona norte con explosivo Anfo – Midas GTS NX. Elaboración propia

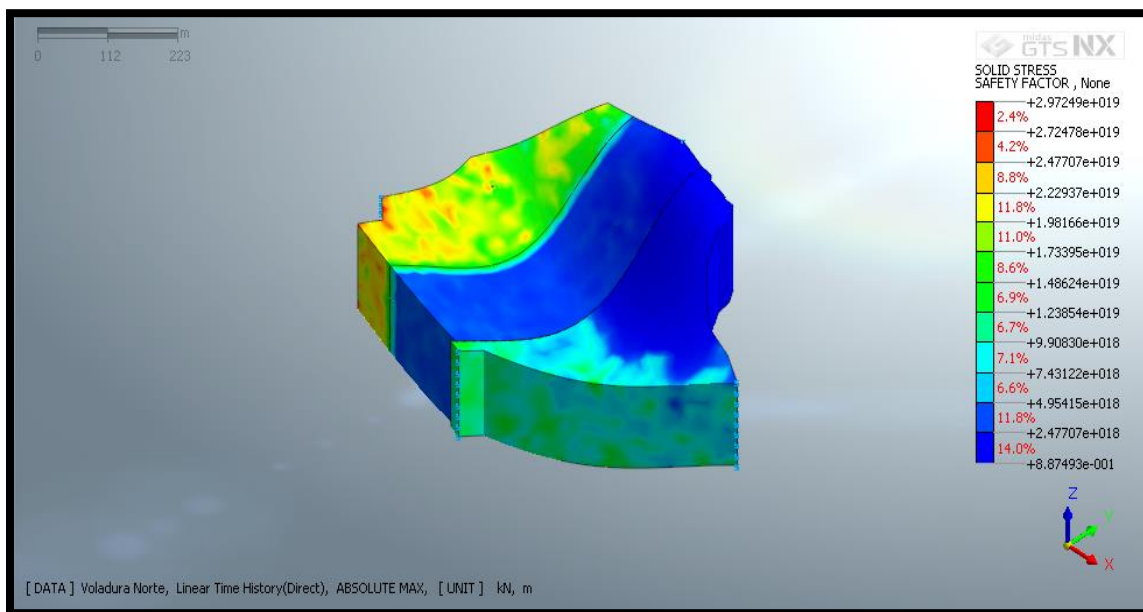


Figura 35. Factor de seguridad producido por voladura en la zona norte con explosivo centra– Midas GTS NX. Elaboración propia

8.2 Zona Sur

8.2.1 Análisis de impacto sobre el área de estudio con voladura Anfo y Centra

Al analizar la incidencia de la voladura realizada en la zona sur con explosivo Anfo, se encuentran desplazamientos máximos de 2.01 mm en el área circundante a la detonación (Aproximadamente 207 m²), mientras que con centra los desplazamientos en esta zona son de 20.5 mm.

Los desplazamientos obtenidos utilizando explosivo centra con respecto al Anfo son aproximadamente 10 veces mayores en la zona aledaña a la detonación.

En zonas más alejadas, correspondientes al 99.6% del área de estudio, los desplazamientos con explosivo Anfo están alrededor de 0.02 mm, mientras que con centra este valor es 17.7 mm.

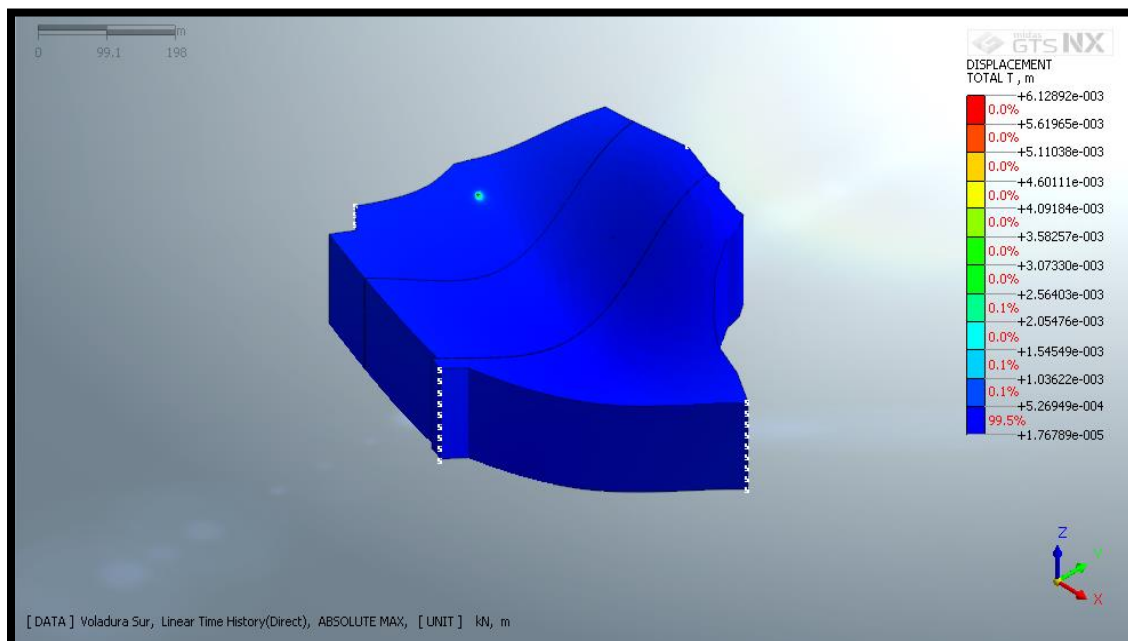


Figura 36.. Desplazamientos totales por voladura en zona sur usando explosivo Anfo – Midas GTS NX. Elaboración propia

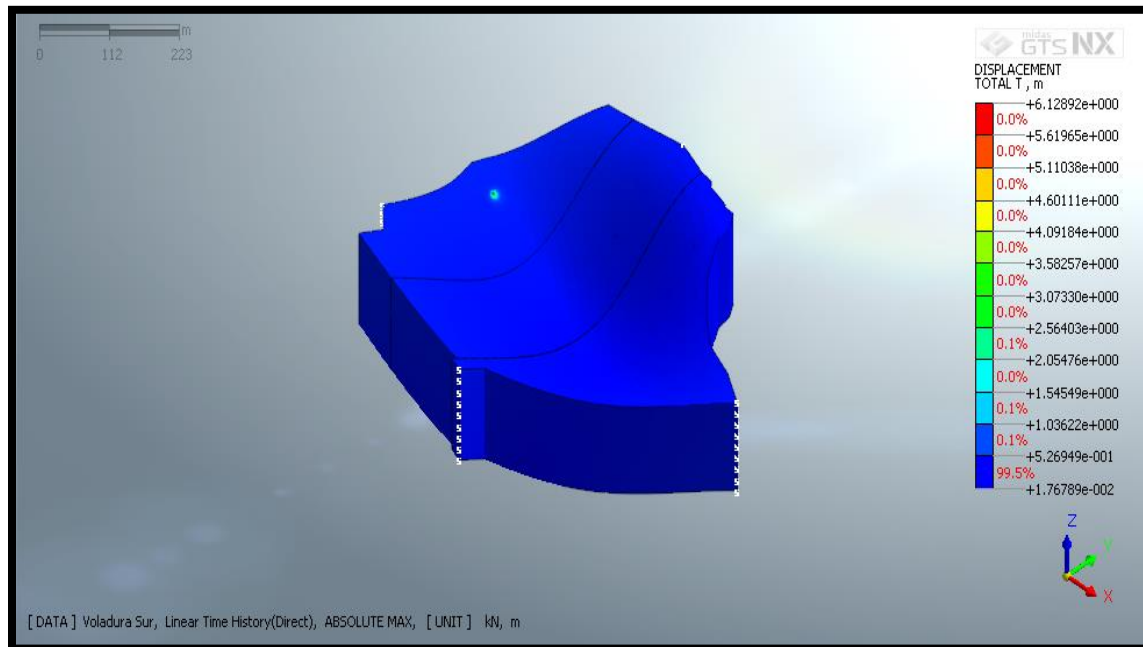


Figura 37. Desplazamientos totales por voladura en zona sur usando explosivo centra – Midas GTS NX. Elaboración propia

Los esfuerzos obtenidos en la zona sur al utilizar explosivo Anfo están en el rango de 94 y 142 MPa, los cuales logran superar ampliamente el límite elástico del material, deformándolo permanentemente, esto ocurre en el sector cercano a la detonación (Aproximadamente 1000 m²). Con explosivo centra los esfuerzos en esta zona están en el rango de 11.8 y 141 GPa concentrados en un área aproximada de 8000 m².

En zonas más alejadas, correspondientes al 99.5 % del área de estudio, los esfuerzos con explosivo Anfo están en un rango de 0.0002 Mpa, mientras que con centra este rango es 0.26 Mpa.

Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la figura 38 y 39, correspondiente a los esfuerzos de Von Mises como criterio de falla en la zona.

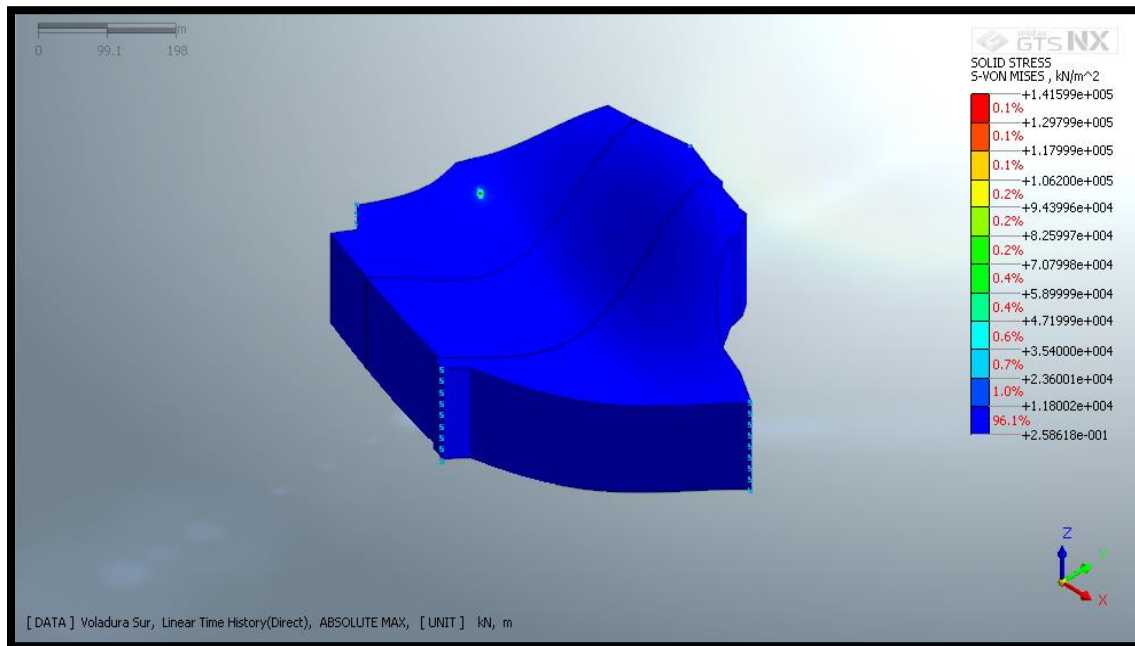


Figura 38. Esfuerzos de Von Mises producidas por la voladura en zona sur usando explosivo Anfo – Midas GTS NX. Elaboración propia

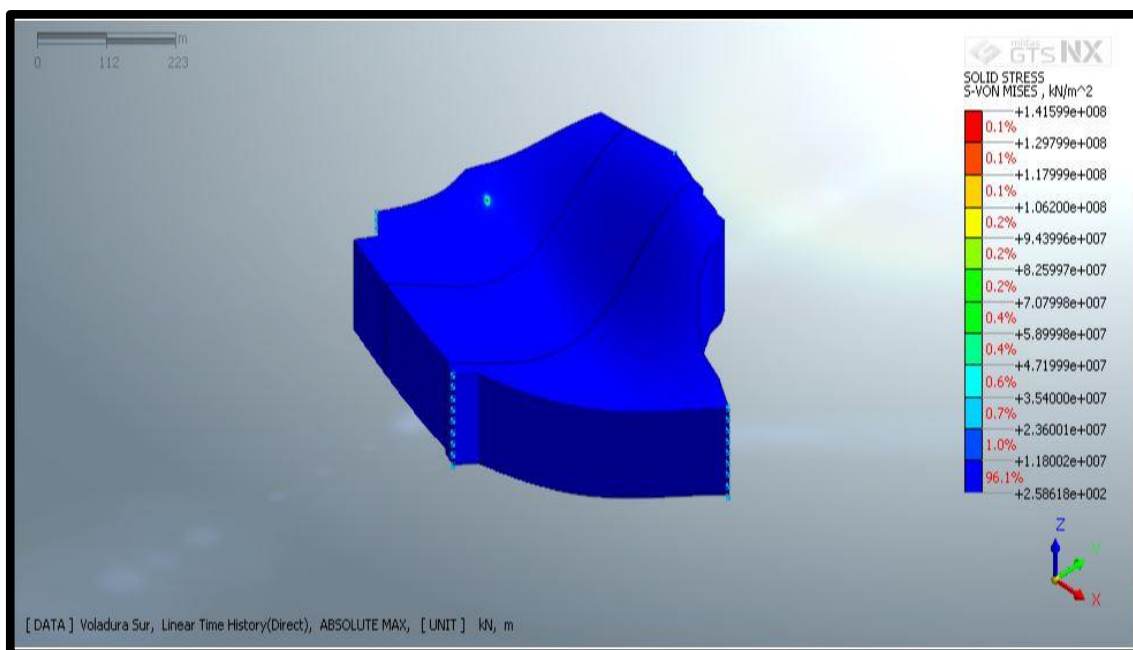


Figura 39. Esfuerzos de Von Mises producidas por la voladura en zona sur usando explosivo centra – Midas GTS NX. Elaboración propia

Para visualizar la estabilidad del área de estudio frente a los impactos por voladura realizados en la zona sur con ambos explosivos, se tomó la información arrojada en la figura 38 y 39 correspondiente al factor de seguridad, donde se pudo evidenciar que al utilizar explosivo Anfo, la gran mayoría de las zona central y la zona sur (correspondiente al 38.2% del terreno bajo estudio), presenta un rango de valores de factor de seguridad altos (valores promedio entre 76.56) mientras que en la zona norte y algunos sectores de la zona centro (equivalentes al 61,8% del terreno) se presenta un factor de seguridad muy alto (entre $1.66E18$ y $1.99 \times 10E19$), representando la buena estabilidad del área de estudio ante una voladura ubicada en esta zona con dicho explosivo.

Al utilizar explosivo centra se pudo evidenciar que la gran mayoría de las zona central y la zona norte (correspondiente al 40.2% del terreno bajo estudio), presentan un factor de seguridad relativamente bajo (valor correspondiente a 0.51) mientras que en la zona norte y algunos sectores de la zona centro (equivalentes al 59,8% del terreno) sucedió todo lo contrario, presentándose un rango de valores de factor de seguridad bastante altos (entre $2.92 \times e18$ y $1.75 \times 10 e19$), representando buena estabilidad en las zonas alejadas a la voladura y poca competencia del material ante la potencia del explosivo en las zonas cercanas a la detonación.

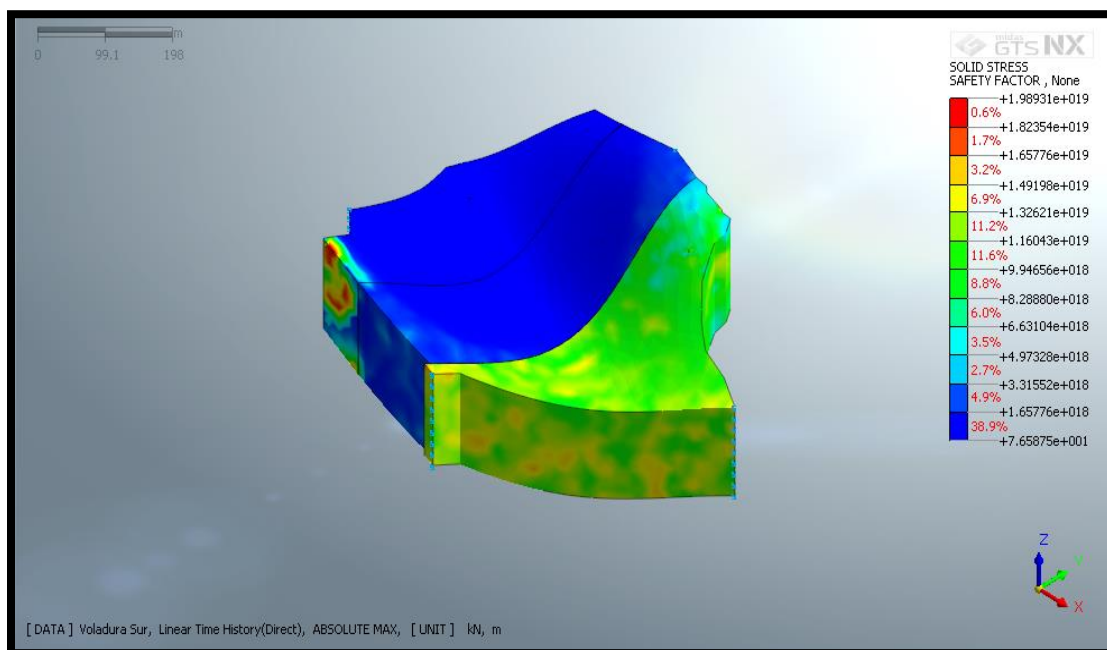


Figura 40. Factor de seguridad producido por voladura en la zona sur usando explosivo Anfo – Midas GTS NX. Elaboración propia

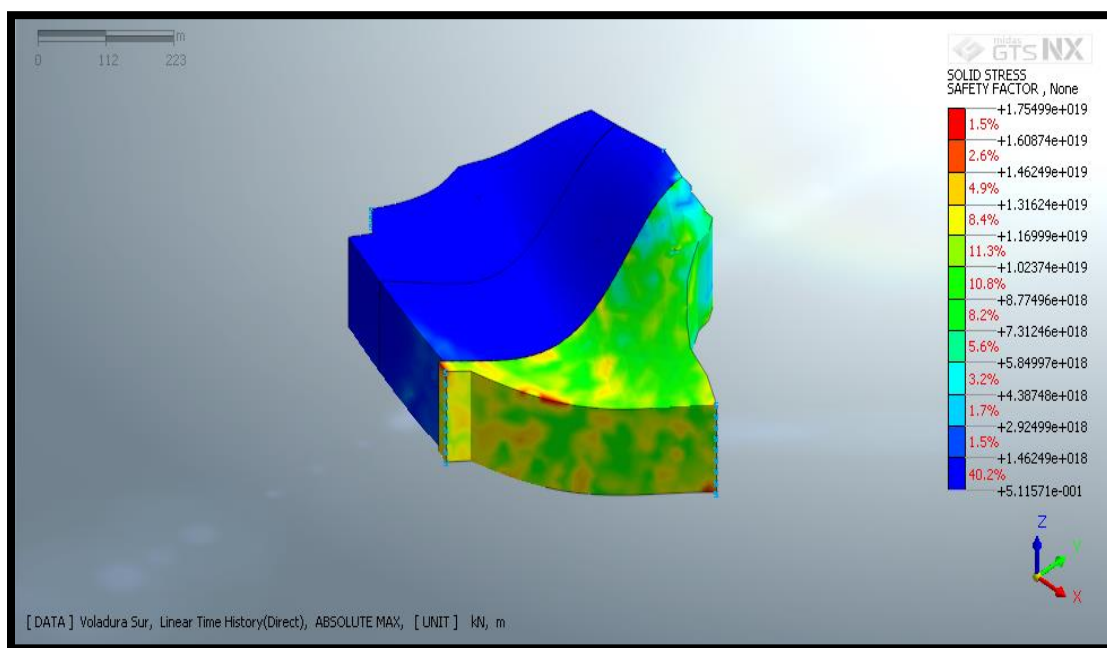


Figura 41. Factor de seguridad producido por voladura en la zona sur usando explosivo centra – Midas GTS NX. Elaboración propia

8.3 Zona Centro

8.3.1 Análisis de impacto sobre el área de estudio con voladura Anfo y Centra

Respecto a la voladura realizada en la zona centro con explosivo Anfo, se pudo evidenciar que existe desplazamiento de material solamente en áreas muy cercanas donde se realizó la voladura (1.21 milímetros, 0.1% de todo el terreno bajo estudio) y con el explosivo centra los desplazamientos registrados en esta zona son de 12.2mm.

La voladura realizada con explosivo centra presenta desplazamientos 10 veces mayor que con explosivo Anfo en este sector.

En las áreas alejadas a la voladura, los desplazamientos presentados con explosivo Anfo son pequeños (1.26E-2 milímetros en promedio, 99.5 % del terreno bajo estudio) mientras que con centra este valor es 1.25 mm en la misma zona.

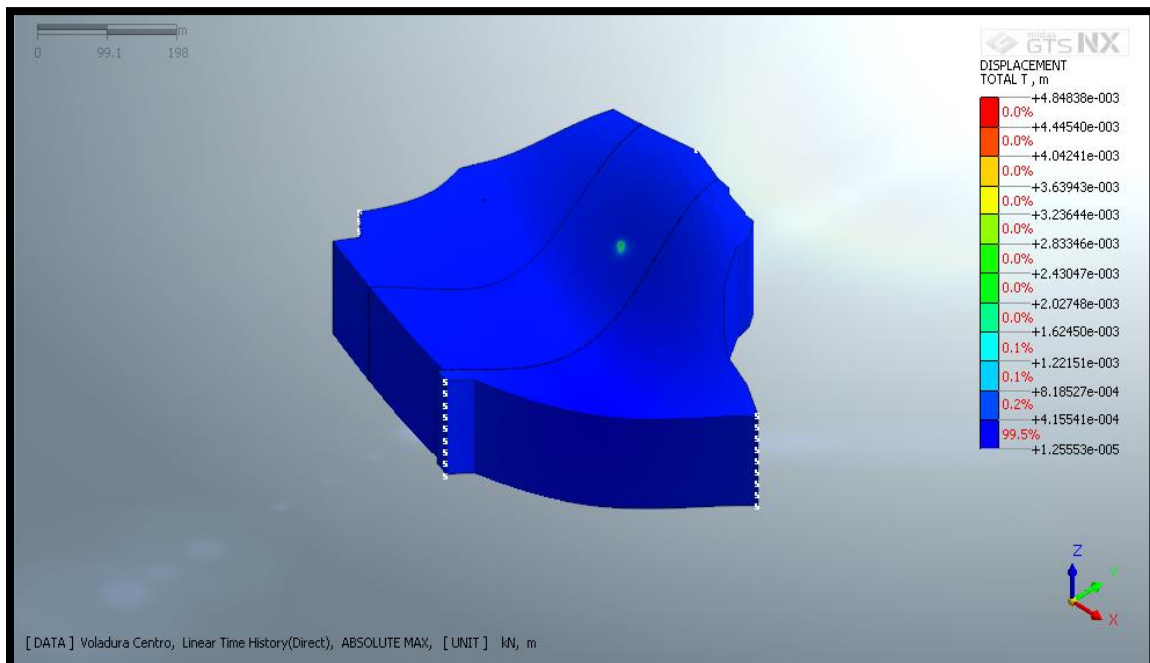


Figura 42. Desplazamientos totales por voladura en zona centro utilizando explosivo Anfo– Midas GTS NX. Elaboración propia

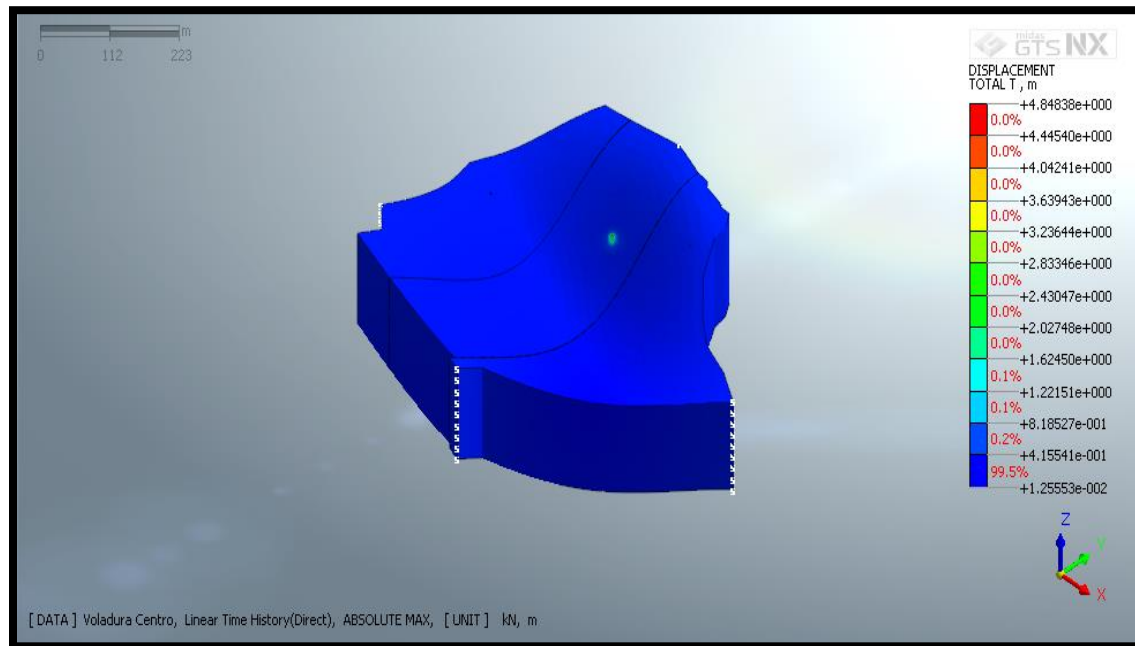


Figura 43. Desplazamientos totales por voladura en zona centro utilizando explosivo centra– Midas GTS NX. Elaboración propia

Los esfuerzos que se presentaron al realizar la voladura con explosivo Anfo en las zonas circundantes están en el rango de 50.15 hasta 125.39 MPa en un área aproximada de 2900 m², los cuales lograron superar ampliamente el límite elástico del material que conforma el terreno, deformándolo permanentemente. Utilizando explosivo centra los esfuerzos que se presentaron en las zonas adyacentes a la voladura superaron el límite elástico del material, deformándolo permanentemente (valores desde 12.54 hasta 125.4 GPa) en un área de 7000 m², valores muy superiores a los 125 MPa obtenidos con Anfo en el doble del área afectada por este explosivo.

En las zonas más alejadas (98.6 % de todo el terreno bajo estudio) los esfuerzos con voladura Anfo no lograron superar el límite elástico del material (valores desde 2.81E-4 hasta 37.62 MPa) mientras que con centra los valores de los esfuerzos en esta zona fueron de 0.28 MPa.

Los resultados se evidencian en las figuras 44 y 45, correspondiente a los esfuerzos de Von Mises que se presentaron en la zona centro.

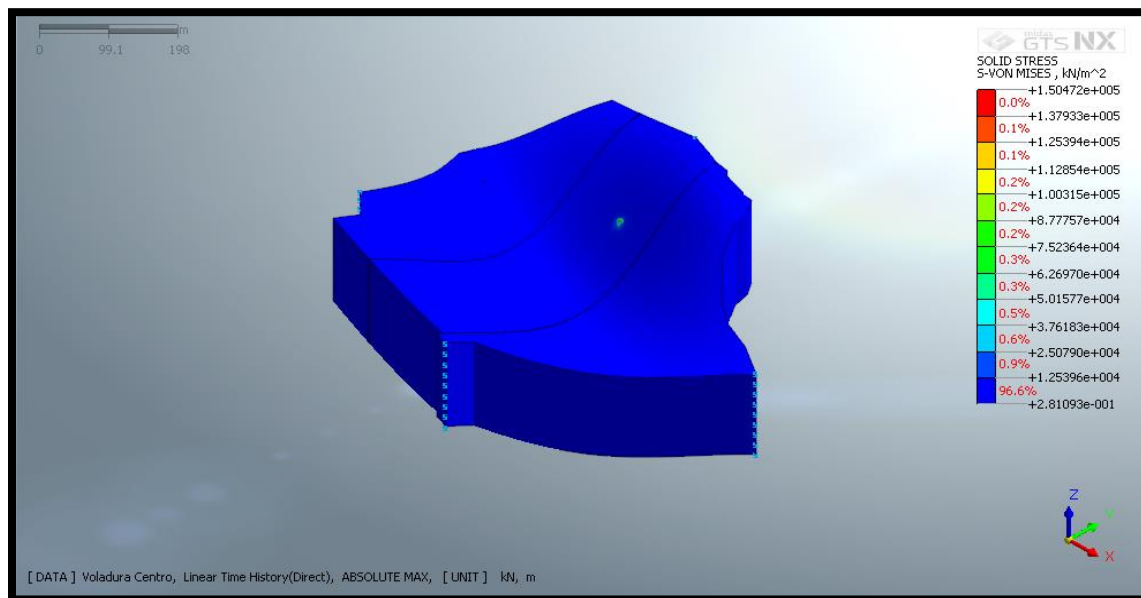


Figura 44. Esfuerzos de Von Mises producidas por la voladura en zona centro utilizando explosivo Anfo – Midas GTS NX. Elaboración propia

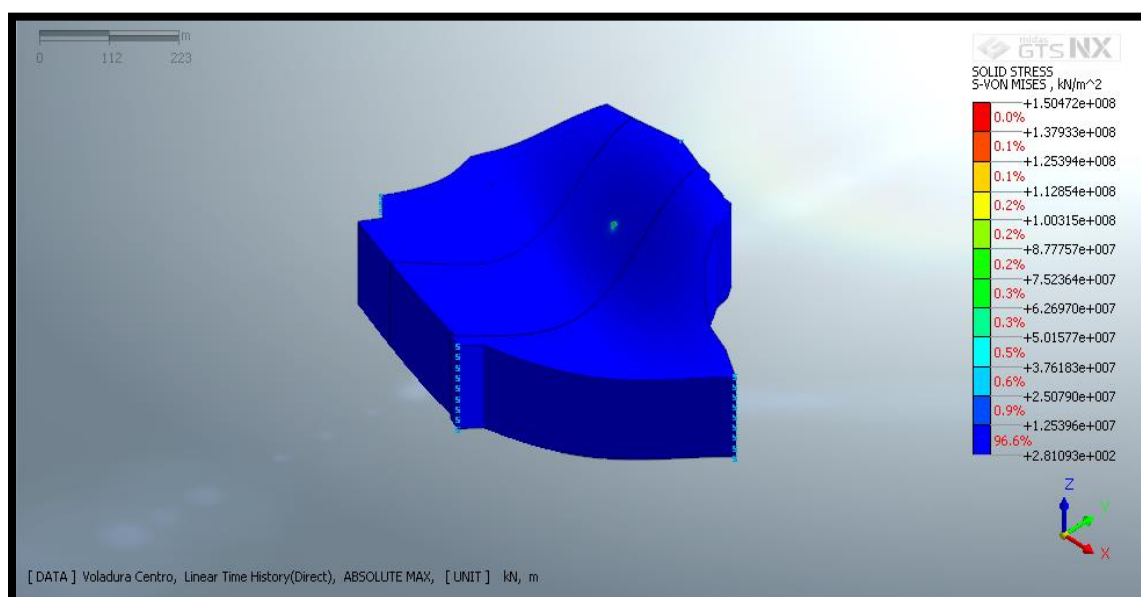


Figura 45. Esfuerzos de Von Mises producidas por la voladura en zona centro utilizando explosivo centra– Midas GTS NX. Elaboración propia

Al realizar el análisis del factor de seguridad de la zona de estudio por efectos de la voladura realizada en la zona central con explosivo Anfo se pudo evidenciar que la gran mayoría de esta zona y partes de las zonas norte y sur vecinas a la ubicación de esta voladura (correspondiente al 24.1 % del terreno bajo estudio), presentan un rango de valores de factor de seguridad altos (desde 5.87 hasta 2.16×10^{18}) y con explosivo centra en el área aledaña a la voladura correspondiente al 44.7% del terreno bajo estudio, presentan un rango de valores de factor de seguridad relativamente bajos (desde 0.26 hasta 2.31×10^{18}).

Los sectores alejados de la voladura con explosivo Anfo, correspondiente a las zonas sur y norte (equivalentes al 66,1% del terreno) presentan un rango de valores de factor de seguridad muy alto (entre 4.33×10^{18} y 2.38×10^{19}), representando la estabilidad de estos sectores del terreno ante una voladura en esta zona.

Al realizar la voladura en la zona central con explosivo centra, los sectores alejados de la zona sur y norte (equivalentes al 55,3% del terreno) presentan valores de factor de seguridad muy alto (entre 4.61×10^{18} y 2.31×10^{19}), representando la estabilidad de estos sectores del terreno ante una voladura en esta zona,

Se puede evidenciar una inestabilidad relativa de la zona centro frente a las zonas norte y sur, esta afirmación se pudo corroborar gracias la realización una combinación lineal de estos mapas de factor de seguridad a través del mismo software, ubicado en el apéndice J que a su vez representa el mapa de estabilidad del terreno.

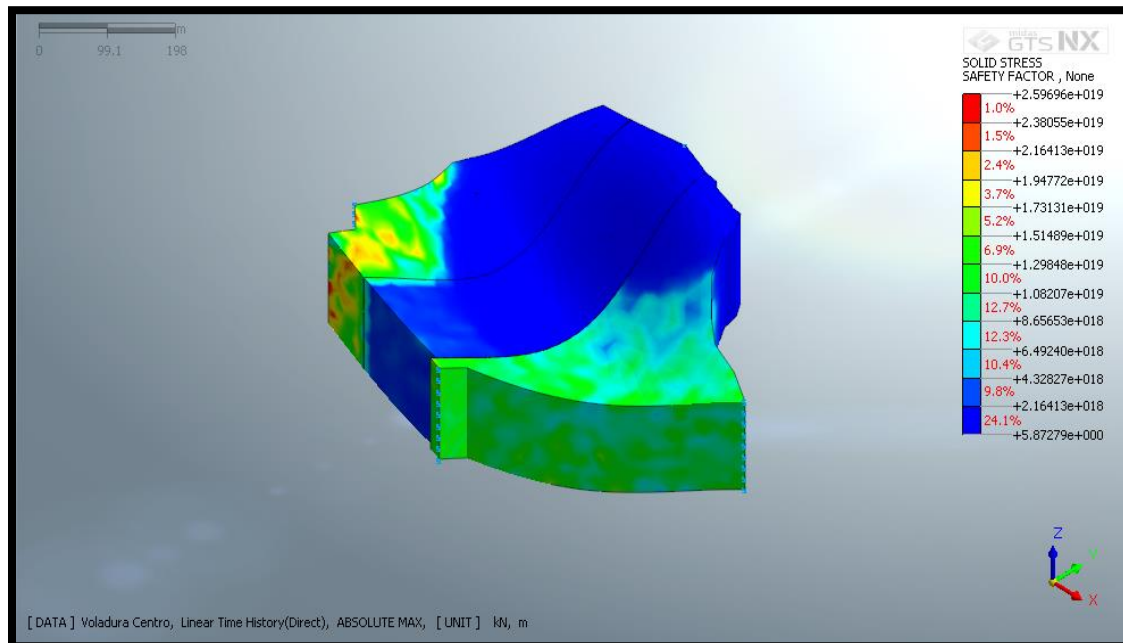


Figura 46. Factor de seguridad producido por voladura en la zona centro utilizando explosivo Anfo – Midas GTS NX. Elaboración propia

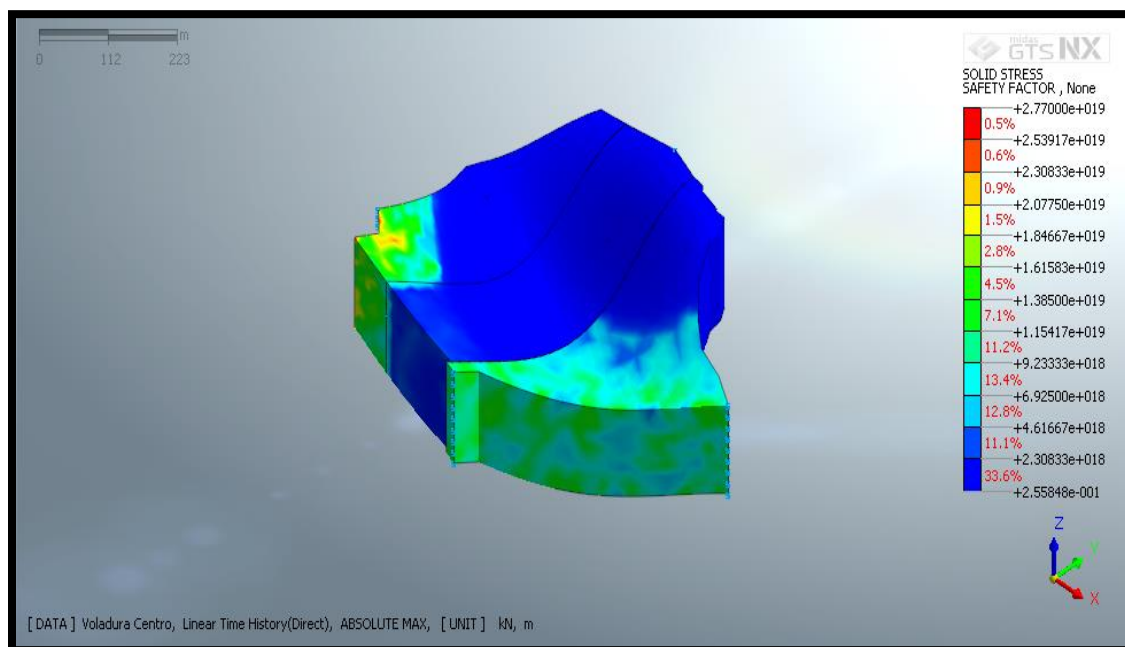


Figura 47. Factor de seguridad producido por voladura en la zona centro utilizando explosivo centra – Midas GTS NX. Elaboración propia

A continuación, se presenta una tabla resumen con la información de los resultados obtenidos en el área de estudio con los explosivos Anfo y centra para cada una de las voladuras simuladas.

La tabla 25 identifica los desplazamientos y el área correspondiente a ese rango de valores, así como los esfuerzos que soporta el terreno especificando el área en que están distribuidos y por último el factor de seguridad. Estos datos se han especificado para las zonas cercanas a la detonación y para los sectores más alejados de la misma, teniendo en cuenta las voladuras con explosivos Anfo y centra.

Tabla 23. Valores de desplazamientos y esfuerzos asociados a voladura con explosivos Anfo y Centra sobre área de estudio

Zona Norte												
Área Adyacente de la Voladura						Área Alejada de la Voladura						
Explosivo	Desplazamiento (mm)	Área Impactada (m ²)	Esfuerzo (MPa)	Área Impactada (m ²)	FS	Área Impactada (m ²)	Desplazamiento (mm)	Área Impactada (m ²)	Esfuerzo (MPa)	Área Impactada (m ²)	FS	Área Impactada (m ²)
Anfo	5.4	207	106.6 355.3	3109	1.26	27000	0.11	206056	0.158 71.05	204190	9.57 x 10e18 2.97 x 10e19	124380
Centra	19.5 – 34.6	207	167.42 753.26	4353	0.88	29000	0.25	206056	0.00381 83.72	203568	9.57 x 10e18 2.97 x 10e19	124380
Zona Sur												
Área Adyacente de la Voladura						Área Alejada de la Voladura						
Explosivo	Desplazamiento (mm)	Área Impactada (m ²)	Esfuerzo (MPa)	Área Impactada (m ²)	FS	Área Impactada (m ²)	Desplazamiento (mm)	Área Impactada (m ²)	Esfuerzo (MPa)	Área Impactada (m ²)	FS	Área Impactada (m ²)
Anfo	2.01	207	94.4 141.6	1037	7.6	79810	0.02	206470	0.0002	206263	1.6 x 10e18 1.9 x 10e19	128111
Centra	20.5	207	11800 141500	8085	0.51	83334	17.7	206470	0.26	206263	2.9 x 10e18 1.8 x 10e19	123965
Zona Centro												
Área Adyacente de la Voladura						Área Alejada de la Voladura						
Explosivo	Desplazamiento (mm)	Área Impactada (m ²)	Esfuerzo (MPa)	Área Impactada (m ²)	FS	Área Impactada (m ²)	Desplazamiento (mm)	Área Impactada (m ²)	Esfuerzo (MPa)	Área Impactada (m ²)	FS	Área Impactada (m ²)
Anfo	1.21	207	50.15 125.39	1.4	0.58	49960	0.0126	206263	0.000281	204397	4.3 x 10e18 2.3 x 10e19	137025
Centra	12.2	207	3400 12500	3.4	0.26	69652	1.25	206263	0.28	206470	4.6 x 10e18 2.2 x 10e19	114636

Nota. Elaboración propia

8.4 Análisis de impacto puntual con voladura Anfo y Centra

Se realizan los gráficos de esfuerzos y desplazamientos en un punto determinado para cada zona con respecto al tiempo de la voladura, lo cual permite visualizar de manera clara el comportamiento del material frente al impacto por la detonación, así como comparar los esfuerzos y desplazamientos generados en el terreno por cada uno de los explosivos.

8.4.1 Zona Norte:

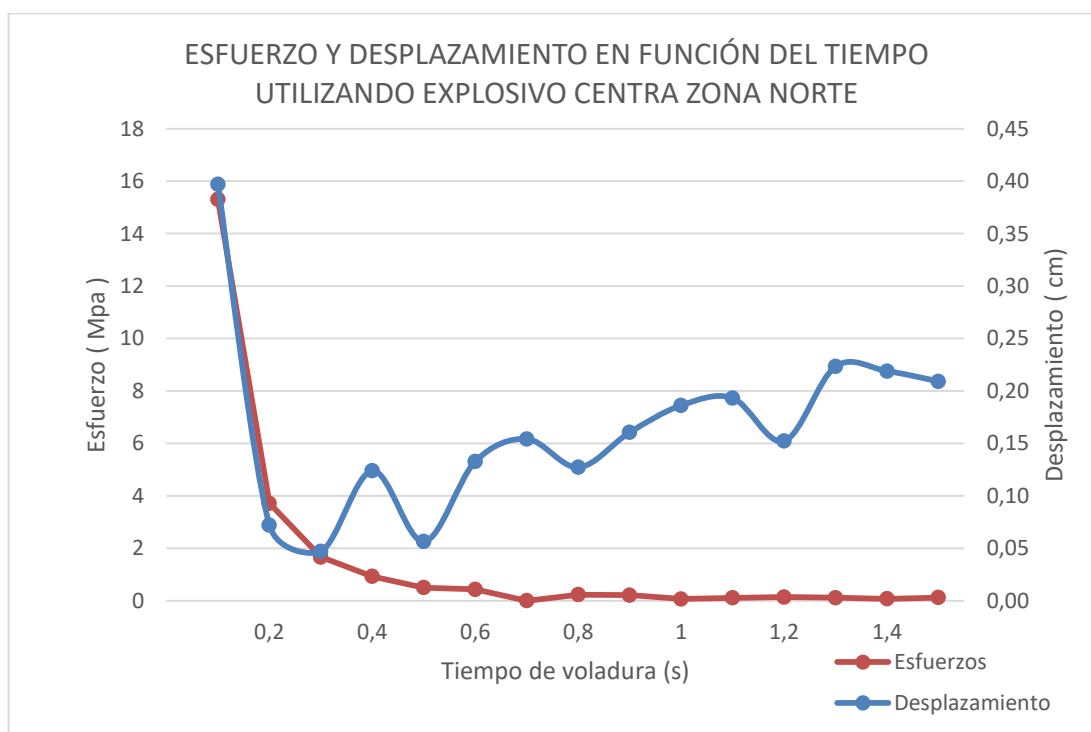


Figura 48. Esfuerzo y desplazamiento usando explosivo centra en zona norte

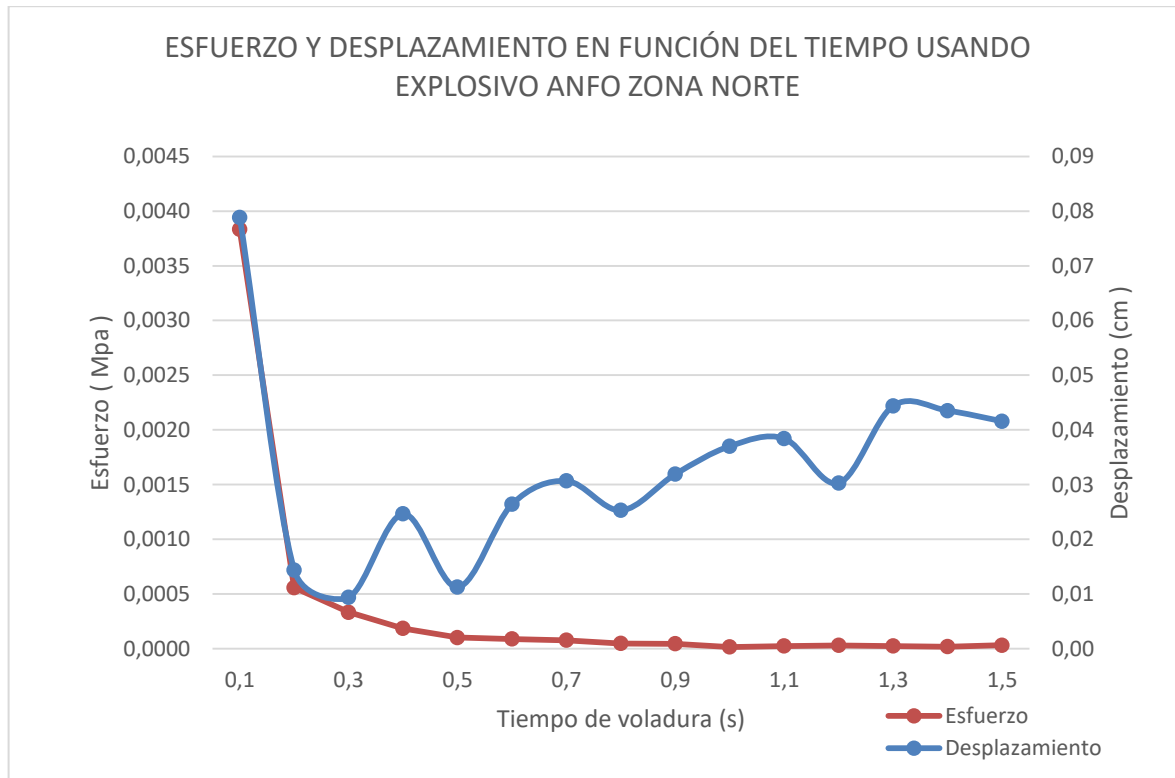


Figura 49. Esfuerzo y desplazamiento usando explosivo Anfo en zona norte

Las deformaciones pueden especificarse por los desplazamientos experimentados en los puntos de referencia del cuerpo antes y después de la deformación.

Se define el vector desplazamiento como el vector que une la posición de un punto antes y después de la deformación. El valor del desplazamiento que genera el programa corresponde a la magnitud del vector que representa el movimiento del terreno debido al impacto de la voladura, el cual está relacionado con el tensor deformación a través de la siguiente relación:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{Ecuación 50}$$

Donde ε_{ij} corresponde a las componentes del tensor deformación de Green – Lagrange.

En las figuras 48 y 49 se puede observar que el desplazamiento es máximo inmediatamente después de la detonación y pasado el 20% del tiempo total del ensayo disminuye un 87.5%, tanto en la voladura con centra como con Anfo, después de este tiempo presenta un comportamiento sinusoidal de manera uniforme en el tiempo restante del análisis.

La forma sinusoidal de la gráfica de desplazamiento indica que las deformaciones en el punto de análisis son oscilantes, y tal comportamiento en esta zona determinada se debe probablemente a la anisotropía y al diaclasamiento del material.

La diferencia en desplazamientos utilizando el explosivo centra es aproximadamente 5 veces mayor con respecto al Anfo.

El hecho de que el desplazamiento sea máximo en el momento de mayor esfuerzo y después este decaiga es propio de los materiales frágiles o competentes.

El esfuerzo es máximo al inicio de la detonación y decrece aproximadamente en 90% pasado el 20% del tiempo total del análisis, luego continúa decayendo de manera uniforme hasta completar el periodo de estudio.

El esfuerzo en el terreno por voladura con explosivo centra es mayor 5000 veces en promedio con respecto al Anfo.

En este punto, el mayor esfuerzo al que es sometido el terreno debido a la voladura es 6.34 veces menor que la resistencia del material.

8.4.2 Zona Sur:

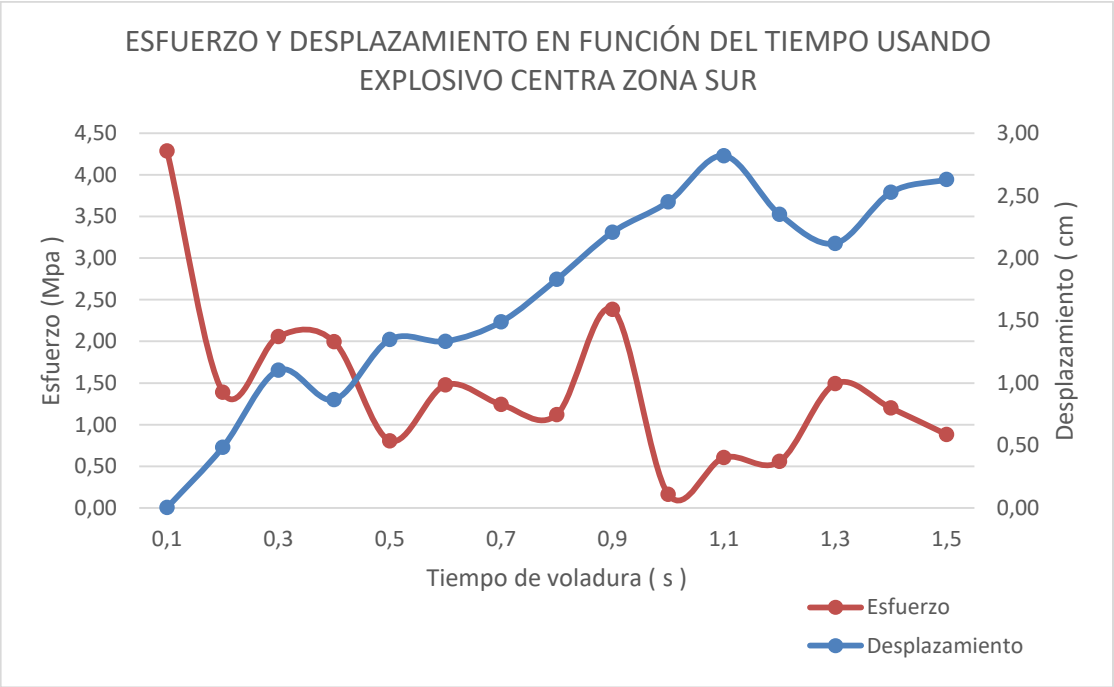


Figura 50. Esfuerzo y desplazamiento usando explosivo centra en zona sur

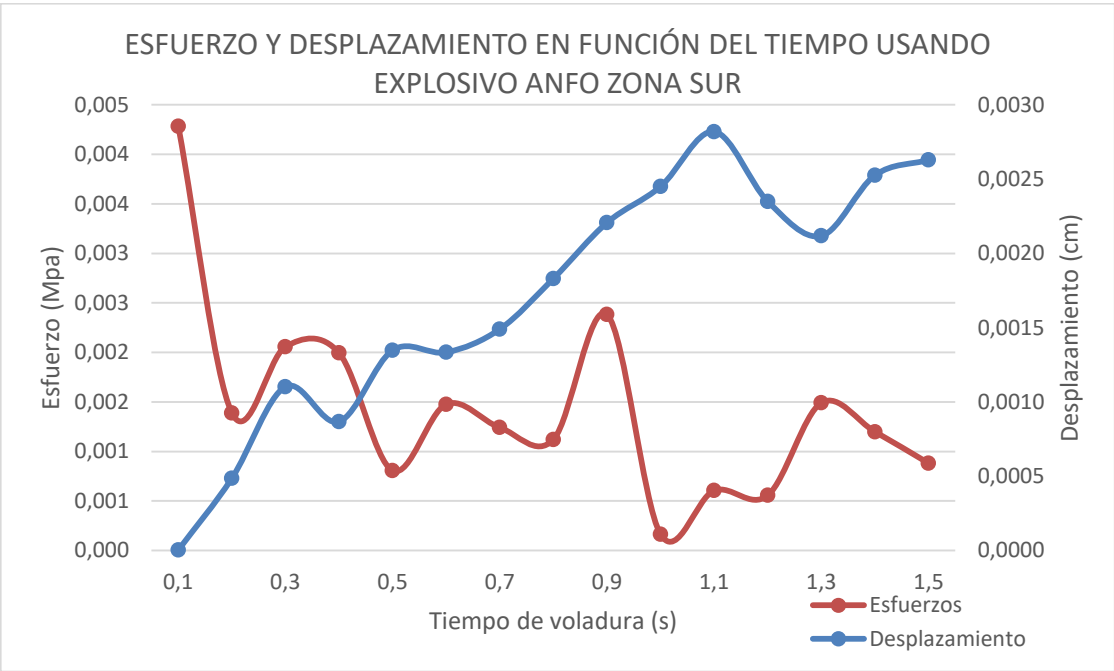


Figura 51. Esfuerzo y desplazamiento usando explosivo Anfo en zona sur

En las figuras 50 y 51 se puede observar que el desplazamiento es mínimo en el instante de la detonación y muestra un comportamiento creciente hasta el final del análisis, el cual se incrementa en 2.63 cm utilizando el explosivo centra y con Anfo este incremento es mil veces menor.

El desplazamiento creciente es propio de la fase elástica de los materiales, aunque el tiempo de análisis es demasiado corto para visualizar su punto máximo.

El esfuerzo es máximo al inicio de la detonación y decrece en forma sinusoidal hasta completar el tiempo del análisis, este decae 3.40 MPa en la voladura con explosivo centra y con Anfo el valor es mil veces menor, esto es debido a la potencia del primer explosivo con respecto al segundo.

8.4.3 Zona Centro

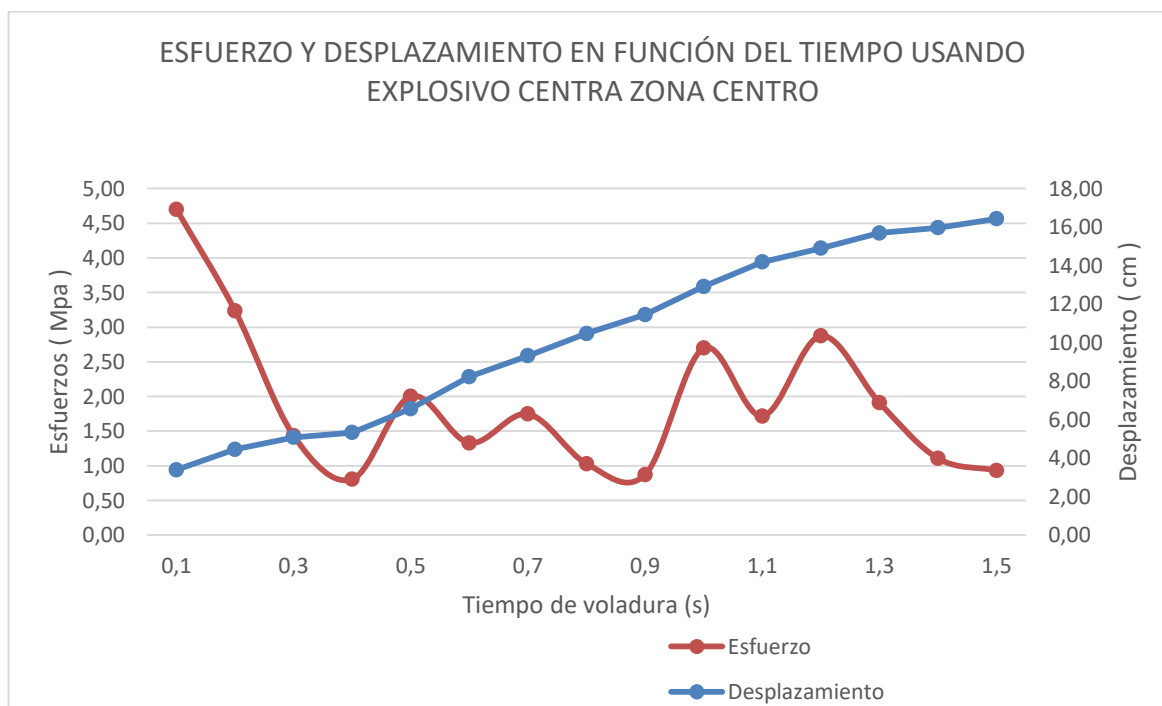


Figura 52. Esfuerzo y desplazamiento usando explosivo centra en zona central

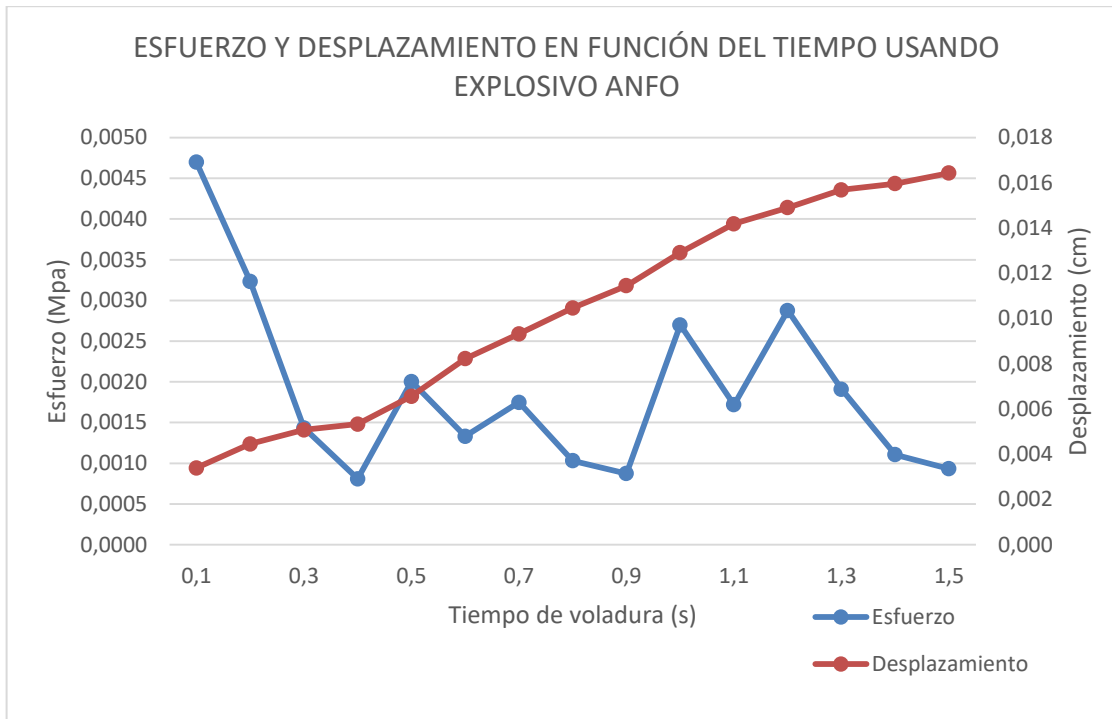


Figura 53. Esfuerzo y desplazamiento usando explosivo Anfo en zona central

En las figuras 52 y 53 se puede observar que el desplazamiento es mínimo en el instante de la detonación y muestra un comportamiento creciente hasta el final del análisis, el cual se incrementa en 13.03 cm utilizando el explosivo centra y con Anfo este incremento es mil veces menor.

El esfuerzo es máximo al inicio de la detonación y decrece en forma sinusoidal hasta completar el tiempo del análisis, este decae 3.76 MPa en la voladura con explosivo centra y con Anfo el valor es mil veces menor.

A continuación, se resumen los desplazamientos y esfuerzos máximos y mínimos obtenidos con los explosivos Anfo y centra en los puntos establecidos en cada una de las zonas.

Tabla 24. Esfuerzos y desplazamientos en puntos ubicados en cada una de las zonas de estudio.

	<i>Zona Norte</i>	<i>Zona Centro</i>	<i>Zona Sur</i>
Esfuerzo Max Centra (MPa)	15.30	4.697	4.285
Esfuerzo Max Anfo (MPa)	0.0038	0.0046	0.0042
Esfuerzo Min Centra (MPa)	0.124	0.933	0.8816
Esfuerzo Min Anfo (MPa)	0.00003	0.00093	0.00088
Desplazamiento Max Centra (cm)	0.396	16.428	2.629
Desplazamiento Max Anfo (cm)	0.0788	0.0164	0.002629
Desplazamiento Min Centra (cm)	0.209	3.392	0.0030
Desplazamiento Min Anfo (cm)	0.00934	0.00339	0.000003

Fuente: Elaboración propia

A partir de los anteriores resultados se puede concluir:

- La zona norte soporta esfuerzos 3.4 veces más grandes que las zonas sur y centro cuando se utiliza explosivo centra, en el caso del Anfo, los esfuerzos máximos son similares en las tres zonas.
- Los desplazamientos son mayores en la zona central al utilizar el explosivo centra, ya que la resistencia del material en este sector es menor con respecto a las otras áreas de estudio debido al fallamiento que aquí ocurre. Con explosivo Anfo los desplazamientos en las tres zonas son similares.
- Se aconseja realizar las voladuras de producción en la zona central con explosivo Anfo con el fin de garantizar la estabilidad del macizo rocoso en este sector.
- La zona norte es la que soporta mayor esfuerzo y registra menor desplazamiento con respecto a las otras dos zonas. Por lo que se puede decir que es la zona más segura para la extracción de material.

Conclusiones

Como conclusiones generales de la presente investigación se resaltan las siguientes consideraciones:

Al realizar la obtención de propiedades índice del macizo rocoso Agregados y Mezclas Cachibí, se determinó que los valores obtenidos para las muestras de rocas se encuentran dentro del rango de valores de referencia en la literatura para las propiedades de los basaltos. Con base en estos valores, se pudo determinar que el basalto bajo estudio presenta un grado de fracturación moderado, esto se debe a que sus propiedades mecánicas y dinámicas no se han visto gravemente afectadas por los factores externos a los que se encuentra sometido indicando la alta competencia del material.

La zona bajo estudio se encuentra ubicada en un área que se halla sometida a constantes procesos tectónicos, evidenciándose claramente la presencia de fallas de cabalgamiento.

La caracterización del macizo rocoso se realizó tomando como fuente primaria los ensayos de laboratorio realizados al material y las visitas de campo donde se evidencian las principales características del macizo, de este modo al determinar el RMR y el GSI, los resultados arrojaron que la zona norte y sur son zonas con macizo rocoso de buena calidad (Norte: RMR 62 GSI 55, Sur: RMR 62 GSI 70), mientras que en la zona centro la calidad del macizo es regular (RMR 47 GSI 30).

Los valores de cohesión y ángulo de fricción encontrados en la literatura para basaltos sanos son más altos que los calculados en el presente estudio. Se puede concluir que esta reducción se debe a las correlaciones que se han usado para obtener los diferentes parámetros que permiten realizar la linealización de la envolvente de falla de donde finalmente se obtienen la cohesión y ángulo de fricción calculados en la presente investigación.

Otro factor que influye en la reducción de la cohesión y fricción es el valor de la resistencia a la compresión, la cual es calculada en laboratorio sobre una probeta remoldeada y que ha sido expuesta a procesos de voladura, reduciendo este parámetro en comparación de una roca sana. El valor obtenido en laboratorio es parte de las ecuaciones de Balmer con las que se calculan las tensiones normal y tangencial que posteriormente generan la envolvente de Mohr.

Del mismo modo, la cohesión en probetas se ve gravemente afectada con respecto a la roca sana en cuanto al efecto de cementación entre partículas, esto se debe a que los efectos de la voladura y el remoldeado de testigos hace que sus componentes pierdan adherencia entre sí, reduciendo en gran medida el parámetro obtenido en laboratorio con respecto al de la literatura.

En la modelación del macizo rocoso de Agregados y Mezclas Cachibí, a través del programa Midas GTS NX, se pudo comprobar la competencia del material, ya que al realizar el análisis de la voladura teniendo en cuenta el factor de seguridad en cada una de las zonas de estudio se han encontrado altos valores (por encima de 10 E19), determinando que la capacidad máxima calculada del sistema es mucho mayor que el

valor del requerimiento a causa de la voladura realizada, también se confirma que la zona central es el sector con menor factor de seguridad en todo el terreno.

Se realizó la calibración del modelo tomando como base los datos registrados en el acelerómetro y comparándolos con los resultados de la deformación en el eje vertical (Z) que presenta la modelación en el programa Midas GTS NX en esa área. Al realizar el cálculo de la deformación en el eje vertical en el punto donde fue instalado el equipo, se registró un valor de 6.3 cm, que al ser comparado con el valor obtenido en el modelo (6.31 cm). Este resultado corrobora la alta confiabilidad en el modelo, debido a que al calcular el porcentaje de error entre los dos valores se tuvo un error del 0,16%.

Se puede evidenciar que los esfuerzos y deformaciones a los que se ve sometido el macizo son mayores en la zona donde se realiza la voladura, que equivale al sitio donde se hace la extracción del material y se presenta rotura del mismo. A medida que se aleja el punto donde determinan las deformaciones de esta zona, se encontró que las deformaciones son de tipo elástico y el material trata de recuperar su estado original.

Los desplazamientos en la zona donde se origina la voladura son mayores con el explosivo Centra con respecto a Anfo (entre 4 y 10 veces), de igual manera los esfuerzos en dicho sector son aumentados entre 2 y 1000 veces al realizar la voladura con Centra y compararse con Anfo. Esto se debe a que la velocidad de detonación del Centra es 1.63 veces mayor que el Anfo y que la densidad del primer explosivo es 1.37 veces más grande con respecto al segundo.

Recomendaciones

Este estudio fue realizado en un macizo rocoso basáltico de alta competencia, por lo que los resultados arrojados fueron altos factores de seguridad independientemente de donde se realizaran las voladuras. En la ciudad existen explotaciones a cielo abierto de materiales que presentan características con menor resistencia (por ejemplo, explotaciones de piedra caliza para las cementeras), por este motivo sería conveniente seguir la metodología aquí descrita en estos yacimientos para programar sistemas de extracción seguros.

Es conveniente actualizar el modelo mediante ensayos constantes e inspecciones de tipo geológico permanente a medida que vaya avanzando la explotación, ya que las características del material pueden variar significativamente debido a las discontinuidades, planos de falla, régimen de agua etc. existentes en el macizo, los cuales son diferentes en cada sector de la cantera.

Es indispensable contar con puntos de monitoreo permanentes, donde a través de deformímetros se pueda determinar el rango de deformación del material debido a las voladuras y así chequear la óptima modelación del sistema a través del programa Midas GTS NX con la calibración respectiva.

Al momento de realizar un modelado de un terreno en software que maneja métodos de elemento finito como MIDAS, es importante contar en primer lugar con un equipo de cómputo con los recursos suficientes para ejecutar las operaciones tanto gráficas como matemáticas que el software exige en un tiempo adecuado, y en segundo

lugar realizar una definición de malla que defina cada elemento finito como si fuera una parte del terreno real; en este último ítem se debe contar con una consideración especial, es decir que es posible realizar un mallado muy fino que se aproxima a la realidad pero la ejecución de los ensayos necesarios puede demorar demasiado tiempo incluso con un equipo de cómputo potente, por la cantidad de operaciones matemáticas que debe realizarse, y por el contrario se puede hacer un mallado menos detallado, pero esta situación incurre en que se pierde tanto precisión como fidelidad en los resultados que allí se arrojan respecto al terreno verdadero, he de allí la importancia de encontrar un punto medio donde se defina al terreno con el menor porcentaje de error y un tiempo de ejecución de análisis factible.

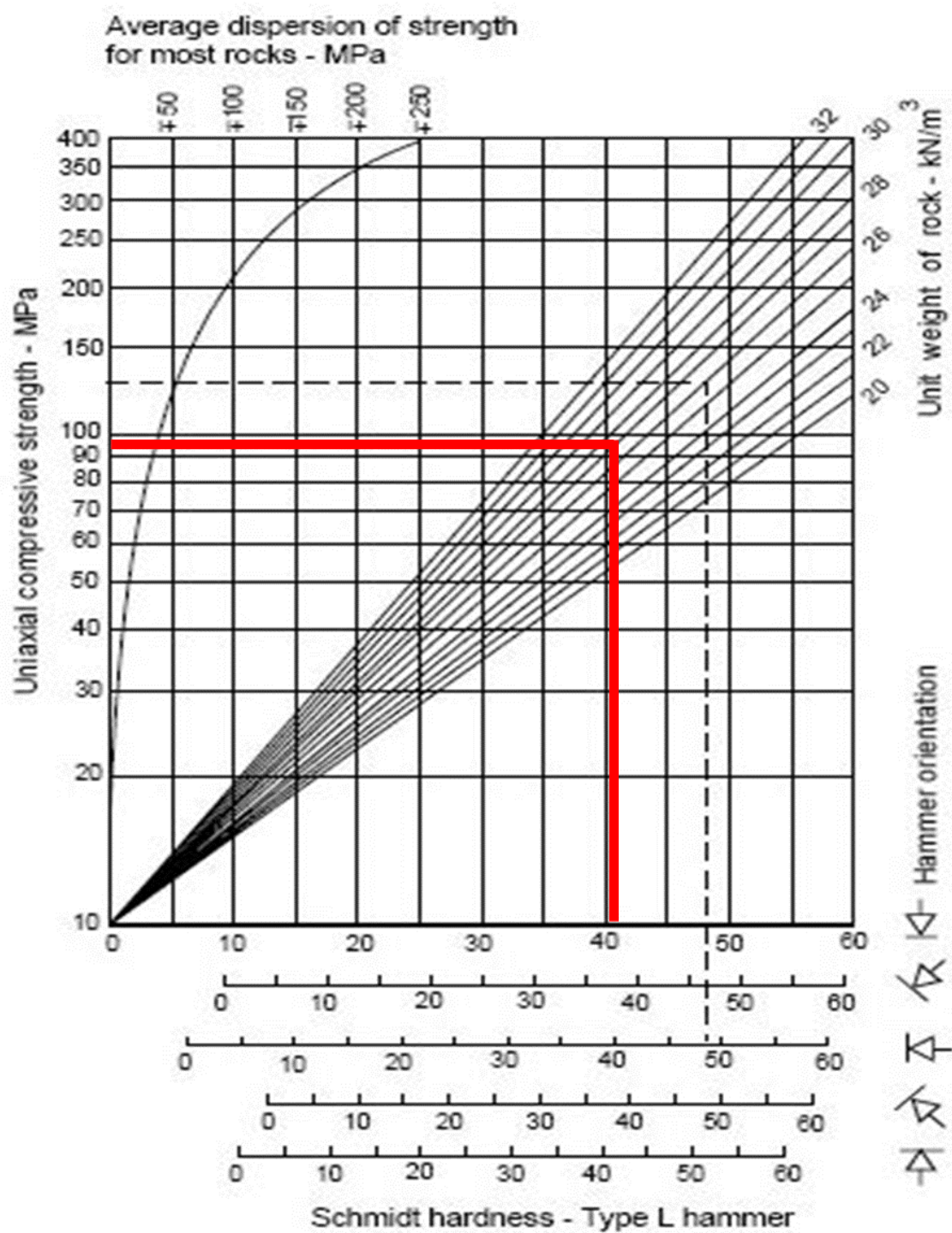
Lista de referencias

- Ames Lara, V. (2015). *Mecánica avanzada de rocas*. Disponible En: <http://es.scribd.com/>
- Apshana, Mora, Moscote, Pimienta, Ortiz. (2011). *Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso para determinar la estabilidad óptima de los taludes en la cantera primavera- municipio de Bosconia -Departamento del Cesar*. Valledupar. Fundación Universitaria Andina. Disponible En: <http://investigacionfuua.wikispaces.com/>
- Arzúa T, J. (2015). *Estudio de Estudio del comportamiento mecánico de rocas intactas y fisuradas en laboratorio con especial énfasis en la dilatación*. Vigo. Universidade de Vigo. Disponible En: <http://www.semr.es/descargas/>
- Cachibi.com.co, (2015). *Agregados y Mezclas Cachibí- S.A.* [En Línea] Disponible En: <http://cachibi.com.co/> [Fecha de Acceso: 22 enero de 2016].
- Elberg, M; Vivas, J; Fernández, V; Sosa, G y González, L. (2011). *Análisis numérico de las discontinuidades del macizo rocoso de la autopista Rafael Caldera en Venezuela*. Revista Ciencia e Ingeniería. Vol. 32, pp. 67-72 Disponible en: <http://erevistas.saber.ula>
- Emad, M., Mitri, H. and Kelly, C. (2014). Effect of blast-induced vibrations on fill failure in vertical block mining with delayed backfill. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(9), pp.975-983.
- Gemi, (2013). *Integrado de los títulos mineros n° 13129, 03-034 y HF8-151 municipio de Yumbo, Valle del Cauca*. Medellín. Disponible en:
- Hoek & Brown. (1980). *Excavaciones subterráneas en roca*. México D.F: McGraw Hill
- Joshep, A. (2012). *Diseño de voladuras en minas a cielo abierto*. [Fotografía]. Disponible en: <http://ingenieroenminas.com/sobre-el-sitio/>
- Ley 685 del 2001. Código de Minas. Diario oficial 45273, agosto 8 del 2003.
- Martínez, Ángel F. (2015). *Blast Analysis on Rock Tunnel in 3D*. Midas Engineering software. Disponible en: <http://northamerica.midasuser.com>
- Mecánica de rocas*. (2015). Wikipedia. Disponible En: https://es.wikipedia.org/wiki/Mecanica_de_rocas
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia, (2002). *Guía Minero Ambiental N°2: Beneficio y Transformación*. Bogotá D.C.

- Ministerio de Minas y Energía de Colombia, (2002). *Guía Minero Ambiental N°3: Beneficio y Transformación*. Bogotá D.C.
- Montalar, E. (2009). *Una breve historia de la mecánica de rocas*. Disponible En: <http://enriquemontalar.com>
- Moreno Robles J, (2006). *Elementos finitos en ingeniería geotécnica*. Disponible En: <http://icc.ucv.cl:8080/geotecnia/>
- Northamerica.midasuser.com, (2016). *MIDASoft North America Regional Site*. [En Línea] Disponible En: http://northamerica.midasuser.com/elearning_upcoming_session.aspx?session_id=282
- Planta de asfalto Agregados y Mezclas Cachibí*. [Fotografía]. (2014). Disponible En: <http://cachibi.com.co/>.
- Planta de trituración Agregados y Mezclas Cachibí*. [Fotografía]. (2014). Disponible En: <http://cachibi.com.co/>.
- Peralta, G; Herrera, R. (2013). *Características y control de las vibraciones producidas por la acción de voladuras en minas a cielo abierto*. Boyacá. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Disponible En: <http://www.uptc.edu.co/minas/documentos>
- Restrepo Mora, I. A. (2013). *Correlación de la resistencia a la compresión uniaxial con la humedad y porosidad eficaz en rocas de una cantera del suroccidente colombiano*. Santiago de Cali.
- Rosas, J. (2013). *Teoría de mecánica de rocas*. Maquinaria para cimentaciones especiales. Disponible en: <https://maquinariacompactaciones.wordpress.com>
- Suárez Burgoa, L. (2013). *Descripción del macizo rocoso: introducción a la ingeniería de rocas de superficie y subterráneas*. 2nd ed. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Ubicación general de los títulos mineros 13129,03 – 034 y HF8 – 151*. [Fotografía]. (2015). Disponible En: Google Earth.

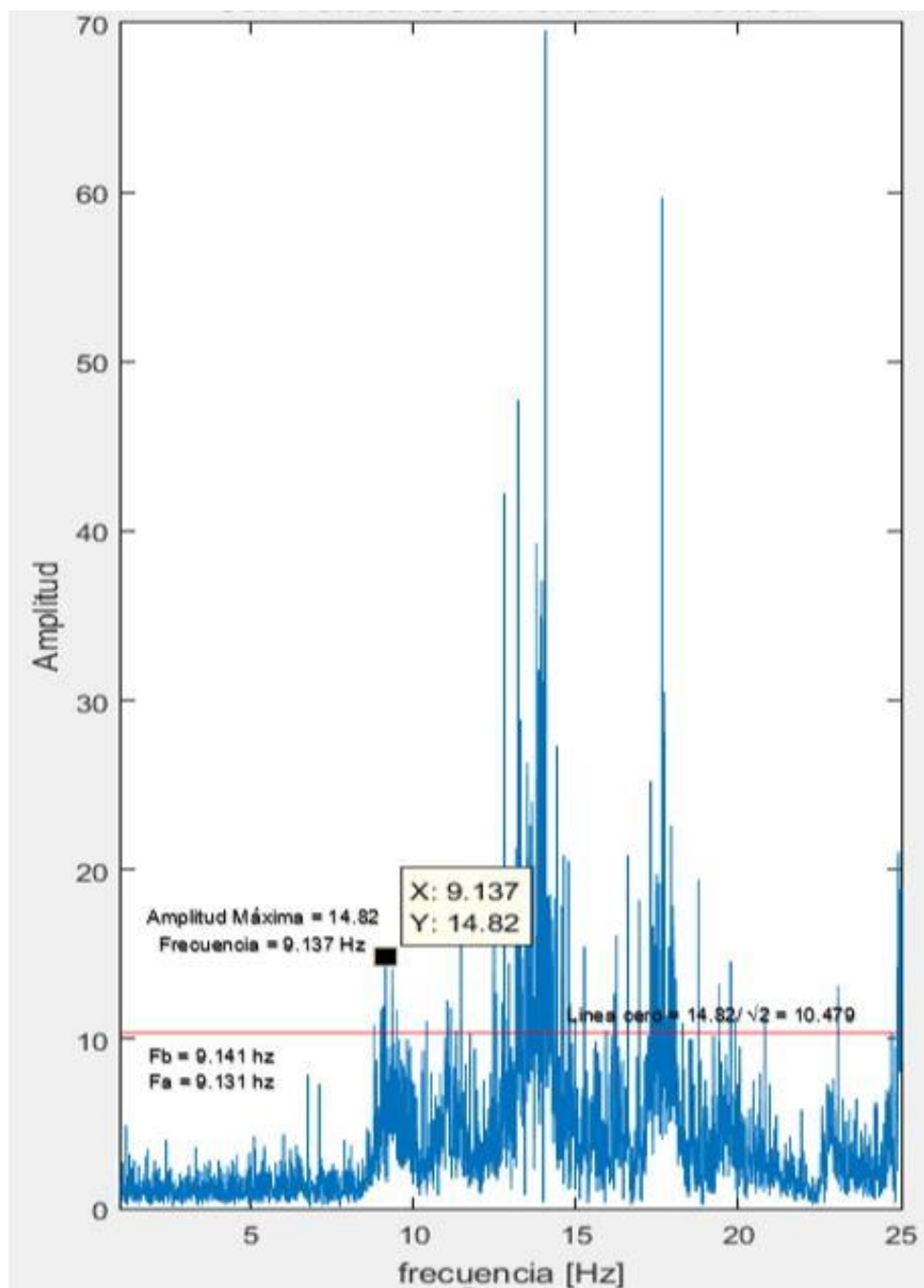
Apéndices

Apéndice A: Cálculo de resistencia a partir del martillo de Schmidt.

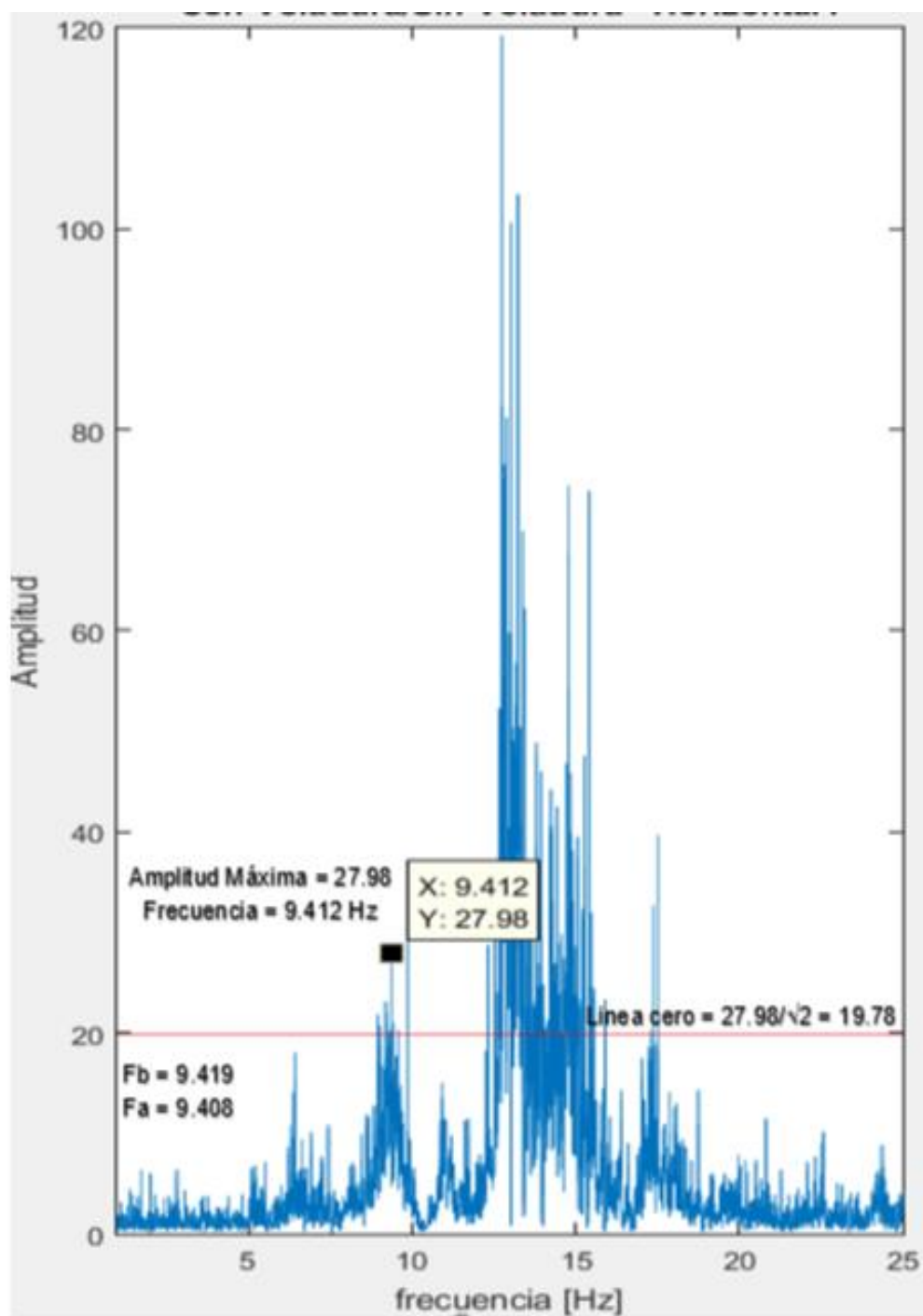


Apéndice B: Registros de Frecuencia y Amplitud del Acelerómetro.

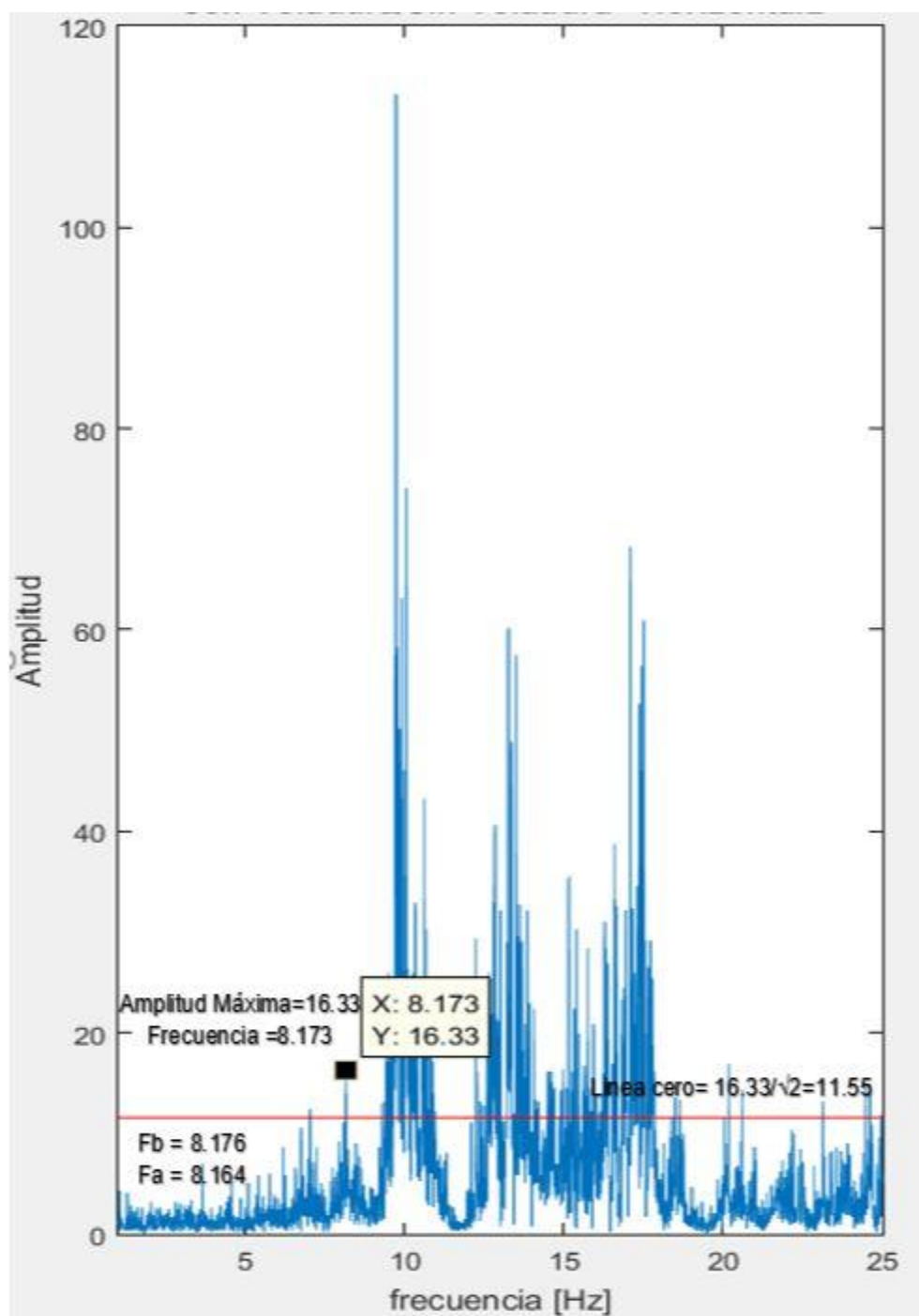
Canal Vertical



Canal Transversal:



Canal Longitudinal:



Apéndice C: Registros de Frecuencia y Amplitud del Acelerómetro.

Zona Norte:

Parámetro			Rango de Valores y Valoraciones										
									Resultado	Observaciones	Puntuación		
Compresión Uniaxial (Mpa)			>150	15	100-250	12	50-100	7	25-50	4	97 Mpa	Laboratorio Univalle	7
RQD (%)			90-100	20	75-90	17	50-75	13	25-50	8	95,2	Jv=6 -Estudio Geológico	20
Espaciamiento			>2m	20	0,6-2m	15	0,2-0,6m	10	0,06-0,2m	8	Desde 2cm a 20 cm	Estudio Geológico	8
Condición de las Juntas	Longitud	<1m	6	1-3m	4	3-10 mm	2	10-20 m	1	Entre 0,5m y 3m	Estudio geológico y corroboración en campo	5	
	Apertura	Cerrada	6	<0,1mm	5	0,1-1,0 mm	4	1-5mm	1	5mm hasta 3cm	Estudio geológico y corroboración en campo	0	
	Rugosidad	Muy rugosa	6	Rugosa	5	Lig. Rugosa	3	Lisa	1	Rugosa	Estudio geológico	5	
	Relleno	Limpia	6	Duro<5mm	4	Dura>5mm	2	Suave<5mm	1	Limo,arena,capa vegetal	Estudio geológico y corroboración en campo	2	
	Alteración	Sana	6	Lig. Alterada	5	Mod. Alterada	3	Muy Alterada	2	Ligeramente alterada	Visualización en campo	5	
Agua Subterranea			Seco	15	Húmedo	10	Mojado	7	Mojado	4	Presencia de agua puntual	Visualización en campo	10
Valor RMR (Suma de Puntuación) = 62													
Clase de Macizo Rocosó													
RMR	100-81			80-61			60-41		40-21		20-0		
Descripción	I Muy Buena			II Buena			III Regular		IV Mala		V Muy Mala		

Nota. Elaboración Propia

Zona Centro:

Parámetro			Rango de Valores y Valoraciones										
									Resultado	Observaciones	Puntuación		
Resistencia Comprensión			>150	15	100-250	12	50-100	7	25-50	4	25 a 50 Mpa	Clasificación Brown- Martillo geológico	4
RQD (%)			90-100	20	75-90	17	50-75	13	25-50	8	91	Jv=8 -Estudio Geológico	20
Espaciamiento			>2m	20	0,6-2m	15	0,2-0,6m	10	0,06-0,2m	8	Desde 2cm a 20 cm	Estudio Geológico	8
Condición de las Juntas	Longitud	<1m	6	1-3m	4	3-10 m	2	10-20 m	1	1 a 3m, 3 a 10 m	Estudio geológico y corroboración en campo	3	
	Apertura	Cerrada	6	<0,1mm	5	0,1-1,0 mm	4	1-5mm	1	2mm hasta 2cm	Estudio geológico y corroboración en campo	0	
	Rugosidad	Muy rugosa	6	Rugosa	5	Lig. Rugosa	3	Lisa	1	Ondulada Rugosa	Estudio geológico	4	
	Relleno	Limpia	6	Duro<5mm	4	Dura>5mm	2	Suave<5mm	1	Limo,arena,capa vegetal	Estudio geológico y corroboración en campo	1	
	Alteración	Sana	6	Lig. Alterada	5	Mod. Alterada	3	Muy Alterada	2	Moderadamente alterada	Visualización en campo	3	
Agua Subterranea			Seco	15	Húmedo	10	Mojado	7	Mojado	4	Presencia de agua	Visualización en campo	4
Valor RMR (Suma de Puntuación) = 47													
Clase de Macizo Rocoso													
RMR	100-81		80-61		60-41		40-21		20-0				
Descripción	I Muy Buena		II Buena		III Regular		IV Mala		V Muy Mala				

Nota. Elaboración Propia

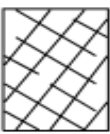
Zona Sur:

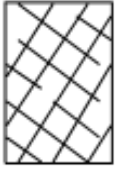
Parámetro		Rango de Valores y Valoraciones								Resultado	Observaciones	Puntuación
Resistencia Comprensión		>150	15	100-250	12	50-100	7	25-50	4	97 Mpa	Laboratorio Univalle	7
RQD (%)		90-100	20	75-90	17	50-75	13	25-50	8	91	Jv= 4 Estudio Geológico	20
Espaciamiento		>2m	20	0,6-2m	15	0,2-0,6m	10	0,06-0,2m	8	Desde 2cm a 20 cm	Estudio Geológico	8
Condición de las Juntas	Longitud	<1m	6	1-3m	4	3-10 m	2	10-20 m	1	1 a 3m , < 1m	Estudio geológico y corroboración en campo	5
	Apertura	Cerrada	6	<0,1mm	5	0,1-1,0 mm	4	1-5mm	1	5mm hasta 3cm	Estudio geológico y corroboración en campo	0
	Rugosidad	Muy rugosa	6	Rugosa	5	Lig. Rugosa	3	Lisa	1	Escalonada Rugosa	Estudio geológico	6
	Relleno	Limpia	6	Duro<5mm	4	Dura>5mm	2	Suave<5mm	1	Limo,arena,capa vegetal	Estudio geológico y corroboración en campo	2
	Alteración	Sana	6	Lig. Alterada	5	Mod. Alterada	3	Muy Alterada	2	Ligeramente alterada	Visualización en campo	5
Agua Subterránea		Seco	15	Húmedo	10	Mojado	7	Mojado	4	Presencia de agua	Visualización en campo	10
Valor RMR (Suma de Puntuación) =											63	
Clase de Macizo Roco												
RMR	100-81		80-61		60-41		40-21		20-0			
Descripción	I Muy Buena		II Buena		III Regular		IV Mala		V Muy Mala			

Nota. Elaboración Propia

Apéndice D: Caracterización Geotécnica y Estimaciones del GSI de las Zonas del Macizo Rocosó

Zona Norte:

Carácterística del Macizo Rocosó para evaluar su resistencia Basándose en la apariencia del afloramiento de roca, escoja la categoría que según su criterio mejor describe la condición típica del Macizo Rocosó in situ en condición no perturbada. Note que superficies expuestas de roca que han sido generadas por voladura pueden dar una impresión errónea de la calidad de la roca subyacente. Puede ser necesario considerar un ajuste por tronadura y un examen de testigos de sondajes y/o superficies definidas con precorte o tronaduras amortiguadas amortiguadas puede ayudar en la definición de este ajuste.		Condición de las Discontinuidades MUY BUENA : Superficies rugosas y de cajas frescas (sin señales de intemperización ni de alteración) BUENA : Superficies rugosas, cajas levemente intemperizadas y/o alteradas, con pátinas de óxido de hierro REGULAR : Superficies lisas, cajas moderadamente intemperizadas y/o alteradas MALA : Superficies lisas y cizalladas, cajas intemperizadas y/o alteradas, con fragmentos de rellenos granulares y/o arcillosos firmes MUY MALA : Superficies lisas y cizalladas, cajas muy intemperizadas y/o alteradas, con rellenos arcillosos blandos				
ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		Empeora la condición de las discontinuidades →				
	FRACTURADO EN BLOQUES Macizo rocoso conformado por trozos o bloques de roca bien trabados de forma cúbica y definido por tres sets de estructuras ortogonales entre sí.	FB/MB	FB/B	FB/R	FB/M	FB/MM
	FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES Macizo rocoso algo perturbado, conformado por trozos o bloques de roca trabados, de varias caras, angulosos y definidos por cuatro o mas sets de estructuras.	FF/MB	FF/B	FF/R	FF/M	FF/MM
	FRACTURADO Y PERTURBADO Macizo rocoso plegado y/o afectado por fallas, conformado por trozos o bloques de roca de varias caras, angulosos y definidos por la intersección de numerosos sets de estructuras	FP/MB	FP/B	FP/R	FP/M	FP/MM
	FRACTURADO Y PERTURBADO Macizo rocoso plegado y/o afectado por fallas, conformado por trozos o bloques de roca de varias caras, angulosos y definidos por la intersección de numerosos sets de estructuras	D/MB	D/B	D/R	D/M	D/MM

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA De los códigos de las letras que describen la estructura del Macizo Rocoso y la condición de las discontinuidades, selecciones el cuadro apropiado en esta tabla. Estime el valor típico del Índice Geológico de Resistencia GSI de los contornos que muestra la tabla.		Condición de las Discontinuidades MUY BUENA : Superficies rugosas y de cajas frescas (sin señales de intemperización ni de alteración) BUENA : Superficies rugosas, cajas levemente intemperizadas y/o alteradas, con pátinas de óxido de hierro REGULAR : Superficies lisas, cajas moderadamente intemperizadas y/o alteradas MALA : Superficies lisas y cizalladas, cajas intemperizadas y/o alteradas, con fragmentos de rellenos granulares y/o arcillosos firmes MUY MALA : Superficies lisas y cizalladas, cajas muy intemperizadas y/o alteradas, con rellenos arcillosos blandos				
ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		Empeora la condición de las discontinuidades →				
	FRACTURADO EN BLOQUES Macizo rocoso conformado por trozos o bloques de roca bien trabados de forma cúbica y definido por tres sets de estructuras ortogonales entre sí.	80	70			
	FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES Macizo rocoso algo perturbado, conformado por trozos o bloques de roca trabados, de varias caras, angulosos y definidos por cuatro o mas sets de estructuras.		60	50		
	FRACTURADO Y PERTURBADO Macizo rocoso plegado y/o afectado por fallas, conformado por trozos o bloques de roca de varias caras, angulosos y definidos por la intersección de numerosos sets de estructuras			40	30	
	FRACTURADO Y PERTURBADO Macizo rocoso plegado y/o afectado por fallas, conformado por trozos o bloques de roca de varias caras, angulosos y definidos por la intersección de numerosos sets de estructuras				20	10

Zona Sur:

Característica del Macizo Rocoso para evaluar su resistencia Basándose en la apariencia del afloramiento de roca, escoja la categoría que según su criterio mejor describe la condición típica del Macizo Rocoso in situ en condición no perturbada. Note que superficies expuestas de roca que han sido generadas por voladura pueden dar una impresión errónea de la calidad de la roca subyacente. Puede ser necesario considerar un ajuste por tronadura y un examen de testigos de sondajes y/o superficies definidas con precorte o tronaduras amortiguadas amortiguadas puede ayudar en la definición de este ajuste.		Condición de las Discontinuidades MUY BUENA : Superficies rugosas y de cajas frescas (sin señales de intemperización ni de alteración) BUENA : Superficies rugosas, cajas levemente intemperizadas y/o alteradas, con pátinas de óxido de hierro REGULAR : Superficies lisas, cajas moderadamente intemperizadas y/o alteradas MALA : Superficies lisas y cizalladas, cajas intemperizadas y/o alteradas, con fragmentos de rellenos granulares y/o arcillosos firmes MUY MALA : Superficies lisas y cizalladas, cajas muy intemperizadas y/o alteradas, con rellenos arcillosos blandos					
ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		Disminuye la trabazón de los bloques de roca ↓	Empeora la condición de las discontinuidades →				
	FRACTURADO EN BLOQUES Macizo rocoso conformado por trozos o bloques de roca bien trabados de forma cúbica y definido por tres sets de estructuras ortogonales entre sí.		FB/MB	FB/B	FB/R	FB/M	FB/MM
	FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES Macizo rocoso algo perturbado, conformado por trozos o bloques de roca trabados, de varias caras, angulosos y definidos por cuatro o mas sets de estructuras.		FF/MB	FF/B	FF/R	FF/M	FF/MM
	FRACTURADO Y PERTURBADO Macizo rocoso plegado y/o afectado por fallas, conformado por trozos o bloques de roca de varias caras, angulosos y definidos por la intersección de numerosos sets de estructuras		FP/MB	FP/B	FP/R	FP/M	FP/MM
	FRACTURADO Y PERTURBADO Macizo rocoso plegado y/o afectado por fallas, conformado por trozos o bloques de roca de varias caras, angulosos y definidos por la intersección de numerosos sets de estructuras		D/MB	D/B	D/R	D/M	D/MM

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA De los códigos de las letras que describen la estructura del Macizo Rocosó y la condición de las discontinuidades, selecciones el cuadro apropiado en esta tabla. Estime el valor típico del Índice Geológico de Resistencia GSI de los contornos que muestra la tabla.		Condición de las Discontinuidades MUY BUENA : Superficies rugosas y de cajas frescas (sin señales de intemperización ni de alteración) BUENA : Superficies rugosas, cajas levemente intemperizadas y/o alteradas, con pátinas de óxido de hierro REGULAR : Superficies lisas, cajas moderadamente intemperizadas y/o alteradas MALA : Superficies lisas y cizalladas, cajas intemperizadas y/o alteradas, con fragmentos de rellenos granulares y/o arcillosos firmes MUY MALA : Superficies lisas y cizalladas, cajas muy intemperizadas y/o alteradas, con rellenos arcillosos blandos
ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		Empeora la condición de las discontinuidades →
	FRACTURADO EN BLOQUES Macizo rocoso conformado por trozos o bloques de roca bien trabados de forma cúbica y definido por tres sets de estructuras ortogonales entre sí.	80 70
	FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES Macizo rocoso algo perturbado, conformado por trozos o bloques de roca trabados, de varias caras, angulosos y definidos por cuatro o mas sets de estructuras.	60 50
	FRACTURADO Y PERTURBADO Macizo rocoso plegado y/o afectado por fallas, conformado por trozos o bloques de roca de varias caras, angulosos y definidos por la intersección de numerosos sets de estructuras	40 30
	FRACTURADO Y PERTURBADO Macizo rocoso plegado y/o afectado por fallas, conformado por trozos o bloques de roca de varias caras, angulosos y definidos por la intersección de numerosos sets de estructuras	20 10
Disminuye la trabazón de los bloques de roca ↓		

Zona Centro:

Característica del Macizo Rocosó para evaluar su resistencia Basándose en la apariencia del afloramiento de roca, escoja la categoría que según su criterio mejor describe la condición típica del Macizo Rocosó in situ en condición no perturbada. Note que superficies expuestas de roca que han sido generadas por voladura pueden dar una impresión errónea de la calidad de la roca subyacente. Puede ser necesario considerar un ajuste por tronadura y un examen de testigos de sondajes y/o superficies definidas con precorte o tronaduras amortiguadas amortiguadas puede ayudar en la definición de este ajuste.		Condición de las Discontinuidades MUY BUENA : Superficies rugosas y de cajas frescas (sin señales de intemperización ni de alteración) BUENA : Superficies rugosas, cajas levemente intemperizadas y/o alteradas, con pátinas de óxido de hierro REGULAR : Superficies lisas, cajas moderadamente intemperizadas y/o alteradas MALA : Superficies lisas y cizalladas, cajas intemperizadas y/o alteradas, con fragmentos de rellenos granulares y/o arcillosos firmes MUY MALA : Superficies lisas y cizalladas, cajas muy intemperizadas y/o alteradas, con rellenos arcillosos blandos					
ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		Disminuye la trabazón de los bloques de roca ↓	Empeora la condición de las discontinuidades →				
	FRACTURADO EN BLOQUES Macizo rocoso conformado por trozos o bloques de roca bien trabados de forma cúbica y definido por tres sets de estructuras ortogonales entre sí.		FB/MB	FB/B	FB/R	FB/M	FB/MM
	FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES Macizo rocoso algo perturbado, conformado por trozos o bloques de roca trabados, de varias caras, angulosos y definidos por cuatro o mas sets de estructuras.		FF/MB	FF/B	FF/R	FF/M	FF/MM
	FRACTURADO Y PERTURBADO Macizo rocoso plegado y/o afectado por fallas, conformado por trozos o bloques de roca de varias caras, angulosos y definidos por la intersección de numerosos sets de estructuras		FP/MB	FP/B	FP/R	FP/M	FP/MM
	FRACTURADO Y PERTURBADO Macizo rocoso plegado y/o afectado por fallas, conformado por trozos o bloques de roca de varias caras, angulosos y definidos por la intersección de numerosos sets de estructuras		D/MB	D/B	D/R	D/M	D/MM

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA		Condición de las Discontinuidades					
De los códigos de las letras que describen la estructura del Macizo Rocosó y la condición de las discontinuidades, selecciones el cuadro apropiado en esta tabla. Estime el valor típico del Índice Geológico de Resistencia GSI de los contornos que muestra la tabla.							
ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		Disminuye la trabazón de los bloques de roca	Empeora la condición de las discontinuidades				
	FRACTURADO EN BLOQUES Macizo rocoso conformado por trozos o bloques de roca bien trabados de forma cúbica y definido por tres sets de estructuras ortogonales entre sí.		80	70			
	FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES Macizo rocoso algo perturbado, conformado por trozos o bloques de roca trabados, de varias caras, angulosos y definidos por cuatro o mas sets de estructuras.			60			
	FRACTURADO Y PERTURBADO Macizo rocoso plegado y/o afectado por fallas, conformado por trozos o bloques de roca de varias caras, angulosos y definidos por la intersección de numerosos sets de estructuras				40		
	FRACTURADO Y PERTURBADO Macizo rocoso plegado y/o afectado por fallas, conformado por trozos o bloques de roca de varias caras, angulosos y definidos por la intersección de numerosos sets de estructuras					30	
							20
							10
		MUY BUENA : Superficies rugosas y de cajas frescas (sin señales de intemperización ni de alteración) BUENA : Superficies rugosas, cajas levemente intemperizadas y/o alteradas, con pátinas de óxido de hierro REGULAR : Superficies lisas, cajas moderadamente intemperizadas y/o alteradas MALA : Superficies lisas y cizalladas, cajas intemperizadas y/o alteradas, con fragmentos de rellenos granulares y/o arcillosos firmes MUY MALA : Superficies lisas y cizalladas, cajas muy intemperizadas y/o alteradas, con rellenos arcillosos blandos					

Apéndice E: Envolvente de Mohr - Coulomb y linealización de la envolvente en cada una de las zonas

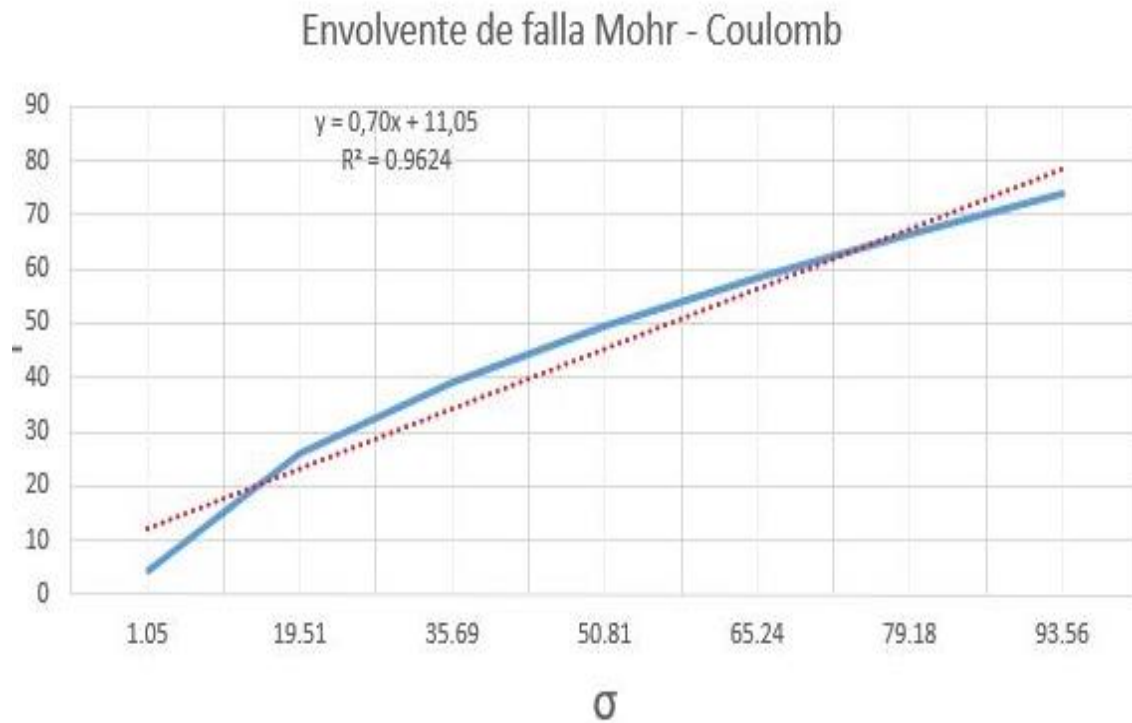
Zona Norte:



σ_3	σ_1	$d\sigma_1/d\sigma_3 =$	σ_n	τ
0.00	7.96	21.76	0.35	1.63
3.00	35.48	6.09	7.58	11.31
16.00	89.16	3.26	33.18	31.01
24.00	113.42	2.85	47.24	39.22
32.00	135.16	2.60	60.64	46.20
40.00	155.26	2.43	73.57	52.37
48.50	175.37	2.30	86.91	58.29

Ajuste envolvente de falla Mohr-Coulomb a partir de esfuerzos efectivos Hoek Brown.
Elaboración propia.

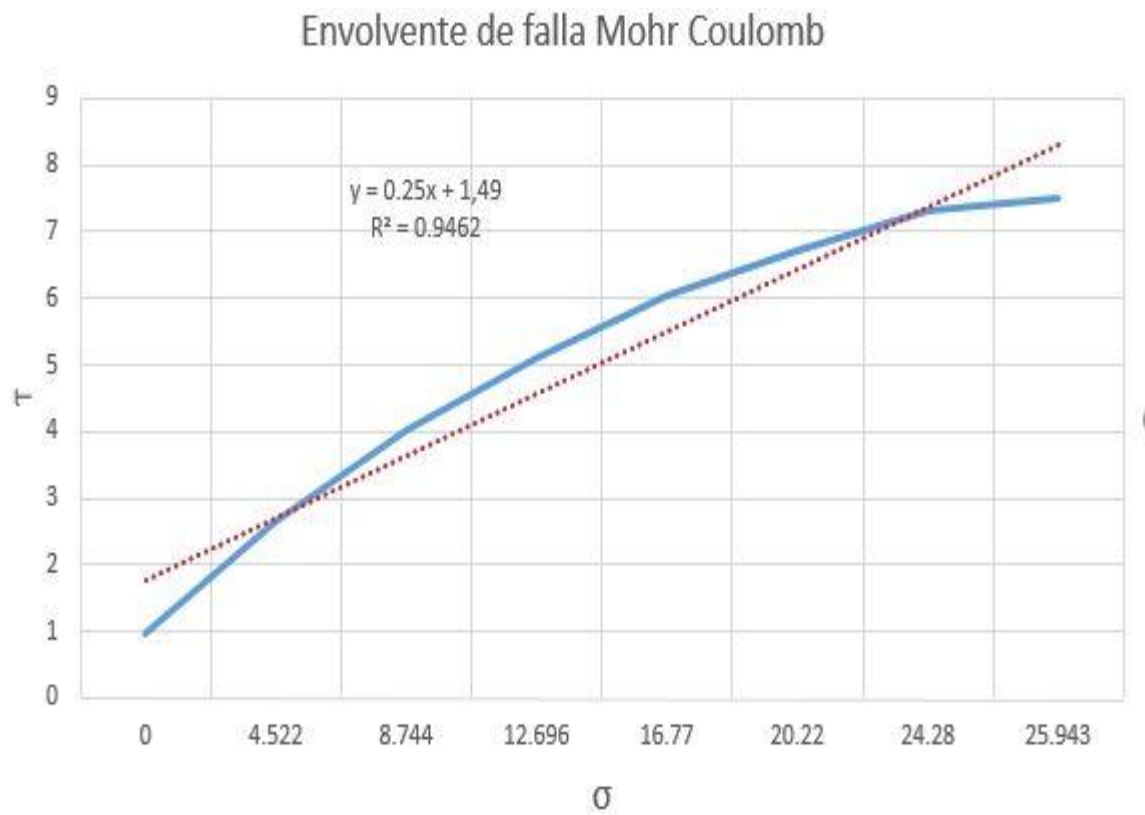
Zona Sur:



σ_3	σ_1	$d\sigma_1/d\sigma_3$	σ_n	τ
0.00	18.32	16.41	1.05	4.26
8.00	77.67	5.05	19.51	25.87
16.00	112.81	3.92	35.69	38.97
24.00	141.86	3.40	50.81	49.41
32.00	167.68	3.08	65.24	58.36
40.00	191.42	2.87	79.18	66.31
48.50	215.02	2.70	93.56	73.98

Ajuste envolvente de falla Mohr-Coulomb a partir de esfuerzos efectivos Hoek Brown.
Elaboración propia.

Zona Centro

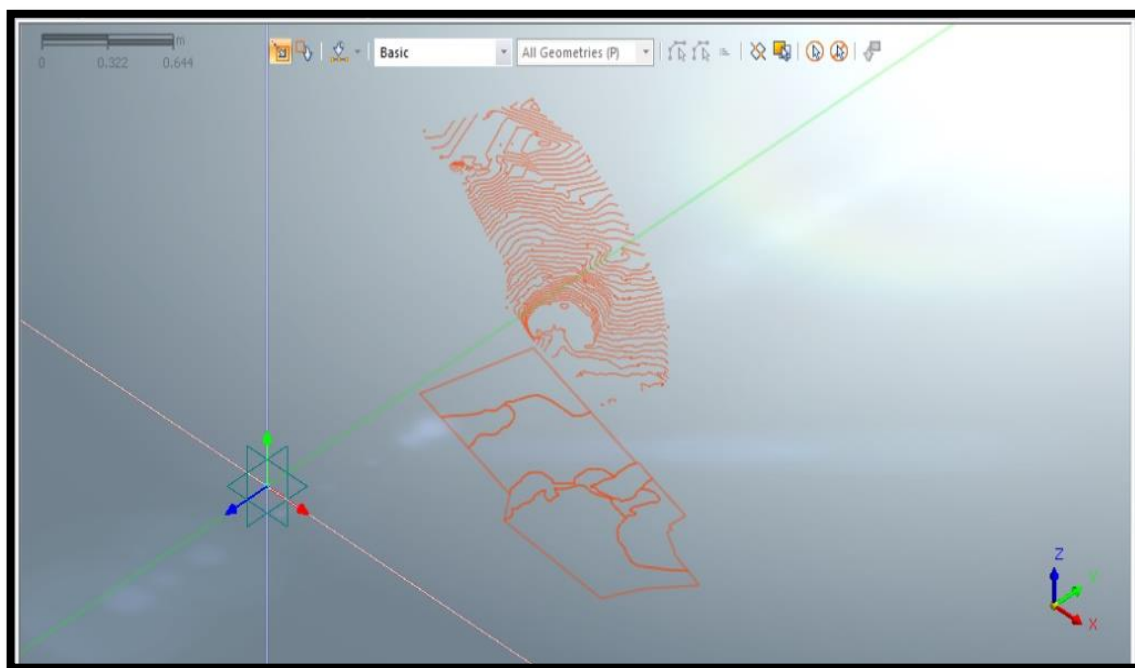


σ_3	σ_1	$d\sigma_1/d\sigma_3 =$	σ_n	τ
0.00	1.12	6.41	0.15	0.38
3.00	9.14	1.99	5.05	2.90
6.00	14.61	1.71	9.18	4.16
9.00	19.52	1.58	13.08	5.12
12.00	24.13	1.50	16.85	5.94
15.00	28.55	1.45	20.53	6.66
18.50	33.53	1.40	24.75	7.41

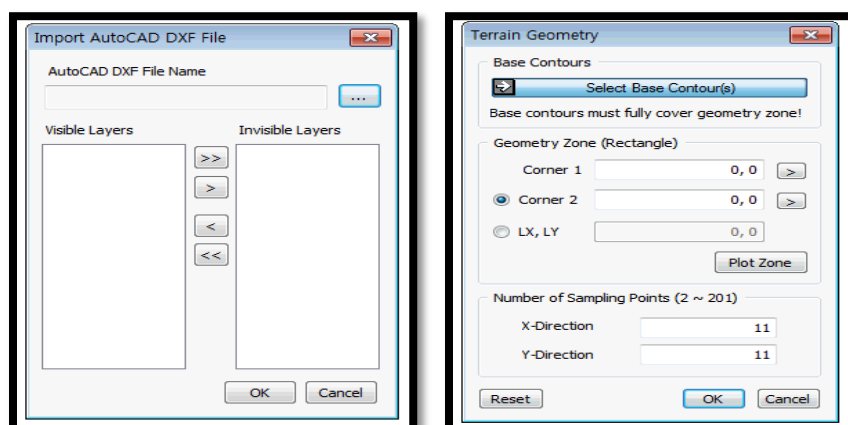
Ajuste envolvente de falla Mohr-Coulomb a partir de esfuerzos efectivos Hoek Brown.
Elaboración propia.

Apéndice F: Paso a paso modelación de terreno y creación zonas de estudio en el programa MIDAS GTS NX

Con la información del terreno y su estratificación consolidada, se procedió en el programa Midas GTS NX a través del comando “Import DXF 3D”, a realizar la importación de la topografía de la cantera, como se muestra en la figura.

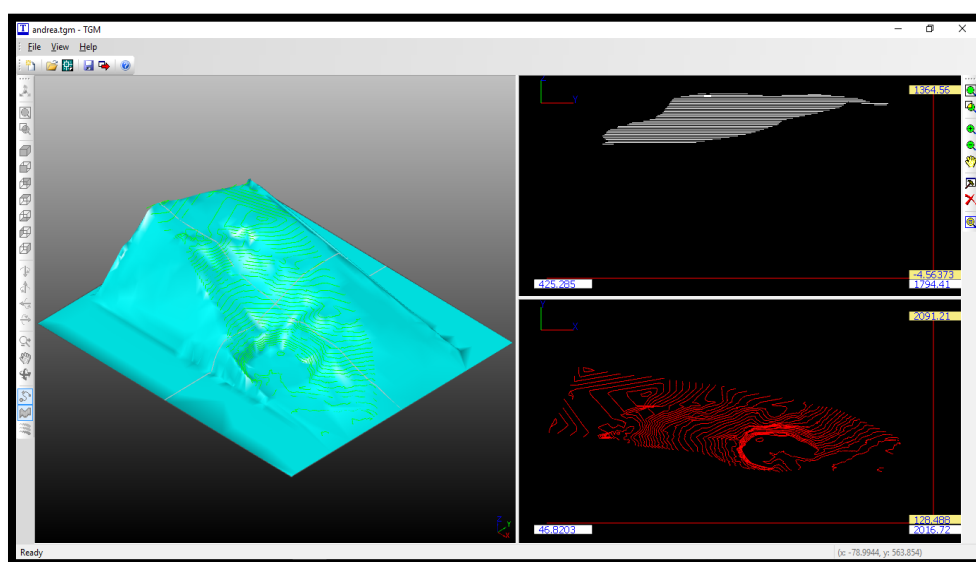


Con el comando *Terrain Geometry*, se generó una superficie a partir de los contornos importados del archivo en AutoCAD con extensión DXF, permitiendo escoger cual capa (Layer) del archivo DXF se considera dentro del área de trabajo, al igual que seleccionar la zona del dibujo que se convertiría en dicha superficie, que tendrá la extensión TMS como se muestra en la siguiente figura.

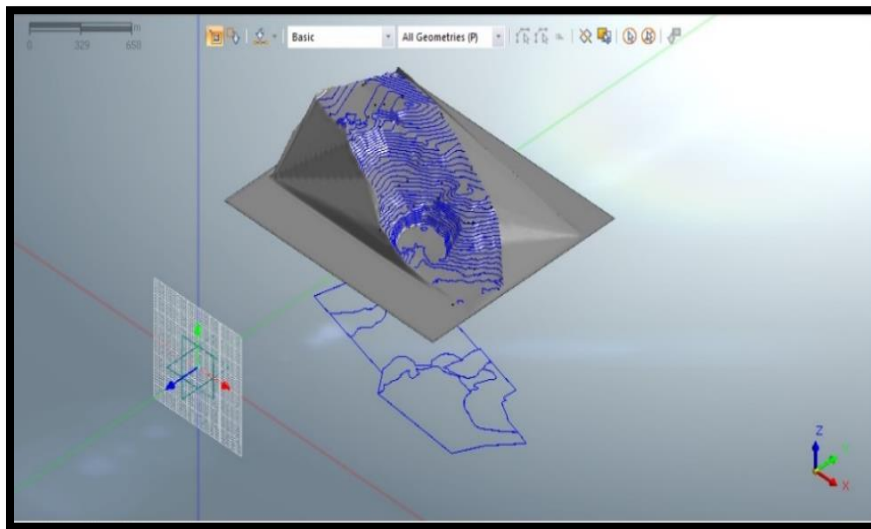


Generación de Superficies a través del comando Terrain Geometry – Midas GTS NX.

Una vez generada la superficie correspondiente a la cantera con extensión TMS, se llamó desde la interfaz del programa Midas GTS NX con el comando “*Terrain Geometry Marker*” o TGM como se muestra en la siguiente figura, para consolidar todas las curvas de nivel y las características anteriores en elementos que consoliden la modelación del terreno bajo estudio, el resultado de este proceso se puede apreciar en la figura “Superficie TMS de la cantera”.

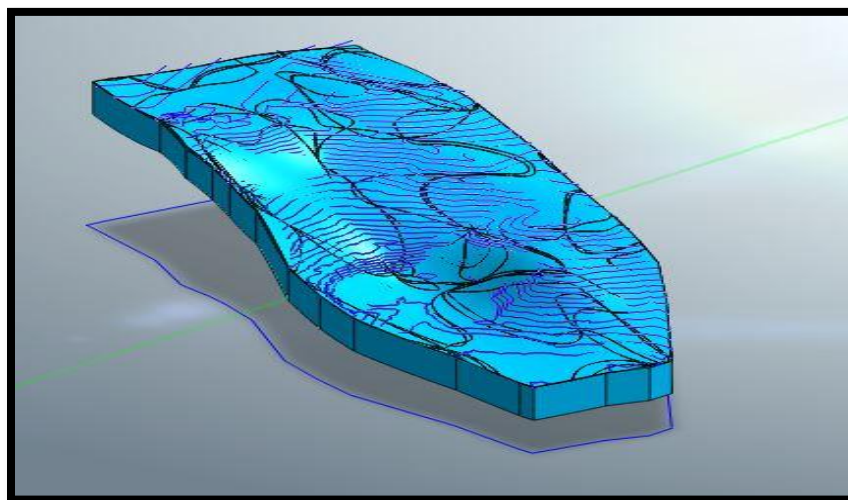


Interfaz Terrain Geometry Maker – Midas GTS NX.



Superficie TMS de la cantera – Midas GTS NX.

Con la superficie modelada dentro del software, aún no se puede realizar la caracterización del terreno para realizar las simulaciones (asignación de materiales rocosos y las propiedades mecánicas respectivas) debido a que este proceso dentro del software solo se puede realizar en modelos 3D sólidos. Por tal motivo se realizó esta conversión empleando el comando de extrusión o “Extrude”, donde se obtuvo el modelo que se aprecia en la figura a continuación.



Resultado Modelo 3D del terreno – MIDAS GTS NX

Una vez generado el sólido mencionado anteriormente y a través del comando “*Bedding Plane*”, se generó la estratigrafía de la zona con base a la información que fue suministrada en los sondeos de campo. Este comando despliega una tabla donde fueron insertadas las coordenadas donde se realizaron los sondeos, la información de las capas y la profundidad de cada una de ellas como se evidencia en la figura.

Bedding Plane Wizard

Bedding Plane

Bedding Plane Name: Hoja 1

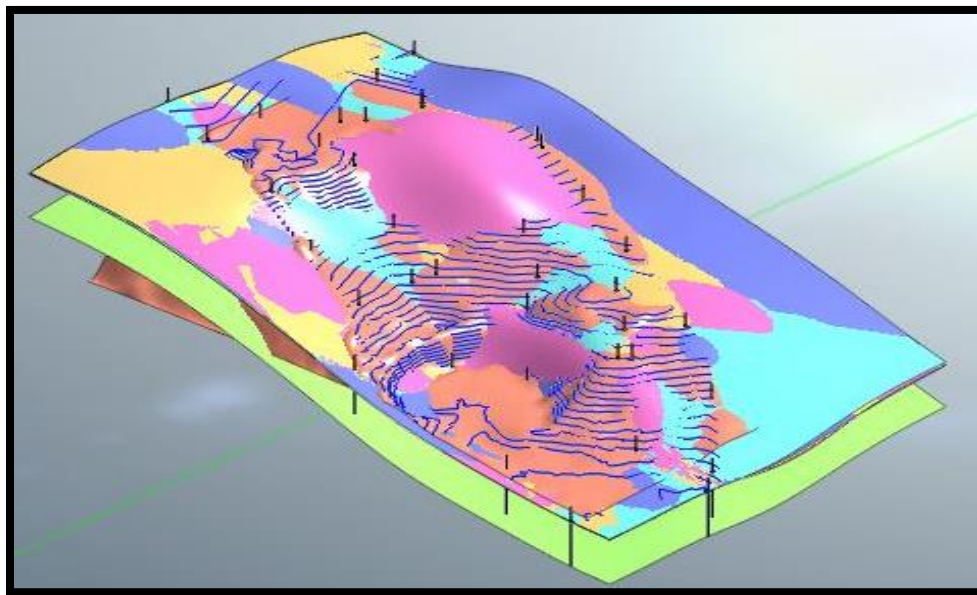
Boreholes Information

Boreholes Location

Name: bb23 Location: 236, 975, 1332

Define Bedding Plane...

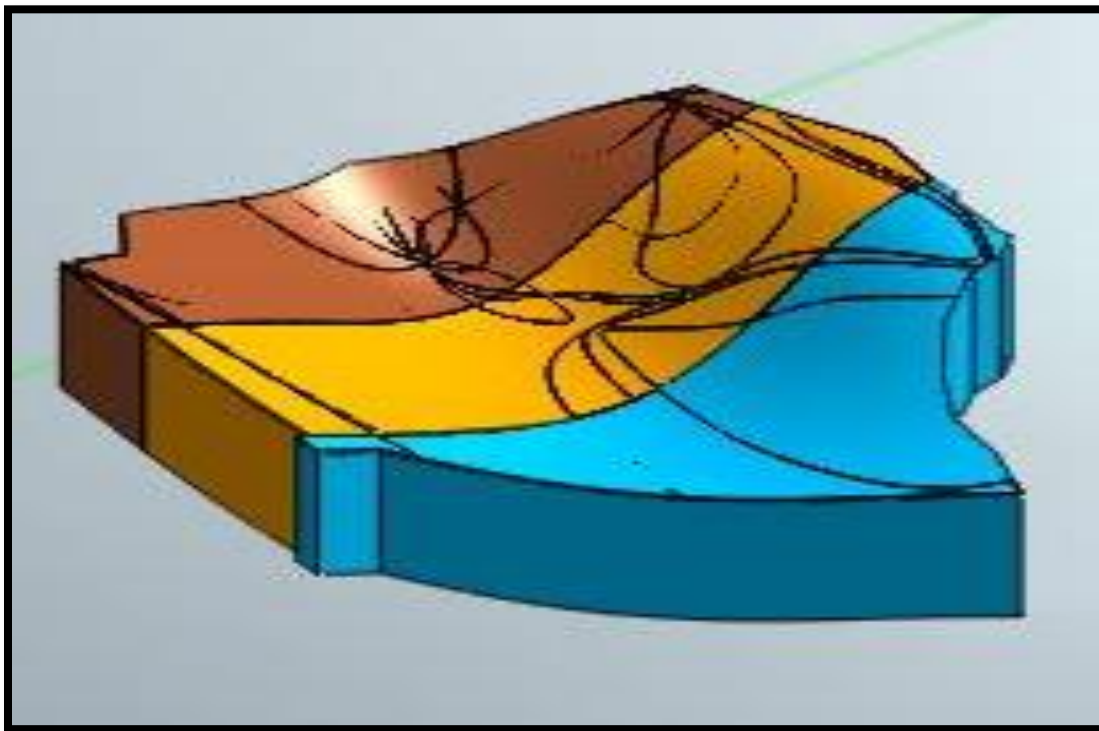
	Plane Name	Depth (m)
1	Esteril	1.5000
2	Esteril 1	1.6000
3	Roca	3.5000
4	Transición	6.5000
5	Basalto	150.0000
6		



Comando *Bedding Plane* – Midas GTS NX. Elaboración propia.

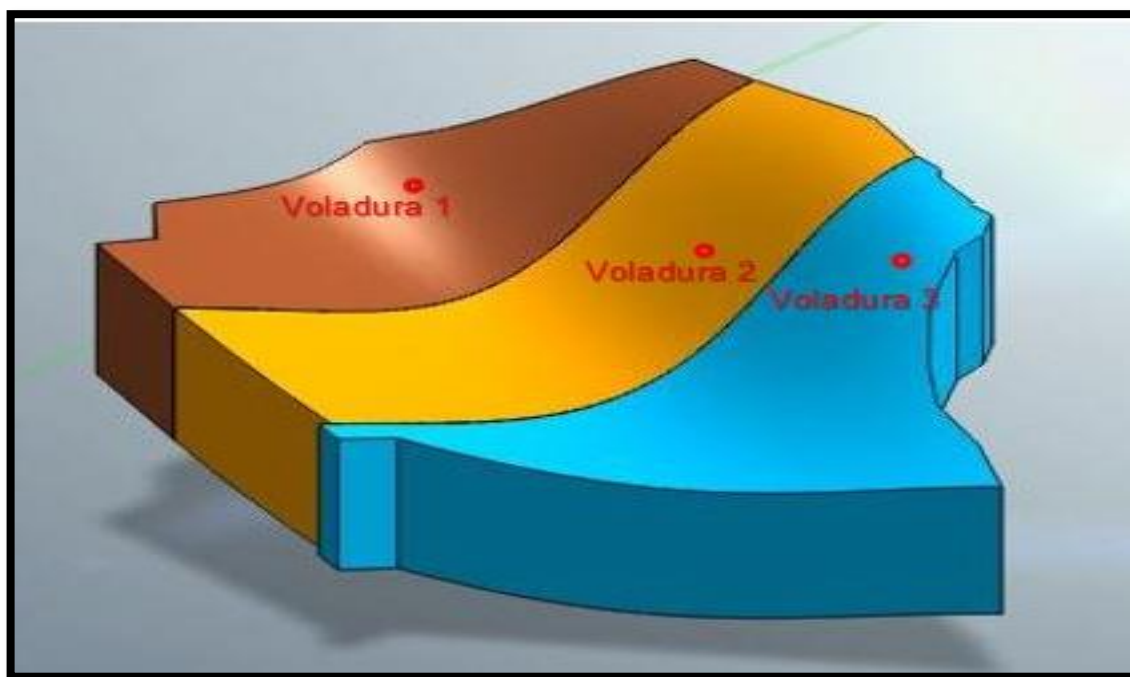
Debido a la gran cantidad de información del modelo y al tiempo de proceso de la información, se redujo la zona de estudio a exclusivamente las áreas donde se realizarían las voladuras en el terreno de la cantera, esto con el propósito de minimizar el tiempo de simulación, optimizando la capacidad del equipo de cómputo que realizó el análisis.

Para realizar lo descrito anteriormente En el panel Divide, con el comando “Solid” y “Surface”, se realizó el corte del terreno modelado, dejando solamente la zona de voladuras a estudiar, dividida en los sectores norte, centro y sur, los cuales fueron detallados en la caracterización del macizo rocoso realizada anteriormente en el presente documento, como lo muestra la figura.



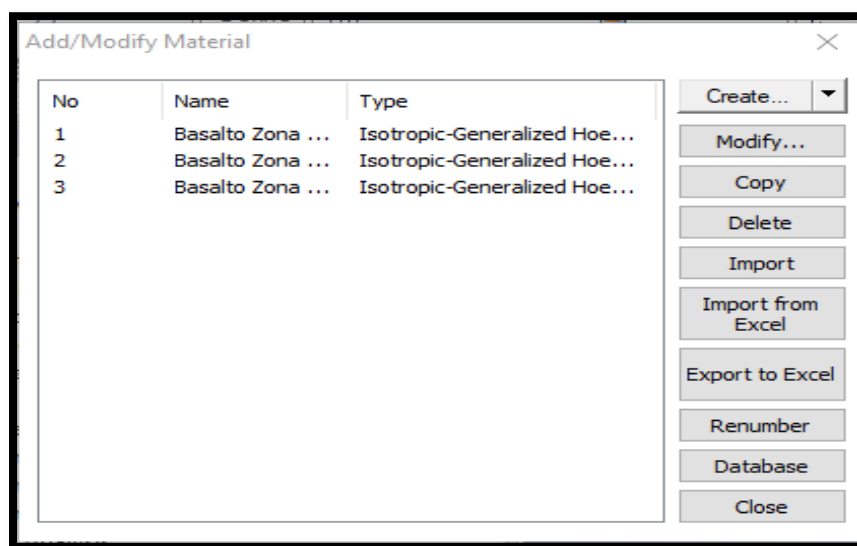
Sólido y Zonas de voladura acotadas en el Modelo 3D – Midas GTS NX. Elaboración propia.

Sobre el modelo anterior fueron insertados los puntos de perforación de las voladuras, donde se crearon los cilindros con las dimensiones equivalentes a la que puede presentar una malla de perforación aplicada en este tipo de terreno, modelando espacialmente el lugar donde se realizaría la voladura, como se indica en la figura.



Zonas de voladura del modelo 3D – Midas GTS NX.

Con el sólido debidamente acotado en las zonas y con las ubicaciones de las cargas en cada una de ellas, se realizó la caracterización de materiales, según la información que se recopiló en estas zonas, a través del comando “*Add / Modify Material*”, el cual permite la creación, modificación, importación, eliminación de materiales tanto 2D como 3D, como se evidencia en la figura.



Comando Add / Modify Material – Midas GTS NX.

Para este caso particular, debido a que no se contaba con las propiedades de los materiales rocosos dentro de una hoja de Excel, o se encontraran como material predeterminado dentro del mismo software, fue necesario transcribir toda la información de estas propiedades con el apartado de crear material; donde se trabajó con materiales isotrópicos.

Dentro de esta opción, en las diferentes pestañas y submenús fueron inscritas las propiedades del material como el módulo elástico, la unidad de peso, el factor de amortiguamiento, los ángulos de fricción y dilatancia, la resistencia a la compresión inconfiada, factor de perturbación (se puede tomar 1 como una aproximación mas no como un valor exacto) y los parámetros de Hoek – Brown para macizos rocosos (mb, s y a), así como el tipo de modelo de análisis de este material, que al igual que en el proceso realizado en este documento, fue de tipo Hoek – Brown generalizado, como se puede apreciar en la figura.

The first screenshot shows the 'Material' dialog box with the following settings:

- ID: 4
- Name: Isotropic
- Color: [Pink]
- Model Type: Generalized Hoek Brown
- Structure: ☐
- General tab: Elastic Modulus (E) = 50000 kN/m², Inc. of Elastic Modulus = 0 kN/m³, Inc. of Elastic Modulus Ref. Height = 0 m, Poisson's Ratio (Nu) = 0.3, Unit Weight (Gamma) = 20 kN/m³, Initial Stress Parameters: Ko = 1, Anisotropy = ☐.
- Thermal Parameter: Thermal Coefficient = 1e-006 1/[T]
- Damping Ratio (For Dynamic): Damping Ratio = 0.05
- Safety Result (Mohr-Coulomb): ☐ Cohesion (C) = 30 kN/m², Frictional Angle (Phi) = 36 [deg], Tensile Strength = 0 kN/m².

The second screenshot shows the 'Material' dialog box with the following settings:

- ID: 4
- Name: Isotropic
- Color: [Pink]
- Model Type: Generalized Hoek Brown
- Structure: ☐
- General tab: Initial mb = 10, Initial s = 0.004, Initial a = 0.5, Residual Parameters: ☐ Residual mb = 0, Residual s = 0, Residual a = 0.
- Uniaxial Comp. Strength = 30000 kN/m²
- Dilatancy Angle = 30 [deg]

The third screenshot shows the 'Hoek Brown Parameter' dialog box with the following settings:

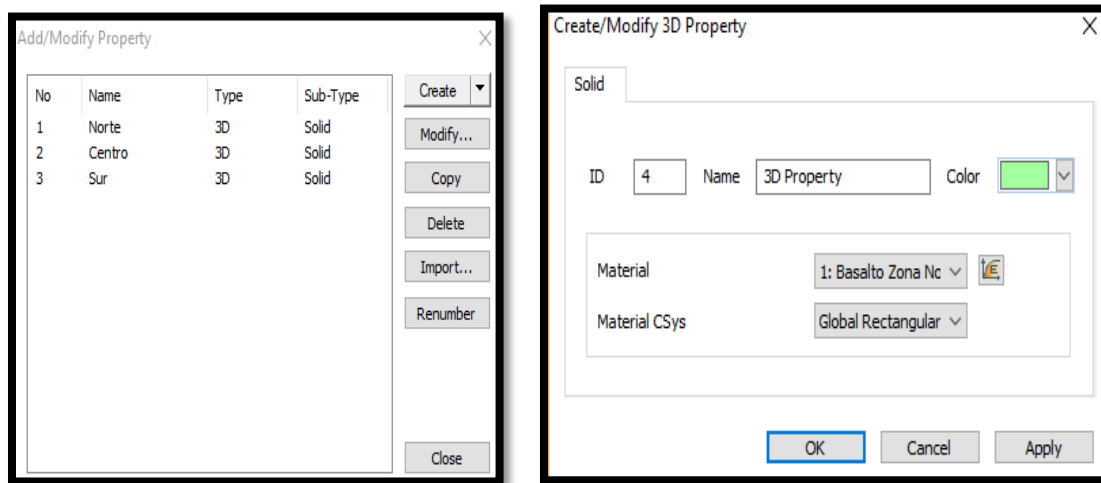
- Intact rock parameter (mi) = 10
- Geological Strength Index (GSI) = 50
- Disturbance Factor (D) = 0

Parámetros de Configuración del material en las 3 zonas por Hoek – Brown Generalizado – Midas GTS NX.

Al terminar de realizar la configuración del material para las 3 zonas, fueron creadas las propiedades 3D que se tendrán en cada una de las mallas según fuera la zona, este proceso fue posible a través del comando “Add / Modify Property”, como se ve en la figura.

Se puede apreciar en dicha figura que cada una de las propiedades tiene asignado un material y el tipo de diferencial o elemento finito que se tomó para realizarlas (En este caso CSys por su versatilidad), al igual que un identificador para el modelado.

Hay que tener en cuenta que al igual que para los materiales, este comando permite la creación, modificación, importación, copia y eliminación de una propiedad para un proyecto.

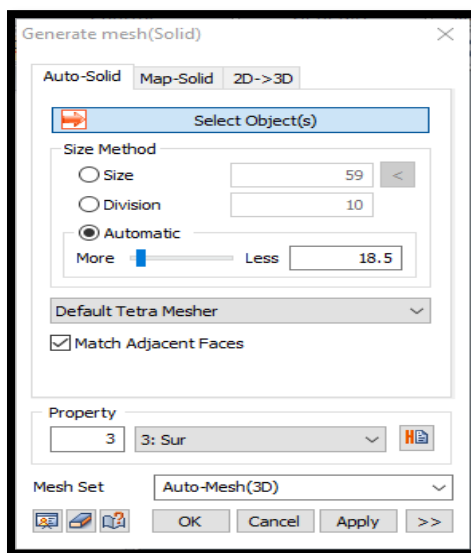


Creación de Propiedades 3D para mallado – Midas GTS NX. Elaboración propia.

Con estos elementos definidos completamente, es posible realizar el proceso de mallado a cada una de las zonas, empleando tanto las propiedades 3D, como los materiales isotrópicos creados anteriormente.

Apéndice G: Proceso de mallado del terreno, creación y asignación de voladuras al modelo en el programa MIDAS GTS NX

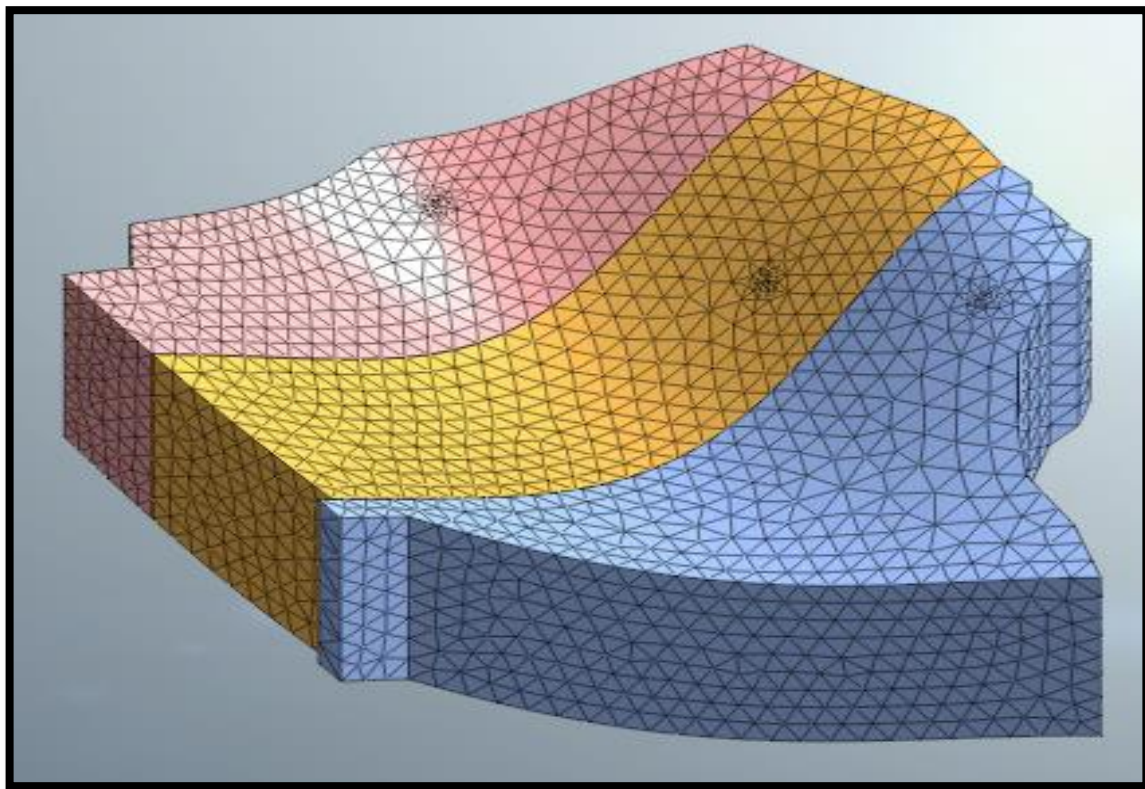
Para realizar el proceso de mallado con los elementos anteriores, fue necesario utilizar el comando “Generate Mesh (Solid)” como lo evidencia la siguiente figura, ubicado en el panel superior en la Pestaña Mesh, el cual permitió escoger el tamaño de la malla en la unidad base de longitud del programa (metros); esta dimensión debe ser lo suficiente pequeña para detallar un comportamiento aproximado del terreno pero no exagerar en ese sentido, esto se debe a que crecerá la cantidad de nodos en el modelo y de este modo también la cantidad de operaciones matemáticas que se deben realizar, tomando más tiempo de ejecución en cada proceso tanto de mallado como de análisis.



Comando Generate Mesh – Midas GTS NX.

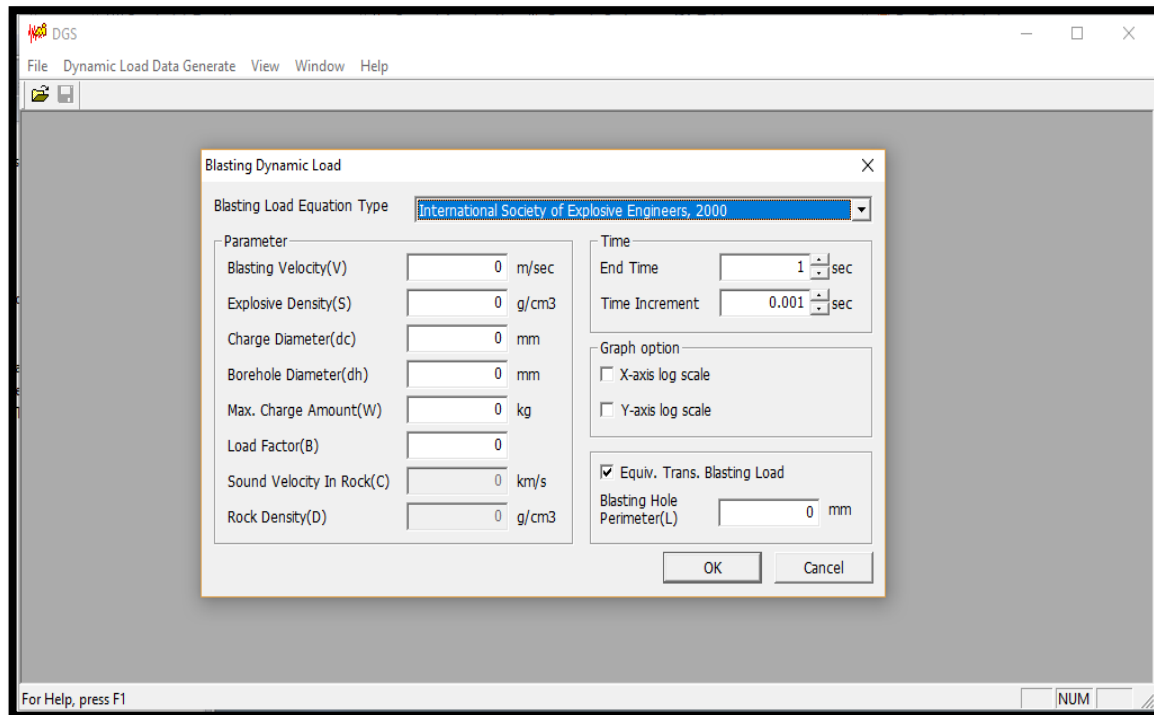
Al seleccionar el tamaño del diferencial y seleccionar la propiedad correspondiente, se seleccionó la zona dentro del modelo a mallar de modo que al aplicar

en cada una de las zonas se obtiene un resultado similar al mostrado en la figura, terminando con la adecuación del terreno para realizar la simulación.



Zonas de la cantera completamente malladas – Midas GTS NX

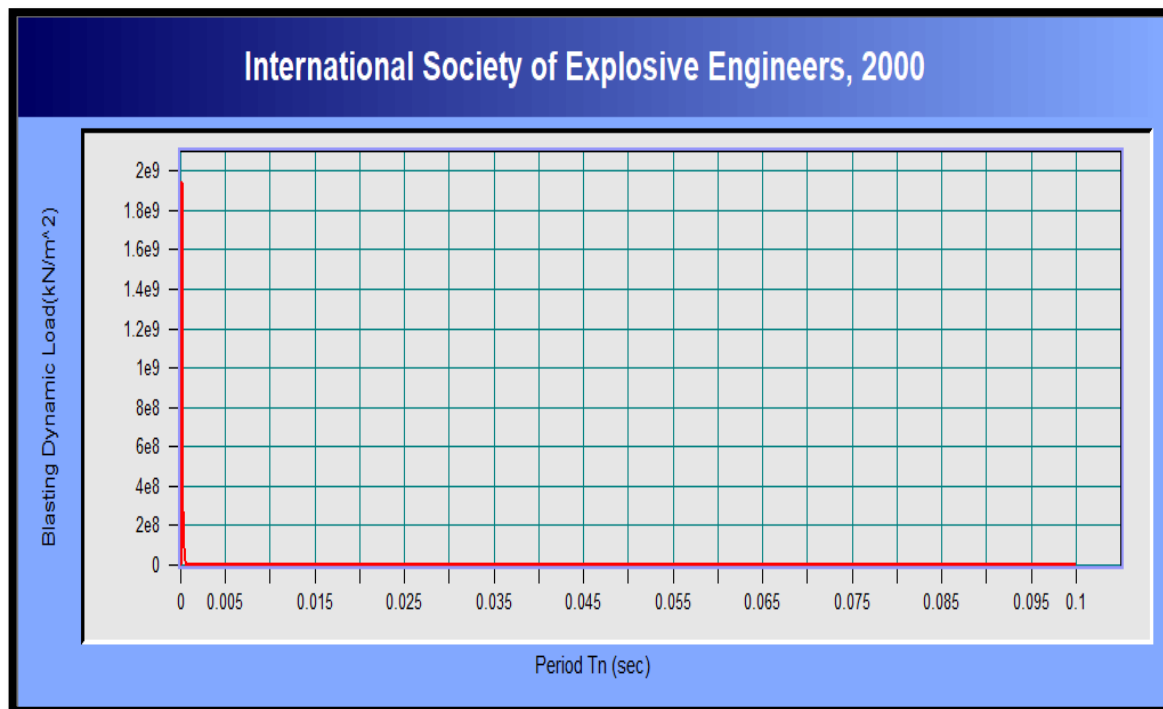
Con el terreno modelado y mallado correctamente, se procedido a crear las “voladuras”, a través del comando “Data Generation System (DGS)” como se muestra en la figura, recreadas por ecuaciones en función del diámetro y el factor de la carga, la densidad del explosivo, la velocidad de explosión, el diámetro del agujero donde se encuentra el explosivo y los factores de tiempo que se requieren para simularse.



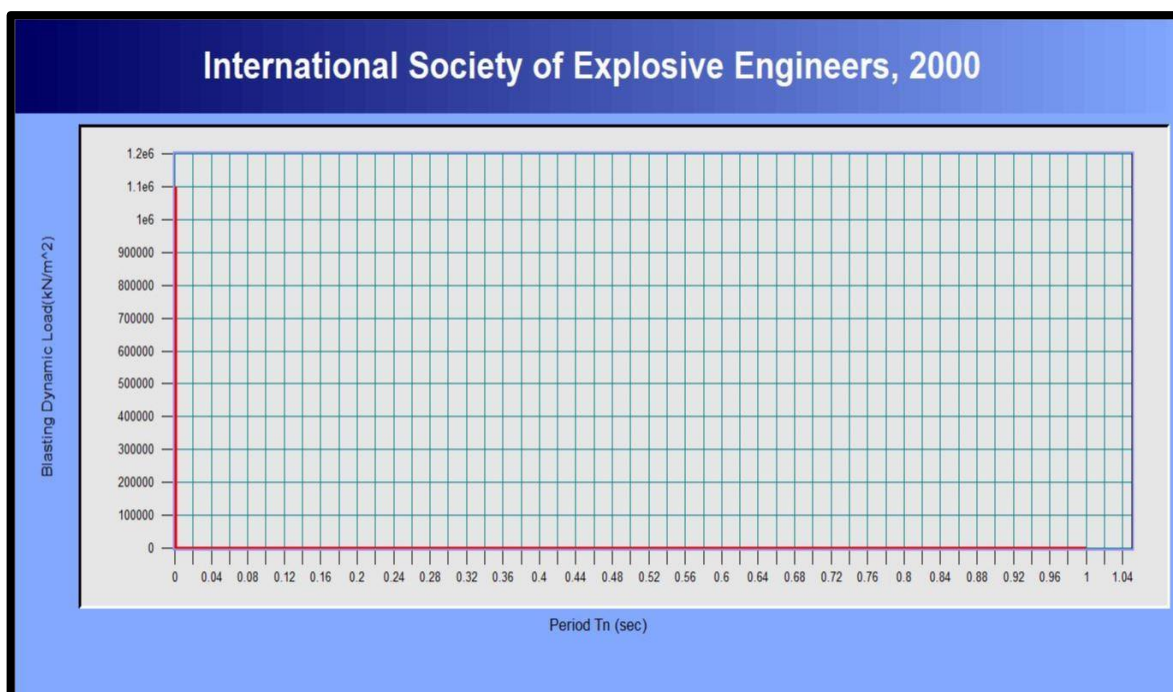
Creación de la voladura a través del comando DGS – Midas GTS NX. Elaboración propia

Al colocar los valores solicitados en el submenú “Blasting Dynamic Load” que representa la voladura, ubicado en el menú Dynamic Load Data Generate dentro del mismo comando, el programa pudo recrear la onda mostrada en la figura, donde se describe el comportamiento temporal de dicha voladura.

Para propósitos de este trabajo se crearon estas funciones para explosivos de Anfo y Centra, de 3 y 4 pulgadas de diámetro.

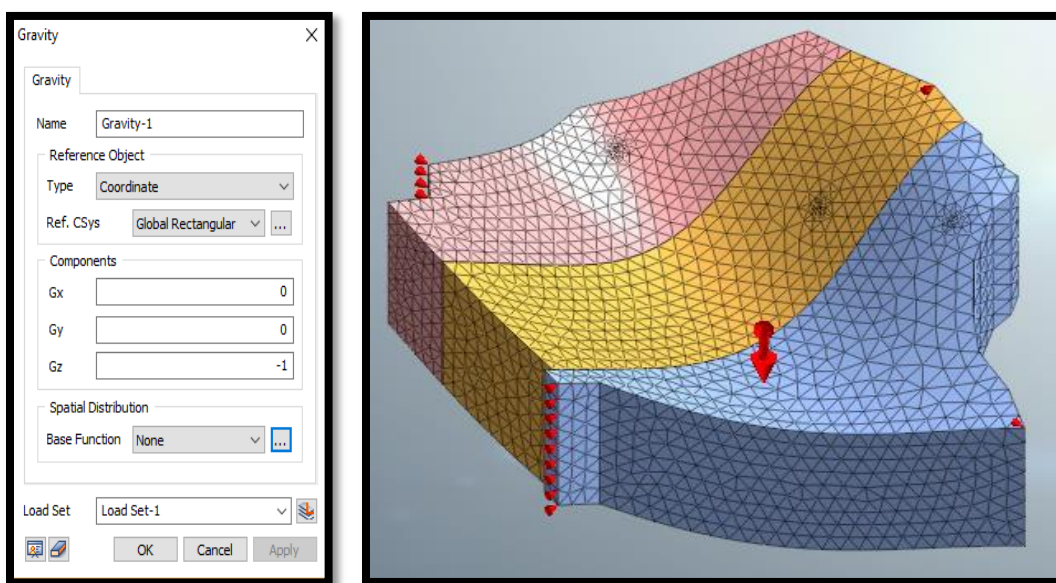


*Comportamiento temporal voladura simulada a través del DGS – Midas GTS NX con explosivo Anfo.
Elaboración propia*



*Comportamiento temporal voladura simulada a través del DGS – Midas GTS NX con explosivo Centra.
Elaboración propia*

Después de la creación de las ecuaciones matemáticas que describen las voladuras, se establecieron las condiciones de frontera del modelo 3D, que para este caso fueron dos condiciones claves para replicar el modelo de forma cercana a la realidad y que matemática y computacionalmente tenga solución; el primero de ellos es la acción de la fuerza gravitatoria en el modelo, tomando el eje Z negativo según la nomenclatura del programa como el sentido donde se ejerce dicha fuerza en todo el modelo; esta acción se realizó a través del comando “Gravity”, dicho comando y su resultado se hallan evidenciados en la figura.

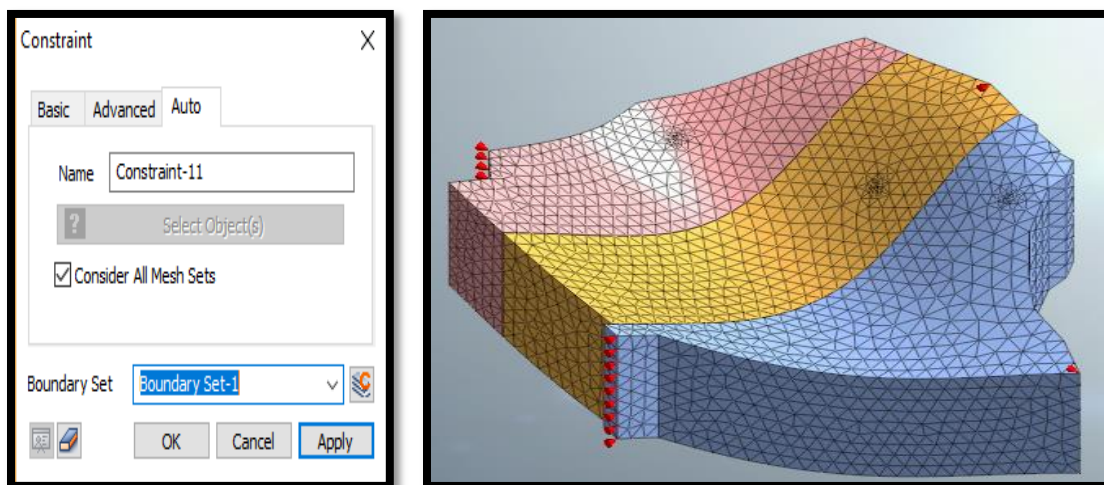


Asignación de gravedad a través del comando Gravity – Midas GTS NX. Elaboración propia

La segunda condición de frontera que se requirió, fue la designación de los límites del modelo en 3D como los topes donde se realizaría el análisis de elementos finitos en la simulación, de este modo se limitó el número de operaciones matemáticas y computacionales a realizar.

La labor mencionada anteriormente fue posible gracias al comando “*Create*” ubicado en la sección Mesh del menú superior del programa, donde a través del mallado definido anteriormente, fueron establecidos automáticamente los límites del modelo como se muestra en la figura.

Sin embargo, hay que anotar que este proceso también se puede realizar de forma manual seleccionando los nodos o diferenciales donde se aplicaron estos límites; de este modo fueron colocadas las condiciones necesarias de frontera para simular el modelo correctamente.

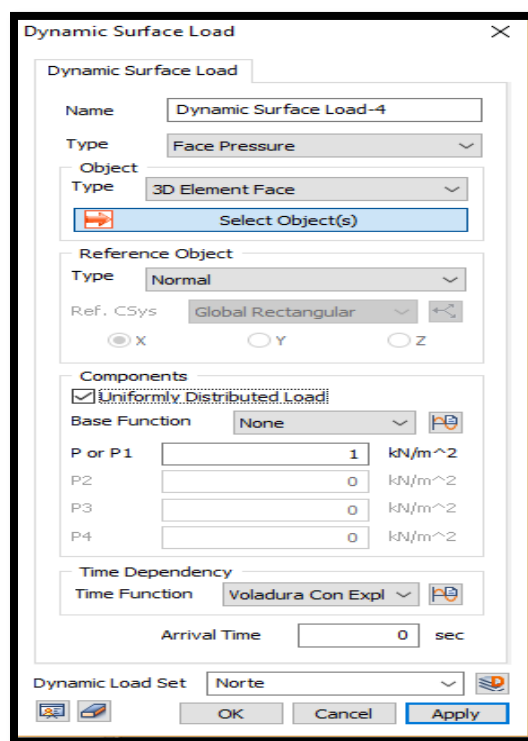


Asignación de condiciones de frontera a través del comando Create – Midas GTS NX. Elaboración propia

Antes de realizar los análisis de elementos finitos (FEA) al modelo 3D completo, se debe juntar la información de las voladuras que se crearon anteriormente con la información del mallado del sólido 3D en los sitios donde se hallan los agujeros donde se harían las voladuras, esta unión de información se realizó a través del comando “Dynamic Surface Load”.

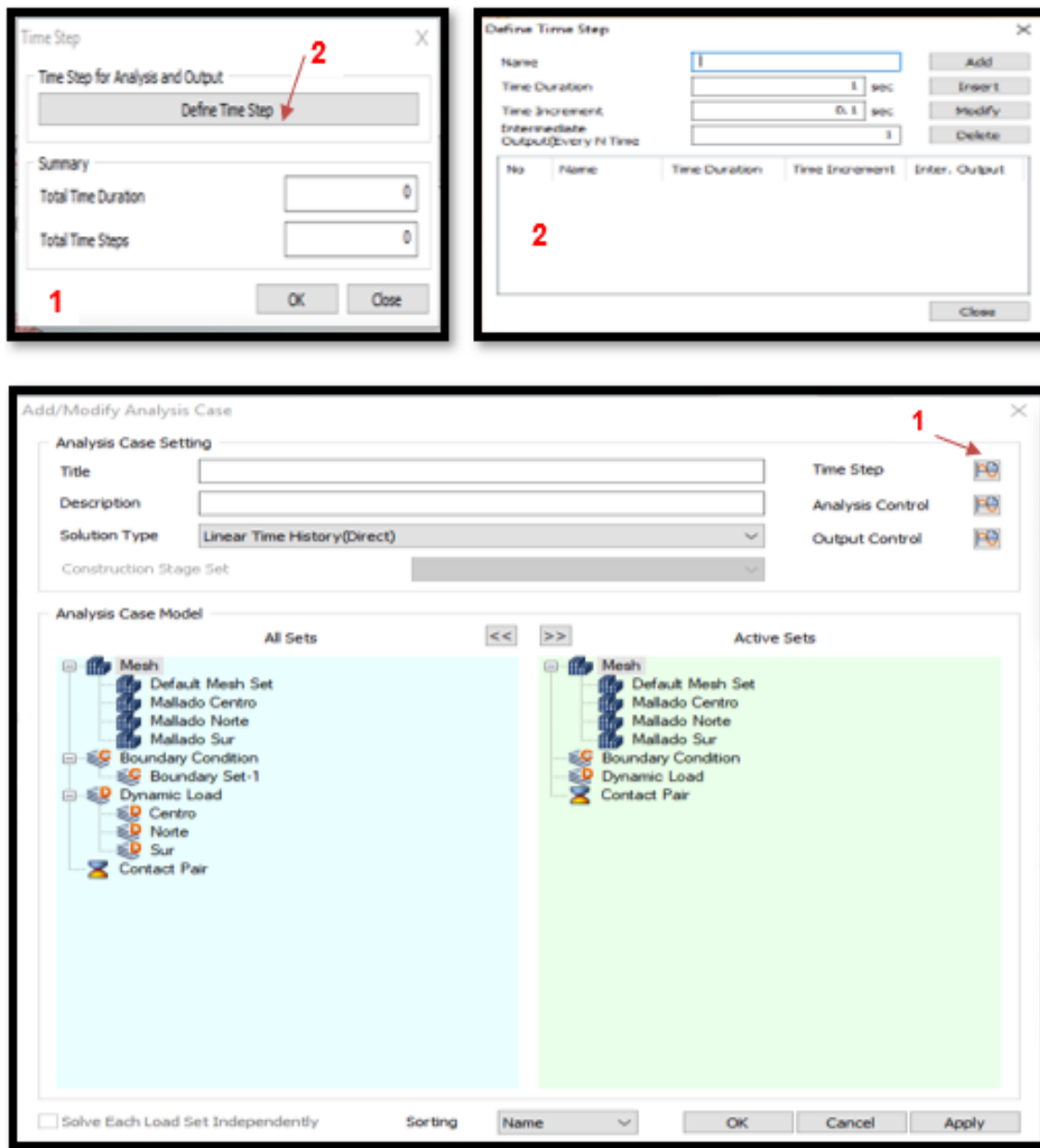
Este comando permite la toma de elementos finitos (nodos, elementos 2D y 3D) en el modelo asignando cargas uniformemente distribuidas, y el comportamiento temporal de la voladura obtenida del DGS, de modo que al realizar el análisis FEA este componente se comporte como la ejecución de la voladura en el sitio donde fueron depositadas las cargas.

Para este caso particular se seleccionaron todos los elementos finitos relacionados en cada uno de los agujeros en el modelo, de este modo se relacionaron en 3 superficies dinámicas (debido a que son 3 zonas, un agujero por cada una) con la misma dependencia de tiempo correspondiente al comportamiento de la voladura como se puede ver en la figura.



*Creación de superficies dinámicas a través del comando Dynamic Surface Load – Midas GTS NX.
Elaboración propia*

Apéndice G: Creación de los casos de análisis y ejecución de la simulación

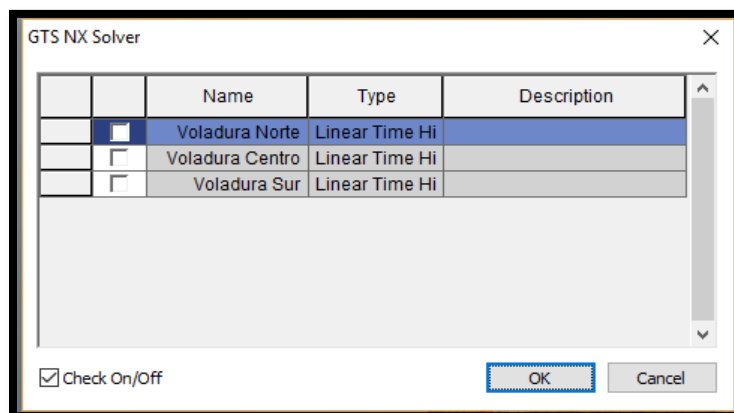


Al ser determinados todos los elementos relacionados con el modelo 3D y las voladuras, se procedió a crear los casos de análisis que, para este caso fue de tiempo – historia de forma lineal (un análisis de este tipo por cada zona), donde aplicando la

superficie dinámica correspondiente, las condiciones de frontera y los diferentes sets de mallado, fuera posible crearlo y ejecutarlo posteriormente.

Este proceso se llevó a cabo por medio del comando “Add / Modify Analysis Case”, donde con la información mencionada anteriormente, permite la configuración de los amortiguamientos (se emplean los amortiguamientos hallados por el acelerómetro), tiempos de ejecución y de captura de datos o tiempos intermedios (1.5 segundos y 0.001 segundos por muestra, equivalente a 1500 muestras en este caso) que deben ser definidos en las diferentes ventanas, en el orden en el que se muestran en la figura anterior.

Con los casos de análisis ya definidos, se procedió a ejecutar la simulación a través de comando “Solver” que el programa Midas GTS NX también contiene en su menú de análisis en la pestaña Perform, donde se pueden definir qué caso o casos serán evaluados bajo el análisis FEA en todos los aspectos (desplazamientos, velocidades, aceleraciones, esfuerzos entre planos, factor de seguridad, deformaciones, entre otros aspectos) por medio de listas de chequeo, como se puede apreciar en la interfaz de este comando en la siguiente figura .



Comando GTS NX Solver – Midas GTS NX. Elaboración propia

De esta interfaz, donde se halla ubicado el archivo en el elemento de computo, se crearon los respectivos archivos de los resultados de las diferentes operaciones matemáticas que se presentan en cada nodo, al igual que archivos en extensiones NFXP, OUT y MEC compatibles que varían de tamaño según sea el ancho del elemento finito y permitieron de forma visual poder apreciar los resultados y así realizar el respectivo análisis

Apéndice H: Hoja de Datos Acelerómetro Trimble Reftek 130-SM



▲ ACCELERÓGRAFO DE MOVIMIENTO FUERTE DE 24 BITS DE REF TEK

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Convertidor analógico/digital de 24 bits de tecnología punta

Amplio rango dinámico

Balance de fuerzas de bajo nivel de ruido

Telemetría y auto grabado simultáneos

Comunicación IP vía Ethernet y asincrónica Serie

Almacenamiento de datos fijo y extraíble

Baja potencia

APLICACIONES:

Libre grabación en campo

Monitoreo estructural

Monitoreo de presas

Construcción de arreglos

Redes telemétricas

Estudios de réplicas de terremoto



Modelo 130-SMHR
Modelo 130-SMA

Los productos de ingeniería sísmica y movimientos fuertes de REF TEK combinan el grabador sísmico de banda ancha de tercera generación (REF TEK 130S) con avanzados acelerómetros de balance de fuerzas de bajo nivel de ruido con una respuesta de frecuencia plana del DC a > 150 Hz.

Los acelerógrafos de movimientos fuertes 130-SMHR y 130-SMA proporcionan datos precisos y puntuales así como información de eventos sísmicos, incluyendo su efecto en edificios y estructuras, utilizando tecnologías y métodos de monitoreo modernos. Ambos modelos están hechos para el monitoreo continuo de terremotos y otros eventos sísmicos, y la grabación de temblores y movimientos fuertes del terreno en edificios y estructuras críticas.

Las funciones de comunicación avanzada del 130-SMHR y del 130-SMA incluyen comunicación TCP/IP vía Ethernet y serie asincrónica. Una LCD visualiza de forma continua información acerca de la condición y estado del sistema.

Ambos modelos tienen tres canales conectados a un acelerómetro triaxial interno. Cuando se adquiere una unidad de seis canales, los tres canales adicionales pueden ser conectados a un sensor externo.

Tanto el 130-SMHR como el 130-SMA:

- pueden tener un módem V.90 opcional para comunicación por líneas telefónicas normales;
- incluyen un cargador para la batería de ácido plomo;
- están alojados en una caja de aluminio anodizado con un solo punto de soporte y nivelación en tres puntos.

El tamaño de la caja del instrumento permite instalar una batería interna que proporcione alimentación de reserva durante más de 48 horas. Asimismo, puede utilizarse una batería externa.

El 130-SMA de bajo costo usa firmware de línea de comando específicamente diseñado para las aplicaciones de monitoreo estructural. El instrumento se programa y controla con la interfaz gráfica del usuario (GUI) de movimientos fuertes, la cual se ejecuta en múltiples plataformas. Este firmware permite controlar tres contactos de cierre de relé para la activación de la alarma externa y puede marcar automáticamente al módem opcional para la notificación remota de eventos y alarmas.

El acelerógrafo 130-SMHR completo con todas las prestaciones, suele ejecutar el firmware estándar REF TEK 130, pero también puede ejecutar el firmware de línea de comando. El firmware estándar ofrece más opciones para tasas de muestreo y activación que el firmware de línea de comando, sin embargo no incluye control de relé. El instrumento se programa y controla con el kit iFSC o con una computadora de escritorio que ejecute RTI. Estas interfaces permiten al usuario programar los parámetros de funcionamiento del instrumento y realizar funciones de diagnóstico.

El rendimiento del hardware de los instrumentos 130-SMHR y 130-SMA es similar, pero presenta dos notables diferencias:

- El oscilador del 130-SMHR es de mayor precisión y permite mantener un registro de tiempo más preciso.
- El acelerómetro del 130-SMHR tiene un rango de escala completa mayor que ± 4 g con un rango dinámico de 145 dB (a 2 Hz) mientras que el acelerómetro del 130-SMA tiene un rango de escala completa mayor que ± 4 g con un rango dinámico de 112 dB (a 1 Hz).

Especificaciones		Acelerógrafo completo, Modelo 130-SMHR	
Mecánicas:			
Tamaño:		•	23,5 cm de alto x 20,3 cm de ancho x 33,7 cm de profundidad
Peso:		•	4,8 kg, sin batería interna
Integridad del sellado:		•	IP67
Impacto:		•	Soporta caídas de un metro de altura en cualquiera de sus ejes
Temperatura de funcionamiento:		•	De -20°C a +70°C
Alimentación:			
Voltaje de entrada:		•	De 10 a 16 VDC
Potencia de funcionamiento:		•	2 W (3 canales @ 125 sps)
Picos de energía:		•	3 W (DAS y GPS activo, escribe a CF)
Cargador de baterías:		•	15 V, 800 mAmp (interna)
Batería:		•	12 VDC, ácido plomo sellada, 12 AmpH (opcional, interna)
Convertidor A/D:			
Tipo:		•	Modulación Δ - Σ , resolución de 24 bits
Canales:		•	3 o 6 canales
Impedancia de entrada:		•	Igualada al acelerómetro
Entrada de escala completa:		•	Igualada al acelerómetro
Peso del bit:		•	1,589 μ V
Nivel de ruido propio:		•	2 cuentas RMS @ 200 sps
Tasas de muestreo (seleccionables por el usuario):		•	1000, 500, 250, 200, 125, 100, 50, 40, 20, 10, 5, 1 sps
Rango dinámico:		•	>137 dB
Base de tiempo:			
Tipo:		•	Receptor/Reloj más un oscilador disciplinado
Precisión:		•	± 10 μ seg con enganche GPS y fijo 3D validado
Precisión sin GPS:		•	0,1 ppm entre 0 y 60°C; 0,2 ppm entre -20 y 0°C
Canales auxiliares:			
Entradas:		•	Batería, Temperatura, Batería de reserva
Calibración:			
Habilitada:		•	Comando del usuario
Tipo:		•	Incremento aplicado a retroalimentación
Comunicación:			
Ethernet:		•	10-BaseT: TCP/IP, UDP/IP, FTP, RTP
Serie:		•	RS-232 asincrónica: PPP, TCP/IP, UDP/IP, FTP, RTP
Módem:		•	N/A
Modo de grabación:			
Tipo de activación:		•	Continúa, Evento (STA/LTA), Externa, Nivel, Hora, Lista de horas, Cruzada, y Activación por Voto (0,0001 a 4g)
Medio:		•	Compact Flash, Ethernet
Formato:		•	Formato de grabación PASSCAL
Cierre del relé:		•	N/A
Capacidad de grabación:			
Batería de respaldo SRAM:		•	8 MB
Disco Flash:		•	8 GB o 16 GB
Homologación:		•	CE
Acelerómetro interno:			
Tipo:		•	Balance de fuerzas (interno)
Rango de escala completa:		•	> $\pm 4g$
Salida de escala completa:		•	$\pm 10V$, 20 VPP
Rango dinámico:		•	145 dB (DC a 2 Hz)
Sensibilidad:		•	2,5 V/g nominal (valor exacto en EEPROM)
Linealidad:		•	< 0,03% de escala completa
Sensibilidad cruzada:		•	< 0,001 g/g
Respuesta de frecuencia:		•	Respuesta de frecuencia plana del DC - > 150 Hz

Acelerógrafo, Modelo 130-SMA (Estándar)

- 23,5cm de alto x 20,3cm de ancho x 33,7cm de profundidad
- 4,8 kg, sin batería interna
- IP67
- Soporta caídas de un metro de altura en cualquiera de sus ejes
- De -20°C a +70°C

- De 10 a 16 VDC
- 2 W (3 canales @ 125 sps)
- 3 W (DAS y GPS activo, escribe a CF)
- 15 V, 800 mAmp (interna)
- 12 VDC, ácido plomo sellada, 12 AmpH (opcional, interna)

- Modulación $\Delta\Sigma$, resolución de 24 bits
- 3, 6 o 9 canales
- Igualada al acelerómetro
- Igualada al acelerómetro
- 1.589 μ V
- 2 cuentas RMS @ 200 sps
- 1000, 500, 250, 200, 125, 100, 50, 40, 20, 10, 5, 1 sps
- >137 dB

- Receptor/Reloj más un oscilador disciplinado
- ± 100 μ seg con enganche GPS y fijo 3D validado
- 2,5 ppm desde -20°C a 60°C

- Batería, Temperatura, Batería de reserva

- Comando del usuario
- Incremento aplicado a retroalimentación

- 10-BaseT: TCP/IP, UDP/IP, FTP, RTP
- RS-232 asincrónica: PPP, TCP/IP, UDP/IP, FTP, RTP
- N/A

- Continua, Evento (STA/LTA), Externa, Nivel, Hora, Lista de horas, cruzada, y activación por voto (0,0001 a 4g)
- Compact Flash, Ethernet
- Formato de grabación PASSCAL
- N/A

- 8 MB
- 8 GB o 16 GB

- CE

- Balance de fuerzas (interno)
- > $\pm 4g$
- $\pm 10V$, 20 VPP
- 112 dB @1 Hz
- 1,6 V/g nominal (valor exacto en EEPROM)
- < 0,02% de escala completa
- < 0,005 g/g
- Respuesta de frecuencia plana del DC - 500 Hz

Acelerógrafo, Modelo 130-SMA (Línea de comando)*

(* El hardware es idéntico: el firmware es diferente)

- 23,5cm de alto x 20,3cm de ancho x 33,7cm de profundidad
- 4,8 kg, sin batería interna
- IP 67
- Soporta caídas de un metro de altura en cualquiera de sus ejes
- De -20°C a +70°C

- De 10 a 16 VDC
- 2 W (DAS y GPS activo, escribe a CF)
- 3 W (DAS y GPS activo, escribe a CF)
- 15 V, 800 mAmp (interna)
- 12 VDC, ácido plomo sellada, 12 AmpH (opcional, interna)

- Modulación $\Delta\Sigma$, resolución de 24 bits
- 3, 6 o 9 canales
- Igualada al acelerómetro
- Igualada al acelerómetro
- 1.589 μ V
- 2 cuentas RMS @ 200 sps
- 200, 100, 50 sps
- >137 dB

- Receptor/Reloj más un oscilador disciplinado
- ± 100 μ seg con enganche GPS y fijo 3D validado
- 2,5 ppm desde -20°C a 60°C

- Batería, Temperatura, Batería de reserva

- Comando del usuario
- Incremento aplicado a retroalimentación

- 10-BaseT: TCP/IP, UDP/IP, FTP, RTP
- RS-232 asincrónica: 1K XMODEM, YMODEM
- V.90 (interno)

- Continua, Externa, Nivel y Activación por Voto (0,0001 a 4g)

- Compact Flash, Ethernet
- Formato de grabación PASSCAL
- 3 independently programmable relay closures

- 8 MB
- 8 GB o 16 GB

- CE

- Balance de fuerzas (interno MEMS)
- > $\pm 4g$
- $\pm 10V$, 20 VPP
- 112 dB @1 Hz
- 1,6 V/g nominal (valor exacto en EEPROM)
- < 0,02% de escala completa
- < 0,005 g/g
- Respuesta de frecuencia plana del DC - 500 Hz

Apéndice I: Código MATLAB para obtención de desplazamientos a partir de los datos arrojados por el acelerómetro REFTEK 130-SM

```
%Procesamiento de vibraciones
clc, clear, close all

fsRef=100; %Frecuencia de adquisisci3n Reftek

% Carga de archivos
d15_00=load('15_00.mat');
d15_10=load('15_10.mat');
d15_20=load('15_20.mat');
d15_30=load('15_30.mat');
d15_40=load('15_40.mat');
d15_50=load('15_50.mat');
d16_00=load('16_00.mat');
d16_10=load('16_10.mat');
d16_20=load('16_20.mat');
d16_30=load('16_30.mat');
d16_40=load('16_40.mat');
d16_50=load('16_50.mat');
d17_00=load('17_00.mat');
d17_10=load('17_10.mat');
d17_20=load('17_20.mat');
d17_30=load('17_30.mat');
d17_40=load('17_40.mat');
d17_50=load('17_50.mat');

acel(:, :, 1)=d15_00.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 2)=d15_10.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 3)=d15_20.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 4)=d15_30.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 5)=d15_40.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 6)=d15_50.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 7)=d16_00.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 8)=d16_10.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 9)=d16_20.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 10)=d16_30.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 11)=d16_40.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 12)=d16_50.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 13)=d17_00.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 14)=d17_10.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 15)=d17_20.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 16)=d17_30.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 17)=d17_40.A.acel(:, 1:3);
acel(:, :, 18)=d17_50.A.acel(:, 1:3);
%%
t=0:1/fsRef:(length(d15_00.A.acel(:, 1))-1)*(1/fsRef);

%Filtro Butterworth para limpieza
```

```

Fc=20;
[B1,A1]=butter(8,Fc/(fsRef/2),'low');
acel = filtfilt(B1,A1,acel);

%% Registro 13 / 17_00 horas
[P13,f13]=cpsd(acel(:, :, 13),acel(:, :, 13), [], [], [], fsRef);
semilogy(f13,P13)
xlabel('frecuencia [Hz]')
ylabel('Energia/Frecuencia [dB/Hz]')
% xlim([1 20])
title('17:00 / Maquinas encendidas')
%% Registro 10 / 16_30 horas
[P10,f10]=cpsd(acel(:, :, 10),acel(:, :, 10), [], [], [], fsRef);
semilogy(f10,P10)
xlabel('frecuencia [Hz]')
ylabel('Energia/Frecuencia [dB/Hz]')
% xlim([1 20])
title('16:30 / Voladura')
%% Registro 9 / 16_20 horas
[P9,f9]=cpsd(acel(:, :, 9),acel(:, :, 9), [], [], [], fsRef);
semilogy(f9,P9)
xlabel('frecuencia [Hz]')
ylabel('Energia/Frecuencia [dB/Hz]')
xlim([1 20])
title('16:20 / Sin Voladura')
%%
subplot(1,3,1)
semilogy(f9,P9)
title('16:20 / Sin Voladura')
xlim([1 25])
xlabel('frecuencia [Hz]')
ylabel('Energia/Frecuencia [dB/Hz]')
subplot(1,3,2)
semilogy(f10,P10)
title('16:30 / Voladura')
xlim([1 25])
xlabel('frecuencia [Hz]')
ylabel('Energia/Frecuencia [dB/Hz]')
subplot(1,3,3)
semilogy(f13,P13)
title('17:00 / Maquinas encendidas')
xlim([1 25])
xlabel('frecuencia [Hz]')
ylabel('Energia/Frecuencia [dB/Hz]')
%%
subplot(1,3,1)
plot(f10,P10(:,1)./P9(:,1))
title('Con Voladura/Sin Voladura - Vertical')
hold on
line([0 25],[8.4 8.4],'color','r')
hold off
ylim([0 70])

```

```

% xlim([1 25])
xlabel('frecuencia [Hz]')
ylabel('Amplitud')
% xlim([1 25])
subplot(1,3,2)
plot(f10,P10(:,2)./P9(:,2))
hold on
line([0 25],[16.4 16.4],'color','r')
hold off
% xlim([1 25])
title('Con Voladura/Sin Voladura - Horizontal1')
% xlim([1 25])
xlabel('frecuencia [Hz]')
ylabel('Amplitud')
subplot(1,3,3)
plot(f10,P10(:,3)./P9(:,3))
hold on
line([0 25],[35.85 35.85],'color','r')
hold off
title('Con Voladura/Sin Voladura - Horizontal2')
% xlim([1 25])
xlabel('frecuencia [Hz]')
ylabel('Amplitud')

%% Integreción Numerica a través de método trapezoidal
velot=cumtrapz(t,(cumtrapz(t,acel(:, :,10)))));
plot(t,velot(:,end-2));
legend('Eje Z','Horizontal1','Horizontal2');

```

Apéndice J: Factores de Seguridad de las 3 zonas de la Cantera Cachibí (Mapa de estabilidad)

