



Densificación de suelos granulares con el uso de explosivos.

Trabajo Final investigativo de grado.

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS.
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INFRAESTRUCTURA VIAL**

DENSIFICACION DE SUELOS GRANULARES CON EXPLOSIVOS

ING.HUGO YEPES SUICA

hugoyepes_1@hotmail.com

ING. HENRY GIOVANNI MARTÍNEZ MENDOZA.

giovanni-04@hotmail.com

INGENIEROS CIVILES.

**TRABAJO FINAL DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE MAGISTER EN
INFRAESTRUCTURA VIAL.**

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO:

INGENIERO DIEGO A. GANTIVA ARIAS IC.--M.SC.

BOGOTÁ D.C. (CUNDINAMARCA), 06 DE OCTUBRE DE 2014



INDICE

GLOSARIO DE TERMINOS.....	13
RESUMEN.....	15
INTRODUCCIÓN.....	17
CAPITULO I.....	22
TEORÍA GENERAL DE LA COMPACTACIÓN.....	22
METODOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS.....	22
1. INTRODUCCIÓN.....	22
1.1. MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS.¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
1.2. MEZCLAS.....¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
1.2.1. MEZCLAS DE SUELOS.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.2. MEZCLAS CON PRODUCTOS QUÍMICOS.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.3. MEZCLAS CON CAL.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.4. MEZCLA CON CEMENTO PORTLAND.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.5. MEZCLAS CON PRODUCTOS ASFÁLTICOS.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.6. PRECARGAS.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.7. DENSIFICACIÓN POR MEDIO DE EXPLOSIVOS.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.8. MEJORAMIENTO POR VIBRADO.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.9. VIBROCOMPACTACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.10. VIBROFLOTACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.11. VIBROSUSTITUCIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.12. VIBROHINCADO.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.13. INYECCIÓN DE COMPACTACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.14. INCLUSIONES RÍGIDAS.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.15. JET GROUTING.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.16. COMPACTACIÓN DINÁMICA.....	¡Error! Marcador no definido.
1.3. CONCLUSIONES DEL CAPITULO.¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
CAPITULO II.....	48
CLASIFICACION DE SUELOS.....	48
INTRODUCCION.....	48
2.1. ESTRATIGRAFIA:.....	50
2.2. DEPÓSITOS DE TIPO ALUVIAL Y LAGUNAR.....	52
2.2.1. Formación Tiltá (N1t).....	52
2.2.2. Formación río Tunjuelito (Q1tu).....	53
2.2.3. Litología.....	53
2.2.4. Posición estratigráfica y edad.....	53
2.2.5. Formación Chía (Q2ch).....	54
2.2.6. Litología.....	54



2.2.7.	Posición estratigráfica y edad.....	54
2.2.8.	Sinclinal de Checua.....	54
CAPITULO III.....		57
GENERALIDADES Y USO DE EXPLOSIVOS		57
3. HISTORIA DE LOS EXPLOSIVOS		57
3.1.	GENERALIDADES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.2.	DEFINICIÓN DE EXPLOSIVO.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.3.	DEFINICIÓN DE DETONACIÓN ..	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.4.	DEFINICIÓN DE DEFLAGRACIÓN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.5.	DEFINICIÓN DE COMBUSTIÓN ..	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.6.	CLASES DE EXPLOSIONES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.7.	MECÁNICA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.8.	QUÍMICA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.9.	NUCLEAR.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.10.	EFFECTOS EN LA EXPLOSIÓN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.11.	SOBREPRESIÓN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.12.	TÉRMICO (CALOR DE EXPLOSIÓN)	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.13.	FRAGMENTACIÓN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.14.	EFFECTO DE CONCENTRACIÓN.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.15.	ONDA DE CHOQUE.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.16.	ONDA SONORA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.17.	PRESIÓN IMPELENTE	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.18.	PRESIÓN DEPRESIVA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.19.	PRESIÓN INCIDENTE	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.20.	PRESIÓN DINÁMICA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.21.	PRESIÓN REFLEJADA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.22.	EFFECTOS ATMOSFÉRICOS Y TERRESTRES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.23.	EFFECTOS BIOLÓGICOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.24.	NATURALEZA DE LAS EXPLOSIONES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.



- 3.25. ONDAS INTERNAS O DE CUERPO **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.26. ONDAS SUPERFICIALES **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.27. ONDA AÉREA **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.28. PROCESO DE DETONACIÓN DE UN EXPLOSIVO **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.29. ENERGÍA LIBERADA DURANTE LA REACCIÓN DE UN EXPLOSIVO **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.30. ENERGÍA DE CHOQUE. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.31. ENERGÍA GASEOSA. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.32. IMPORTANCIA DE LOS EXPLOSIVOS **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.33. APLICACIONES COMERCIALES **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.34. MINERÍA **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.35. INGENIERÍA **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.36. DEMOLICIONES **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.37. INDUSTRIA **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.38. MEDICINA **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.39. AVANCE DE LA CIENCIA **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.40. APLICACIONES BÉLICAS. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.41. CLASIFICACIÓN Y TIPO DE EXPLOSIVOS **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.42. DE ACUERDO A SU VELOCIDAD DE DETONACIÓN **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.42.1. EXPLOSIVOS DEFLAGRANTES, LENTOS O PROGRESIVOS. **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.42.2. EXPLOSIVOS DETONANTES O ROMPIENTES **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.42.3. DE ACUERDO A SU COMPOSICIÓN QUÍMICA **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.42.4. SEGÚN SU USO: **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.43. TIPOS DE EXPLOSIVOS **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 3.43.1. RDX (CICLONITA) **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.43.2. TRINITROTOLUENO (TNT) **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.43.3. PENT **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.43.4. HMX **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.43.5. TETRIL **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.43.6. TETRITOL **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.43.7. NITROGLICERINA **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.43.8. NITRATO DE AMONIO **¡Error! Marcador no definido.**
- 3.43.9. PÓLVORA NEGRA **¡Error! Marcador no definido.**



3.43.10. COMPUESTO C-4	¡Error! Marcador no definido.
3.43.11. PENTOLITA	¡Error! Marcador no definido.
3.43.12. DINAMITAS.....	¡Error! Marcador no definido.
3.44. METODO DE DEMOLICION CON CEMENTOS EXPANSIVOS. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
3.44.1. Cementos con clinker portland.....	¡Error! Marcador no definido.
3.44.2. El cex broke o cemento broke.....	¡Error! Marcador no definido.
3.44.3. El CBA expansivo	¡Error! Marcador no definido.
3.44.4. ACCESORIOS DE VOLADURA.....	¡Error! Marcador no definido.
3.45. DETONADORES. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
3.45.1. Detonadores eléctricos	¡Error! Marcador no definido.
3.45.2. De acuerdo a las características eléctricas	¡Error! Marcador no definido.
3.45.3. De acuerdo a las características eléctricas los detonadores se clasifican en: ...	¡Error! Marcador no definido.
3.46. PROPIEDADES GENERALES DE LOS EXPLOSIVOS ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
3.46.1. Potencia relativa.....	¡Error! Marcador no definido.
3.46.2. Brisancia o poder rompedor.....	¡Error! Marcador no definido.
3.46.3. Densidad	¡Error! Marcador no definido.
3.46.4. Velocidad de detonación.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPITULO IV.....147	
DENSIFICACION DE SUELOS CON EL USO DE EXPLOSIVOS.147	
4. INTRODUCCION.....147	
4.1. LAS APLICACIONES DE COMPACTACIÓN EXPLOSIVO PARA LA REDUCCIÓN DE RELAVES DE VOLUMEN¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
4.1.1. RESUMEN:	¡Error! Marcador no definido.
4.2. COMPORTAMIENTO DEL SUELO DURANTE LA COMPACTACION CON EXPLOSIVOS..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
4.2.1. TEORIA.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.2. ANALISIS DIMENSIONAL	¡Error! Marcador no definido.
4.3. CONSIDERACIONES PRÁCTICAS¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
4.3.1. Control de la vibración:	¡Error! Marcador no definido.
4.4. TRABAJO DENSIFICACIÓN CON EXPLOSIVOS¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
4.4.1. Ensayos de campo – densificación con explosivos.....	¡Error! Marcador no definido.
4.4.2. Introducción.....	¡Error! Marcador no definido.
4.4.3. El sitio de investigación	¡Error! Marcador no definido.
4.4.4. Selección del sitio	¡Error! Marcador no definido.
4.4.5. El perfil del suelo.....	¡Error! Marcador no definido.
4.4.6. Ensayo del cono de penetración.	¡Error! Marcador no definido.
4.4.7. Ensayo del dilatómetro.....	¡Error! Marcador no definido.



- 4.4.8. Instrumentación y recolección de datos ¡Error! Marcador no definido.
- 4.4.9. Presión de poros ¡Error! Marcador no definido.
- 4.4.10. Aceleración. ¡Error! Marcador no definido.
- 4.4.11. Asentamiento. ¡Error! Marcador no definido.
- 4.4.12. Diseño de explosivo y ejecución. ¡Error! Marcador no definido.
- 4.4.13. Diseño experimental. ¡Error! Marcador no definido.
- 4.5. POST-EXPLOSIVA TESTING ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.6. PLAN DE PRUEBAS. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.7. PORE DISIPACIÓN DE PRESIÓN ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.8. SOLUCIÓN ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.9. CONE PENETRATION TESTING. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.10. VISIÓN CONO DE PENETRACIÓN ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.11. DISIPACIÓN CONO DE PENETRACIÓN ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.12. SHEAR WAVE VELOCITY. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.13. DILATÓMETRO TESTING ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.14. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE ENVEJECIMIENTO ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.15. ANÁLISIS ESTADÍSTICO BÁSICO ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.16. VARIOGRAMA SELECCIÓN ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.17. ANISOTROPÍA ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.18. BLOQUE KRIGING Y PRUEBAS DE HIPÓTESIS ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.19. COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA CÍCLICA RATIO DE VARIOS ENSAYOS IN SITU ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.20. DETERMINACIÓN DE LA CRR... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.21. COMPARACIÓN DE ANTES DE LA VOLADURA CRR DE DIFERENTES ENSAYOS IN SITU ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.22. COMPARACIÓN DE UNA SEMANA CRR DE DIFERENTES ENSAYOS IN SITU ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.23. COMPARACIÓN DE UN MES Y POSTERIORMENTE CRR DE DIFERENTES ENSAYOS IN SITU ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- 4.24. RESUMEN DE LOS RESULTADOS ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.



4.25. CONCLUSIÓN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.26. USO DE EQUIPOS PARA EL USO DE EXPLOSIVOS: APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PERFORACIÓN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.26.1. MÉTODOS ROTOPERCUTIVOS	¡Error! Marcador no definido.
4.27. PERFORACIÓN CON MARTILLO EN CABEZA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.27.1. Perforadoras Hidráulicas	¡Error! Marcador no definido.
4.28. PERFORACIÓN CON MARTILLO EN EL FONDO DEL BARRENO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CONCLUSIONES DEL CAPITULO	196
CAPITULO V	197
DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO INVESTIGATIVO DE GRADO DENSIFICACION DE MATERIALES GRANULARES CON EL USO DE EXPLOSIVOS.	197
INTRODUCCION	197
4.29. CRONOGRAMA DENSIFICACIÓN DE SUELOS GRANULARES CON EL USO DE EXPLOSIVOS.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.30. LOCALIZACIÓN LUGAR DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS:	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.31. TIPOS DE EXPLOSIVOS UTILIZADOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.32. ANFO. FIGURA 116: EXPLOSIVO ANFO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.33. CORDÓN DETONANTE	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.34. MECHA DE SEGURIDAD.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.35. DETONADOR INELECTRICO HANDIDET.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.36. REGISTRO FOTOGRAFICO DE LA CANTERA BUENAVISTA UBICADA EN EL KM VIA TUNJA EN LAS AFUERAS DE LA SABANA DE BOGOTA.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CAPITULO VI.....	232
RESULTADOS.....	232
INTRODUCCION	232



ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....	239
CAPITULO VII.	239
7.1 LOS RESULTADOS GENERADOS LUEGO DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO PRELIMINARES. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
8. BIBLIOGRAFIA.....	248



TABLA DE FIGURAS.

Figura 1. Mezcla de suelos. (Vía rural 2012).....	26
Figura 2. Mezcla con químicos (vía rural 2012).....	27
Figura 3. Mezclas con cal. (anfagal 2002).....	28
Figura 4. Mezclas con cemento (civilgeeks 2011).....	30
Figura 5. Mezclas con emulsión (imc 2005).....	31
Figura 6. Sistema de precarga (ucm 1990).....	33
Figura 7. Densificación con explosivos (imc 2005).....	34
Figura 8. Mejoramiento por vibración (work 2004).....	35
Figura 9. Equipo para vibro compactación. (Smms 2009).....	36
Figura 10. equipo para vibroflotación smms 2009.....	37
Figura 11. Equipo para vibro sustitución smms 2009.....	39
Figura 12. Equipo de vibrohincado smms 2009.....	40
Figura 13. Equipo para inyección smms 2009.....	42
Figura 14. Equipo para inclusiones rígidas 2009.....	43
Figura 15. jet grouting (keller grundbau gmbh 2010).....	44
Figura 16. Compactación dinámica (vyepe 2012).....	46
Figura 17. Fuentes de información según planchas topográficas del IGAC.....	49
Figura 18. Localización de la sabana de Bogotá y vías principales.....	50
Figura 19. Sinclinal de Checua en la localidad de Cucunubá.....	55
Figura 20. Historia de los explosivos.....	57
Figura 21. Sustancia explosiva anfo.....	60
Figura 22. Funcionamiento de los explosivos.....	62
Figura 23. Efecto de sobrepresión.....	65



Figura 24. Destrucción por efectos de la explosión.....	71
Figura 25. Uso de explosivos en minería.....	78
Figura 26. Pólvora negra explosivo deflagrante.....	82
Figura 27. PENT explosivo rompiente.....	83
Figura 28. Explosivo militar Carga de demolición M 118.....	85
Figura 29. Explosivo de Uso comercial PENTOFEX.....	86
Figura 30. Explosivo TNT.....	89
Figura 31. Explosivo PENT.....	90
Figura 32. - Gránulos Nitrato de Amonio.....	92
Figura 33. Pólvora Negra.....	94
Figura 34. Composición C-4.....	95
Figura 35. Dinamitas Comerciales.....	97
Figura 36. Dinamitas de Nitroglicerina.....	99
Figura 37. Indugel Plus.....	103
Figura 38. Explosivos Sísmicos.....	105
Figura 39. Explosivo Sismigel.....	107
Figura 40. Anfo.....	109
Figura 41. Indugel AV 800.....	112
Figura 42. Cordón Detonante.....	114
Figura 43. Cordón Detonante Militar.....	116
Figura 44. Mecha Lenta.....	117
Figura 45. Mecha Rápida.....	119
Figura 46. Micro Retardos.....	119
Figura 47. Conectores de Superficie.....	121
Figura 48. Conector.....	123
FIGURA 49. DETONADOR ELÉCTRICO.....	125
Figura 50. Cápsula eléctrica M6.....	130



Figura 51. Detonador de Nonel.	132
Figura 52. Uso de explosivos.	147
Figura 53. Uso de explosivos en lugares aislados.	148
Figura 54. Uso de explosivos.	149
Figura 55. Pruebas de campo para calibración.	153
Figura 56. Pruebas de campo para calibración.	156
Figura 57. Fotografía aérea de la arena y la grava de cantera Mulzer cascajo, Inc. en Griffin, IN (foto cortesía de Mulzer cascajo, Inc.).	158
Figura 58. Característica Paleo-licuefacción en un corte vertical a lo largo de la orilla del lago en el sitio de campo Griffin (foto cortesía de Russell verde). ...	158
Figura 59. Resultados de CPT-9 y CPT-11. El área de la explosión fue entre estos lugares CPT.	159
Figura 60. Suelo de estratificación en el lugar de la explosión.	160
Figura 61. Curvas de distribución de tamaño de grano de la arena suelta y capas de arena grava sueltos en Griffin, IN.	161
Figura 62. Esquema del cono utilizado en la prueba de penetración de cono.	162
Figura 63. Prueba sísmica de penetración de cono (adaptado de Lunne et al., 1997).	162
Figura 64. Disposición de pre-explosión en ensayos in situ.	163
Figura 65. Intervalo de los resultados de CPT pre-hornos.	164
Figura 66. Pre-blast velocidad de onda cortante de SCPT-19.	164
Figura 67. Hoja Dilotometer (foto cortesía de Romano Hryciw).	166
Figura 68. Pre-BLAST resultados DMT: (a) KD, el índice de estrés horizontal, (b) ED, el módulo de dilatómetro, y (c) Identificación, el índice de material.	167
Figura 69. Transductor Sensotec presión de poro con el cono de nylon.	169
Figura 70. Aceleración máxima y la frecuencia máxima de las vibraciones hornos como una función de la raíz de escalado distancia cubo (adaptado de Hryciw, 1986).	170



Figura 71. Establecer para el experimento instrumento piscina (foto cortesía de Russell verde).	171
Figura 72.. Localización de los puntos de la encuesta. Puntos de la encuesta se muestran en rojo se repitieron midieron tras la explosión.	172
Figura 73. Sondex equipo del tubo de liquidación (de http://www.slopeindicator.com/instruments/ext-sondex.html).	173
Figura 74. Liquidación tras la explosión.	184
Figura 75. Solución que se produce entre una semana y un mes después de la explosión.	185
Figura 76. Liquidación total después de la explosión.	185
Figura 77. Grietas superficiales observados después DENSIFICACIÓN EXPLOSIVO.....	186
Figura 78. Resultados de TTC pre-hornos de 10 "desde el punto de explosión cercana.	187
Figura 79. CPT a cabo dentro de una semana de la explosión 10 "desde el punto de explosión cercana trazada por fecha realizado.	188
Figura 80. Los resultados de las pruebas VISCPPT que muestra las áreas con evidencia visual de licuefacción (adaptado de Jung, 2010).	191
Figura 81. (a) la velocidad de onda de cizalla 2,5 meses después de la explosión y antes. (b) velocidad de la onda de cizalla 2,5 meses después de la explosión y posterior.....	192
Figura 82.Perforadoras con martillo en cabeza.....	193
Figura 83. Perforadoras neumaticas.	194
Figura 84.Perforadoras Hidráulicas.....	195
Figura 85.Perforación con martillo en el fondo del barreno.....	196
Figura 86. Localización Cantera del proyecto - Sabana de Bogotá y vías principales.	197
Figura 87. Cantera Buenavista Km 27 Vía Tunja	198
Figura 88.Macizo rocoso presente en la cantera con estratificación y diaclasamiento continuo.....	200



Figura 89. Macizo rocoso presente en la cantera con estratificación y diaclasamiento continuo.....	200
Figura 90. Implementación de Maquinaria en este caso retroexcavadoras para la elaboración de los cortes para el ensayo piloto en la cantera.	201
Figura 91. Movimiento de tierra para la preparación del sitio y la efectuación del ensayo piloto con las detonaciones.....	201
Figura 92. Explotación de materiales pétreos con el uso de explosivos	202
Figura 93. Localización del sitio del ensayo de los apiques y el ensayo piloto.....	202
Figura 94. Preparación del terreno para la conformación de los terraplenes que soporten la onda de choque producida por las voladuras.	203
Figura 95. Material granular después de la explotación con maquinaria.....	203
Figura 96. Retroexcavadora 220, equipo utilizado para la realización del corte y los apiques.	204
Figura 97. Materiales sobrantes de la explotación por medio de maquinaria.	204
Figura 98. Terminación zona para construcción del terraplén.....	205
Figura 99. Esquema Tramo de prueba.....	206
Figura 100. Banco donde se efectuarán las detonaciones en la cantera.	207
Figura 101. Acopio de material granular para construcción de carreteras.	207
Figura 102. Diferentes acopios de material para base y subbase granular.....	208
Figura 103. Localización densidades en el terraplén.....	209
Figura 104. Densidades del terraplén conformado.....	210
Figura 105. Toma Densidades.	211
Figura 106. Pruebas de carga de explosivos.	212



INDICE DE TABLAS

- Tabla 1. Métodos de mejoramiento de suelos... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3. Efectos biológicos con la presión explosiva. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4. Códigos de venta sismigel..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 5. Empaques para explosivo anfo..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 6. Empaques para explosivo alanfo..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 7. Empaques para explosivo indugel av 800 **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 8. Potencia explosiva: Equivale a un detonador No. 6 **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 9. Multiplicador pentofex..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 10. Características técnicas para conector para mecha de combustión externa. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 2. Resumen de casos Historicos. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 11. Cronograma de Estructuración Densificación de Suelos Granulares con el Uso de Explosivos. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 12. Cronograma de Estructuración Densificación de Suelos Granulares con el Uso de Explosivos. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 13. Cronograma de Estructuración Densificación de Suelos Granulares con el Uso de Explosivos. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 14: Características Cordones detonantes. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 15. Materiales explosivos solicitados para las voladuras del trabajo investigativo densificación de suelos granulares con el uso de explosivos. ...232
- Tabla 16. Análisis Granulométrico del suelo granular en estudio. **¡Error! Marcador no definido.**



GLOSARIO DE TERMINOS.

TERMINO

SIGNIFICADO

Termino 1. Explosión:

Un explosivo es un compuesto químico o mezcla de componentes que, cuando es calentado, impactado, sometido a fricción o a choque, produce una rápida reacción exotérmica liberando una gran cantidad de gas y produciendo altas temperaturas y presiones en un breve instante de tiempo.

Una explosión es una liberación súbita de gas a alta presión en el ambiente. Súbita porque la liberación debe ser lo suficientemente rápida de forma que la energía contenida en el gas se disipe mediante una onda de choque. A alta presión porque significa que en el instante de la liberación de la presión del gas es superior a la de la atmósfera circundante.

Termino 2. Voladura:

voladura (llamada además tronadura en algunos países de *América del Sur*), es la acción de fracturar o fragmentar la *roca*, el *suelo* duro, el hormigón o de desprender algún elemento metálico, mediante el empleo de *explosivos*. Las mismas se realizan para lograr un objetivo predeterminado, pueden ser controladas, o no, puede ser a cielo abierto, en galerías, tunces o debajo del agua



TERMINO

SIGNIFICADO

Termino 3. Densificación:

La densificación es un proceso lento y gradual de reducción del índice de vacíos de un suelo por expulsión del fluido intersticial y transferencia de la presión del fluido (agua) para el esqueleto sólido, debido a las cargas aplicadas o al peso propio de las capas suprayacentes

Termino 4. Compactación:

La compactación con explosivo consiste en colocar (con cubierta) los cargos únicos o múltiples en un pozo perforado más de la profundidad del suelo para densificar. Varios cargos son despedidos de forma secuencial, con retrasos seleccionados para minimizar las vibraciones fuera del sitio y también para promover la carga cíclica del subsuelo. Adentro, el proceso se repite un número de veces para causar progresiva compactación del suelo. Presiones intersticiales generadas en suelos saturados después de cada secuencia de la explosión pueden disiparse antes de nuevas explosiones se llevan a cabo.

Termino 5. Licuación de suelos:

Durante los terremotos el movimiento del terreno puede causar una pérdida de la firmeza o rigidez del suelo que da como resultados el desplome de edificaciones, deslizamientos de tierra, daños en las tuberías, entre otros. El proceso que conduce a esta pérdida de firmeza o rigidez es conocido como licuación del suelo. Este fenómeno está principalmente, más no exclusivamente, asociado con suelos saturados poco cohesivos. El término licuación, incluye entonces todos los fenómenos donde se dan excesivas deformaciones o movimientos como resultado de transitorias o repetidas perturbaciones de suelos saturados poco cohesivos.



AGRADECIMIENTOS.

- A dios quien guio nuestro camino para realizar de manera precisa y con la mayor responsabilidad nuestro trabajo investigativo de grado.
- A nuestras familias quienes nos apoyaron incondicionalmente durante todo el tiempo de la realización del trabajo de grado.
- A La escuela de ingenieros militares, al centro nacional de explosivos y Minas, al Grupo Marte del ejército nacional, y al apoyo de los soldados de nuestro ejército de Colombia.
- A los que nos apoyaron con el lugar de ejecución del proyecto la cantera sector yerba buena km 27 via caro, por lo cual nombramos a: Eneziel sanchez y Mery pinzon.
- A nuestros profesores de la Maestría de Infraestructura vial.
- A nuestro director de trabajo investigativo de grado el (coronel) ingeniero Diego A. Gantiva Arias IC.--M.SC, quien acepto dirigirnos y asesóranos, en el presente trabajo, y que con su experiencia y dinamismo nos guio para la realización de este gran sueño que creemos beneficie al desarrollo de la infraestructura vial del país.



RESUMEN.

Este Trabajo consiste en el uso de explosivos para compactar (3) tipos de suelos granulares, que conforman un terraplén que mediante la utilización de los explosivos indugel y anfo se pretende determinar el porcentaje de compactación de cada uno de estos 3 suelos granulares, variando la profundidad de voladura y cantidad de carga aplicada en cada barreno, después de realizar las 5 pruebas y el ensayo piloto, (Y de esta manera estabilizarlo) se limita a los suelos granulares con menos del 20% de limos y menos del 5% de arcillas. Se utilizarán cargas de explosivos relativamente pequeñas con espaciamientos entre 3 y 7.5 metros y con explosiones repetitivas. El sistema de funcionamiento consiste en producir la licuación de los suelos en un volumen semiesférico de éstos, alrededor de cada punto de explosión y de este modo, generar

Este trabajo se hizo con ayuda y apoyo de personal del ejército, La escuela de ingenieros militares, el centro nacional de explosivos y Minas, Grupo Marte del ejército nacional, y apoyo de los soldados de nuestro ejército de Colombia.

Se tomarán mediciones de densidad del suelo, antes, durante y después de las pruebas realizadas,



INTRODUCCIÓN

La historia de los explosivos en la construcción de vías en Colombia da evidencia de que no se ha inspeccionado al detalle la mejora que puede traer estos materiales explosivos al utilizarse en la compactación de suelos granulares, por lo cual mediante la realización de estas pruebas y el ensayo piloto, se cuantificaran y analizaran los resultados de cada una de las estas, antes, durante y después de cada voladura, tomando las densidades del suelo, y de esta manera mediante ensayos de laboratorio medir su nivel final de compactación para cada uno de los suelos que conforman el terraplén.

1. **EN EL PRIMER CAPÍTULO SE ESTUDIA LA TEORÍA GENERAL DE LA COMPACTACIÓN** donde se describen cada uno de los métodos existentes para compactar un suelo, con los cuales se pretenden mejorar las características de comportamiento de los materiales pétreos que constituyen la sección estructural de las carreteras, los ferrocarriles o las aeropistas. Los métodos de mejoramiento, guardan en general un estado de conocimiento y dominio tal que solo se pueden recomendar sobre la base de procedimientos de ensayo y error. La decisión de mejorar un suelo no es fácil de tomar; los parámetros económicos y técnicos que deben estudiarse son diversos, no solo se debe analizar la factibilidad constructiva, sino también la económica, es decir los insumos, costos, equipos y tiempos de ejecución.
2. **LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS** está definida para mostrar las diferentes formaciones alrededor de la sabana de Bogotá ya que uno de los parámetros principales en la construcción de estructuras es el conocimiento del suelo de fundación, en particular sus propiedades y características para prevenir y anticiparse a futuras fallas por cambios de esfuerzos que pueden provocar las construcciones. El suelo se debe aprovechar al máximo con sus propiedades mecánicas a favor de la economía del proyecto o por el contrario utilizar métodos de mejoramiento, En el presente trabajo Investigativo se estudiará uno de los métodos de mejoramiento masivo de suelos como lo es la densificación de suelos con el uso de explosivos.



3. LAS GENERALIDADES Y USOS DE LOS EXPLOSIVOS

El uso de los explosivos en Colombia es limitado debido al entorno bélico en el cual realizan uso de estos materiales.

4. **LA DENSIFICACIÓN DE SUELOS CON EL USO DE EXPLOSIVOS**, Este método busca lograr una mejora de las partículas del suelo mediante un incremento relativamente uniforme y repentino de la presión de aire, generado por explosivos y transmitirlo a través de las fases fluida y sólida del suelo, la voladura debe superar la energía mínima que se requiere para romper el equilibrio en la estructura del suelo, pero no debe “volar” el suelo. Para que el uso de esta técnica sea adecuado, debe tomarse en cuenta el explosivo, (en las pruebas se utilizaron por costos y adquisición solo dos explosivos: indugel y anfo) el suelo por densificar, y la estratigrafía general del sitio. Es conveniente utilizar varias voladuras consecutivas, en vez de una sola explosión.



5. **EN EL CAPÍTULO NÚMERO 5 SE DESCRIBE DE MANERA DETALLA EL DESARROLLO DEL TRABAJO INVESTIGATIVO DE GRADO,** El proyecto tiene como fin comprobar que los suelos o rellenos de tipos granulares son los mas favorables para utilizar el método de densificación de suelos con el uso de explosivos, debido a que este sistema podrá ser una herramienta que permita al ejército nacional ponerla en práctica teniendo en cuenta el rol que tiene hoy en día los ingeniero militares en la ejecución de proyectos de infraestructura vial en aras de beneficiar a la población del territorio colombiano.

Para la realización de este importante proyecto se cuenta con la experiencia reconocida que el ejército tiene en el ámbito del desarrollo de la estructura vial y el conocimiento en las diferentes técnicas sobre el uso de explosivos. Basados en estas experiencias se recolectaran bases estadísticas que podrán soportar los resultados.

6. **RESULTADOS,** En este capítulo se realizaron los ensayos de laboratorio al suelo granular seleccionado para el relleno de los apiques y el ensayo piloto en la cantera Buenavista km 27 vía Tunja, ubicada en la sabana de Bogotá; con estos ensayos preliminares del trabajo investigativo de densificación de suelos granulares con el uso de explosivos, se solicitó el suministró de los materiales explosivos con sus respectivas cargas con las cuales se va a realizar la voladura estos se evidencian en la Tabla 11. Materiales explosivos solicitados para las voladuras del trabajo investigativo densificación de suelos granulares con el uso de explosivos.

Se gestionó y coordino la obtención de los explosivos y el material granular al cual se le realizaran los ensayos respectivos de densidad y compactación una vez se hallan realizado las voladuras, Con base en las relaciones de humedad y masa unitaria seca en los suelos; se realizaron los ensayos del análisis granulométrico de suelos por tamizado I.N.V.E.-213-07, contenido de agua (humedad) del suelo I.N.V.E – 122 -07; determinación del límite liquido de los suelos I.N.V.E -125 -07; determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos I.N.V.E. 126 -07.

7. **EN EL CAPÍTULO 7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS,** Los resultados generados luego de los ensayos de laboratorio preliminares para el suelo granular que se va a utilizar como relleno en las pruebas de los apiques y el ensayo piloto se determinaron con base en los siguientes ensayos: Con respecto a las relaciones



de humedad – masa unitaria seca en los suelos (ensayo modificado de compactación) I.N.V.E. -142 -07; En este ensayo se obtuvo un contenido de humedad óptimo del 8%, una masa unitaria seca de 2027 kg.

Con respecto al análisis granulométrico de suelos por tamizado I.N.V.E. -213 -07 contenido de agua (humedad) del suelo I.N.V.E. -122-07 Determinación del límite líquido de los suelos I.N.V.E. -125 -07 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos I.N.V.E. 126 -07. Los resultados obtenidos del análisis granulométrico establecieron la siguiente información: un porcentaje de gravas del 28,4%; un porcentaje de arena de 55,7% y porcentaje de finos de 15,9% para un total de muestreo del 100%. De acuerdo a la clasificación unificada de suelos es una arena limosa (SM). Con base en la teoría y antecedentes de este método se establece que se limita el material de suelos granulares con menos del 20% de limos y menos del 5% de arcillas; por lo cual se observa que el porcentaje que pasa el tamiz 200 es el 15,9 % y 84,1% de porcentaje retenido acumulado correspondiente al Tamiz 200; En este primer ensayo para el límite referenciado en la teoría y antecedentes se cumple ya que está por debajo del 20% de contenido de limos, para esto Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Las limitaciones para este proyecto se detallan debido al costo de los materiales explosivos, este es sumamente alto, su implementación en las construcciones civiles debe ser justificada, además de tramites muy dispendiosos y su manipulación es únicamente por personal especializado en explosivos y técnicas de voladura del grupo Marte del ejército nacional de Colombia, el transporte fue otro punto importante debido al alto peligro que implica transportar estos explosivos, ya que deben llevar su respectiva seguridad y escoltas, el lugar de ejecución para las pruebas y el ensayo piloto fue uno de las tareas más complejas dentro de este proyecto debido a cambiar en tres ocasiones de sitio debido Ya que dentro de los análisis realizados y la complejidad de la zona en la que se tenían planteados las voladuras del ensayo piloto en planadas Tolima se presentaron problemas de orden público lo cual nos obligado a cambiar la zona de voladuras del ensayo piloto inicialmente a la zona de Mondoñedo en este sector tampoco fue posible por problemas de trámites (licencias ambientales) ante la ANLA; por tal motivo se optó por realizarlos los ensayos de prueba y el ensayo piloto en el siguiente lugar de ejecución: Cantera Buenavista Km 27 Vía Tunja sector Yerba buena; y además del imprevisto con los lugares de ejecución, la obtención de los explosivos ha sido un tema que ha sido dispendioso y muy complicado por la cantidad de trámites a realizar ante las fuerzas militares, ya que la manipulación de los explosivos solamente puede ser por personal técnico en explosivos del ejército



8. **LAS CONCLUSIONES** a las que se llegó con este trabajo investigativo de grado fueron.



CAPITULO I. TEORÍA GENERAL DE LA COMPACTACIÓN. METODOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS

1. INTRODUCCIÓN

Para las finalidades de este trabajo la compactación es un proceso mecánico destinado a mejorar las características de comportamiento de los materiales pétreos que constituyen la sección estructural de las carreteras, los ferrocarriles o las aeropistas.

Existen tres características en el caso de las vías, que pueden ser mejoradas al compactar un suelo cuya mejoría se busca prácticamente en todos los casos. Son la deformabilidad, que implica la intención de disminuir la compresibilidad de los suelos e incrementar su estabilidad volumétrica, especialmente ante la absorción o pérdida de agua; la resistencia, especialmente al esfuerzo cortante, obviamente en el sentido de obtener los mayores valores posibles y unas adecuadas relaciones esfuerzo-deformación que garanticen un balance conveniente en el comportamiento. Algunas otras características cuya mejoría se busca en ocasiones son la flexibilidad de la formación (es decir, la no susceptibilidad al agrietamiento); la permeabilidad (cuyo control es mucho más típico en la construcción de presas de tierra), y el incremento de la resistencia de los suelos compactados a la erosión.

Dentro de las primeras etapas del proyecto y construcción de una obra existe una muy importante que se refiere al adecuado conocimiento de las condiciones del subsuelo, en particular de su estratigrafía y propiedades, para determinar si es adecuado o requiere de mejoramiento. Hasta hace años, los tratamientos de suelos en la construcción solo tenían bases empíricas. El proceso de mejoramiento de suelos debe responder una pregunta fundamental: ¿Qué método y equipo debe emplearse para obtener en un suelo las propiedades mecánicas que especifique un proyecto? En general puede decirse que todos los suelos pueden ser mejorados, pero su proceso y costo son muy diferentes. El presente capítulo muestra una clasificación de distintos métodos de mejoramiento de suelos, describiendo su procedimiento y aplicación de cada uno de ellos.



La compactación puede ser un proceso de objetivos múltiples; además, es evidente que esos objetivos pueden ser contradictorios entre si en muchos problemas concretos, en el sentido de que las acciones que se emprendan para cumplir uno pudieran perjudicar a algún otro. Por ejemplo, en términos generales puede ser cierto que una compactación muy intensa produce un material más resistente, pero seguramente muy susceptible al agrietamiento o poco estable al absorber agua. Al considerar que los suelos compactados han de tener una vida larga, conservando básicamente sus características, se comprende que alguno de los objetivos anteriores podrá ser inclusive contradictorio consigo mismo. Por ejemplo, un suelo fino intensamente compactado podrá ser poco deformable, pero si absorbe agua, su deformabilidad puede hacerse extrema, de manera que el esfuerzo al compactarlo pueda resultar altamente contraproducente, dando lugar a un suelo aún más deformable que en su estado natural.

Cuando por compactar de más un suelo se le hacen adquirir características indeseables, se dice que el suelo ha sido sobre compactado. El convertir a los suelos finos en altamente expansivos a costa del dinero y el esfuerzo que representa la compactación es uno de los pecados más frecuentes, pero no el único, de la sobre compactación. En suma debe concluirse que no existe una relación fija entre la compactación que se da a un suelo y los resultados obtenidos, mucho habrá de depender de las circunstancias futuras en que la obra se desenvuelva y la consideración que se haga de tales circunstancias al planear el proceso de compactación.

Entre las mejoras que muchas veces se requieren en un suelo están el aumento de su compacidad (en el caso de los granulares) y la reducción de susceptibilidad a cambios volumétricos (en los suelos arcillosos). Todo proceso de mejoramiento implica una doble acción sobre la estructura de los suelos: un rompimiento y cambio de la estructura original que el suelo tenía y la modificación del arreglo o acomodo de sus partículas.



1.1. MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS.

La compactación es uno de los varios métodos que se dispone para mejorar la condición de un suelo que haya de usarse en una obra de construcción pesada; es, además, sin duda uno de los más eficientes y de aplicación más universal; pero no es el único en que pueda pensarse. La Tabla 1. Métodos de mejoramiento de suelos. Presenta un panorama más general sobre otras técnicas de utilización posible.



Tabla 1. Métodos de mejoramiento de suelos.

En el último renglón, de compactación por medios mecánicos, deben considerarse incluidas las técnicas de compactación a base de grandes impactos producidos por masas muy considerables dejadas caer desde alturas muy grandes, utilizadas con frecuencia para mejorar la condición de suelos naturales que servirán como terrenos de cimentación a diferentes obras de ingeniería; estas técnicas han sido poco utilizadas hasta hoy en obras lineales, pero, por supuesto, están disponibles cuando su uso sea conveniente.

La historia del desarrollo de la tecnología de compactación en muchos países merece un comentario especial. En un principio, situado aproximadamente hasta los últimos años de la década de los cuarentas en el caso específico de obras lineales, los ingenieros manifestaron una frecuente predisposición en contra de su utilización. La razón era la casi siempre invocada en contra de cualquier innovación



tecnológica obediente a los incrementos del tránsito tanto en peso como en número, tratándose de camiones, trenes o aviones comerciales. Se decía que la compactación vendría únicamente a incrementar los costos de construcción, sin ningún beneficio compensatorio. El mejoramiento puede lograrse por varios procedimientos, entre los cuales podemos relacionar los siguientes:

1.2. **MEZCLAS.**

La estabilización es el proceso de combinar o mezclar materiales con el suelo para mejorar sus propiedades. El proceso puede incluir la mezcla entre diversos tipos de suelos para alcanzar una graduación deseada (estabilización mecánica) o la mezcla del suelo con aditivos (estabilización física y/o química), que puedan mejorar su graduación, textura o plasticidad. Igualmente el estabilizante puede actuar como ligante para la cementación del suelo. Específicamente, en este proyecto nos enfocamos en la modificación física y/o química mediante cal, cemento y bitumen.

El principal fin de la estabilización es aumentar la resistencia mecánica, haciendo que el suelo presente mayor trabazón entre partículas y asegurando que las condiciones de humedad del suelo varíen dentro de los rangos adecuados. Con esto se logran tres objetivos importantes: adecuada estabilidad ante las cargas, durabilidad de la capa y una variación volumétrica mínima. Dentro del marco de este estudio, es importante aclarar que existen dos tipos de modificaciones de materiales, el primero cuando se enfoca en mejorar características tales como graduación, trabajabilidad y plasticidad, para las cuales se requieren cantidades mínimas de aditivos (mejoramiento de materiales), por otra parte cuando el objetivo es mejorar propiedades como resistencia y durabilidad de manera significativa, se necesitan cantidades mayores de aditivos (estabilización de materiales).

Este método se utiliza para mejorar un suelo mediante la combinación de los suelos con agentes estabilizadores. Existen mezclas de suelos y mezclas con productos químicos, como enseguida se trata.



1.2.1. MEZCLAS DE SUELOS.

Este tipo de estabilización es de amplio uso. Los suelos de grano grueso, como grava-arena, tienen una fricción interna alta, lo que les permite soportar grandes esfuerzos; sin embargo, esta cualidad no hace que sean estables para ser usadas como material de base en una carretera, ya que al carecer de cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos pueden separarse. Las arcillas, al contrario, tienen notoria cohesión y poca fricción, lo que provoca que pierdan estabilidad ante humedades altas. Como se puede ver en la Figura 1. Mezcla de suelos. (Vía rural 2012).



Figura 1. Mezcla de suelos. (Vía rural 2012).

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. pagina web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

La mezcla adecuada de los dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se aprovecha la fricción interna de uno y la cohesión del otro. Sin embargo, la sola mezcla no logra producir los efectos deseados; se requiere además, de compactación.



1.2.2. MEZCLAS CON PRODUCTOS QUÍMICOS.

La estabilización química de suelos es una tecnología que se basa en la aplicación de un producto químico, genéricamente denominado estabilizador químico, el cual se debe mezclar íntima y homogéneamente con el suelo a tratar y curar de acuerdo a especificaciones técnicas propias del producto. Como se puede ver en la Figura 2. Mezcla con químicos (vía rural 2012).



Figura 2. Mezcla con químicos (vía rural 2012).

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. Página web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

La aplicación de un estabilizador químico tiene como objetivo principal transferir al suelo tratado, en un espesor definido, ciertas propiedades tendientes a mejorar sus propiedades de comportamiento ya sea en la etapa de construcción y/o de servicio. Se refiere principalmente a la utilización de sustancias químicas que involucran la sustitución de iones metálicos y cambio en la constitución de los suelos involucrados en el proceso. Se han usado gran número de productos químicos con este fin, la mayoría de ellos con resultados satisfactorios, pero requieren del estudio y asesoría de especialistas, tanto durante la etapa de diseño como de construcción.



1.2.3. MEZCLAS CON CAL.

La cal puede ser utilizada en el tratamiento de suelos, en varios grados o cantidades, dependiendo del objetivo. Una mínima cantidad de cal para tratamiento se utiliza para secar y modificar temporalmente los suelos. Tal tratamiento produce una plataforma de trabajo para la construcción de caminos temporales. Figura 3. Mezclas con cal. (anfagal 2002).



Figura 3. Mezclas con cal. (anfagal 2002).

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. Página web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

Un mayor grado de tratamiento – respaldado por las pruebas, diseño y las técnicas apropiadas de construcción – producen la estabilización estructural permanente del suelo. Antes de iniciar cualquier proyecto de construcción, se deben desarrollar los planos y especificaciones.

Para pavimentos de carreteras, el diseño debe ajustarse al tráfico esperado, tomando también en cuenta el medio ambiente, el sitio y las condiciones de los materiales. Todos los diseños estructurales deben basarse en pruebas de laboratorio y parámetros que se ajusten a las demandas del proyecto en particular y además, proveer la alternativa más económica para el uso planeado La cal disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es relativamente económica. Los porcentajes que se utilizan varían normalmente del 2 al 6% con respecto al peso seco del material por mejorar. Es recomendable no usar porcentajes mayores, ya que aunque se aumenta ligeramente la resistencia hay un incremento en la



plasticidad. La dosificación del cementante dependerá del tipo de suelo y debe determinarse en el laboratorio.

Para analizar a los suelos estabilizados con cal se realizan usualmente los siguientes ensayos de laboratorio: límites de Atterberg, granulometrías, valor cementante, equivalente de arena y valor relativo de soporte (VRS). La estabilización con cal no es muy efectiva en suelos granulares.

El mezclado puede realizarse en planta o en campo, obteniéndose mejores resultados en el primer caso. Puede agregarse en forma de lechada, a granel o en sacos. Si se agrega en forma de lechada, ésta se disuelve en el agua que se integra a la compactación. Se recomienda no hacer la estabilización cuando haya riesgo de lluvia o cuando la temperatura ambiente sea menor a 5 ° C.

1.2.4. MEZCLA CON CEMENTO PÓRTLAND.

Es una mezcla íntima de suelo pulverizado, cemento Portland y agua que compacta a su óptima humedad y densidad máxima produce (debido a la hidratación del cemento) un material durable y con la resistencia mecánica apropiada para la conformación de capas de base para pavimentos urbanos, carreteras y de aeropuertos. Cuando el tránsito no adquiere importancia, hace las veces de capa de rodadura, permitiendo grandes economías en los programas viales. La dosificación del cemento se calcula como porcentaje en peso del material seco, y la humedad de la tierra durante el apisonamiento puede ser del 18 % base húmeda.

Mediante estudios de los suelos que se pueden estabilizar con cemento es muy amplio y sólo existe una restricción de empleo con aquellos que presentan un contenido alto de materia orgánica, ya que inhiben las reacciones de hidratación del cemento. Incluso los suelos limosos de difícil estabilización pueden estabilizarse con asfalto, previo pre-tratamiento con cemento Portland.

Se usa principalmente en suelos granulares (arenas y gravas finas). El cemento mezclado con el suelo mejora las propiedades mecánicas de éstos, dando como resultado la disminución de la relación de vacíos y de la plasticidad de los suelos, así como un aumento en su resistencia y durabilidad.

La estabilización consiste en agregar cemento Portland en cierta proporción (usualmente 3 – 8 % por volumen de mezcla). Por economía de las obras es necesario ajustar el porcentaje de cemento con base en ensayos de laboratorio y campo. Algunas de las características del suelo que deben tomarse en cuenta para la estabilización son: su granulometría, limitando que los materiales no contengan partículas con tamaño superior a 6.0 cm, que el porcentaje que pasa por la malla



200 sea menor del 50% y estableciendo un límite líquido e Índice de plasticidad adecuados.

El éxito de la estabilización con cemento depende del contenido de éste, del contenido de agua y de su compactación. Las mezclas deben someterse a diversos ensayos en laboratorio, entre ellos: compactación, durabilidad y resistencia a la compresión simple, que aparte de su objeto específico, servirán para dosificar el cemento que se empleará en la mezcla. Figura 4. Mezclas con cemento (civilgeeks 2011).



Figura 4. Mezclas con cemento (civilgeeks 2011).

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. Página web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

El suelo que se mezclará con cemento debe pulverizarse y esparcirse sobre la superficie para lograr la proporción adecuada de la mezcla. Es conveniente hacer la distribución del cemento con equipo especializado (pulvimixer1) para lograr un mezclado uniforme. También pueden usar discos rotatorios de arado hasta que se determine un mezclado total. La mezcla puede hacerse en seco o en húmedo. La adición del agua debe ser uniforme en toda la zona, cuidándose de que no quede depositada en huecos. El curado se realiza con un riego de agua, en proporción de 0.5 a 1.0 l/m², Se pueden utilizar excavadoras, empujadoras, traíllas escarificadoras (motoescrapas), niveladoras rodillos vibradores, apisonadoras y rodillos lisos.



1.2.5. MEZCLAS CON PRODUCTOS ASFÁLTICOS.

La estabilización de suelos con emulsiones asfálticas tiene una amplia aplicación en distintas tareas de la construcción vial. Entre las tareas más usuales se encuentran la obtención de materiales de alta resistencia para bases –utilizando la emulsión asfáltica sola o incorporando cemento a la mezcla- y el estabilizado de vías de bajo tránsito. Figura 5. Mezclas con emulsión (imc 2005).



Figura 5. Mezclas con emulsión (imc 2005).

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. Página web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

El objetivo del estabilizado de vías es presentar una técnica constructiva de bajo costo y con buenas condiciones de servicio para mejorar la red vial en caminos y calles no pavimentadas y con ello una sustancial mejora en la calidad de vida de los habitantes de la zona tanto en sus aspectos sociales como en los económicos.

Parte importante del bajo costo de esta técnica es que se utiliza el suelo del lugar. Es decir no es necesario proveerse de suelos seleccionados (ahorro en transporte). La técnica descrita más abajo es posible efectuarle con el equipamiento presente en la mayoría de los municipios del país.

Además, no se necesita personal altamente especializado con lo cual se transforma un una importante fuente de trabajo en la zona de la obra. Los productos utilizados en la estabilización de suelos son variados tanto asfálticos como no asfálticos. Hay varios factores a favor del uso de las emulsiones asfálticas, frente a otros productos asfálticos:



- Dado que las emulsiones se trabajan a temperatura ambiente, no requieren calentamiento para su manipulación ni para su empleo en obra disminuyendo así los riesgos de quemaduras en los operarios.
- Además, como el medio dispersante es agua las emulsiones no son inflamables ni emanan vapores de hidrocarburo hacia la atmósfera.

El objetivo del estabilizado es otorgarle al suelo resistencia mecánica y que ésta resistencia permanezca con el tiempo. El estabilizado del suelo con emulsión asfáltica se puede realizar con o sin el agregado de otros materiales. Por ejemplo, en algunos casos se agrega arena constituyéndose en un estabilizado llamado Suelo-Arena-Emulsión(SAE).

La capa a mejorar debe estar completamente terminada. No se debe hacer la estabilización con mucho viento, temperaturas inferiores a 5° C o lluvia. La dosificación depende de la granulometría de los suelos. Los suelos finos requieren mayor cantidad de bitumen, y de ellos los plásticos no pueden estabilizarse a costos razonables debido a la dificultad para pulverizarlos y cantidad de bitumen necesario. En general, la cantidad de bitumen varía entre 4% y 7%; en todo caso la suma de agua para compactación más el bitumen no debe exceder a la cantidad necesaria para llenar los vacíos de la mezcla compactada. También se puede estabilizar con ácido fosfórico, fosfato de calcio (yeso), resinas y polímeros.

1.2.6. PRECARGAS.

Consisten en aplicar al terreno de cimentación cargas previas a las normales de operación de las estructuras en proyecto. Tienen como objetivo principal disminuir la compresibilidad e incrementar la resistencia de los suelos cohesivos blandos.

Precargar los suelos finos tiene dos objetivos:

- Acelerar el desarrollo de la consolidación del suelo. Entonces es posible cimentar sobre el mismo sin peligro de asentamientos totales o diferenciales importantes a mediano o largo plazo.
- Aumentar la resistencia al corte no drenado del suelo y por tanto la capacidad de carga del terreno.



Para verificar la eficiencia de la precarga, es necesario medir la evolución de los asentamientos en diferentes puntos y a diferentes profundidades mediante bancos de nivel y placas de asentamientos, verificar la disipación de las presiones intersticiales dentro del Subsuelo durante el proceso y medir el aumento de la resistencia a la corte no drenada del suelo al terminar el tratamiento.

Las precargas usuales son terraplenes o plataformas de materiales térreos (Fig. 1.4); en ocasiones se ha usado el abatimiento del nivel freático para proporcionarlas, pero esto es muy costoso por el bombeo continuo. La precarga con plataformas es de uso frecuente en Colombia por su facilidad de ejecución, aunque tiene la desventaja de requerir mayor área de trabajo y en algunos casos, en los que no se usa el material con el que se aplicó, un costo mayor. Para tanques de almacenamiento la precarga puede proyectarse en dos etapas: la primera la constituye el terraplén estructural del propio tanque, construido con las especificaciones propias para ese fin y la segunda es propiamente la precarga que por facilidad y economía se forma con materiales colados al volteo y bandeados hasta la elevación máxima prevista. Figura 6. Sistema de precarga (ucm 1990).



Figura 6. Sistema de precarga (ucm 1990).

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. Página web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

La precarga se inicia con el desmonte y limpieza del área, seguido del tendido en capas del material. Como ya se citó, desde un inicio puede formarse un terraplén estructural, compactado conforme a las normas y especificaciones previstas en el proyecto, lo cual en cimentaciones de tanques de almacenamiento tiene alguna ventaja sobre los materiales no controlados, como menor costo y tiempo de construcción, ya que se usa la misma estructura de proyecto; sin embargo, presenta desventajas como la de un mayor riesgo en caso de falla o colapso y la necesidad



de nivelación en el fondo una vez efectuadas las pruebas hidrostáticas. Para conocer el comportamiento del subsuelo y el efecto de la precarga se instala instrumentación geotécnica.

El propósito de dicha instrumentación es observar la respuesta de la cimentación bajo el programa de precarga, construcción y pruebas hidrostáticas. Consiste principalmente en realizar nivelaciones de precisión en bancos superficiales para determinar los hundimientos generados y en instalación de piezómetros que permitan conocer la evolución de la presión de poro en el subsuelo (Stamatopulos, y Kotzias, 1990).

1.2.7. DENSIFICACIÓN POR MEDIO DE EXPLOSIVOS. Este método busca lograr un mejor acomodo de las partículas del suelo mediante un incremento relativamente uniforme y repentino de la presión de aire, generado por explosivos y que se transmiten a través de las fases fluida y sólida del suelo. Figura 7. Densificación con explosivos (imc 2005).

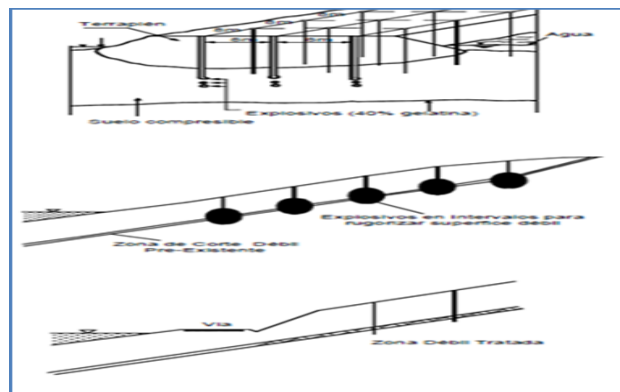


Figura 7. Densificación con explosivos (imc 2005).

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. Página web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

La excitación debe superar la energía mínima que se requiere para romper el equilibrio en la estructura del suelo, pero no debe “volar” el suelo.

Para que el uso de esta técnica sea adecuado debe tomarse en cuenta el explosivo, el suelo por densificar y la estratigrafía general del sitio. Es conveniente utilizar varias detonaciones consecutivas, en vez de una sola explosión.



También es necesario contar con instrumentación geotécnica, compuesta principalmente por bancos de nivel superficiales y profundos y piezómetros abiertos instalados en los estratos de mayor permeabilidad. La evaluación inmediata se realiza con base a los movimientos medidos en los bancos de nivel, complementada con la interpretación de las lecturas piezométricas. Pueden también emplearse sondeos de penetración estándar para verificar la compacidad.

El método solo es eficiente en suelos granulares, con contenido de finos menor de 20%; un contenido de arcilla reduce substancialmente su eficiencia. Además, el método proporciona poca densificación por arriba de 1 m de profundidad y el material puede permanecer suelto alrededor de los puntos de explosión. Los resultados pueden no ser los deseables comparándolos con otros procedimientos, especialmente en estratos parcialmente saturados o no saturados. Por otra parte, induce daños en el medio ambiente, por lo que se recomienda su uso solo en lugares aislados (Vieitez, 1979). En el Capítulo 2 se trata con mayor detalle el procedimiento. Figura 8. Mejoramiento por vibración (work 2004).

1.2.8. MEJORAMIENTO POR VIBRADO.

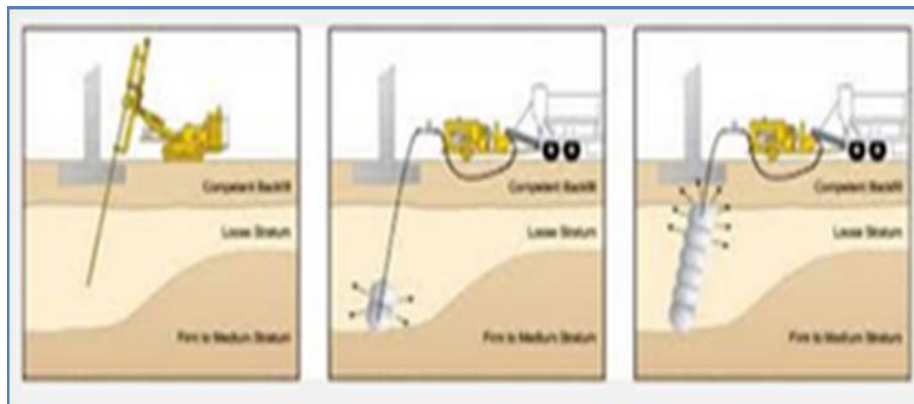


Figura 8. Mejoramiento por vibración (work 2004).

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos.página web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

Entre los procedimientos de mejoramiento por vibración se encuentra la vibrocompactación, la vibroflotación, la vibrosustitución y el vibrohincado cuyos aspectos relevantes son los siguientes:

1.2.9. VIBROCOMPACTACIÓN.

El método se ha aplicado con éxito hasta 10 - 15 m de profundidad, pero pueden alcanzarse 20 m con un vibrador poderoso. Se debe verificar la densificación del



material después de que el suelo ha sido vibrado; para ello se realizarán sondeos de penetración estándar o de cono, comparando sus resultados con determinaciones iniciales en la misma área. Figura 9. Equipo para vibro compactación. (Smms 2009).



Figura 9. Equipo para vibro compactación. (Smms 2009).

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos.página web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

En la aplicación de este método se ha observado lo siguiente:

- ✓ los primeros 1 - 2 m generalmente no quedan densificados y deben compactarse después con un equipo de compactación superficial.
- ✓ Si el suelo contiene capas limosas o arcillosas éstas no se logran compactar.
- ✓ La resistencia de punta en sondeos de cono puede incrementarse entre 50% y 100%.
- ✓ La compacidad relativa requerida (de 60 a 80 %, y en algunos casos 100 %) se puede alcanzar; y el suelo se asienta de 7 a 10 % [SMMS, 1957].

El grado de densificación alcanzado dependerá de la intensidad de la vibración generada y de las propiedades del suelo, en particular su composición y forma de los granos. El método es más efectivo en arenas limpias. Se han logrado mejoramientos a profundidades de 30 m, pero las típicas son de 9 a 15 m.



El mejoramiento que se logre depende, como ya se dijo, del tipo de suelo, además del espaciamiento de los puntos de vibro compactación y del tiempo de mejora. Los asentamientos medidos en suelos granulares alcanzan del 5 a 15% de la profundidad tratada. Se ha visto que el procedimiento es más eficiente en materiales granulares con contenido de finos no mayor de 10 a 15%. El efecto de la densificación disminuye conforme aumenta la distancia horizontal respecto al vibrador. La licuación inducida durante el tratamiento es total hasta distancias de 30 a 50 cm del vibrador, siendo nulo el efecto a 2.5 m debido al amortiguamiento del propio terreno. Figura 10. equipo para vibroflotacion smms 2009.

1.2.10. VIBROFLOTACIÓN.

Método de mejoramiento de suelos granulares (arenas o gravas) con un contenido de finos (porción que pasa el tamiz # 200) inferior a un 15 a 20 %. En resumen, el método consiste en introducir un tubo por vibración horizontal en el terreno granular. La vibración induce un reacomodamiento de los granos del suelo, aumentando la densidad.



Figura 10. equipo para vibroflotacion smms 2009.

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. página web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

Este tratamiento se realiza por puntos formando una malla generalmente triangular, de forma que el radio de acción de cada punto alcance para tratar toda la masa de suelo. El procedimiento se lleva a cabo mediante un vibrador alojado en la punta inferior de un tubo de diámetro 30 a 40 cm, el cual pende de una grúa. Este vibrador funciona mediante un excéntrico que rota a altas rpm accionado eléctrica o



hidráulicamente. Se alcanzan amplitudes de vibración desde 5 a 40 mm y frecuencias de 1800 a 3000 rpm. Suplementariamente a la vibración, su efecto se refuerza mediante aletas en la punta y la inyección de agua con alto caudal (hasta 30 litros por segundo) y presión máxima de 10 bares.

La secuencia de ejecución es la siguiente:

- Inca del vibrador hasta la profundidad máxima del tratamiento.
- Compactación por retiro en etapas del vibrador.
- Relleno con material de aporte (puede ser el mismo del sitio tratado o externo).
- Repetición de las tareas 1 a 3 en todos los puntos de la malla seleccionada.
- Compactación superficial sobre todo el terreno tratado.

El dispositivo principal del sistema es el llamado “Vibroflot” (según la patente americana), que consiste en un vibrador de grandes dimensiones, dotado con boquillas para lanzar agua a presión (chiflón). La densificación se logra mediante la acción combinada de vibración y del chiflón. El método consiste en hincar en el terreno el vibrador, que puede tener 40 cm de diámetro, 183 cm de longitud y 2 t de peso. Con su masa excéntrica interna, el vibrador puede desarrollar una fuerza horizontal de 10 t a 1800 rpm, desplazándose lateralmente del orden de 2 cm. Para facilitar su hincado y en general su funcionamiento, tiene chiflones de agua tanto en su parte inferior como superior, con los cuales puede suministrar agua a razón de 4 a 5 lts/seg (60 a 80 gpm) con una presión de 4 a 6 kg/cm² (60 a 80 psi). Los huecos dejados por el vibrador se van rellenando con material granular (Vieitez, 1979).

Con este procedimiento se forman columnas de 2.4 a 3.0 m (8 a 10 pies) de diámetro en cada penetración del vibrador. El grado de compactación es máximo al centro de la columna y decrece radialmente. La experiencia indica que el método también es más eficiente en suelos arenosos limpios, de preferencia gruesos. Dado que se introduce suficiente agua en el terreno en la zona por tratar, para asegurar la saturación del material, la ubicación del nivel freático no afecta la aplicabilidad del método.

1.2.11. VIBROSUSTITUCIÓN.

Cuando el terreno a mejorar está compuesto por suelos finos (cohesivos), entonces no es posible lograr la compactación por efecto de la vibración, cambiando la forma de realizar el trabajo conceptualmente. Este es el campo de aplicación de la



Vibrosustitución. En este caso se utiliza la vibración con inyección en la hinca para llegar hasta la profundidad máxima. Luego se rellena con material de aporte (siempre externo) consistente en grava de tamaños en el rango 2 a 80 mm. Durante la extracción se va agregando la grava desde la boca del pozo. El vibrador la va compactando y con su peso presionándola contra el terreno cohesivo, logrando así insertar en el terreno blando una columna de grava compactada. Las columnas de grava se construyen también formando mallas en planta (triangulares generalmente) y se comportan como pilotes compuestos por un material granular de alta resistencia al corte confinado en una masa de suelo cohesivo. Este tratamiento es particularmente interesante en el caso de arenas finas limosas con alto potencial de licuefacción, ya que se además de aumentarse la resistencia al corte fuertemente por la inclusión de las columnas de grava, se obtienen elementos verticales que sirven para disipar las presiones de poros que pueden originar licuefacción por sismo. Figura 11. Equipo para vibro sustitución smms 2009.

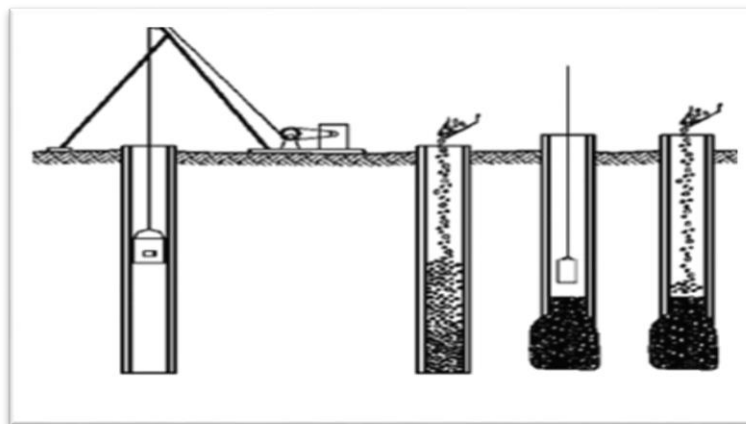


Figura 11. Equipo para vibro sustitución smms 2009.

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos.pagina web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

En suelos cohesivos blandos y en depósitos orgánicos se han usado con éxito columnas de grava formadas por Vibroflotación. Esto es una variante del proceso original y se le conoce también como vibrosustitución. En este método el Vibroflot forma una perforación vertical a través de un terreno blando, el cual posteriormente es llenado con grava o piedra triturada, además de ser compactado por el propio vibrador.



El método permite incrementar la densidad del suelo y proporcional drenaje para disipación de la presión de poro. Al Introducir un elemento rígido se ocasiona una disminución de esfuerzos en el suelo, ya que habrá una mayor concentración en los elementos rígidos, además de una deformación limitada.

1.2.12. VIBROHINCADO.

Utiliza un martillo vibratorio con un elemento metálico columnar que se va introduciendo verticalmente en cada sitio prefijado, siguiendo un patrón establecido. El método es aplicable en suelos granulares y saturados con tamaños comprendidos entre 7,5 cm. (3") y la malla 40, con contenido de finos menor de 25%. Se recomienda no emplear este método en depósitos de arenas gruesas y grava con coeficiente de permeabilidad, $k > 10^{-2}$ m/s. Figura 12. Equipo de vibrohincado smms 2009.



Figura 12. Equipo de vibrohincado smms 2009.

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. Pagina web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

En caso necesario puede añadirse agua para garantizar la saturación. Las vibraciones transmitidas al elemento columnar son básicamente verticales, por lo que el hincado se realiza normalmente sin ayuda de chiflones de agua. Al terminar de densificar una zona, la superficie del terreno desciende y para restituir el nivel debe agregarse nuevo material o bien puede colocarse previamente antes de efectuar el tratamiento del terreno. No se requiere agregar simultáneamente el



material que ocupe el espacio extra ganado, ya que esto puede realizarse antes o después del tratamiento.

En suelos parcialmente saturados el reacomodo de las partículas se dificulta. A mayor contenido de finos la eficiencia del método se reduce; así, para suelos con contenido de finos mayor de 20%, el mejoramiento que se obtiene es muy pobre. Además, en suelos con compacidad mayor del 70% es difícil obtener un mejoramiento y en depósitos de arena que contengan lentes de limo o arcilla se disminuye el efecto de densificación.



1.2.13. INYECCIÓN DE COMPACTACIÓN.

El método se basa en la inyección en el terreno de un mortero de baja movilidad, de forma que la mezcla inyectada no fluya por el terreno, quedando concentrada alrededor del punto de inyección. Este mortero se inyecta a una presión de hasta 40 bares y con un asiento en el cono de Abrams menor de 8 cm, lo que permite una correcta densificación. El material inyectado rellena los huecos y compacta o estabiliza el suelo que rodea a la zona tratada. Posteriormente el cemento del mortero fragua confiriéndole resistencia y dureza al mismo. Figura 13. Equipo para inyección smms 2009.



Figura 13. Equipo para inyección smms 2009.

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. Página web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

Durante la inyección se produce un desplazamiento del terreno sin romper su estructura.

Sus aplicaciones principales son:

- Mejora de suelos.
- Estabilización y recalce de cimentaciones.
- Recuperación de la capacidad portante o incremento de ésta a lo largo del fuste o la punta de cimentaciones profundas existentes.
- Relleno de cavidades

Consiste en la inyección a presión de una mezcla de cemento de alta consistencia y arena, formando bulbos de mortero que comprimen, desplazan y compactan el suelo. Las bombas y equipos a emplear son clave dada la poca trabajabilidad de la mezcla empleada. Los equipos utilizados cuentan con registro de los parámetros de



inyección. El proceso de inyección se rige por el volumen de mortero por fase, el caudal, la presión de inyección y la viscosidad del mortero.

1.2.14. INCLUSIONES RÍGIDAS.

Cuando las cargas a soportar sean puntuales o elevadas, la alternativa es la utilización de inclusiones rígidas en el terreno como técnica de mejora del mismo. Son elementos de hormigón en masa o incluso armados que disipan las cargas aplicadas únicamente por fuste ya que no necesariamente deben apoyarse sobre terrenos competentes. Este sistema de compactación de terreno es utilizado, entre otras funciones para mejorar las características de resistencia a cortante y deformabilidad en estratos blandos a muy blandos del terreno. Figura 14. Equipo para inclusiones rígidas 2009.



Figura 14. Equipo para inclusiones rígidas 2009.

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. Pagina web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

Las inclusiones rígidas pueden ejecutarse mediante técnicas de vibración profunda u otras técnicas que deberán venir reflejadas en el proyecto. Es una técnica que permite controlar los hundimientos en suelos blandos debido al peso de las estructuras y de los abatimientos piezométricos. Son elementos cilíndricos no conectados con la estructura, que pueden incluirse en el suelo recurriendo a diferentes técnicas. Sus ventajas son la disminución de los asentamientos debido a la transferencia de una parte importante de los esfuerzos soportados por el suelo a estos elementos, la facilidad de colocación y la mínima interacción con la estructura. La limitante que presenta es la complejidad para evaluar la interacción inclusión-suelo.



1.2.15. JET GROUTING.

Es un método de mejora del terreno en el cual se inyecta un fluido mediante el empleo de una alta energía que rompe la estructura del terreno para luego mezclarse con el mismo y formar un suelo mejorado. El Jet-Grouting es una tecnología que utiliza la inyección radial de fluidos, a muy alta velocidad, para desagregar (erosionar) el terreno, sustituyendo parcialmente el material erosionado y mezclándolo con un agente de cementación para formar un nuevo material.

La aplicación de esta técnica, tan versátil, nos permite introducir en el terreno nuevos materiales en la forma de columnas enteras o truncadas, que consiguen mejorar las características geotécnicas resistentes de la zona tratada, reducir su deformabilidad, o disminuir su permeabilidad. Sus aplicaciones se han extendido a una gran variedad de trabajos que incluyen: cimentaciones, recalces, soporte de excavaciones, mejoras del terreno, obras auxiliares para la construcción de túneles, estabilización de laderas, control del agua freática, etc.

Es una de las tecnologías más demandantes de los sistemas de mejora, requiriendo excelencia técnica en el diseño y la construcción por parte de especialistas. Las ventajas de aplicación de esta técnica radican en su aplicabilidad a casi todos los tipos de suelos; tratamientos particularizados o a estratos de suelos específicos; utiliza componentes inertes; su ejecución es sin vibraciones; puede evitar instalaciones enterradas; y la posibilidad de trabajar con limitaciones de espacio. Figura 15. jet grouting (keller grundbau gmbh 2010)

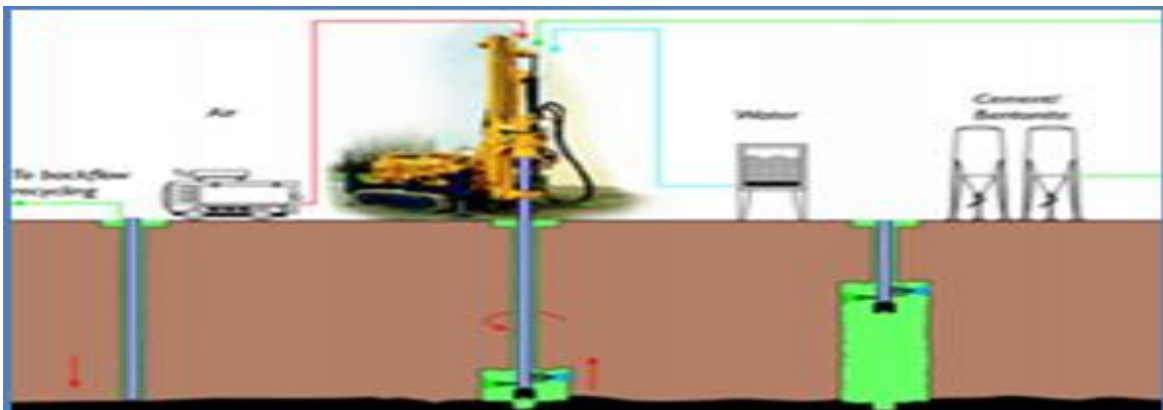


Figura 15. jet grouting (keller grundbau gmbh 2010)

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. Pagina web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

El procedimiento consiste en cortar, excavar y mezclar, el material “in situ”, a través de energía hidráulica a alta velocidad y remplazarlo por una mezcla de suelo –



cemento. Es adecuado para un rango amplio de suelos desde aglomerados hasta arcillas de alta plasticidad. Sin embargo, cuando se incrementa la resistencia del suelo, la profundidad de penetración disminuye y a mayor permeabilidad del mismo aumenta la profundidad de penetración. Por lo anterior, el tiempo requerido para la máxima penetración es mayor en suelos cohesivos.

El volumen de suelo afectado es mayor que el diámetro de la perforación y se incrementa al aumentar el tamaño de partículas. En arcillas, limos y arenas con finos, la profundidad de penetración máxima se alcanza con una saturación del 100% y la penetración mínima con un grado de saturación de 40 a 50%.

1.2.16. COMPACTACIÓN DINÁMICA.

Procedimiento para compactar materiales marginales en sitio sin remoción de ningún tipo y se usa para mejorar las propiedades de los suelos por encima y debajo del nivel freático. La resistencia del suelo se aumenta y la compresibilidad y los asentamientos disminuyen como resultado de la densificación calculada y programada.

El objetivo primordial es el de cambiar un suelo heterogéneo a uno más uniforme y fuerte por medio de impactos superficiales de gran energía. La densidad resultante se verifica por medio de estudio geo-eléctrico o sísmico.

Este método consiste en dejar caer una masa repetidamente desde una cierta altura. La reacción del suelo ante la compactación dinámica depende del tipo de suelo y de la energía que le sea impartida por los impactos que tiene un arreglo predeterminado. **Figura 16.** Compactación dinámica (vyepe 2012).

Figura 52. Uso de explosivos.



Figura 16. Compactación dinámica (vyepe 2012).

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. Pagina web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

La energía es función de la masa, altura de la caída, espaciado de la cuadrícula y número de caídas en cada punto. Las masas son usualmente boques de acero o una serie de placas de acero sujetas entre sí. Las masas se dejan caer varias veces en el mismo lugar, siguiendo un patrón de cuadrícula con cierto espaciado. El procedimiento normalmente se hace con más de una pasada o serie de apisonamientos rellenando los cráteres que se forman entre pasadas.

Por lo general, el subsuelo por mejorar se considera constituido por dos capas: la más profunda es mejorada por la primera serie de apisonamientos, con un determinado número de repeticiones, con las mayores separaciones entre los puntos de impacto, y el nivel de energía más alto. La capa intermedia es mejorada por una segunda serie de apisonamientos.

1.2.16.1. Aplicaciones:

- Zonas costeras rellenadas por dragado
- Zonas húmedas
- Arenas sueltas
- Suelos licuables o solubles
- Rellenos sanitarios
- Zonas arcillosas o limosas



CONCLUSIONES DEL CAPITULO.

Después de hacer la anterior reseña de los métodos de compactación, es de gran relevancia señalar la importancia del tema en estudio, y poder concluir que la densificación de los suelos es primordial en el proceso de la construcción de las carreteras, ya que se logran avances físicos en nuestro país debido a las técnicas utilizadas en la construcción; como es el caso de las técnicas de la densificación de suelos con el uso de explosivos y con los equipos vibradores de compactación de suelos.

Los métodos de mejoramiento de suelos pueden utilizarse en diferentes tipos de terrenos o rellenos, pero debe realizarse un estudio geotécnico completo para seleccionar el adecuado a cada proyecto jugando un papel importante las tecnologías aplicadas para la construcción geotécnica.

La densificación de suelos con el uso de explosivos posee ventajas con respecto a otros métodos de mejoramiento debido a la disponibilidad del equipo, maquinaria, herramientas y materiales, siempre y cuando se cuente con el personal idóneo y información adecuada y suficiente de las condiciones del subsuelo.

Los resultados pueden no ser los deseables comparándolos con otros procedimientos, especialmente en estratos parcialmente saturados o no saturados. Por otra parte, induce daños en el medio ambiente, por lo que se recomienda su uso solo en lugares aislados.



CAPITULO II CLASIFICACION DE SUELOS.

INTRODUCCION.

Con base en la teoría investigada en el El Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS, el levantamiento de la cartografía geológica del territorio Colombiano. En este trabajo tiene como referencia la actualización de la cartografía geológica del área que comprende la Sabana de Bogotá a una escala 1:100.000.

En el área de la Sabana de Bogotá confluyen varias planchas geológicas escala 1:100.00, la plancha 209 Zipaquirá (Montoya & Reyes, 2003), 208 Villeta (Ulloa & Acosta, 2002), 227 La Mesa (Acosta & Ulloa, 2001), 228 (Bogota Oriental), 246 Fusagasugá (Acosta & Ulloa, 1998); sin embargo, debido a la utilización de nomenclaturas y conceptos geológicos diferentes, el empate entre estos mapas presentan problemas de tipo estratigráfico y estructural; además, los depósitos cuaternarios fueron trabajados con poco detalle a diferencia de los mapas de Helmes & Van der Hammen (1995), los cuales tiene una diferenciación detallada.

Por lo anterior INGEOMINAS adelantó una actualización de la cartografía geológica del área de la Sabana de Bogota, en la cual se hizo una diferenciación estratigráfica y una identificación de las estructuras regionales para las rocas preplioceno que permitió ensamblar un mapa geológico escala 1:100.000 con memoria explicativa y para las unidades del plioceno y cuaternarias se intregaron los mapas de Helmes & Van der Hammen (1995), con los mapas geomorfológicos escala 1:25.000 realizados por Carvajal et al. (2004).

A continuación se presenta una descripción de las diferentes unidades cretácicas y cenozoicas y las estructuras que afectaron estas unidades litológicas. Se espera que este informe y mapa proporcione información geológica básica que sirva de soporte para los planes de ordenamiento territorial, exploración de recursos: minerales e hídricos, evolución geológica y además aporte al conocimiento geocientífico de la parte central de la Cordillera Oriental.



INSTITUTO COLOMBIANO
DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
INGEOMINAS

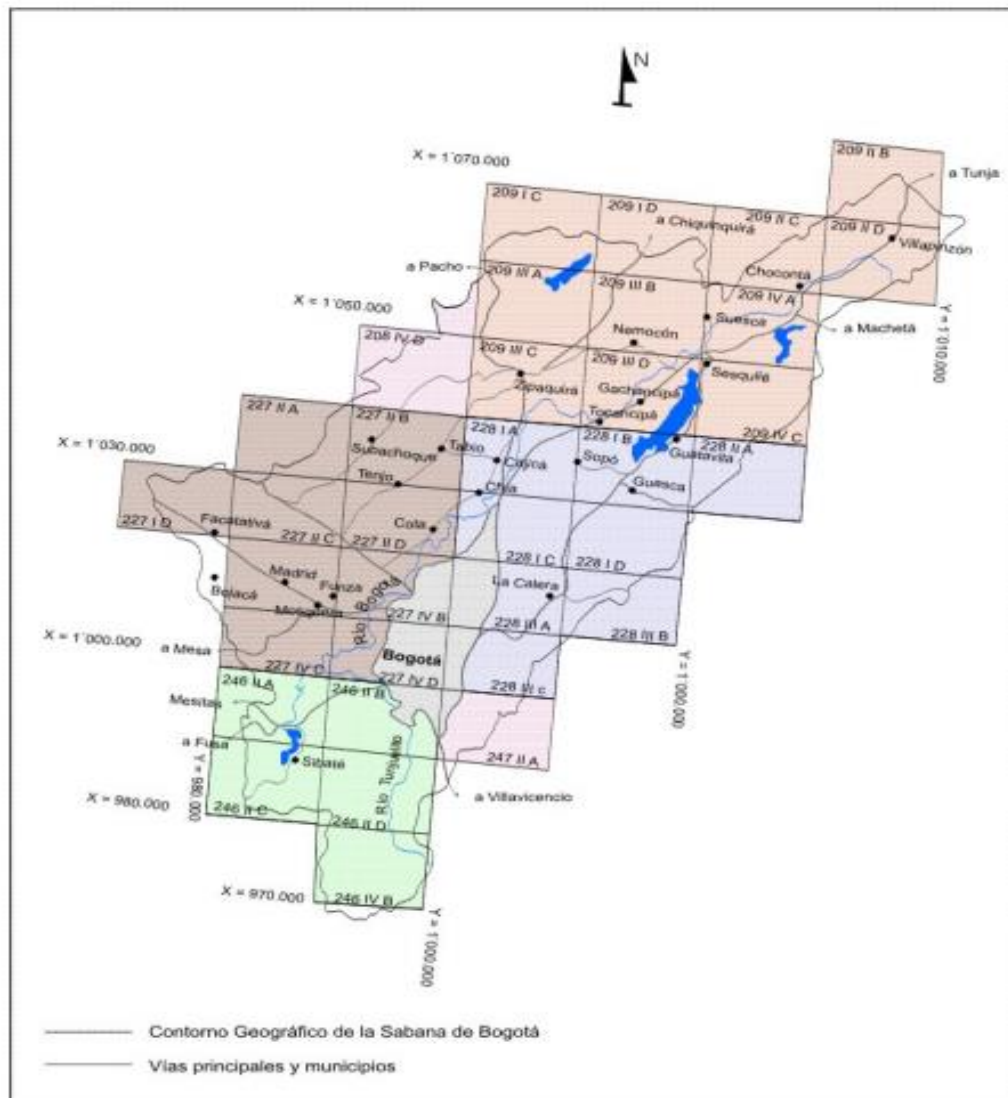


Figura 17. Fuentes de información según planchas topográficas del IGAC.

Fuente: pagina web; http://choconta.files.wordpress.com/2007/12/informe_geologia_sabana_bta.pdf



2.1. ESTRATIGRAFIA:

La ubicación en la que se realizara el ensayo piloto y las voladuras se encuentra contemplada en la sabana de Bogota, El área de estudio está ubicada en la Cordillera Oriental, en la zona axial y el inicio de los flancos oriental y occidental y abarca las siguientes planchas geológicas a escala 1:100.000 publicadas por INGEOMINAS: 209 Zipaquirá (Montoya & Reyes, 2003), 208 Villeta (Acosta & Ulloa, 2002), 227 La Mesa (Acosta & Ulloa, 2001) y 246 Fusagasugá (Acosta & Ulloa, 1998). En la zona las unidades geológicas están representadas en una secuencia sedimentaria con edades del Cretáceo Superior, Paleógeno, Neógeno y Cuaternario.

Se tomará como referencia geográfica el río Bogotá, para separar las partes Oriental y Occidental de la Sabana y al Sur se escogió el río Tunjuelito; éstos, sirven de referencia y no tienen un significado geológico.

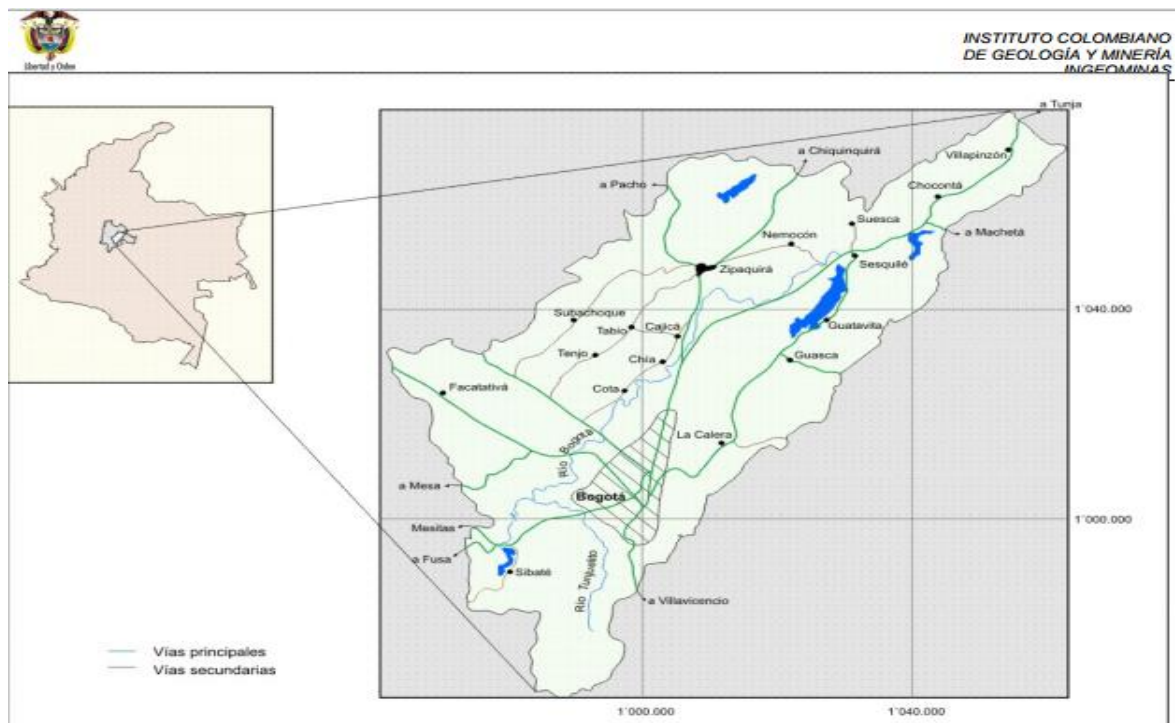


Figura 18. Localización de la sabana de bogota y vías principales.

Fuente: pagina web; http://choconta.files.wordpress.com/2007/12/informe_geologia_sabana_bta.pdf

Se escogió la nomenclatura que cumpliera los requerimientos mínimos de la Guía Estratigráfica Internacional (1994): antigüedad, difusión y uso ampliamente reconocidos y aceptados. La nomenclatura para la secuencia del Cretáceo Superior



(Cenomaniano hasta el Santoniano), difiere entre el oriente y el occidente de la cordillera (Figura 4) en este intervalo la nomenclatura que se utiliza al Oriente corresponde a la Formación Chipaque en el sentido de Renzoni (1962) y al Occidente a las Formaciones Simijaca, La Frontera y Conejo definidas en la región de Chiquinquirá y Villa de Leyva (Etayo, 1968 y 1979).

Mientras para las unidades de edad Campaniano y Maastrichtiano, la nomenclatura utilizada son las formaciones que conforman el Grupo Guadalupe: Arenisca Dura, Plaeners y Labor-Tierna que fueron definidas formalmente por Pérez & Salazar (1978), al Oriente de Bogotá y se aplicará para toda el área (Tabla 2).

Sin embargo, en la parte norte-central para las rocas correspondientes al Campaniano Inferior, se presentan dos litologías diferentes, entre las Formaciones Conejo y Plaeners aflora una unidad de composición silíceas que aunque en posición corresponde con la Formación Arenisca Dura, litológicamente es diferente y es llamada en este trabajo Lidita Superior en el sentido de De Porta (1965), se utiliza esta nomenclatura por comparación cronoestratigráfica y litológica con las unidades del Valle Superior del Magdalena (Montoya & Reyes, 2003).

Para las unidades litoestratigráficas paleógenas y neógenas, la nomenclatura que se adopta ha sido ampliamente utilizada en la Sabana de Bogotá y alrededores (Tabla 2), como son las Formaciones Guaduas, Cacho, Bogotá, Regadera, Usme y Tilotá. Para el Cuaternario se usan denominaciones que tienen que ver con el tipo de depósito y con la nomenclatura de Helmes y Van der Hammen (1995).



2.2. DEPÓSITOS DE TIPO ALUVIAL Y LAGUNAR.

Dentro de este grupo se presentan depósitos relacionados con el relleno de la Sabana de Bogotá mediante la acumulación de sedimentos por ríos y lagunas; se diferencian las siguientes formaciones Subachoque, Río Tunjuelito, Sabana y Chía.

2.2.1. Formación Tilatá (N1t).

Scheibe (1933), dio el nombre de piso de Tilatá a un conjunto de areniscas de grano grueso, lecho-cascajosos con clastos de cuarzo y de “plaeners” que afloran en la Hacienda Tilatá en la represa del Sisga. Hubach (1957) la elevó al rango de Formación y la estudió en lo que llamó cuenca de Chocontá – Villapinzón.

Julivert (1961) en el estudio de la Sabana de Bogotá, llama Formación Tilatá a una terraza alta con sedimentos lacustres y para Helmens & Van der Hammen (1995), la Formación Tilatá esta subdivida en los miembros Tequendama, Tibagota (Tilatá inferior) y Guasca (Tilatá Superior).

En el área de trabajo se designa Formación Tilatá a los sedimentos aflorantes en el sinclinal de Sisga que recubren discordantemente a las unidades cretáceas (Formaciones Plaeners, Labor-Tierna) y paleógenas (Formaciones Guaduas, Cacho, Bogotá y Regadera) y en el sinclinal de Subachoque donde recubre rocas de la Formación Bogotá.

Morfológicamente la Formación Tilatá muestra terrazas alomadas de varios kilómetros de extensión en forma de abanicos explayados con pendientes suaves e inclinadas; como las observadas en la vía principal Bogotá – Tunja y que corresponden a arenas de grano fino o forma colinas redondeadas a veces alargadas, las cuales están conformadas por gravas y arenas.

El origen de estos depósitos esta asociado con la existencia de abanicos y planicies aluviales antiguas muy disectados y localmente tectonizados (Carvajal et al., 2005).



2.2.2. Formación río Tunjuelito (Q1tu).

Helmes & Van der Hammen (1995), llaman formación río Tunjuelito al depósito constituido por sedimentos de grano grueso a lo largo de los ríos que cruzan la Sabana de Bogotá, están constituidos por gravas intercaladas de arenas, arcillas y turbas y que están cubiertas por sedimentos de la Formación Chía. Esta formación aflora en el Valle de Guasca, en la zona del río Tunjuelito y en cercanías a la cabecera del municipio de Cogua.

Para Carvajal et al. (2005), estos depósitos son de origen fluvial, forman abanicos aluviales explayados y aterrizados con suaves pendientes. Para (Helmes & Van der Hammen, 1995), esta formación esta presente en varios niveles de terraza fluviales y son el resultado de depósitos en los valles marginales de la cuenca de la Sabana en donde se depositaron sedimentos arenosos; las gravas son depositadas en los canales a lo largo de los ríos, luego hubo periodos donde se dio sedimentación de material fino desde el centro de la cuenca a estos valles y se depositan arcillas y turbas.

2.2.3. Litología.

Para Helmes & Van der Hammen (1995), esta formación esta caracterizada por secuencias de gravas con intercalaciones de arenas arcillosas, arcillas, arcillas orgánicas y arcillas turbosas; las gravas pueden mostrar gradación, los cantos son redondeados, con diámetros hasta de 40 cm. En ciertas localidades los sedimentos gravosos pueden tener espesores de hasta 80 m (río Tunjuelito).

2.2.4. Posición estratigráfica y edad

Estos sedimentos se han encontrado sobre rocas de la formación Marichuela en el río Tunjuelito y son recubiertas por una delgada capa de sedimentos finos de la formación Chía (Helmes & Van der Hammen, 1995). La edad asignada para este depósito es determinada por datos palinológicos y ^{14}C y le asignan una edad Pleistoceno para la parte mas superior.

Sin embargo Van del Hammen (2003), considera que toda la Formación río Tunjuelito cubre todo el Pleistoceno.



2.2.5. Formación Chía (Q2ch).

Helmes & Van der Hammen (1995), denominan formación Chía a los depósitos constituidos por sedimentos fluviales de grano fino que afloran a lo largo de los ríos principales que generalmente están por debajo de las llanuras de inundación de los ríos.

2.2.6. Litología.

El espesor máximo es de 5 m, está constituido por arcillas, en ocasiones pueden ser moteadas (grises y naranja) como se observa en el sector de Chía y localmente pueden contener limos y en áreas fangosas, arcillas orgánicas diatomíticas (Helmes & Van der Hammen, 1995).

Para Carvajal et a (2005), estos depósitos forman terrazas fluviales por erosión, son planas, de suave pendiente y son talladas por la acción de las corrientes fluviales actuales.

2.2.7. Posición estratigráfica y edad.

La formación Chía suprayace sedimentos de la formación Río Tunjuelito o formación Sabana; los datos de 14 C, arrojan edades del holoceno y hasta de 16.000 años (Van der Hammen, 2005).

2.2.8. Sinclinal de Checua.

Denominación usada en la cartografía del cuadrángulo K11, para la estructura sinclinal localizada entre las localidades de Zipaquirá y Lenguazaque (Figura 33) y que hacia el norte continúa en la plancha 190 con el nombre de Guachetá. Es una estructura asimétrica, con el flanco oriental más inclinado y en ocasiones invertido por efecto de la Falla de Cucunubá. Hacia el Sur, el sinclinal de Checua muestra algunos plegamientos menores y es cubierto por depósitos cuaternarios de la Sabana de Bogotá. El núcleo está en rocas de la

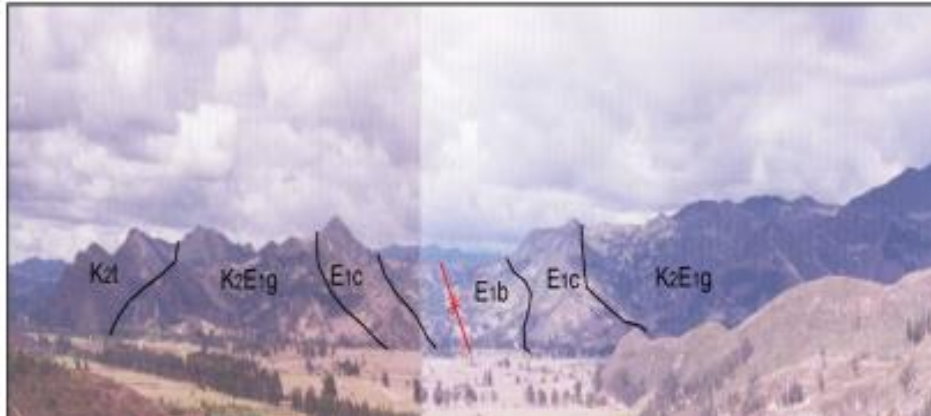


Figura 19. Sinclinal de Checua en la localidad de Cucunubá.

Fuente: pagina web; http://choconta.files.wordpress.com/2007/12/informe_geologia_sabana_bta.pdf

Formación Bogotá y en los flancos las Formaciones Cacho y Guaduas. Regionalmente se puede pensar en su continuidad hacia el sur de la Sabana entre la serranía de Chía-Cota y los cerros orientales de Bogotá y de no existir fallas con desplazamientos importantes fosilizadas en el centro de la Sabana podría tener una conexión con el sinclinal de Usme.



3.2.3 Falla El Porvenir

Nombre tomado de Velandia & Bermoudes (2002), para referirse a la estructura que es la continuación por debajo de los depósitos cuaternarios de la falla que bordea por el occidente a la serranía de Chía – Cota y que se extiende hacia el norte hasta Zipaquirá.

Es una falla inversa con vergencia al occidente, en su parte sur se localiza debajo de depósitos cuaternarios, pero es la responsable del levantamiento de la serranía de Chía colocando la Formación Conejo al nivel de los depósitos cuaternarios. En el sector norte desde la carretera Tabio-Cajicá, hacia Zipaquirá, su trazo entra a afectar rocas de las formaciones Dura, Plaeners y Labor-Tierna, esta última cabalga sobre la Formación Guaduas, en este sentido su desplazamiento va siendo menos importante y en Zipaquirá queda involucrada en el complejo bloque fallado que existe a causa del diapirismo de sal.

3.2.10 Sinclinal de Río Frío

Nombre utilizado en las cartografías del cuadrángulo K11 y plancha 227. Está localizado al Noroccidente de la Sabana y su eje con rumbo N-S a N400 E, cruza al oriente de las localidades de Tabio y Tenjo. Tanto al Sur como al Norte es una estructura amplia con el núcleo en rocas de la Formación Bogotá y con depósitos fluvio-glaciares y de coluvión; en la parte central se angosta considerablemente por las entrantes que hacen las unidades cretácicas a través de las fallas el Porvenir y Chital. Al sur de Tenjo su continuidad se considera asociada a la terminación de la serranía de Tabio-Tenjo (flanco occidental) y la serranía de Chía-Cota (flanco oriental)



CAPITULO III. GENERALIDADES Y USO DE EXPLOSIVOS

3. HISTORIA DE LOS EXPLOSIVOS

El primer explosivo conocido fue la pólvora, también llamada "pólvora negra". Está en uso desde el siglo XIII, cuando, según la historia, Marco Polo la conoció en su viaje a China. La Nitrocelulosa y la Nitroglicerina, ambas descubiertas en 1846, fueron los primeros explosivos modernos. Desde entonces, los nitratos, nitrocompuestos, fulminatos y ácidos (compuestos que contienen nitrógeno del grupo N3, derivados del ácido hidrazoico (NH₃) han sido los principales compuestos explosivos utilizados solitariamente o mezclados con comburentes y otros agentes. El trióxido de xenón, fue el primer óxido explosivo desarrollado en 1962.



Figura 20. Historia de los explosivos

Fuente Grupo MARTE ESING

Si bien no hay datos contundentes del descubrimiento de la pólvora negra, se le acredita este importante descubrimiento a los chinos en el siglo IX. Los primeros en emplearla fueron los emperadores de la dinastía Song, los cuales la utilizaron en las celebraciones como fuegos pirotécnicos.

La pólvora fue el primer explosivo conocido en Europa; su fórmula aparece ya en el siglo XII, en los escritos del monje inglés Roger Bacon quien fue el que realizara los primeros experimentos de que se tenga noticia, mezcla compuesta



aproximadamente por un 73 a 77% de salitre; un 10 a 15% de carbón vegetal y un 8 a 15% de azufre.

En 1313, algunos inventores atribuyen el descubrimiento de la Pólvora negra al señor Berthold Schwartz monje Alemán; quien le dio un uso militar, cuyo descubrimiento le costó la vida y quien fue el primero que se sirvió de la pólvora negra como elemento propulsor, los ingleses la utilizaron para lanzar piedras contra los franceses en la guerra de Crecy¹ en 1346.

En 1525, los franceses desarrollaron un nuevo procedimiento que consistía en mezclar los tres componentes (reducidos a polvo) mojados (método muy seguro que aún se utiliza hoy en día), formando obleas y dejando que se secan posteriormente, luego se desmenuzaban y se pasaban por un tamiz, obteniendo la pólvora en distintos tipos de gránulos, que se destinaban a diferentes usos, pistolas, mosquetes, cañones y la más fina, denominada polvorín, para el cebado de cazoletas de todas ellas, este polvorín tenía que estar formado por los granos más finos y no por el polvo que se desprendiera, ya que éste solo era polvo de carbón y no de los tres componentes que forman la pólvora.

Durante más de tres siglos la pólvora negra se utilizó con fines militares. En 1627 se la comenzó a utilizar con fines mineros, generalizándose rápidamente en el trabajo con barrenos en la construcción de caminos y túneles.

En 1659, J.R. Glauber experimentó con salitre y preparó por primera vez el nitrato de amonio (NH_4NO_3). Con respecto al salitre y la elaboración de la pólvora, se dice que el caliche (tipo de sal), probablemente, se empleó antes de 1650 para la fabricación de fuegos artificiales y cohetería.

En 1788, el químico francés Berthollet concibió la idea de reemplazar el salitre por el recién descubierto clorato de potasio, pero la idea terminó en un rotundo fracaso por la imposibilidad de controlar la reacción. Una nueva investigación le permitió descubrir la plata negra o plata fulminante sustancia revolucionaria por su alto poder explosivo; compuesto de asombrosa inestabilidad y potencia, no tuvo aplicación práctica como explosivo.

En 1846, se considera el año de oro de los explosivos, ya que en este año se descubren las propiedades de la nitrocelulosa y por otra parte el químico Italiano Ascansio Sobrero descubrió la nitroglicerina de fórmula $\text{C}_3\text{H}_5(\text{NO}_3)_3$, derivado de la glicerina mediante el tratamiento con una mezcla de ácidos sulfúrico y nítrico,

¹Guerra de crecy: confrontación bélica entre feudales franceses e ingleses en el año 1346.



explosivo potente pero sensible. Tuvieron que pasar algunas décadas para lograr que estos altos explosivos lograsen ser manejables y pudiesen almacenarse con relativa confiabilidad.

El uso de la dinamita hizo que muchas tareas pertenecientes al mundo de la construcción y la minería progresaran a una velocidad sin precedentes en la historia, permitió la explotación de minas y la construcción de túneles, carreteras, canales, puertos y presas.

En 1867, inventó una cápsula detonante a base de fulminato de mercurio para provocar con seguridad la explosión de la dinamita, del algodón pólvora y de otros explosivos.

En 1875, continuó con la creación de la gelatina explosiva, masa viscosa, elástica, en la cual la nitroglicerina está retenida por un 7-8% de algodón pólvora soluble, el algodón colodión. Con esta asociación de dos explosivos en un tercero todavía más potente, la dinamita de base activa o dinamita 100%, llegó Nóbel a la composición ideal.

En 1882, los Suecos Johnson y Norvin obtuvieron la dinamita gelatina, amasando nitrato de amonio con 60 a 70% de nitroglicerina los que se llamaron explosivos de seguridad. Los trabajos del francés Vieille, hacia 1885, fueron en este sentido para lograr una pólvora laminar de nitrocelulosa, que posteriormente se hizo famosa con el nombre de pólvora B.

Al año siguiente obtenían en Londres los químicos Abel y Dewar la más potente de todas las pólvoras de cañón, la cordita, formada por nitroglicerina y algodón pólvora (nitrocelulosa) de alta nitración. Una tercera pólvora de nitroglicerina de múltiples aplicaciones, exenta de disolvente o pólvora gelatinizada en seco desarrollaron los alemanes antes de la 1er. Guerra Mundial. Otro avance de importancia fue realizado también por los alemanes para la 2ª. Guerra Mundial con el uso de la pólvora a base de dinitrato diglicólico.

En 1900, se descubre en Alemania el primer explosivo sólido llamado 2,4,6-trinitrotolueno o TNT, el cual fue obtenido del aceite de carbón.

En 1945, segunda guerra mundial, empleo de los explosivos nucleares.

En 1955, se descubre el ANFO (Amonium Nitrato más Ful Oil).

A partir del siglo XX y los impresionantes avances científicos y tecnológicos realizados hasta nuestros días, el mundo de los explosivos también se vio involucrado. Las dinamitas han cedido terreno a los modernos explosivos como lo son los hidrogeles, slurries y emulsiones.



En la actualidad, el control y la precisión que se ha obtenido de los mismos, permite que sean aplicados con mayor seguridad y que se aumente su eficiencia y productividad.

GENERALIDADES

3.1. DEFINICIÓN DE EXPLOSIVO.

Se denomina explosivo a todo compuesto o mezcla de sustancias químicas con capacidades para transformarse por medio de estímulos de presión o calor, en productos gaseosos y condensados. El volumen inicial ocupado por el explosivo, se convierte en una masa gaseosa que alcanza altas temperaturas y como consecuencia muy altas presiones. Figura 21. Sustancia explosiva anfo.



Figura 21. Sustancia explosiva anfo.

Fuente:Manual de explosivos ESING

Estos fenómenos son aprovechados para realizar trabajos mecánicos aplicados en el rompimiento de materiales pétreos, lo que constituye la “técnica de voladura de roca”. Casi todos los materiales explosivos contienen oxígeno (cloratos y nitratos), solo excepcionalmente no lo contienen (yoduro de nitrógeno, fulminato de mercurio). Otros son mezclas de sustancias oxidantes con materiales fácilmente combustibles (azufre, carbón, etc.).



Los elementos se encuentran mucho más próximos ya que forman parte de la misma molécula explosiva. Por ejemplo el algodón fulminante, la nitroglicerina, el fulminato de mercurio, el ácido pícrico.

Por artefactos explosivos se entenderá todas las municiones convencionales que contengan explosivos, con excepción de las minas, las armas, trampa y otros artefactos que se definen en el Protocolo II de la Convención enmendado el 3 de mayo de 1996. (CCW.P.V).

Es el escape súbito y repentino de gases, acompañado de altas temperaturas, violentas sacudidas y ruidos estrepitosos. Los productos gaseosos originados se dilatan rápidamente, comprimiendo el aire circundante y formando una onda explosiva. La presión del gas se mueve hacia fuera como un fuerte viento detrás del frente de la onda explosiva llamado "frente de choque. Cuando se produce una explosión, se forman gases altamente comprimidos y que alcanzan altas temperaturas y crean presiones de alrededor de 700 toneladas por pulgada cuadrada (635.040 Kg. por cm^2) en la atmósfera que rodea el punto de la explosión. Estos gases en expansión se propagan hacia el exterior con velocidades que llegan a alcanzar hasta 13.000 millas por hora (20.920,9 kilómetros por hora), comprimiendo el aire circundante que forma la onda de presión explosiva.

La onda de presión explosiva se propaga hacia fuera en una formación esférica como la ola de un maremoto como la ola de un maremoto gigante, golpeando y destrozando todo objeto que encuentra a su paso. Cuanto encuentra a su paso. Cuanto mayor es la distancia que recorre la onda de presión desde el punto de detonación, desde el punto de detonación, tanto mayor es su desaceleración hasta que llega a convertirse en una onda convertirse en una onda sonora y luego a disiparse completamente. Esta onda se llama "onda de presión llama "onda de presión explosiva" y forma lo que se conoce como "frente de choque²". La tasa de disipación de choque²". La tasa de disipación de los efectos explosivos es proporcional a la raíz cúbica de la distancia entre cúbica de la distancia entre la explosión y el objetivo. La presión de la detonación se decae o se disipa se decae o se disipa rápidamente y la segunda fase es prácticamente inmediata o casi conjunta con la fase de casi conjunta con la fase de la detonación, esta es la fase de la propagación de la onda del choque y de tensión. onda del choque y de tensión. Cuando el frente de onda se mueve encontrará discontinuidades e interfaces y discontinuidades e interfaces y en estos puntos, una cierta energía se transfiere a través y algo se refleja detrás.

²Frente de choque: dirección en que viajan las diferentes ondas de choque.



través y algo se refleja detrás.

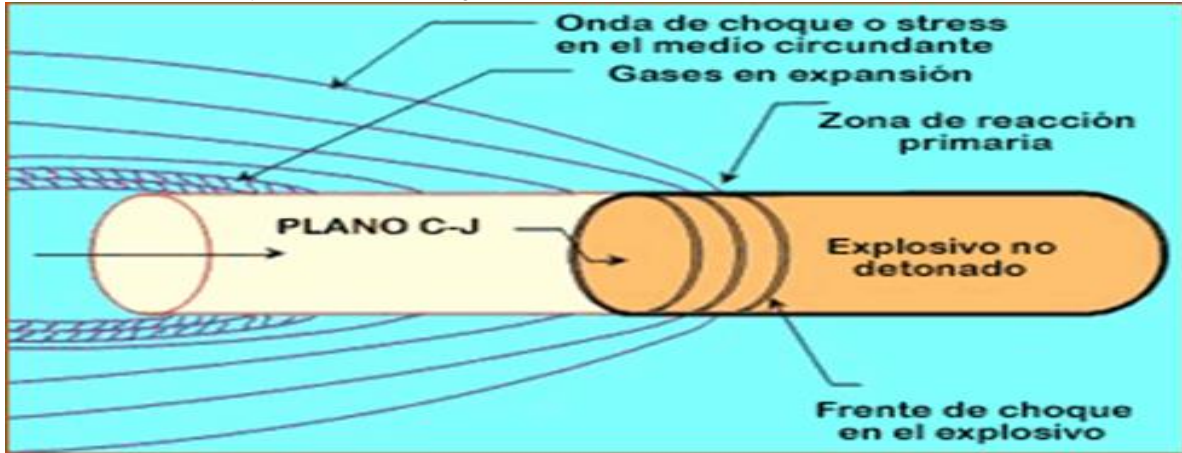


Figura 22. Funcionamiento de los explosivos.

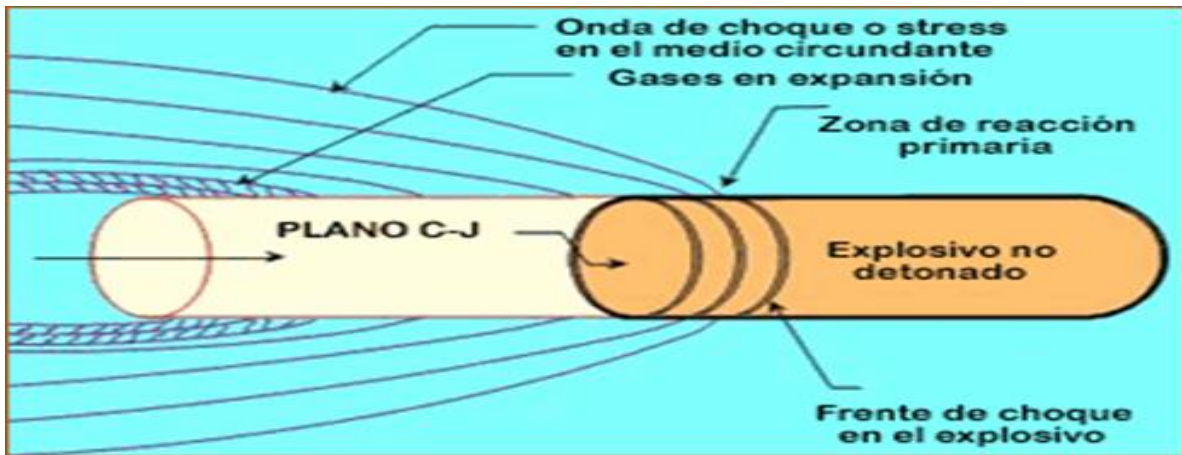


Figura 22. Funcionamiento de los explosivos.

Fuente: Manual de explosivos ESING

Durante y después de la detonación, la onda de tensión se propaga y la alta temperatura y presión de los gases se extienden por las grietas radiales y por cualquier fractura o empalme de la discontinuidad, la energía del explosivo tomará siempre la trayectoria de menos resistencia.

3.2. DEFINICIÓN DE DETONACIÓN



Es el proceso fisicoquímico caracterizado por su gran velocidad de reacción y formación de gran cantidad de productos gaseosos, a elevadas temperaturas que adquieren una gran fuerza expansiva.

En la detonación la velocidad de las primeras moléculas gasificadas es tan grande que no ceden su calor por conductividad a la zona inalterada de la carga, sino que la transmiten por choque deformándola y produciendo su calentamiento y explosión adiabática con generación de nuevos gases. El proceso se repite con un movimiento ondulatorio que afecta a toda la masa explosiva (onda de choque).

3.3. DEFINICIÓN DE DEFLAGRACIÓN

Es el proceso exotérmico en que la transmisión de la reacción de descomposición se logra en la conductividad térmica. La deflagración es el cambio que se origina por la acción y presencia del fuego sobre determinadas sustancias las cuales se “queman”.

Este cambio físico químico originado se da con una velocidad en un periodo no mayor a los 2000 m/seg. Ejemplo el quemado de sustancias explosivas como las pólvoras.

3.4. DEFINICIÓN DE COMBUSTIÓN

Combustión, proceso de oxidación rápida de una sustancia, acompañado de un aumento de calor y frecuentemente de luz. En el caso de los combustibles comunes, el proceso consiste en una reacción química con el oxígeno de la atmósfera que lleva a la formación de dióxido de carbono, monóxido de carbono y agua, junto con otros productos como dióxido de azufre, que proceden de los componentes menores del combustible. El término combustión, también engloba el concepto de oxidación en sentido amplio. El agente oxidante puede ser ácido nítrico, ciertos percloratos e incluso cloro o flúor.

La mayoría de los procesos de combustión liberan energía (casi siempre en forma de calor), que se aprovecha en los procesos industriales para obtener fuerza motriz o para la iluminación y calefacción domésticas. La combustión también resulta útil para obtener determinados productos oxidados, como en el caso de la combustión



de azufre para formar dióxido de azufre y ácido sulfúrico como producto final. Otro uso corriente de la combustión es la eliminación de residuos.

La energía liberada durante la combustión provoca una subida de temperatura en los productos. La temperatura alcanzada dependerá de la velocidad de liberación y disipación de energía, así como de la cantidad de productos de combustión. El aire es la fuente de oxígeno más barata, pero el nitrógeno, al constituir tres cuartos del aire en volumen, es el principal componente de los productos de combustión, con un aumento de temperatura considerablemente inferior que en el caso de la combustión con oxígeno puro. Teóricamente, en toda combustión sólo se precisa añadir una mínima porción de aire al combustible para completar el proceso. Sin embargo, con una mayor cantidad de aire, la combustión se efectúa con mayor eficacia y aprovechamiento de la energía liberada. Por otra parte, un exceso de aire reducirá la temperatura final y la cantidad de energía liberada. En consecuencia habrá de establecerse la relación aire-combustible en función de la temperatura y del grado de combustiones deseadas.

Para lograr altas temperaturas se puede utilizar aire rico en oxígeno, o incluso oxígeno puro, como en el caso de la soldadura oxiacetilénica. El grado de combustión se puede aumentar partiendo el material combustible para aumentar su superficie y de este modo incrementar su velocidad de reacción. También se consigue dicho aumento añadiendo más aire para proporcionar más oxígeno al combustible. Cuando se necesita liberar energía de modo instantáneo, como en el caso de los cohetes, se puede incorporar el oxidante directamente al combustible durante su elaboración.

3.5. CLASES DE EXPLOSIONES

3.6. MECÁNICA

Una explosión mecánica consiste en la conversión gradual de una sustancia, como el agua, en gas o vapor. La presión creciente del vapor dentro de un recipiente sobrepasara la resistencia estructural del recipiente como, por ejemplo, cuando explota una caldera de vapor.

3.7. QUÍMICA

Una explosión química es la conversión casi instantánea de una sustancia sólida, líquida o gaseosa en un gas de mucho mayor volumen. Todos los explosivos fabricados, salvo los nucleares, son explosivos químicos.



3.8. NUCLEAR

Una explosión nuclear puede ser provocada por fisión³, o división del núcleo de un átomo, o por fusión, o sea, la unión mediante considerable presión de los núcleos de los átomos. La explosión subsiguiente a la detonación de una bomba atómica tiene efectos catastróficos para la zona circundante. Los edificios son arrasados por la intensidad de la onda expansiva y por la gran cantidad de calor liberada. La característica nube con forma de hongo que genera, despiden restos y material radiactivo hasta la atmósfera, por lo que origina daños biológicos a miles de kilómetros del lugar de la explosión.

3.9. EFECTOS EN LA EXPLOSIÓN

El cambio de una sustancia explosiva a un estado gaseoso se considera como una explosión, la cual en el momento en que se desarrolla en su máxima expresión hace que se originen cambios físicos que alteran el estado original de los cuerpos en el medio. Debemos de tener en cuenta que el efecto de las explosiones depende básicamente de la cantidad y tipo de sustancia explosiva que haya reaccionado, del mayor efecto de la explosión depende que se den ciertos efectos físicos que trataremos a continuación.

³Fisión del átomo: se da en el momento en que se borbandea el núcleo del átomo con neutrones lo cual hace que se divida el átomo liberando gran cantidad de neutrones.



3.10. SOBREPRESIÓN



Figura 23. Efecto de sobrepresión

Fuente: Nuclearpowered-9.tripod

Una sustancia en el momento en que se transforma y produce una explosión, esta a su vez origina un aumento de presión con respecto a la presión atmosférica normal. Se puede afirmar que un efecto de sobrepresión no es más que la acumulación concentrada de la presión normal existente en el medio ambiente que por medio de una explosión, hace que por milésimas de segundos esta presión se concentre en determinados lugares, comprimiendo los elementos y materias existentes esos sitios, causándoles daños físicos. Ver Figura 113 - Efecto de sobrepresión

Las ondas de sonido disminuyen su intensidad con la distancia de acuerdo con ciertas leyes de atenuación. Las variables de interés en este caso son la sobrepresión del aire S_p , que es equivalente al ruido generado por las voladuras, la distancia al punto de detonación D_s y la carga máxima de explosivo por unidad de retardo Q . La ley de atenuación de la onda de sonido puede ser calculada para cada caso en particular si se dispone de mediciones del ruido generado por un cierto número de voladuras, a diferentes distancias. En el caso en que no se disponga de ésta información, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$S_p = 82 (D_s/Q^{1/3})^{-1.2}$$



Donde:

Sp: Sobrepresión en (lb/in²)

Ds: Distancia al punto de la voladura en (ft)

Q: Carga Operante en (lb)

La expresión anterior fue tomada del Manual para el uso de Explosivos de Du Pont S.A. (1983) y gobierna la atenuación de voladuras no confinadas.



3.11. TÉRMICO (CALOR DE EXPLOSIÓN)

El efecto térmico es la producción de calor causado por la explosión. El efecto térmico varía en función del explosivo detonado, por lo general un explosivo lento tendrá un efecto incendiario de mayor duración que un alto explosivo. Sin embargo, un alto explosivo producirá una temperatura mucho mayor. A menos que los materiales en cuestión sean muy combustibles, el efecto térmico será normalmente insignificante. Los efectos térmicos generalmente causan menos daño que los efectos explosivos, salvo cuando se emplean mezclas de combustibles hidrocarbúricos, aire y los explosivos lentos son de 4 a 28 veces mayor que el calor producido por la detonación de TNT.

Es el calor desarrollado en la reacción de detonación, que es igual a la diferencia entre la suma de los calores de formación de los productos de la explosión y la suma de los calores de formación de los componentes del explosivo, se mide en KCal/Kg. y se designa por Q . Como los calores de formación se determinan a 20°C y a la presión atmosférica, este calor de explosión es a presión constante, pero en las condiciones de explosión el fenómeno ocurre a volumen constante, por lo tanto, es necesario hacer una corrección para obtener el calor desarrollado a volumen constante; si entre los productos de la explosión hay algún sólido, habrá otra corrección procedente del calor que absorbe para la fusión correspondiente.



3.12. FRAGMENTACIÓN

Una bomba de fragmentación ordinaria se construye colocando un explosivo dentro de un recipiente frágil como, por ejemplo, un tubo de metal. El explosivo detonado rompe entonces el recipiente y produce fragmentos que son lanzados a gran velocidad dependiendo del tipo de explosivo utilizado. Estos fragmentos se propagaran volando en línea recta y pueden causar daños o la muerte a grandes distancias.

Se prohíbe el uso de cualquier arma cuyo efecto principal sea lesionar mediante fragmentos no localizables por rayos x en el cuerpo humano. G. CW. P.I.

3.13. EFECTO DE CONCENTRACIÓN

Las ondas de presión pueden torcerse, deformarse y concentrarse rebotando en superficies reflectoras (por ejemplo, barreras o capas térmicas atmosféricas) para causar un refuerzo de la presión explosiva. Tales reacciones pueden hacer que las ondas de presión explosivas se propaguen a distancias extraordinarias. Las inversiones de la temperatura atmosférica de baja altura pueden ocasionar un efecto de concentración importante y una desviación de los vientos fuertes pueden provocar una concentración a favor del viento.

3.14. ONDA DE CHOQUE

La rápida expansión de los materiales expulsados por la explosión produce un impulso de altas presiones, también llamado onda de choque, que se mueve desde el lugar de la detonación hacia fuera con mucha rapidez.

La rápida expansión de la bola de fuego genera una onda de choque como cualquier explosión, pero de una potencia muy superior, ya que puede aplastar o barrer elementos dañándolos muy seriamente o destruyéndolos por completo, ya que más que "empujar" por su duración lo que hace es estrujar.



3.15. ONDA SONORA

La onda sonora es un pequeño exceso de presión que transmite con una velocidad solo dependiente de la naturaleza del medio en que se propaga. En una mezcla de gas oxhídrico dicha velocidad de la onda sonora sería de 514 m/seg, a cero grados centígrados.

3.16. PRESIÓN IMPELENTE

La onda de presión impelente se forma en el instante de la detonación y comprime la atmósfera que la rodea. Este aire comprimido se conoce como el frente de choque y es el frente de la onda de presión impelente. Esta onda es el más potente y destructivo de los efectos producidos por la detonación de los altos explosivos. Este efecto generado por la onda explosiva desplaza todo elemento que se encuentre ubicado cerca de la detonación del explosivo, dependiendo del poder del explosivo podrá romperlo o simplemente cumplirá con la función de desplazarlo del sitio.

3.17. PRESIÓN DEPRESIVA

La onda de presión depresiva sigue a la onda impelente y forma un vacío parcial, lo que hace que el aire comprimido y desplazado invierta su marcha y se precipite hacia llenar el vacío creado por la onda de presión impelente. Esta precipitación hacia dentro del aire desplazado moverá también los objetos que encuentre en su camino hacia el punto de detonación. Aunque la onda depresiva o de presión es menos potente, dura mucho más que la onda impelente.

3.18. PRESIÓN INCIDENTE

La presión incidente es la presión que viaja en ángulos rectos (90 grados) en dirección de la trayectoria del frente de choque. Una persona que se encuentre de pie detrás de una barrera en la línea de la trayectoria del frente de choque de la explosión experimentaría una presión incidente.



3.19. PRESIÓN DINÁMICA

Una presión dinámica es el resultado de la velocidad de fuertes vientos y la mayor densidad del aire detrás del frente de choque. Aunque esto suele ser insignificante en relación con las fuertes sobrepresiones producidas por la onda de presión explosiva, las personas expuestas al frente de choque experimentarían también la presión dinámica además de la presión incidente.

3.20. PRESIÓN REFLEJADA

Cuando la onda de presión explosiva golpea cualquier superficie en su trayectoria, se produce una amplificación rápida de la presión como resultado de la acumulación y la reflexión de la onda al rebotar en la superficie. Esta reflexión se produce, aunque la superficie expuesta fallara o se derrumbara. La onda reflejada se aleja de la superficie objetivo y se disipa a la misma velocidad proporcional a la raíz cuadrada de la distancia recorrida desde la superficie reflejada. Cualquiera que sea el ángulo de las presiones incidentes, la presión se refleja siempre en ángulos rectos con la superficie expuesta.

La superficie reflejada no determina la amplificación de la onda reflejada. Una pared de concreto reforzado y una ventana de cristal producirán la misma reflexión de la misma onda incidente. Esto se debe a que la onda de choque explosiva viaja a una velocidad más rápida que el tiempo de respuesta de la superficie reflectora. Por consiguiente, la onda se ha reflejado y se ha disipado antes de que la estructura expuesta pueda responder al incidente experimentado.

3.21. EFECTOS ATMOSFÉRICOS Y TERRESTRES

Cuando se detona un explosivo en la superficie del suelo, parte de la energía explosiva penetra la tierra como una onda de choque terrestre y parte se refleja volviendo a pasar a la atmósfera. La onda reflejada se combina y refuerza la onda incidente en la atmósfera.

En situaciones reales, el suelo disipará parte de la energía en forma de caracterización y sacudida terrestre. El grado de disipación variará en función del tipo de superficie de que se trate. Si se produce una caracterización importante, la energía explosiva de aire equivalente será 1,8 veces la cantidad explotada en la superficie. La pendiente de la superficie terrestre puede influir en el efecto de una onda explosiva. Las pendientes que se inclinan gradualmente pueden ocasionar un



aumento de la onda explosiva formando una onda Mach⁴, a medida que la pendiente refleja las ondas de vuelta a la onda incidente. Las pendientes inclinadas producen una expansión y por lo tanto, debilitan la onda explosiva.

Otros factores que influyen en los efectos de las ondas explosivas son las inversiones de temperatura, los cambios de la temperatura ambiente y de la presión, las estaciones, la altitud, la humedad relativa, la niebla, la lluvia y la irregularidad de las superficies del suelo. Figura 24. Destrucción por efectos de la explosión. Figura 24. Destrucción por efectos de la explosión.



Figura 24. Destrucción por efectos de la explosión.

FUENTE: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. Pagina web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

⁴ONDA MACH: Es la velocidad con que viaja la onda explosiva respecto a la atmósfera dividida entre la velocidad del sonido en el mismo medio y con las mismas condiciones.



3.22. EFECTOS BIOLÓGICOS

La capacidad del cuerpo humano para soportar los efectos de la presión explosiva varía en función de la duración, la cantidad de presión y la orientación del cuerpo respecto a la dirección de la onda explosiva (de pie o en posición boca abajo).

El siguiente cuadro indica los efectos explosivos de corta duración sobre personas no protegidas, donde LPC5 es libras por pulgadas cuadradas:

En el presente cuadro se puede evidenciar el efecto ocasionado por una determinada cantidad de sustancia explosiva la cual dependiendo del tipo de explosivo detonado y la distancia entre la carga y una persona puede causar daños biológicos que van desde ruptura de tímpano hasta la muerte.

PRESIÓN (lpc/kpa)	EFFECTOS
5/34	Ligera posibilidad de ruptura del tímpano
15/103	50% de posibilidad de ruptura del tímpano
30 - 40/207 - 275	Ligera posibilidad de daños a los pulmones
80/550	Daños graves a los pulmones
100 -120/687 - 824	Ligera posibilidad de muerte
130 -180/893 - 1237	50% de posibilidad de muerte
200-250/1374-1717	100% de muerte probable

Tabla 2. Efectos biológicos con la presión explosiva.

El efecto que causa la sustancia explosiva en el instante de hacer explosión se encuentra establecida por el poder explosivo que genera el TNT.

Se elegirán y se utilizarán los medios de combate para evitar que haya víctimas y daños civiles, reducir en todo caso el número de víctimas y los daños inevitables. G.P.I, 57.

⁵IPC: Libras de explosivo por pulgadas cuadradas. es la medida que hacer relación al poder efectivo de la explosión de una cantidad de sustancia explosiva, y el efecto causado a determinadas distancias en pulgadas cuadradas.



3.23. NATURALEZA DE LAS EXPLOSIONES

Cuando se produce una explosión, se forman gases que alcanzan un alto grado de temperatura que se desplazan a largas velocidades y crean presiones de alrededor de 700 toneladas por pulgada cuadrada (635.040 Kg. por cm²) en la atmósfera que rodea el punto de la explosión. Estos gases en expansión se propagan hacia fuera a velocidades que llegan a alcanzar hasta 13.000 millas por hora (20.920,9 kilómetros por hora), comprimiendo el aire circundante que forma la onda de presión explosiva. La onda de presión explosiva se propaga hacia a fuera en una formación esférica como la ola de un maremoto gigante, golpeando y destrozando todo objeto que encuentra a su paso. Cuanto mayor es la distancia que recorre la onda de presión desde el punto de detonación, tanto mayor es su desaceleración hasta que llega a convertirse en una onda sonora y luego a disiparse completamente.

Esta onda se llama “onda de presión explosiva” y forma lo que se conoce como “frente de choque”. La tasa de disipación de los efectos explosivos es proporcional a la raíz cúbica de la distancia entre la explosión y el objetivo.

Las vibraciones que generan las voladuras se transmiten desde el lugar de la detonación por el terreno generando dos tipos de onda: "Ondas Internas" y "Ondas superficiales." Igualmente se transmiten en el aire, generando las ondas aéreas.

3.24. ONDAS INTERNAS O DE CUERPO

Las ondas Internas transmiten la deformación elásticamente en el interior del medio y se dividen en ondas compresionales o primarias (P) y ondas de corte o secundarias (S). Las ondas compresionales o longitudinales producen compresión o expansión del medio sin deformación angular y la partícula material vibra en la dirección de propagación de la onda. Son más rápidas que las ondas S y producen cambios de volumen, pero no deforma el material por el que se propagan.

Las ondas de corte o transversales generan un movimiento de partículas perpendicular a la dirección de propagación de la onda. La velocidad de las ondas transversales es mayor que la de las ondas superficiales. El material por el cual se propagan experimenta cambios de forma pero no de volumen.



3.25. ONDAS SUPERFICIALES

Las ondas superficiales son aquellas que se generan y propagan a lo largo de interfases producidas por fuertes variaciones en las propiedades elásticas del medio. Es en la superficie terrestre donde dichas ondas se transmiten con mayor energía, debido al brusco cambio que constituye la interfase tierra-aire. La amplitud de la oscilación de las partículas decrece en éste caso de modo exponencial con la profundidad.

Los dos tipos fundamentales de onda superficial son las ondas Rayleigh y las ondas Love. La onda Love produce vibración de las partículas sólo horizontalmente, en forma transversal a la dirección de la propagación; para su transmisión se requiere la existencia de un medio estratificado con una capa de baja velocidad en la superficie. La onda Rayleigh, en cambio, produce un movimiento elíptico retrógrado de las partículas en el plano vertical, siendo el eje vertical de la elipse, siempre mayor que el horizontal. Su propagación puede darse en medios con o sin estratificación.

3.26. ONDA AÉREA

La onda aérea es la onda de presión que va asociada a la detonación de una carga explosiva, mientras que el ruido es la parte audible e infrasónica del espectro, desde 20 Hz a 20 kHz. Las ondas aéreas son vibraciones en el aire de baja frecuencia, con valores generalmente por debajo de los 20 Hz. De acuerdo con Wiss y Linehan (1978), las fuentes de estas perturbaciones son las siguientes:

- Movimiento del terreno provocado por la explosión.
- Escape de los gases por el barreno al proyectarse el retacado.
- Escape de los gases a través de las grietas creadas en el frente del macizo rocoso.
- Detonación del cordón iniciador al aire libre.
- Desplazamiento del frente del banco al progresar la voladura.
- Colisión entre los fragmentos proyectados.

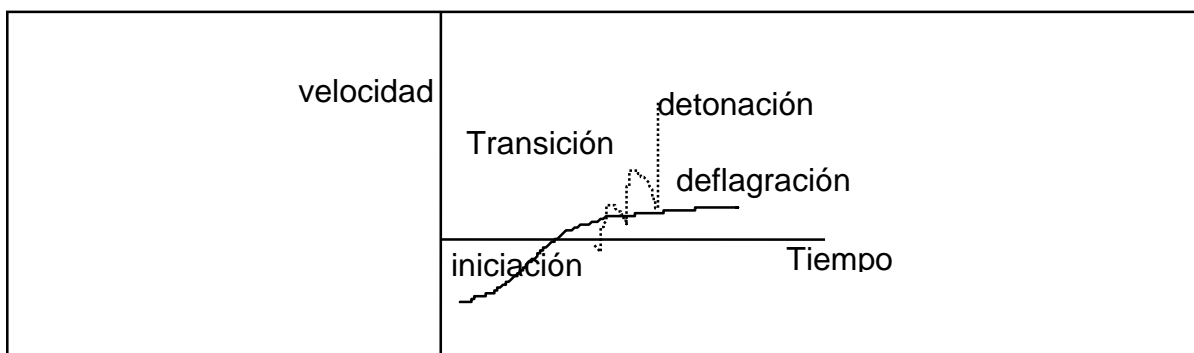


3.27. PROCESO DE DETONACIÓN DE UN EXPLOSIVO.

Una vez que se ha iniciado el explosivo, el primer efecto que se produce es la generación de una onda de choque o presión que se propaga a través de su propia masa. Esta onda es portadora de la energía necesaria para activar las moléculas de la masa del explosivo alrededor del foco inicial energizado, provocando una reacción en cadena.

A la vez que se produce esta onda la masa del explosivo que ha reaccionado produce una gran cantidad de gases a una elevada temperatura. Si esta presión secundaria actúa sobre el resto de la masa sin detonar, su efecto se suma a la onda de presión primaria, pasando de un proceso de deflagración a otro de detonación.

En el caso en que la onda de presión de los gases actúe en sentido contrario a la masa de explosivo sin detonar, se produce un régimen de deflagración lenta, de tal forma que al ir perdiendo energía la onda de detonación primaria llega a ser incapaz de energizar al resto de la masa de explosivo, produciéndose la detención de la detonación.



La detonación consiste en la propagación de una reacción química que se mueve a través de un explosivo a una velocidad superior a la del sonido en dicho material, transformando a éste en nuevas especies químicas.

En la figura, se aprecia que en la cabeza de la reacción viaja un choque puro que inicia la transformación química del explosivo, que tiene lugar a través de la zona de reacción para terminar en el plano llamado de Chapman- Jouget (C-J), donde se admite el equilibrio químico, por lo menos en las detonaciones ideales.



3.28. ENERGÍA LIBERADA DURANTE LA REACCIÓN DE UN EXPLOSIVO

Los tipos de energía que son posibles que se generen en este tipo de reacción son calor, luz, sonido, presión gaseosa y energía de choque. Las 4 primeras son comunes para todos los explosivos deflagrantes y detonantes, mientras que la última sólo la liberan los explosivos rápidos, debido a que la genera una onda de choque.

De todas ellas, sólo las 2 últimas son capaces de efectuar trabajo útil e indirectamente el calor al calentar los gases e incrementar su presión, pero como son diversas las proporciones con que se liberan en los diferentes explosivos, el usuario tiene la posibilidad de seleccionar el más adecuado a una determinada aplicación.

3.29. ENERGÍA DE CHOQUE.

Es una forma de energía cinética generada por la onda de choque, cuya magnitud es función del producto de la velocidad de detonación al cuadrado por la densidad del explosivo, o lo que es lo mismo, de la presión ejercida por la onda detonante que se propaga a través de la columna, denominada presión de detonación.

Es importante hacer hincapié en que la presión detonante generada por un cartucho de explosivo rápido no es igual en todas direcciones, siendo máxima en la dirección que se va desplazando la onda de choque, y por lo tanto en el extremo opuesto al de su iniciación y cerca de cero en sus paredes laterales. Por estas razones, para obtener el máximo efecto fracturador de la presión detonante de una carga explosiva no confinada, es necesario asegurar la máxima área de contacto con el material que se desea quebrar, e iniciarla desde el extremo opuesto a la superficie de contacto explosivo- material.

ENERGÍA GASEOSA.



Generada por el gran incremento de volumen que experimenta un explosivo sólido, líquido o una mezcla de ambos confinado en un pequeño espacio denominado tiro, al reaccionar y transformarse en un gran número de moléculas livianas, en un breve lapso. La presión gaseosa denominada también presión de explosión, depende del número de moléculas livianas liberadas por unidad de peso del explosivo, de la temperatura que alcanzan los gases por la acción del calor desprendido en el proceso, y de la relación de los diámetros del explosivo y del tiro.

3.30. IMPORTANCIA DE LOS EXPLOSIVOS

La utilización de los explosivos en actos rebeldes es una de las facetas más grises de esta mezcla reactiva de productos combustibles y oxidantes. Su utilidad se extiende a áreas tales como la ingeniería civil, la minería, el entretenimiento (fuegos artificiales) y la defensa militar. Esta última es una de las más polémicas ya que uno de los debates más animados se ha generado en torno al comercio y fabricación de las minas terrestres, especialmente las antipersonales.

Variadas organizaciones han puesto en relieve las terribles consecuencias de estas armas que, una vez sembradas, permanecen activas durante décadas, convirtiéndose en un peligro para la población civil y obstaculizando la recuperación económica de la zona afectada. Sus defensores alegan su gran utilidad táctica y sugieren establecer un marco jurídico internacional que regule adecuadamente su uso.

3.31. APLICACIONES COMERCIALES

Desde la aparición de la pólvora negra como primer explosivo, se dio un gran adelanto en la industria de la minería por el uso de explosivos para la explotación de minerales y otros tipos de materiales pétreos, los cuales se hicieron de más fácil extracción por la utilización de materiales explosivos que minimizaron y redujeron el tiempo y esfuerzo que se tenía que hacer antes de la aparición de este tipo de sustancias.

Con el paso de los años los explosivos evolucionaron creando nuevas sustancias que superaban el poder explosivo de la pólvora negra y aumentaban la producción en el trabajo en las diferentes aplicaciones comerciales en que eran empleados, desde entonces el uso de explosivos en el ámbito comercial se ha convertido en pieza fundamental para el desarrollo de todo tipo de trabajos de minería.



3.32. MINERÍA



Figura 25. Uso de explosivos en minería.

Fuente: Editec.ic.

La industria de la minería ha sido la más beneficiada con el uso de los explosivos para realizar trabajos que serían de difícil ejecución sin poner en uso este tipo de sustancias, es importante señalar que el uso de los explosivos en la minería ha reducido de forma consecutiva el tiempo para realizar trabajos de voladura que anteriormente llevaban largos periodos de tiempo para realizarlos. La minería encontró en el uso de los explosivos el elemento fundamental para la explotación de materiales y minerales, gracias al uso de explosivos de características sísmicas evoluciono el trabajo en canteras y en la localización de hidrocarburos por parte de las ondas generadas por las sustancias explosivas las cuales tienen la capacidad de transmitir señales que son captadas por medio de un receptor electrónico. Ver Figura 115 uso de explosivos en minería.

3.33. INGENIERÍA

La aplicación de los explosivos en las voladuras para construcción de obras de ingeniería constituye una de las más importantes aplicaciones y ha permitido ejecutar la fragmentación de la roca, ya sea mineral o estéril, para facilitar el



movimiento de tierras en proyectos de construcción de carreteras, presas, túneles, etc.

3.34. DEMOLICIONES

El uso de los explosivos de alto poder en trabajos de demoliciones a sido de gran importancia debido a la gran variedad de cargas para demoler que se pueden encontrar para realizar diferentes trabajos como la ruptura de estructuras en hormigón o demoliciones controladas de edificaciones las cuales por el uso de los explosivos se puede desarrollar en forma rápida y controlada.

Si analizamos detalladamente el efecto producido por los explosivos podemos evidenciar que entre mayor efecto tenga la sustancia explosiva mayor será el efecto que cause en un blanco. En los trabajos de corte de estructuras en acero o metálicas el uso de explosivos plásticos ha marcado la pauta debido a la concentración térmica que alcanza en el momento de la explosión aprovechando este poder para fundir las estructuras y facilitando la labor del ingeniero en los trabajos de corte de materiales metálicos.

3.35. INDUSTRIA

En el campo de la industria el uso de los explosivos ha sido de gran importancia debido al incremento y desarrollo que ha alcanzado por el uso de este tipo de sustancias, materiales de alta densidad como el acero de alto molibdeno requiere para su fundición y corte temperaturas que solo la explosión de algunas sustancias explosivas pueden llegar a alcanzar.

Para el buen desempeño de la industria, los explosivos han enmarcado cambios importantes que la han fortalecido en el campo de la producción de nuevos proyectiles de guerra los cuales centran su poder de reacción en base a las sustancias explosivas que las componen.

3.36. MEDICINA

El uso de algunas sustancias explosivas es de gran importancia en el campo de la medicina ya que gracias a sus características químicas han sido utilizadas para el tratamiento de enfermedades crónicas, que mediante el uso de fármacos



convencionales no es posible su tratamiento o sus componentes químicos no son lo suficientemente fuertes para tratar las enfermedades.

En enfermedades como el ataque al miocardio o la angina de pecho son tratadas por medio de sustancias explosivas como la nitroglicerina la cual genera en el momento de su inhalación una regulación en el sistema circulatorio de la sangre, evitando taponamientos en arterias y venas.

3.37. AVANCE DE LA CIENCIA

Con la aparición de la pólvora negra se dio un gran adelanto en cargas propulsoras que a medida que fue transcurriendo los años se convirtieron en cargas de mayor concentración propulsora capaces de desplazar cuerpos que poseen un peso excesivo. Por medio de la utilización de los explosivos se da un hecho de gran importancia para la humanidad como lo es la conquista del universo, gracias al poder de propulsión que generan determinadas sustancias explosivas se pueden impulsar los transbordadores espaciales que en nuestros días hacen presencia en el espacio exterior.

3.38. APLICACIONES BÉLICAS.

En páginas anteriores habíamos visto la importancia de los explosivos en el desarrollo de la industria, pero hay usos menos beneficiosos para la humanidad en la aplicación de los explosivos, hay situaciones negativas que son importantes nombrar como el uso de los explosivos en la elaboración de armas de destrucción las cuales han sido cruciales en el desarrollo de las guerras que han en marcado la vida cotidiana de nuestra humanidad.

Con la aparición de la pólvora negra en el siglo IX y su utilización como sustancia explosiva en el siglo XIII, se da un gran adelanto en el uso de los explosivos en las confrontaciones bélicas entre pueblos y países, sustancias como la pólvora negra utilizada como carga propulsora para el lanzamiento de piedras y el surgimiento de nuevos explosivos que superan el poder de la pólvora aumentaron la capacidad destructora de las nuevas armas de guerra como granadas, misiles tierra aire y los poderosos y contundentes misiles continentales son algunos de los adelantos de notable importancia en el uso de los explosivos como armas destructivas de guerra.

3.39. CLASIFICACIÓN Y TIPO DE EXPLOSIVOS

En forma general y teniendo en cuenta las diferentes características que presentan los explosivos en su composición química y los cambios físicos que originan en el



momento de producir explosión, podemos identificar la clasificación general de los explosivos teniendo como parámetros generales potencia del explosivo, empleo en determinados trabajos y efectos mecánicos que cumplen como sustancia explosiva.

Teniendo en cuenta lo anteriormente enunciado se ha dado la siguiente clasificación a los explosivos, de acuerdo a su velocidad de detonación, de acuerdo a su composición química y según su uso.

3.40. DE ACUERDO A SU VELOCIDAD DE DETONACIÓN

Si tenemos en cuenta la velocidad de detonación⁶ de los explosivos podemos identificar que algunos tienen mayor capacidad para transformarse que otros, esta condición depende básicamente de los compuestos químicos que lo contienen y el medio en que se desplaza.

Los explosivos de acuerdo a la velocidad de detonación se clasifican en:

⁶VELOCIDAD DE DETONACIÓN: Es la velocidad con que el explosivo se transforma de su estado natural a un estado gaseoso.



3.40.1. EXPLOSIVOS DEFLAGRANTES, LENTOS O PROGRESIVOS

Estos explosivos tales como la pólvora negra y pólvora sin humo Ver Figura 116 Pólvora negra explosivo deflagrante, son los que cambian lentamente de su estado natural al estado gaseoso a una velocidad menor de 2000 metros por segundo. La reacción que causa el cambio se denomina deflagración.

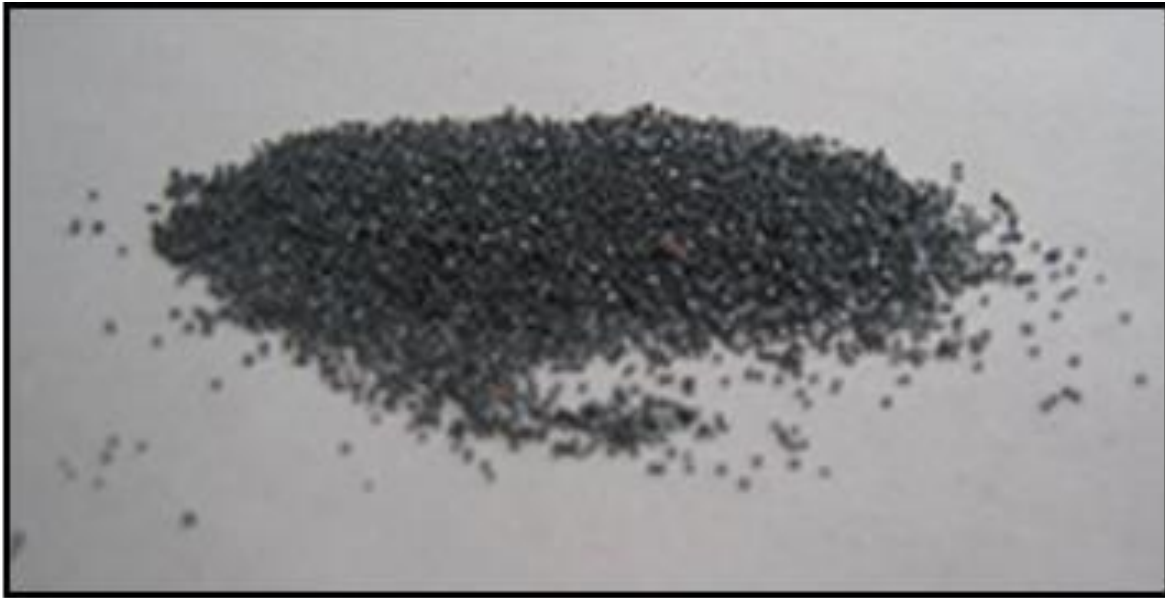


Figura 26. Pólvora negra explosivo deflagrante

Fuente: Grupo MARTE ESING.



3.40.2. EXPLOSIVOS DETONANTES O ROMPIENTES

Estos explosivos son los que cambian rápidamente de su estado natural a su estado gaseoso a una velocidad mayor de 2000 metros por segundo. La reacción que causa el cambio de este tipo se denomina detonación.

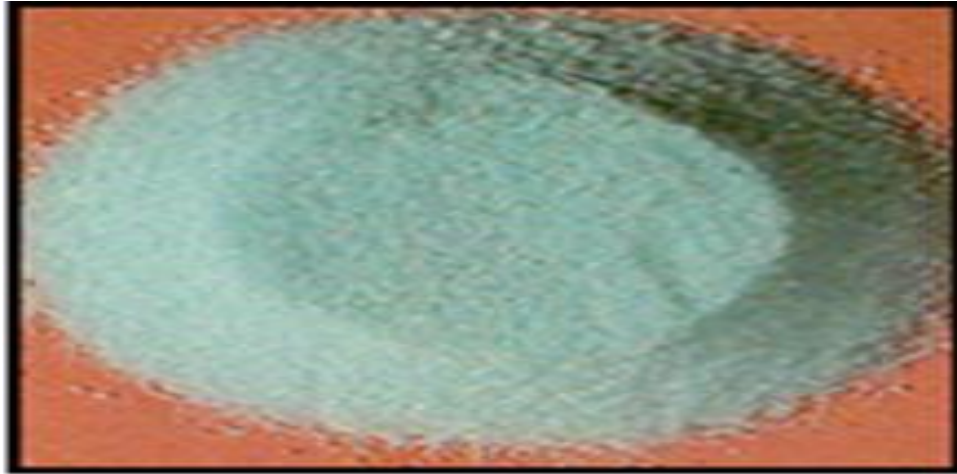


Figura 27. PENT explosivo rompiente.

Fuente: ATF.

Cuando se produce el estallido de un explosivo detonante la onda llamada “ONDA DETONADORA EXPLOSIVA”, se transmite por el total de la masa del explosivo convirtiéndolo casi instantáneamente en gases. Figura 27. PENT explosivo rompiente. Estos gases ocupan durante un instante un espacio ligeramente mayor que el ocupado por el explosivo.



3.40.3. DE ACUERDO A SU COMPOSICIÓN QUÍMICA

De acuerdo a las diferentes sustancias y compuestos químicos con los que son elaborados los explosivos hacen que estas sustancias sean de mayor poder o de menor, el efecto destructor y la acción mecánica que cumplen pueden variar dependiendo de su configuración química. Estos explosivos están sujetos a reaccionar por medio de diferentes acciones iniciadoras y teniendo en cuenta la formulación química van a determinar parámetros para su uso y la acción explosiva que producirán en su trabajo mecánico.

La composición química de estas sustancias varía en mezclas y compuestos químicos, como en sustancias de tipo radioactivo que superan el poder de los explosivos químicos.

De acuerdo a la composición química tenemos que los explosivos se clasifican en:

3.40.3.1. EXPLOSIVOS QUÍMICOS

Son todos los explosivos que nosotros vemos, todo tipo de elemento que se inicia con un detonador y da un rendimiento de trabajo y producción con base a la detonación y los que podemos manipular.

3.40.3.2. EXPLOSIVOS NUCLEARES

Son aquellos cuyo rendimiento de producción se fundamenta o se basa en la radiación, se puede obtener producción a largo plazo o después de su activación merecen manipulación, almacenamiento, y transporte totalmente especial, en estos tenemos los que se elaboran basándose en materiales radioactivos tales como el uranio, plutonio, etc.

3.40.3.3. AGENTES EXPANSIVOS

Son emulsiones acuosas las cuales al mezclarse entre sí producen un aumento en su composición física la cual permite fracturar los blancos en los cuales son utilizados. Básicamente su uso es implementado en el sector minero en la fracturación de rocas ya que minimizan la proyección de fragmentos y su uso lo hace seguro para ser utilizado.



3.40.4. SEGÚN SU USO:

3.40.4.1. EXPLOSIVOS MILITARES

Los explosivos militares presentan características especiales para ser empleados en trabajos de uso militar, sus características generales como la alta velocidad de detonación facilita trabajos mecánicos de demoliciones y corte de estructuras. Ver Figura 28. Explosivo militar Carga de demolición M 118.



Figura 28. Explosivo militar Carga de demolición M 118.

Fuente: Grupo MARTE ESING.

Los explosivos militares fueron elaborados para suplir las necesidades en la vida militar como cargas explosivas de proyectiles de guerra y básicamente cargas de demolición y corte.



3.40.4.2. EXPLOSIVOS INDUSTRIALES

Los explosivos industriales son elaborados para ser utilizados en el ámbito comercial en la explotación de canteras, voladura a cielo abierto, en túneles, ect.



Figura 29. Explosivo de Uso comercial PENTOFEX.

Fuente: INDUMIL.

Estos explosivos presentan una elevada estabilidad teniendo en cuenta que la mayoría de estos productos no reaccionan ante agentes externos como la fricción, choque o el exceso de altas temperaturas. Ver Figura 119 - Explosivo de Uso comercial PENTOFEX.

Esta clase de sustancias a diferencia del explosivo de uso militar no es utilizada como cargas de demolición y corte, debido a su baja velocidad de detonación y a su configuración. La composición química de estos productos se basa en el uso de los nitratos y emulsiones que le brindan seguridad para su manejo en el campo de la minería y trabajos de ingeniería en general.

Estos explosivos se clasifican en sensibles al detonador común No.8, insensibles y accesorios de voladura.



3.40.4.2.1 SENSIBLES AL DETONADOR No. 08

Para determinar la sensibilidad de un explosivo al detonador común No.8, se realizan pruebas en la cual se somete al explosivo a la acción del detonador, si este reacciona a esta acción se le denomina explosivo sensible al detonador, al no reaccionar se le denomina no sensible al detonador.

En este grupo encontramos todos los explosivos que inician su proceso de ignición con el detonador No. 08, ejemplo, dinamita, Indugel Plus, etc.

3.40.4.2.2 INSENSIBLES AL DETONADOR No. 08

Se caracterizan por su baja sensibilidad al detonador y su elevada estabilidad, para la iniciación de estos explosivos se requiere adicionar una carga reforzadora o booster.

Son empleados como carga principal en las voladuras a cielo abierto, debido a sus bajas velocidades de detonación las cuales facilitan la acumulación de gases que permiten un mayor efecto de fracturación en rocas y en trabajos generales de ingeniería. Los explosivos insensibles al detonador son llamados agentes de voladura, entre ellos tenemos los slurries, hidrogeles, emulsiones, Indugel AV. 800, etc., estas sustancias necesitan de un booster, para iniciar su proceso de explosión ya que el detonador No. 08 no es lo suficientemente potente para la ignición.

3.40.4.2.3 ACCESORIOS DE VOLADURA

Como su nombre lo indica en este grupo clasificamos todos aquellos accesorios que son necesarios para complementar el proceso de explosión.

- Cordón detonante.
- Mecha de seguridad.
- Multiplicadores (booster o primer).
- Micro retardos.
- Conectores para el cordón detonante.
- Tira flector, para iniciar la mecha lenta.
- Encendedores de meca.



3.41. TIPOS DE EXPLOSIVOS

A continuación haremos referencia a las principales características de los explosivos en su composición química, poder rompedor y capacidades para ser utilizados en diferentes medios y usos industriales.

3.41.1. RDX (CICLONITA)

También se conoce como ciclonita. El nombre químico del RDX es 1,3,5-trinitro-1,3,5- triazina. Es un polvo blanco y es sumamente explosivo. Es usado en explosivos y también en combinación con otros ingredientes no explosivos. No se conocen ni el sabor u olor del RDX. Es un producto sintético que no ocurre naturalmente en el medio ambiente. Cuando se quema con otras sustancias produce humo.

Las siglas RDX (por sus siglas en inglés) significan “Explosivo de investigación y desarrollo”. RDX es uno de los más ampliamente usados en los explosivos compuestos y plásticos. Es extremadamente estable y tiene una vida de anaquel comparable a la del TNT. Es altamente sensitivo y tiene un efecto destructor, es uno de los explosivos militares más poderosos. El RDX se usa por sí solo como la carga de base en los detonadores eléctricos M-6.

El principal uso del RDX, es para la elaboración de explosivos mixtos de gran poder explosivo como las composiciones A, B y C, a los cuales les aumenta su poder, alcanza una velocidad de detonación de 8.350 m/seg.

3.41.2. TRINITROTOLUENO (TNT)

El trinitrotolueno tiene como fórmula química $C_6H_2 \cdot CH_3 \cdot (NO_2)_3$. Es un explosivo muy estable, que no sería posible utilizar como tal si no se dispusiera de un iniciador que desencadenara su energía explosiva. Ver Figura 120 - Explosivo TNT.

El 2,4,6-trinitrotolueno es un sólido amarillo, sin olor, que no ocurre naturalmente en el ambiente. El TNT es el explosivo militar más común y por sí solo o como parte de un explosivo mixto⁷, es ampliamente usado como carga multiplicadora, rompedora o de demolición.

⁷EXPLOSIVO MIXTO: son aquellos explosivos que están elaborados a base de varias sustancias explosivas que aumentan su poder y en determinadas mezclas desensibilizan las sustancias explosivas para hacerlas seguras para su empleo.



Figura 30. Explosivo TNT.

Fuente: ATF.

El TNT se usa más comúnmente en cargas multiplicadoras y cargas de demolición. Es un compuesto cristalino amarillento que viene fundido o en forma de hojuela. Se encuentra principalmente en forma fundida. Cuando se expone a la luz solar durante períodos prolongados de tiempo, se vuelve café. Es un explosivo moderadamente tóxico que es relativamente insensible, estable y compatible con otros explosivos cuando se almacena de forma adecuada tiene una vida de anaquel de por lo menos 40 años.

Se usa como un explosivo estándar para la evaluación de otros altos explosivos militares, viene en presentaciones de 1 libra, $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{4}$ de libra. Posee una velocidad de detonación de 6.900 m/seg.

Características:

- Sólido color amarillo claro a café oscuro.
- Soluble en acetona, alcohol y aceite caliente.
- Prácticamente insoluble en agua.
- Punto de fusión 80° C.
- Sustancia química muy estable.
- Explosivo militar utilizado internacionalmente.
- Muy seguro y no higroscópico.



3.41.3. PENT

El Pentranitrato de Pentaeritrita Sólido cristalino color blanco, es altamente sensitivo y es uno de los explosivos militares más poderosos, comparable a la ciclonita (RDX) y a la nitroglicerina. El PENT se usa en algunas cargas multiplicadoras, los cordones detonantes y en algunos detonadores. Es casi insoluble en agua, y puede usarse en demoliciones subacuáticas, alcanza una velocidad de detonación de 8.300 m/seg. Ver Figura 121 - Explosivo PENT.

Características:

- Soluble en acetona.
- Punto de fusión 140° C.
- Relleno cordón detonante.
- Explota por percusión.



Figura 31. Explosivo PENT

Fuente: ATF.

3.41.4. HMX

El HMX viene de la sigla en inglés High Melting Explosive. También se conoce como octágono y tetramina de ciclotetrametileno, y también por otros nombres. Es un sólido incoloro, poco soluble en agua. Solamente una pequeña cantidad de HMX se evaporará al aire; sin embargo, puede encontrarse en el aire adherido a partículas suspendidas o a polvo. No se conocen ni el sabor u olor del HMX, velocidad de detonación 9124 m/s.



3.41.5. TETRIL

EL Tetril se usa por sí solo como una carga multiplicadora y también se usa en algunos explosivos como carga de ruptura o demolición. El Tetril es más sensible y más poderoso que en TNT; No obstante, el Tetril se encuentra fabricado a partir de PENT y RDX. , Velocidad de detonación 7.100 m/seg.

El nombre químico de TETRIL es 2,4, 6-trinitrofenil-Nmetilnitramina. Algunos nombres usados comúnmente son nitramina, tetralita, y tetril. Es un sólido sintético cristalino, sin olor, que no ocurre naturalmente en el ambiente. Bajo ciertas condiciones, el tetril puede existir como polvo en el aire. Se disuelve levemente en agua y en otros líquidos.

3.41.6. TETRITOL

Explosivo mixto contiene un 75% de tetril y un 25 % de TNT, se usa como carga de demolición, el tetritol es más poderoso y tiene mayor potencia rompedora que el TNT y es menos sensible que el Tetril, alcanza una velocidad de detonación de 7.000 m/seg.

3.41.7. NITROGLICERINA

Potente explosivo de fórmula $C_3H_5(NO_3)_3$, derivado de la glicerina mediante el tratamiento con una mezcla de ácidos sulfúrico y nítrico. Es un líquido pesado, aceitoso, incoloro o ligeramente amarillo, con una densidad de $1,60 \text{ g/cm}^3$ y un olor suave a quemado. Produce dos formas cristalinas: Una con un punto de fusión de $2,8 \text{ }^\circ\text{C}$, y otra de $13,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Se solidifica a $12 \text{ }^\circ\text{C}$.

La nitroglicerina arde lentamente si se calienta al aire libre, pero explota al calentarla en un recipiente cerrado o si alcanza una temperatura de $218 \text{ }^\circ\text{C}$. Es muy sensible a los golpes por lo que resulta peligroso de transportar. Aunque fue descubierta en 1846, la nitroglicerina no se utilizó como explosivo hasta que el ingeniero e inventor sueco Alfred Nobel la empleó para fabricar dinamita en 1866.

La nitroglicerina es hoy en día un explosivo común y generalmente se mezcla con materiales inertes y porosos como el aserrín. Al detonar produce alrededor de 10.000 veces su propio volumen de gas. Es ocho veces más potente que la pólvora. Se emplea en el campo de la medicina como agente dilatador en venas y arterias en dosis de 0,2 a 0,6 mg.



Características:

- Líquido aceitoso color amarillo claro.
- Sabor dulce.
- Prácticamente insoluble en agua.
- Su inhalación produce dolor de cabeza.
- Muy sensible al golpe, fricción o choque.
- Más denso que el agua, soluble en alcohol, acetona y cloroformo.
- Aumenta su sensibilidad por acción del calor o frío excesivo.
- Velocidad de detonación de 7.700 m/seg.

3.41.8. NITRATO DE AMONIO

El nitrato de amonio es un explosivo de baja sensibilidad, estable e insensible al calor y a las descargas eléctricas. Es una sal higroscópica, debido a esto presenta dificultades para ser utilizado en voladuras con presencia de humedad. Ver Figura 122 - Gránulos Nitrato de Amonio.

Es el componente principal en la elaboración de los explosivos sísmicos y en la mayoría de los agentes de voladura, para su iniciación requiere la presencia de una carga reforzadora que aumente la capacidad del detonador.



Figura 32. - Gránulos Nitrato de Amonio.

Fuente: ATF.



Es utilizado para la elaboración de explosivos mixtos y para cargas direccionales y de brecha. El nitrato de amonio es uno de los principales explosivos instantáneos de carga principal menos sensibles y más fácilmente disponibles. Se usa ampliamente como agente explosivo, un ingrediente en ciertas dinamitas, y como fertilizante.

Dependiendo de su pureza, su color varía de blanco a beige-café y tiene un sabor salado. Para facilitar la identificación, también se pueden añadir tintes al producto. El nitrato de amonio se encuentra generalmente en forma de pastillas pequeñas comprimidas, comúnmente conocidas como glóbulos. Cuando se añade aceite combustible a los glóbulos, la mezcla se convierte en ANFO (nitrato de amonio y aceite combustible).

Para detonar el nitrato de amonio se requiere el uso de una carga iniciadora. Comercialmente, Pentolita y RDX se usan como carga multiplicadora, mientras que el ejército usará con frecuencia TNT como carga iniciadora.

3.41.9. PÓLVORA NEGRA

Entre las numerosas sustancias explosivas la pólvora negra por su composición, preparación y empleo, constituyen un grupo especial diferente a los demás explosivos, de gran importancia universal debido a su aplicación a las armas de fuego, compuesta de 75% de nitrato de potasio, 15% de carbón vegetal y 10% de azufre.

El nitrato de potasio se expresa químicamente como KNO_3 , es una sal del ácido nítrico (HNO_2) con el potasio (K). Este componente por sus cualidades de fuerte oxidante, es el que aporta el oxígeno para la combustión de la pólvora, ya que sin la presencia de este (el oxígeno) no puede haber combustión. Ver Figura 123 Pólvora Negra.

El azufre es un elemento químico sólido y cristalino de un color amarillo muy característico. Entra en la composición de la pólvora negra ya que facilita la propagación de la combustión, aumentando la velocidad además de mejorar la estabilidad ya que es un elemento insensible a la humedad. El azufre en estado natural tiene la propiedad de fundir a los 115°C y de quemar a los 250°C .



Figura 33. Pólvora Negra.

Fuente: ATF.

El Carbón utilizado para la preparación de la pólvora negra debe ser seleccionado con mucho cuidado por la gran importancia que asume como combustible base de nuestra mezcla, este debería ser lo más puro posible, es decir que tenga la menor cantidad posible de cenizas. La mayor parte de los residuos que deja la combustión de la pólvora negra son cenizas de carbón y pueden llegar a ser el 50% del peso original de la pólvora.

3.41.10. COMPUESTO C-4

El compuesto C-4 es un explosivo mixto que contiene 91% de RDX y 9% de plastificante no explosivo, es conocido como barra de demolición M112. El compuesto C-4 con el tiempo reemplazará el compuesto C-3 como carga de demolición y también se usa como carga rompedora. Ver Figura 124 Composición C-4.

Tiene más potencia rompedora que el compuesto C-3, es moldeable a una amplia gama de temperaturas (-70GF a + 170GF); Es el más estable y está menos sujeto a la erosión por causa del agua cuando se usa para demoliciones subacuáticas, es la base fundamental para la fabricación de las minas kleymor, alcanza una velocidad de detonación de 8.040 m/seg.



Figura 34. Composición C-4

Fuente: Grupo MARTE ESING.

Características:

- Color blanco.
- Explosivo moldeable.
- Resistente al agua.
- Utilizado en las cargas de demolición y corte.
- Alcanza un alto grado de temperatura al explotar.
- Utilizado en demoliciones submarinas.
- Produce humo en el momento en que se quema.

3.41.11. PENTOLITA

La Pentolita es una mezcla de PENT y TNT. Se usa una mezcla de 50-50 (por 50% de PENT y 50% de TNT). El color varía de blanco a amarillo a gris, dependiendo del contenido de TNT. Ver Figura 125 Pentolita 50-50.

La Pentolita se usa ampliamente en el ejército en cargas multiplicadoras y cargas de molde. La Pentolita es más sensible que el TNT, como carga multiplicadora en ciertos modelos de cargas direccionales debido a su alto poder de velocidad de detonación que alcanza 7.450 m/seg., Es la base fundamental para la fabricación de los torpedos bangalores, cargas huecas, cargas defensivas dirigidas, sismofex, pentofex, entre otros.



La Pentolita es utilizada como carga de demolición adaptable a diferentes presentaciones de 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$ de kilogramo y como carga reforzadora para la iniciación de los explosivos insensibles al detonador, es resistente a la humedad, sustancia explosiva estable.

3.41.12. DINAMITAS

La dinamita pura tiene un olor acre y dulce debido a su contenido de nitroglicerina. La inhalación de los gases de nitroglicerina generalmente provoca un dolor de cabeza fuerte y constante. Generalmente es de color café claro a café rojizo y aunque su textura varía, se puede describir como una mezcla aceitosa suelta, ligeramente húmeda. Es altamente sensible al impacto y a la fricción y produce gases tóxicos cuando se detona. Ver Figura 126- Dinamitas Comerciales.

Si aparecen cristales en el exterior de un cartucho de dinamita significa que las sales de nitrato se han lixiviado y solidificado, haciendo a la dinamita extremadamente inestable. Así mismo si parece tener un escape de cualquier sustancia aceitosa, se debe tener cuidado extremo. Esto puede indicar la presencia de nitroglicerina. Nóbel inventó la dinamita en 1866 y después fundó compañías y laboratorios en más de 20 países alrededor del mundo. Es poseedor de más de 350 patentes, también se dedicó a escribir poesía y drama, y hasta consideró seriamente el convertirse en escritor.



Figura 35. Dinamitas Comerciales

Fuente: ATF.

Alfredo N obel averiguó que empapando la nitroglicerina en una tierra mineral porosa llamada tierra de diatomeas o kieselgur, se obtenía una mezcla exenta de algunos de los inconvenientes de la nitroglicerina líquida. Al nuevo producto se le dio el nombre de dinamita, químicamente inerte, no alteraba la reacción química cuando se hacía detonar la nitroglicerina sin embargo, en una tierra porosa era mucho más fácil de manejar que la nitroglicerina líquida. Las primeras dinamitas se clasificaban por la cantidad de nitroglicerina de la mezcla, de modo que el producto obtenido mezclando 60 partes de nitroglicerina y 40 partes de kieselgur se llamaba "dinamita 60%".

Además de ser menos peligrosa que la nitroglicerina era más cómoda de transportar porque se podía llevar en forma de barras. El uso de la dinamita hizo que muchas tareas pertenecientes al mundo de la construcción y la minería progresaran a una velocidad sin precedentes en la historia. Sin embargo, la dinamita también fue de gran utilidad en la fabricación de explosivos, aplicación que se generalizó hasta el punto de hacerle acreedor, aún a pesar de sus actividades humanitarias, del epíteto "mercader de la muerte".

Pronto se descubrió que sustituyendo el kieselgur por otros minerales podían hacerse explosivos aún más potentes. Por ejemplo: empleando una mezcla de nitrato de sodio finamente pulverizado y pulpa de madera se obtenía un explosivo que era bastante más potente que la dinamita primitiva que contuviese la misma cantidad de nitroglicerina. Estos explosivos se llamaron "dinamitas de absorbente activo" para distinguirlas de las primeras dinamitas, y pronto reemplazaron a ésta últimas.



Años después se fabricaron dinamitas que empleaban nitro almidón en lugar de nitroglicerina. El término dinamita se convirtió en un término genérico para los explosivos de alta potencia usados en trabajos de minería, ingeniería, en canteras, construcción de pozos, perforación de túneles y otras operaciones de voladura de superficie y subterráneas.

En las dinamitas amoniacales o dinamitas de nitrato de amonio, cantidades de nitrato amoniacal reemplazan una parte de la nitroglicerina y también parte del nitrato de amonio. En la medida en que el nitrato de amonio reemplaza al nitrato de sodio aumenta la cantidad de gases producidos por el explosivo. Casi todos los explosivos de voladura contienen cantidades sustanciales de nitrato de amonio.

Las dinamitas de nitroglicerina y las dinamitas conocidas de nitro almidón tienen análogas propiedades explosivas generales no son idénticas en todos los aspectos. El nitro almidón es un material sólido pulverulento que no se congela a temperaturas atmosféricas como la nitroglicerina. No produce dolores de cabeza cuando se ponen en contacto con la piel desprotegida o cuando se aspiran pequeñas cantidades de los gases que quedan en la atmósfera después de una explosión.

La adición de materiales anticongelantes, como dinitrotolueno, diglicerina nitrada, azúcares nitrados los nitroglicoles, reduce tanto la tendencia de la nitroglicerina a congelarse que se ha eliminado sustancialmente la necesidad de congelar los explosivos de nitroglicerina que habían sido sometidos a temperaturas bajas. En las fórmulas, se acostumbra considerar los materiales anticongelantes asociados a ella. Los azúcares, los glicoles, la glicerina, suelen agregarse a la glicerina antes de nitrarla.

3.41.12.1. TIPOS DE DINAMITAS

3.41.12.1.1 Dinamitas de nitroglicerina

La parte de una dinamita de nitroglicerina que no es el componente o, los componentes orgánicos nitrados, suelen componerse de una mezcla de: pulpa de madera u otro material carbonáceo cuyo objeto es absorber la nitroglicerina líquida; nitrato de sodio para suministrar oxígeno disponible al material carbonáceo, y carbonato de calcio, óxido de cinc para neutralizar los indicios de acidez que puedan producirse por la descomposición de los nitratos presentes. Es conveniente que el material absorbente combustible y el material oxidante estén en proporciones equilibradas. Ver Figura 127 - Dinamitas de Nitroglicerina.



Debe haber suficiente nitrato para oxidar completamente el material absorbente combustible. Si hay demasiado nitrato el explosivo produce óxidos de nitrógeno los productos de la explosión y no libera tanta energía.



Figura 36. Dinamitas de Nitroglicerina

Fuente: ATF.

La existencia de una cantidad excesiva de absorbente combustible origina cantidades excesivas de monóxido de carbono en los gases producidos en la explosión. La presencia de grandes cantidades de estos gases es un inconveniente, sobretodo cuando la dinamita se usa en trabajos subterráneos de minería la envoltura del explosivo interviene en las reacciones que se producen en la explosión; por consiguiente, también se tiene en cuenta este factor al formular las dinamitas. Se emplea un pequeño porcentaje adicional de nitrato de sodio con el fin de que la entrada del papel o la parafina de la envoltura de la reacción no haga aumentar la cantidad de monóxido de carbono.

3.41.12.1.2 Dinamitas amoniacales

La dinamita de amonio tiene un olor acre y dulce porque contiene algo de nitroglicerina y al igual que la dinamita pura los gases pueden causar un fuerte dolor de cabeza. Generalmente es de color café tostado claro a café claro y tiene una textura aceitosa, pulposa, granular y ligeramente húmeda. Es menos sensible al impacto y a la fricción que la dinamita pura porque una parte del contenido de nitroglicerina se ha sustituido por nitrato de amonio y nitroglicol.

Contienen nitrato amónico que reemplaza una parte del nitrato orgánico. Puesto que el nitrato de amonio tiene una potencia explosiva exterior a la de nitroglicerina, es necesario emplear en la fórmula más nitrato de amonio que la cantidad de nitroglicerina que reemplaza.



Son muy usadas en minas y canteras. Aunque son algo menos resistentes al agua que las dinamitas sencillas y bastante menos resistentes al agua que las dinamitas gomosas, su resistencia al agua es suficiente para la mayoría de los fines de minería y cantería. Tienen excelentes características tanto en lo que respecta al vigor del golpe que producen en el instante de la detonación (potencia rompedora) como la presión sostenida que el efecto de empuje que sigue al choque (volumen de gases). Puesto que las dinamitas amoniacaes son algo más baratas que otros explosivos, no sólo tomando como base el peso, sino también con arreglo a la cantidad real de energía que proporcionan, son hoy explosivos de voladura de mucho uso en las operaciones ordinarias en minas y canteras.

3.41.12.1.3 Gelatina explosiva y dinamitas gomosas

La gelatina explosiva consiste en nitrocelulosa en aproximadamente 12% de nitrógeno asociada con nitroglicerina para formar un gel bastante firme. La relación usual es aproximadamente 11.5 partes de nitroglicerina por 1 parte de nitrocelulosa soluble. El otro componente de la gelatina explosiva es una pequeña cantidad de un material antiácido, como carbonato de calcio, carbonato de magnesio y óxido de cinc.

3.41.12.1.4 Dinamitas gomosas amoniacaes.

Se formulan para reunir, las mejores cualidades de las dinamitas sencillas y de las dinamitas amoniacaes, consiste en una dinamita amoniacaal en la que la nitroglicerina existe en forma de un coloide de nitrocelulosa. No tienen una resistencia al agua igual a la de las dinamitas gomosas, pero resisten mejor el agua que las dinamitas amoniacaes.

3.41.12.1.5 Dinamitas semigomosas.

Tienen una composición intermedia entre la de las dinamitas gomosas amoniacaes y de las dinamitas de nitrato amoniaco, y son dinamitas amoniacaes a las que se ha añadido nitrocelulosa para formar un gel duro. Físicamente, las dinamitas semigomosas son más plásticas que las amoniacaes son algo menos sensibles en las pruebas de rozamiento y del choque que las dinamitas gomosas. Sin embargo, su sensibilidad es suficiente para asegurar una respuesta satisfactoria a la acción de una carga detonante.



3.41.12.1.6 Dinamita militar

La dinamita militar es un explosivo mixto que contiene 75% de RDX, 15% de TNT y 10% de desensibilizadores y plastificantes que minimizan la sensibilidad del RDX. Está empacada en cartuchos cilíndricos de papel recubierto de parafina y de 1/2 libra de peso, con diámetro nominal de 1.25 pulgadas y longitud nominal de 8 pulgadas. El mejoramiento y evolución de los productos explosivos, se ha realizado con la colaboración entre los usuarios y los fabricantes; por esto, INDUMIL ofrece dinamitas plásticas (FEXAGEL) y pulverulentas (SEMIGEL)

Se emplea la dinamita militar principalmente para el retiro de tocones, contra construcciones militares, y para operaciones de cantera, de zanjeo y de demolición. La dinamita militar es apropiada para demolición submarina. La dinamita militar no se congela ni suda durante su almacenamiento, y su composición no es higroscópica. A diferencia de los recipientes de dinamita comercial, los recipientes de la dinamita militar no requieren el cambio de posición durante su almacenamiento. La dinamita militar es más segura para almacenar, manejar y transportar que 60% de las dinamitas comerciales. A menos que sea necesario, no use dinamita comercial en las áreas de combate.

La dinamita militar es confiable en operaciones submarinas durante 24 horas. Debido a su reducida sensibilidad, empaque los cartuchos de dinamita militar de modo que se asegure la detonación completa de la carga. La dinamita militar no es eficaz como carga de corte o de ruptura.



3.41.12.1.7 Otras dinamitas militares:

3.41.12.1.8 FEXAGEL.

Corresponde al grupo de las gelatinas especiales, en las cuales parte del nitrogliceroglicol, se ha reemplazado por nitratos y otros compuestos, manteniendo su balance de oxígeno positivo.

3.41.12.1.9 SEMIGEL.

Corresponde al tipo de dinamitas pulverulentas con baja incorporación de nitrogliceroglicol, el cual se reemplaza por nitratos y otros compuestos, manteniendo su balance de oxígeno positivo.

3.41.12.1.10 POTENCIA DE LAS DINAMITAS.

La cantidad de energía que produce un explosivo puede determinarse por el cálculo partiendo de los factores termoquímicos de los componentes y de los productos de la reacción, o bien inflamando una porción del explosivo con una fuerte bomba calorimétrica construida especialmente.

La manera como un explosivo comercial de voladura desarrolla su energía en la explosión suele ser una guía mucho más importante para averiguar su rendimiento en cualquier clase de trabajo especial que la energía total del explosivo medida en una bomba calorimétrica. Las dinamitas normales son intermedias, entre las gomosas y las amoniacaes y muestra un empuje excelente. Los explosivos de nitrato de amonio encuentran su uso en los trabajos de voladura en que no se necesita una potencia voladora muy grande y lo que se desea es un empuje grande; para estos trabajos dan excelentes resultados.

3.41.12.2. INDUGEL PLUS

Explosivo tipo hidrogel aluminizado, con sustancias gelificantes que evitan la segregación de los ingredientes oxidantes y combustibles sensibilizados en la mezcla. Es un explosivo a base de nitrato de amonio, slurries gelatinosos, polvo de aluminio y agua, es utilizado para trabajos de voladura en canteras, ideal para la voladura de rocas y es altamente resistente a la humedad, alcanza una velocidad de 4.300 a 4.700 m/seg. Ver Figura 128 Indugel Plus.



Características:

- Elevada seguridad en su manejo debido a su baja sensibilidad al roce y al impacto.
- Excelente resistencia al agua.
- Explosivo denso, fácilmente sumergible en agua y con alta energía específica.
- No produce dolores de cabeza durante su almacenamiento y empleo.
- Sensible a detonador N° 8.
- Cartuchos con numeración codificada visible e invisiblemente.
- Encartuchado en tubos de polietileno grapados en sus extremos y embalados en cajas de cartón con un peso de 25.0 Kg. peso neto y 26.2 Kg. de peso bruto.

Usos

- En voladuras en ausencia de gas grisú y polvo de carbón.
- Para explotación de minerales como el oro, esmeraldas, sal, caliza u obras construcción.
- Voladuras subterráneas con adecuada ventilación.
- Explotación de roca semidura a dura.
- En demoliciones de edificios e infraestructuras civiles.
- Se emplea como carga de columna con detonador N° 8 como iniciador.



Figura 37. Indugel Plus

Fuente: INDUMIL.



Presentación del explosivo Indugel en referencia al producto elaborado por la industria militar colombiana FEXAR.

26 X 250 CAJA 154 TACOS PESO 162 grs.

32 X 250 CAJA 102 TACOS PESO 245 grs.

38 X 250 CAJA 72 TACOS PESO 347 grs.

44 X 250 CAJA 54 TACOS PESO 463 grs.

3.41.12.3. AMATOL

Mezcla de nitrato de amonio y TNT. Era usado como carga base en los torpedos bangalores, debe almacenarse en recipientes herméticos, ya que posee nitrato de amonio el amatol es un compuesto higroscópico, posee una velocidad de detonación de 4.900 m/seg.

3.41.12.4. COMPUESTO A3

Explosivo mixto, contiene el 91% de RDX y 9% de cera que cubre las partículas de RDX, las desensibiliza y sirve de aglutinador, utilizado como carga multiplicadora en las más recientes cargas direccionales y torpedos bangalores, también se usa como carga principal en los proyectiles de alto explosivo plástico, velocidad de detonación de 8.100 m/seg, es el explosivo mixto a base de RDX de mayor poder.

3.41.12.5. COMPOSICIÓN B

Explosivo mixto, contiene aproximadamente 60% de RDX, 39% de TNT y 1% de cera, se utiliza como carga principal de las cargas direccionales debido a su potencia destructora y a su alta velocidad de detonación, a la vez es utilizada en la elaboración de granadas de mortero y de mano, alcanza una velocidad de detonación de 7.800 m/seg.

3.41.12.6. COMPUESTO B4

Contiene 60% de RDX, 39.5% de TNT y 0.5% de silicato de calcio, explosivo altamente resistente a la humedad, se usa como carga principal en los más recientes modelos de torpedo bangalores y cargas direccionales, alcanza una velocidad de detonación de 7.800 m/seg.

3.41.12.7. FULMINATO DE MERCURIO

Su fórmula química es ONC-Hg-CNO . Es muy inestable ya que el mercurio sobrecarga la molécula lineal como una viga bajo un peso puntual exagerado. En



consecuencia su descomposición explosiva es poco exotérmica. Su inestabilidad lo hace muy sensible y apto para estallar fácilmente por acciones exteriores. Por eso se utiliza mucho como iniciador de otros explosivos. El fulminato de mercurio es un polvo cristalino pardo oscuro, que cuando está seco explota al más ligero choque. Se utiliza para la preparación de mezclas detonantes, en la metalurgia del oro y de la plata, como catalizador en muchas reacciones orgánicas, en los aparatos científicos (termómetros, barómetros...), para la preparación de amalgamas y en la construcción de lámparas con vapor de mercurio.

3.41.12.8. EXPLOSIVO SÍSMICO

Se emplean en la exploración sísmica con el fin de ubicar yacimientos de hidrocarburos como petróleo, gas y otros recursos naturales. Este explosivo se suministra como dinamita gelatinosa y es envasado en cartuchos plásticos sellados herméticamente. Ver Figura 129 Explosivos Sísmicos.

La constancia de sus características de detonación garantiza la calidad de los registros sismográficos.



Figura 38. Explosivos Sísmicos

Fuente: Grupo MARTE ESING - INDUMIL.

La excelente resistencia al agua que caracteriza que los explosivos sísmicos, especialmente en pozos sometidos a altas presiones hidrostática, garantiza un óptimo rendimiento. No requiere reforzadores ni explosivos primarios, iniciándose con un detonador sismográfico. Los cartuchos tienen tapa porta fulminante con rosca para el acoplamiento axial de varios cartuchos en columna.



3.41.12.9. EXPLOSIVOS BINARIOS INSTANTÁNEOS

Los explosivos binarios, vendidos como un componente sólido o líquido, sólo se convierten en explosivos instantáneos sensibles al detonador cuando se mezclan los dos componentes. El componente sólido es un oxidante (nitrate de amonio) y el líquido es un líquido inflamable (nitrometano). Son relativamente insensibles al impacto o a la fricción y tienen una vida de anaquel indefinida siempre y cuando haya suficiente cantidad de nitrometano en el recipiente sin abrir para sensibilizar el nitrate de amonio.

Los explosivos binarios no contienen nitroglicerina y se pueden enviar por medio de servicios de carga o paquetería. Algunos explosivos binarios que se conocen con frecuencia son:

3.41.12.9.1 Xpak

Sólido es un componente blanco con un agujero en el medio que está disponible en cartuchos de plástico rígidos rojos (1/3 de libra), amarillos (1/2 libra) y verdes (1 Y libra), una botella de plástico rígido roja (1 libra) y una bolsa de aluminio roja (1/2 libra). Xpak líquido es un componente transparente que viene en una botella de plástico transparente. Xpak se puede usar como carga iniciadora, carga de columna, o para voladura secundaria. Xpak se usa ampliamente en la agricultura, demolición general, servicios industriales, desecho de bombas y en el cizallamiento del revestimiento de pozos petroleros.

Xpak se puede desarmar y neutralizar quitando el contenido del empaque y empapándolo en agua durante 8 horas.

3.41.12.9.2 Kinepouch

Utiliza dos componentes químicos independientes (un polvo blanco y un líquido rojo) y se puede encontrar en un paquete de aluminio con cubierta de plástico que viene en bolsas de 1, 2 y 4 libras. Se utiliza para quitar el afloramiento de roca durante la construcción de caminos y para romper las piedras en las canteras.

El sistema Kinestik™ utiliza dos componentes químicos independientes (un polvo blanco y un líquido rojo) y se puede encontrar en cartuchos de 1/3 y 1 libra, y en barras de aluminio de 1/2 libra. Es un explosivo impermeable que es más fuerte que el 60% de la dinamita y se usa en zanjas, para destronar y en la construcción de línea de transmisión



3.41.12.9.3 SISMIGEL

Explosivo tipohidrogel, con sustancias gelificantes que evitan la segregación de los ingredientes oxidantes y combustibles en la mezcla, con velocidad de detonación alta para la prospección sísmica. Ver Figura 130 Explosivo Sismigel. Usado en exploración petrolera.



Figura 39. Explosivo Sismigel

Fuente: INDUMIL.

Características:

1. Alta seguridad en su manejo debido a su baja sensibilidad al roce y al impacto.
2. Muy buena resistencia al agua.
3. Explosivo denso, fácilmente sumergible en agua y con alta energía específica.
4. No produce dolores de cabeza durante su almacenamiento y empleo.
5. Sensible al detonador sismográfico n° 8.
6. Unidades con numeración codificada visible y rotulo interno.
7. Su presentación se hace en unidades de 150 y 450 de peso unitario, en envase plástico roscable para acople de columna, y empacadas en cajas de cartón. Según necesidades del mercado se produce en unidades de peso unitario diferente desde 900 a2700 g.



PRODUCTO	CÓDIGO VENTA	UNIDADES POR CAJA
SISMIGEL DI 115 150g	6251	30
SISMIGEL DI 115 600g	6252	25
SISMIGEL DI 115 900g	6220	16
SISMIGEL DI 115 1200g	6255	12
SISMIGEL DI 115 1350g	6221	10

Tabla 3. Códigos de venta sismigel

3.41.12.10. AGENTES DE VOLADURA

En el uso de explosivos comerciales en trabajos de ingeniería civil a sido de gran importancia por el incremento de los agentes de voladura, estos explosivos tienen como característica general que no es sensible al detonador común No. 8, requieren de una carga reforzadora que aumente el poder del detonador.

Estas sustancias explosivas están reglamentadas en el uso de la ingeniería civil, orientando su empleo en las voladuras a cielo abierto y en túneles, debido a su alta estabilidad que las hace seguras para su manipulación.

3.41.12.11. ANFO

Estas son las siglas de "Ammonium Nitrate-Fuel Oil Solution". Un anfo es una disolución de nitrato amónico y aceite combustible. Soluciona de esta forma el gran problema que tiene el nitrato amónico: su gran capacidad para absorber vapor de agua. Se suele obtener realizando una disolución al 94% en peso de nitrato amónico y un 6% de aceite combustible o queroseno. Son muy estables y requieren un iniciador o una descarga eléctrica para explotar. Ver Figura 131 Anfo.

Agente de voladura a base de nitrato de amonio y otros compuestos como combustibles que mejoran sus propiedades explosivas. Debido a su alto contenido de nitrato de amonio es extremadamente sensible a la humedad por lo cual no puede ser utilizado en barrenos con agua. El nitrato de Amonio es un ingrediente especial en casi todos los explosivos comerciales, incluyendo a la dinamita y a los hidrogeles. Su uso predominante es la forma de gránulos de NA, una pequeña bolita



porosa mezclada con aceite combustible (fuel oil) FO, alcanza una velocidad de detonación de 3.000a 3.200 m/seg.



Figura 40. Anfo

Fuente: INDUMIL

Desde su introducción en 1950, los productos ANFO han encontrado un uso extensivo en una gran variedad de aplicaciones en voladuras a cielo abierto y en terreno seco. En su uso y manejo es muy seguro, debido a que no es sensible a choque y fricción. Preferiblemente debe usarse el cordón detonante de bajo grámaje a todo lo largo del barrenos.

ANFO es un explosivo usado comúnmente para voladuras industriales en gran parte del mundo. Tiene una velocidad lenta de detonación que lo hace ideal para usarse en pedreras y otras aplicaciones de voladura. Es insensible y un detonador solo no causa que ANFO detone. Para iniciar el ANFO, se requiere de un sistema de iniciación y una carga iniciadora. Viene en volumen (mezclado en el sitio y bombeado directamente en los pozos de sondeo) o en bolsas de 50 libras (premezclado).

Características:



- Muy seguro en su uso y manejo.
- Ninguna resistencia al agua.
- Insensible al choque y fricción.
- No produce dolores de cabeza durante su almacenamiento y empleo.
- No sensible al Detonador No. 8.
- Se recomienda su empleo en diámetros superiores a 50 mm.
- Empacado en bolsas con 25.0 Kg. de peso neto.
- Velocidad de detonación de 1000 a 2500 m/s.

PRODUCTO	DIMENSIÓN PESO POR EMPAQUE (Kg.)
ANFO FEXAR	25
ANFO DESCENTRALIZADO	25
ANFO INSITU	GRANEL

Tabla 4. Empaques para explosivo anfo

3.41.12.12. ALANFO

Son agentes de voladura que contienen en su formulación aluminio, aumentando su densidad con respecto a los anfos normales; confiriéndole una alta concentración de energía por longitud de perforación. Se lo utiliza en obras civiles, minería, canteras, etc. y como carga de columna en voladuras. No se recomienda utilizar Alanfo en barrenos donde se presenta agua, ya que el Nitrato de Amonio es higroscópico.

Características Técnicas:



PARÁMETROS	UNIDAD DE MEDIDA	ANFO ALUMINIZADO
DENSIDAD	g/cm ³	0.89
VOLUMEN DE GASES	lt/Kg.	891.13
CALOR DE EXPLOSIÓN	Kcal/Kg.	1219.78
VELOCIDAD DETONACIÓN	m/s	2300
POTENCIAL	Kj/Kg	5103.55
RESISTENCIA AL AGUA	horas	NULA

Tabla 5. Empaques para explosivo al anfo.

La importancia del aluminio en los explosivos es la de aumentar su energía. En una detonación se producen reacciones muy exotérmicas, provenientes de la formación de óxidos de aluminio. "En la práctica hasta un 8% de aluminio, aumenta considerablemente la energía del explosivo y con porcentajes mayores al 15% el producto comienza a desensibilizarse", por otra parte al aumentar el porcentaje de aluminio, la velocidad de detonación disminuye debido a la presencia de este sólido.

3.41.12.13. HIDROGELES

Son explosivos introducidos en los años sesenta. Como su nombre lo indica son explosivos gelatinizados a base de agua y tienen un desempeño similar a las dinamitas pero con grandes ventajas en lo referente a seguridad, tienen gran resistencia al agua y una consistencia que facilita su manejo. Están sensibilizados por varias sustancias como aluminio, nitrato de monometilamina. Por lo regular se usan como carga de fondo o cuando los barrenos tienen gran cantidad de agua. Tienen el inconveniente en el último de los casos de no acoplarse al mismo diámetro del barrenos, produciendo una pérdida de energía ya que se utilizan encartuchados.

3.41.12.14. INDUGEL AV 800

Agente de voladura resistente al agua, elaborado a base de emulsiones y de nitrato de amonio, elevada seguridad en su manejo debido a su insensibilidad al roce y al impacto, baja toxicidad y buena resistencia al envejecimiento, no produce dolores



de cabeza durante su almacenamiento y empleo, alcanza una velocidad de detonación de 4.600 m/seg. Ver Figura 132 Indugel AV 800.

Usos:

- En voladuras a cielo abierto sin presencia de agua.
- Explotación de calizas en mediana minería, canteras u obras de construcción.
- Explotación de roca blanda o semidura, usando iniciador multiplicador de fondo.

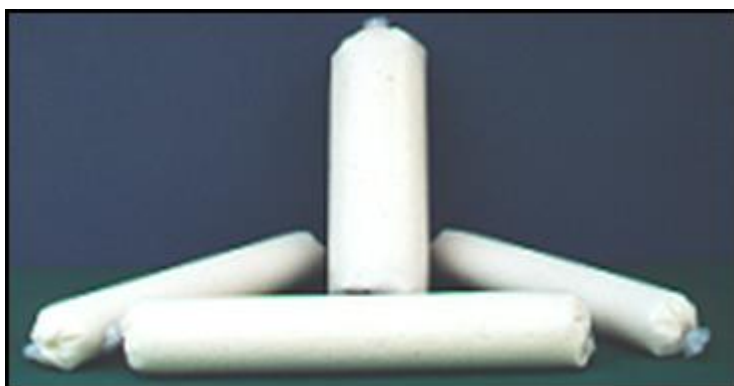


Figura 41. Indugel AV 800

Fuente: INDUMIL.

Características:

- Muy seguro en su uso y manejo.
- Ninguna resistencia al agua.
- Insensible al choque y fricción.
- No produce dolores de cabeza durante su almacenamiento y empleo.
- No sensible al detonador No. 8.
- Se recomienda su empleo en diámetros superiores a 50 mm.
- Empacado en bolsas con 25.0 Kg. de peso neto.

PRODUCTO	CÓDIGO VENTA	DIMENSIÓN (Diámetro x largo en mm)	UNIDADES POR CAJA
INDUGEL AV 800	6329	65 X 460	13
INDUGEL AV 800	6332	75 X 500	12



INDUGEL AV 800	6331	85 X 460	10
INDUGEL AV 800 DESC.	6337	127 X 420	4

Tabla 6. Empaques para explosivo indugel av 800

3.41.12.15. SLURRIES

Son explosivos de base Acuosa y TNT, agua y sustancias para mantener el explosivo homogéneo. Las propiedades de alguna composición individual dependen del tipo de proporciones de los ingredientes sólidos.

Constituidos por una mezcla de componentes oxidantes y reductores capaces de reaccionar violentamente cuando se les activa mediante un iniciador, todos estos componentes actúan dispersos en un medio acuoso. Los Slurries son específicamente diseñados para explosiones en barrenos largos y condiciones de humedad. Ellos son relativamente insensibles a los iniciadores y por lo tanto necesitan ser iniciados con un primer explosivo. Esos primeros explosivos son TNT comprimido o un iniciador especial. Los Slurries son resistentes al agua y son también bombeados directo dentro del barreno o aplicados en bolsas de plástico.

Son empleados en la voladura de rocas de dureza media en calibres pequeños, medianos, tanto interior como exterior, barrenos húmedos, tanto en voladura subterránea como a cielo abierto y en demoliciones.

3.41.12.16. EMULSIONES

Las emulsiones son materiales explosivos que contienen cantidades importantes de oxidantes disueltos en gotas de agua rodeados de un combustible que es incapaz de mezclarse.

Estos explosivos introducidos en los años 70's. Son el resultado de emulsionar sustancias inmiscibles, como nitrato de amonio diluido en agua y algún ácido graso. El resultado son pequeñas gotas de nitrato de amonio diluido, rodeadas por el ácido graso. Se sensibilizan con aire, el cual puede proporcionarse por medio de pequeñas esferas huecas o bien con una reacción química obtenida al momento de producir el explosivo. Son resistentes al agua y presentan algunos problemas en su manejo debido a su consistencia. Se utilizan como carga de fondo o cuando se tienen problemas de agua en los barrenos y al igual que los hidrogeles pierden energía al momento de detonar por el mal acoplamiento con los barrenos cuando las emulsiones son encartuchadas.



3.41.13. ACCESORIOS DE VOLADURA

3.41.13.1. Cordón detonante

Es un cordón flexible e impermeable que contiene pentrita explosiva cuya velocidad de detonación es de 7000 M/Seg. y recubierto por una serie de fibras sintéticas y revestido exterior plástico de cloruro de polivinilo (pvc) de color que forman un conjunto flexible, resistente a la tracción humedad y abrasión. Que se emplea especialmente para transmitir a los explosivos la detonación iniciada por un detonador. El cordón detonante es un medio de detonación de las cargas explosivas, a diferencia de la mecha de seguridad o lenta. Ver Figura 133 Cordón Detonante

El cordón detonante puede solamente detonar y transmitir la detonación a distancias considerables hasta las cargas explosivas. La excitación del cordón detonante se realiza mediante un detonador, en su explosión el cordón detonante ocasiona detonación sin falla de las sustancias explosivas industriales.



Figura 42. Cordón Detonante

Fuente: INDUMIL.

En la práctica de los trabajos explosivos el cordón detonante encontró aplicación especialmente en los trabajos a cielo abierto, para la explosión de cargas localizadas en perforaciones. En este proceso tiene máxima importancia la detonación completa de las cargas, cuando el cordón detonante se prolonga por toda la longitud de las perforaciones. Mediante esta modalidad de explosión se hace innecesaria la utilización de detonadores, que como se mencionó son peligrosos de manipular.



El cordón detonante contiene sustancia explosiva con alto grado de capacidad demolidora de una cubierta de papel de algodón. La envoltura tiene 3 capas: Una interior en la cual se encuentra la sustancia explosiva y una capa exterior, cubierta también con masilla. El recubrimiento del cordón detonante es de plástico de diferentes colores.

El núcleo del cordón detonante se llena con pentrita. El diámetro del núcleo es de acuerdo al gramaje con que cuenta el cordón viene en presentaciones de 3, 6, 12, 40, 80 gramos, esto quiere decir que por cada metro de cordón detonante viene ya sea 3 o el gramaje que vimos anterior mente, el color depende de la industria fabricante de igual forma su revestimiento. Su velocidad de detonación es de 6.500 a 7.000 m/seg.

La industria militar colombiana fabrica tres gamas de cordón detonante los cuales son utilizados por las empresas de minería y las fuerzas militares de Colombia, dentro de estas presentaciones contamos con el cordón detonante de tres gramos el cual es de color anaranjado oscuro y viene en bobinas de 500 metros, es utilizado básicamente en el campo de la minería en la unión de cargas de fondo en barrenos.

Se cuenta con el cordón detonante de seis gramos de color azul el cual viene en bobinas de 300 metros, es utilizado en el campo de la minería y en el ámbito militar como líneas de unión y cargas de refuerzo.

Por ultimo tenemos el cordón detonante de doce gramos de color rojo, viene en bobinas de 250 metros, utilizado especialmente en la parte militar. Los diversos colores y patrones de material textil en el cordón identifican las diferentes fuerzas (medidas en granos de material explosivo por pie) y los tipos de cordón detonante para cada fabricante. Viene en un carrete que puede tener hasta 2,000 pies de cordón. El código de fecha y planta debe estar ubicado en el carrete o en la caja.

Puede usarse para conectar varias cargas explosivas en serie, o se puede usar para iniciar otros explosivos amarrando el cordón detonante alrededor de un explosivo, pasando el cordón detonante a través de un explosivo, o haciendo un nudo en el cordón detonante dentro del explosivo.

3.41.13.1.1 Cordón detonante militar

El cordón detonante militar es un cordón redondo, flexible e impermeable hecho de varios materiales textiles o plásticos consta de un núcleo de HE (6.4 libras de PETN por 1,000 pies) envuelto en una capa plástica reforzada y a prueba de agua, de color verde oliva. Ver Figura 134 Cordón Detonante Militar



Está hecho de manera similar que el cordón detonante industrial. Las normas varían dependiendo de la aplicación. En años recientes, el Departamento de Defensa ha usado cordón detonante fabricado industrialmente. Para distinguir entre la espoleta de tiempo y el cordón detonante, vea el núcleo del explosivo. El núcleo del explosivo del cordón detonante es blanco o rosa, mientras que la espoleta de tiempo tiene un núcleo de pólvora negra.



Figura 43. Cordón Detonante Militar.

Fuente: ATF.

Este cordón detonante tiene un diámetro de aproximadamente 0.5 centímetros, pesa 18 libras por 1,000 pies y exhibe resistencia a la ruptura de 175 libras. El cordón detonante es funcional en la misma gama de temperatura del explosivo plástico, aunque la cubierta es quebradiza a temperaturas bajas. La humedad puede penetrar el relleno explosivo a una distancia máxima de 15,24 centímetros de cualquier corte o rajadura en el recubrimiento. El cordón detonante empapado en agua puede detonar si existe un extremo seco que permite la iniciación. Deje un extremo de 15,24 centímetros al hacer conexiones o cebar cargas.

3.41.13.2. MECHA LENTA

La mecha lenta es un cordón con núcleo de pólvora negra, recubierto de papel, varias capas de hilo de algodón, brea y cloruro de polivinilo (pvc), para garantizar impermeabilidad, flexibilidad y resistencia a la abrasión. El recubrimiento plástico le proporciona una buena seguridad de funcionamiento bajo el agua y cuyo tiempo de



combustión es de 130 Seg./mt con una tolerancia de más o menos 10 Seg. Ver Figura 135 Mecha Lenta.

La mecha de seguridad es el medio por el cual se transmite el fuego de una velocidad uniforme hasta un detonador ordinario o hasta el explosivo, generalmente cuando se trata de pólvora negra que se pretende iniciar.



Figura 44. Mecha Lenta.

Fuente: INDUMIL

Características:

- Usado como transportador de llama y como iniciador de detonadores comunes No. 6 y 8 en cápsulas de cobre y aluminio.
- Transmisor de energía calórica hasta el detonador sensible a la misma, el cual explota y se encarga de iniciar los explosivos sensibles que están en contacto con éste.
- Manipularse con el cuidado que requiere un elemento combustible y explosivo sensible a la fricción, a la chispa y el fuego.
- Muy buena resistencia al agua siempre y cuando no se haya maltratado su capa impermeabilizante.
- Aceptable resistencia a la tracción, abrasión y esfuerzos mecánicos.
- Unidades con numeración codificada visible e invisible.
- Su presentación se hace en bobinas de 250 m, embaladas en cajas de cartón.

3.41.13.3. Espoleta de tiempo m 700

La espoleta de tiempo militar M700 consiste de un núcleo de pólvora negra dentro de una envoltura de fibra verde oscuro con una cubierta plástica impermeable. La



M700 es de color verde oscuro con una banda amarilla a intervalos de 1 pie o 18 pulg. Estas marcas se usan para calcular la longitud aproximada de la espoleta. La espoleta de tiempo M670 más antigua puede no tener la banda amarilla. El color del núcleo de la espoleta de tiempo es negro o gris. La espoleta de tiempo se usa principalmente en demoliciones militares para encender cápsulas explosivas no eléctricas y también se puede utilizar para iniciar mezclas pirotécnicas.

3.41.13.4. Mecha de combustión externa

Es un accesorio de voladura formado por masa pirotécnica y varios alambres, todo este conjunto se encuentra cubierto por un material plástico. Cuando este accesorio se utiliza complementariamente con los Conectores, tiene como objetivos principales, eliminar el chispeo individual de las mechas de seguridad, evitar la exposición del operador a la presencia de los humos y permitir la evacuación segura ante la posibilidad de una iniciación prematura. Usándolo adecuadamente proporciona el tiempo suficiente al operador para retirarse a un lugar seguro.

En las conexiones de las redes de encendido, la mecha de combustión externa se pasa por la ranura del conector, el cual es presionado adecuadamente con la finalidad de obtener una fijación correcta; Además esta misma fijación se puede obtener haciendo un enrollamiento o torniquete en la parte posterior de la ranura y sin necesidad de presionar ésta. La combustión de la mecha de combustión produce el calor suficiente para activar la masa pirotécnica del conector que a su vez garantiza un encendido eficiente de la mecha de seguridad. El tiempo de combustión adecuado y constante, permite que las voladuras puedan planificarse con una secuencia y obtener resultados eficientes.

La longitud del Cordón de Ignición a usarse en un disparo debe ser tal que permita que todas las Mechas de Seguridad estén encendidas y quemándose dentro de los taladros antes que la primera active la carga correspondiente según el plan de voladura trazado.

3.41.13.5. Mecha rápida

Es un accesorio de voladura formado por masa pirotécnica y dos alambres, todo este conjunto se encuentra cubierto por un material plástico que garantiza su impermeabilidad, flexibilidad y resistencia a la abrasión. Ver Figura 136 Mecha Rápida. Usada como transportadora de llama y como iniciadora de detonadores inelétricos a una velocidad más alta que la mecha de seguridad.



Figura 45. Mecha Rápida.

Fuente: FAMESA.

3.41.13.6. Micro retardos

El retardo para cordón detonante es un accesorio de voladura conformado por un protector plástico moldeado adecuadamente dentro del cual va ensamblada una cápsula de aluminio que contiene el elemento de retardo y un fulminante respectivo. En ambos extremos del plástico hay un dispositivo que permite ubicar el cordón detonante en forma de "U", el cual será fijado por sus respectivas cuñas de seguridad. Ver Figura 137 Micro Retardos

Este tipo de retardo se diseñó para trabajar indistintamente en las dos direcciones puesto que el cordón detonante está en contacto en ambos extremos de la cápsula, la que tiene una carga suficiente para iniciarlo.



Figura 46. Micro Retardos



Fuente: FAMESA.

Este accesorio se utiliza para retardar la iniciación de los taladros dando secuencia a la formación de las caras libres y es colocado en las líneas troncales de cordón detonante, de las redes de voladuras en minería a cielo abierto, canteras y cualquier trabajo de remoción de rocas. Su operatividad es sumamente fácil y rápida.

La selección adecuada de los retardos da como resultado una mejor fragmentación y mínima proyección del material volado; además proporciona un mejor control de rotura hacia atrás en la última fila y de los niveles de vibración del área circundante. Su característica de no eléctrico hace que pueda ser usado en cualquier condición de terreno y tiempo sin los riesgos de una iniciación prematura.

Características técnicas.

Tiempo en milisegundos	9	17	25	35	42	50	75	100
Color Protector Plástico	verde	amarillo	rojo	naranja	celeste	azul	lila	blanco

Tabla 7. Potencia explosiva: Equivale a un detonador No. 6

3.41.13.7. Conector de superficie

El conector de superficie es uno de los productos que conforman el sistema de iniciación no eléctrico de cargas explosivas. Ver Figura 138 Conectores de Superficie. Tiene como objetivo producir un retardo en líneas troncales de cordones detonantes, ya sea en trabajos de remoción de materiales rocosos, en minería a cielo abierto y subterráneo.



Figura 47. Conectores de Superficie

Fuente: Grupo MARTE ESING.

3.41.13.8. Iniciadores de mecha m-60

El encendedor de espoleta M60 es un encendedor impermeable que se utiliza en el ejército para iniciar la espoleta de tiempo. Se emplean estos dispositivos para encender mecha lenta de seguridad en todas las condiciones meteorológicas, aún submarinas, si está debidamente protegido contra el agua. Introduzca la espoleta a través de un ojal de caucho y un collar ranurado.

Este procedimiento asegura la mecha lenta de seguridad cuando se aprieta la copa de extremo en el encendedor. Sin el pasador de seguridad, el tirón del anillo de tracción suelta el conjunto del percutor, lo que permite que el pasador de disparo inicie el cebado, y que se encienda la mecha lenta de seguridad.

3.41.13.9. Encendedor de espoleta de tiempo

Un encendedor de espoleta de tirar consiste de un tubo de papel cerrado en un extremo que contiene un dispositivo de encendido que contiene un compuesto golpeador, un alambre que sobresale a través del extremo cerrado del tubo. Para usarse, la media de seguridad está insertada en el extremo abierto del encendedor hasta que toca el elemento de iniciación del encendedor. La espoleta está firmemente sujeta en su lugar por un diente sujetador de metal que se atora en la espoleta. La espoleta se enciende tirando del alambre que sobresale del tubo.



3.41.13.10. Multiplicadores (booster o primer).

El BOOSTER es un explosivo potente de alta densidad, velocidad y presión de detonación, por lo que las columnas explosivas que serán activadas con éste, maximizarán su desarrollo energético, lo cual redundará favorablemente en los resultados de las voladuras. Se le conoce también como primers o cebos. Son utilizados para iniciar explosivos insensibles de tipo slurries, ANFO y nitrocarbonitratos, donde un detonador común o el poder explosivo de un cordón detonante no los activa, éstos se usan en la voladura de taladros de diferentes diámetros en las minas de tajo abierto, canteras y eventualmente en minería de subsuelo.

3.41.13.11. Pentofex.

Multiplicador iniciador de fondo de barreno de los agentes de voladura, conformado por mezcla de potentes explosivos, con alta presión y velocidad de detonación.

Características:

- Excelente resistencia al agua.
- Gran presión de detonación y alta densidad.
- Pese a su buena seguridad en su manejo debido a su relativa baja sensibilidad al roce fuego y al impacto, se deben seguir todas las normas de seguridad establecidas para altos explosivos.
- Sensible al detonador No. 8 común, eléctrico o nonel y al cordón detonante.
- Unidades con numeración codificada visible y rótulo interno.
- Envasados en tubos de cartón embalados en cajas de cartón.
- Velocidad de detonación es de 6700 m/s

PRODUCTO	DIMENSIÓN PESO UNITARIO (g)	UNIDADES POR CAJA
PENTOFEX TIPO D-1	337.5	74
PENTOFEX TIPO D	450 (3 ORIFICIOS)	56
PENTOFEX TIPO D-2	450 (2 ORIFICIOS)	56

Tabla 8. Multiplicador pentofex.



3.41.13.12. Conector para mecha de combustión externa

El conector es un complemento de la mecha de combustión externa, de la cual recibe el calor necesario para encenderse y activar a la mecha de seguridad. El conector tiene una ranura que permite una conexión segura y eficiente con la mecha de combustión externa en el cual asegura el cuerpo metálico del conector, brindando al operador las facilidades necesarias para realizar la voladura aún en condiciones severas de humedad. Ver Figura 139 Conector.

Famesa (fábrica de explosivos peruana), elabora conectores con ranura, los cuales están conformados por un casquillo de aluminio, en cuya parte inferior tiene un corte paralelo a la base. Esta parte se encuentra pintada de color rojo para diferenciarlo del Fulminante.

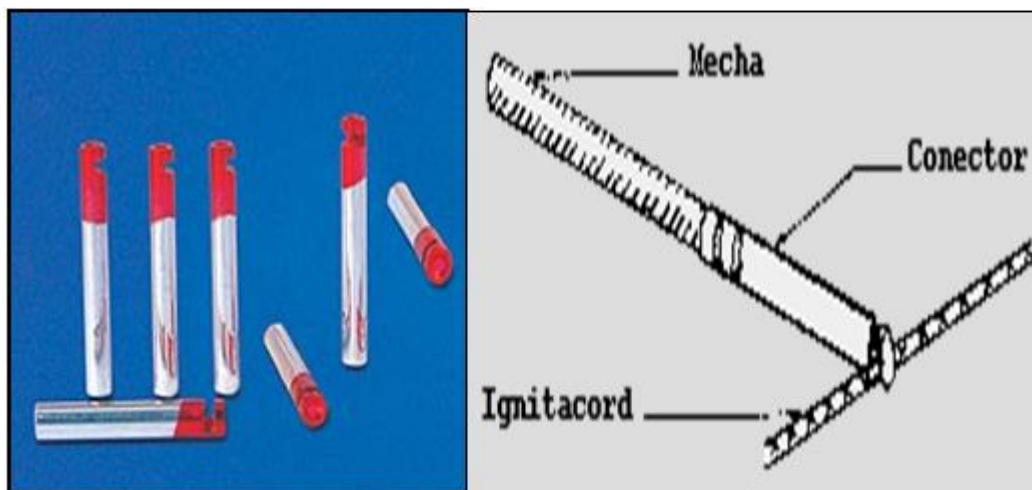


Figura 48. Conector.

Fuente: FAMESA.

En la ranura del conector se coloca la mecha de combustión externa y para mantener un contacto seguro se presionan la base o se realiza un enrollamiento (torniquete) en la parte posterior del cuello. Es posible también asegurar la mecha utilizando un medio de sujeción.

3.41.13.12.1 Características técnicas

DIÁMETRO EXTERNO (mm)	6.3
LONGITUD DE CASQUILLO (mm)	45



ANCHO DE LA RANURA (mm)	2.4
CARGA DE MATERIAL PIROTÉCNICO (g)	0.5
ALTURA DE CARGA (mm)	14

Tabla 9. Características técnicas para conector para mecha de combustión externa.

3.42. DETONADORES.

Los detonadores son accesorios de voladuras encargados de iniciar las sustancias explosivas, gracias al explosivo brizante que contienen internamente, para su uso y manipulación se requiere aplicar todas las medidas de seguridad necesarias ya que son extremadamente delicados y están sujetos a la detonación involuntaria por agentes externos como las altas temperaturas, el roce o presión.

Se conocen cuatro tipos de detonadores los cuales se diferencian entre sí por los medios que requieren para su iniciación, estos varían de acuerdo a la casa fabricante y al tipo de detonador. A continuación veremos las clases de detonadores existentes en el ámbito comercial y militar.

3.42.1. Detonadores eléctricos

Un detonador eléctrico está constituido por una cápsula metálica, de cobre o aluminio, cerrada por un extremo, un explosivo iniciador, un inflamador y un explosivo base o secundario.

El inflamador queda sujeto al casquillo mediante un tapón, normalmente de plástico, fuertemente comprimido en la vaina. El cierre estanco se consigue mediante un engrase especial. Cuando el detonador es de tiempo retardo o microretardo, lleva incorporado entre el inflamador y el explosivo primario un elemento retardador de tipo pirotécnico, constituido por un casquillo metálico en cuyo interior se ha colocado una pasta retardadora de precisión.

La energía eléctrica es llevada hacia el detonador mediante alambres de metal con aislamiento de plástico, los cuales se introducen a través de un tapón de hule o plástico. El tapón colocado en el extremo abierto del casco del detonador forma un cierre hermético resistente al agua. Los extremos de los alambres son unidos dentro del detonador por un alambre de corta longitud y diámetro muy pequeño llamado filamento, el cual queda en contacto con la carga de ignición. Cuando se aplica corriente eléctrica se pone incandescente el filamento y el detonador explota.



El inflamador esta conformado por dos electrodos separados por una pieza de plástico, cuyos extremos están unidos entre sí por un filamento metálico calibrado el cual esta embebido en una composición inflamadora y protegido por un tapón de P.V.C. antiestático, los terminales de los electrodos del lado opuesto al puente, queda conectados a los hilos de alimentación del detonador los cuales llevan un recubrimiento especial.



FIGURA 49. DETONADOR ELÉCTRICO.

Fuente: Grupo MARTE ESING

La píldora o cerilla del inflamador, recibe a través de los dos hilos conductores la energía necesaria para que al calentarse el puente de incandescencia, se produzca su inflamación provocando la explosión de la carga primaria y a continuación de la carga base, cuando el detonador es instantáneo.

El detonador eléctrico es un artefacto que bajo una apariencia exterior simple, encierra en su interior una verdadera máquina de precisión. Los alambres de detonador sencillos o dobles, generalmente de aluminio, cobre o hierro, vienen en varias longitudes de 4 a 400 pies y están cubiertos con aislante plástico de colores. Ambos alambres de detonador pueden ser del mismo color, o de diferente color. Los detonadores industriales eléctricos son instantáneos o tienen un período de retardo.

La clasificación de los detonadores eléctricos se da básicamente por tres características principales que son las características eléctricas, el tiempo de detonación y aplicación.

3.42.2. De acuerdo a las características eléctricas

Esta primera clasificación permite al usuario la elección de los detonadores más idóneos para ser utilizados en lugares donde pueda existir iniciación imprevista. Las



diferentes características de tiempo proporcionan la posibilidad de realizar voladuras secuenciadas, adaptadas a todo tipo de terreno con lo que se consiguen excelentes resultados de fragmentación y permite controlar adecuadamente el nivel de vibraciones y onda aérea. Existen algunos tipos de trabajo que por su particularidad requieren el uso de detonadores especiales. Dentro de ese grupo tenemos los detonadores sísmicos, detonadores para minas de carbón, para trabajos bajo grandes presiones de agua y los inflamadores eléctricos.

3.42.3. De acuerdo a las características eléctricas los detonadores se clasifican en:

3.42.3.1. Detonadores sensibles (s)

Su inflamador obedece a una débil corriente para su iniciación, es utilizado en trabajos sísmicos y de geología, se debe manipular con cuidado son sensibles a la corriente estática que se pueden producir por el operador e inyectarla al detonador al efectuar una mala manipulación, terminando en un accidente, de acuerdo a la casa fabricante las corrientes continuas necesarias para iniciarlos varían pero estos se pueden trabajar con una constante de 0.8 amperios para su iniciación.

3.42.3.2. Detonadores insensibles (i)

Su inflamador obedece a una corriente un poco mayor que el detonador sensible para que el inflamador haga iniciación, es utilizado en trabajos de voladura a cielo cubierto y subterráneas ampliamente utilizado por las fuerzas militares en trabajos de demoliciones, una mala manipulación puede generar por corriente estática su activación produciendo un accidente, la corriente continua necesaria mínima para su iniciación es de 1.5 amperios esta puede variar muy poco de acuerdo a la casa fabricante.

3.42.3.3. Detonadores de alta insensibilidad (ai)

Su inflamador obedece a una corriente mayor que la utilizada por el detonador insensible, es utilizado en voladuras a cielo cubierto, en túneles, áreas con vías férreas, estaciones de radios. Se recomienda su empleo en aquellos trabajos donde las condiciones no son las más precisas ni del terreno o del contorno, como los anteriores se pueden presentar accidentes por corrientes estáticas. La corriente continua necesaria mínima para su iniciación es de 25 amperios.



3.42.3.3.1 De acuerdo al tiempo de detonación

De acuerdo con el espacio de tiempo transcurrido entre el momento en que se energiza el detonador y el instante en que se produce la detonación los detonadores se clasifican en:

3.42.3.4. Detonadores instantáneos

En estos detonadores al incidir directamente el chorro de fuego de la píldora sobre la carga primaria, la explosión del detonador coincide con el instante de la iniciación del inflamador. Realmente desde el momento en que se cierra el circuito hasta el momento en que explota el detonador transcurre un periodo de tiempo muy corto, cuya magnitud depende de la cantidad de energía aplicada. Con el adelanto de la técnica de voladura, la fabricación de los accesorios también ha evolucionado; es así como el fulminante eléctrico instantáneo se ha desarrollado como un sustituto de la Mecha de Seguridad y del Fulminante Común.

El fulminante eléctrico instantáneo consiste en una cápsula de aluminio que contiene en su interior un explosivo brizante y otro de explosivo primario; esta última se encuentra en contacto con la gota eléctrica, la que a su vez está fijada a los alambres conductores de energía. Tienen dos alambres de cobre calibre 20 ó 22, generalmente uno rojo y el otro amarillo. Estos dos colores distintos son de gran ayuda al hacer las conexiones. El Fulminante es activado por acción de la corriente eléctrica, la que se transmite por los alambres hacia iniciar la gota eléctrica y luego a la carga primaria.

Está diseñado para detonar inmediatamente después de que se le haya aplicado suficiente intensidad de corriente, permitiendo la iniciación simultánea de un buen número de cargas explosivas, teniendo en cuenta la capacidad del explosor. Normalmente, mantenemos en stock fulminante de sensibilidad estándar (A.N.) con longitudes de cable de 3,4 y 6m. A solicitud del cliente se puede suministrar fulminantes eléctricos con especificaciones especiales.

3.42.3.5. Detonadores de retardo

Los detonadores temporizados de retardo o microretardo están diseñados para hacer explosión, según una secuencia predeterminada, a intervalos regulares de tiempo. La diferencia fundamental de estos detonadores con respecto a los instantáneos está en que van provistos de un artificio retardador o rele interpuesto entre la píldora y la carga primaria.



El elemento retardador está compuesto por una composición pirotécnica, al arder la píldora se inicia la combustión en un extremo de dicho elemento retardador, propagándose la misma uniformemente hasta alcanzar el otro extremo que está en contacto con la carga primaria.

3.42.3.6. Detonador de retardo de 500 mseg

Estos detonadores explotan con secuencias de medio en medio segundo. Los colores de los hilos son el azul y el otro color depende de la sensibilidad.

3.42.3.7. Detonador de microretardo de 20 y 30 mseg

Estos detonadores que en realidad deberían llamarse de microretardo, teniendo en cuenta el intervalo de tiempo entre números consecutivos.

3.42.3.8. De acuerdo a las aplicaciones

Dentro de los diferentes tipos de detonadores existentes hay algunos los cuales son diseñados para ser utilizados en trabajos específicos donde sus características y rendimiento facilitan los trabajos de voladuras y los diferentes usos a los que son sometidos.

3.42.3.9. Detonadores eléctricos para minas de carbón

Son detonadores adecuados para su utilización en ambientes grisosos o inflamables. La cápsula e hilos de alimentación son siempre de cobre. Dentro de este grupo se fabrican, en lo que respecta a características eléctricas detonadores sensibles e insensibles, y a lo que hace referencia a la retardo detonadores instantáneos, de retardo de medio segundo y de microretardo de 30 mseg.

3.42.3.10. Detonadores sísmicos

La exploración sísmica constituye un medio auxiliar de la geología para estudiar las formaciones subterráneas. Mediante este procedimiento se registran los tiempos transcurridos desde el instante que se produce la explosión en un punto dado, hasta que el tren de ondas es captado por los geofonos después de haber sido reflejadas por las diferentes estructuras geológicas. La emisión de la corriente eléctrica al circuito de voladura, así como la llegada del tren de ondas sísmicas son registradas



en una banda magnética, lo que permite conocer el tiempo transcurrido entre el instante de la explosión y la llegada de dicho tren a los geofonos.

Es un detonador capaz de convertir un impulso eléctrico en una detonación. Se caracteriza por contar con un iniciador electro-pirotécnico ultra rápido, dando un tiempo promedio entre el momento en que se entrega la energía especificada y el instante en que se produce la detonación menor a 1 milisegundo. Está constituido por una cápsula de aluminio, una carga explosiva compuesta por un explosivo secundario y uno primario y un inflamador electro-pirotécnico de iniciación ultra rápida. El elemento inflamador va alojado en un dispositivo antiestático y soldado a dos alambres conductores cubiertos por un plástico semiconductor.

De acuerdo al tiempo que transcurre entre el instante de entregar la energía eléctrica y el de la detonación de la carga explosiva, los detonadores eléctricos de retardo se pueden clasificar en dos series:

- Serie de Milisegundo (MS).
- Serie de Medio segundo (1/2S).

3.42.3.11. Detonador eléctrico m6

La cápsula explosiva eléctrica M6 contiene una carga base de RDX, una carga intermedia de acida de plomo y una carga de iniciación. Ver Figura 141 Cápsula eléctrica M6. La cápsula explosiva eléctrica consiste de una capa (armazón) de aleación de aluminio de aproximadamente 2.35 pulg. de largo, un alambre de puente, una clavija de hule (o de hule y sulfuro) y tiene dos alambres conductores de 12 pies. La cápsula explosiva tiene dos pliegues en forma de circunferencia. Las cápsulas explosivas eléctricas son instantáneas.

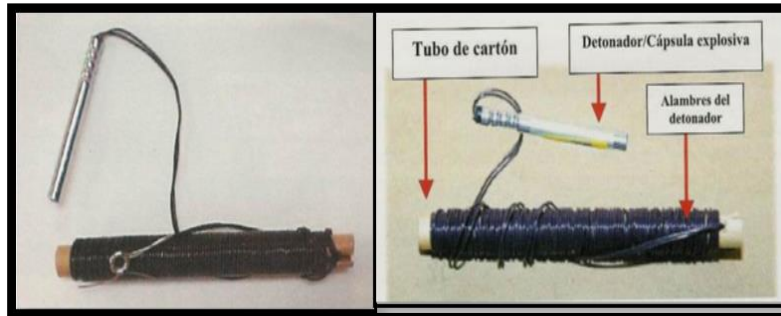


Figura 50. Cápsula eléctrica M6.

Fuente: ATF

Use cápsulas detonantes eléctricas para la detonación en general o cuando se dispone de una fuente de energía, tal como un equipo detonante o un acumulador. Se pueden usar cápsulas comerciales o militares. Las cápsulas detonantes eléctricas requieren 1.5 amperios de energía para su activación, y la cápsula eléctrica de distribución reglamentaria es la especial M6.

3.42.3.12. DETONADORES INELÉCTRICOS

Los detonadores ineléctricos son casquillos metálicos cerrados en un extremo en el cual contienen una carga explosiva de gran sensibilidad, por ejemplo fulminato de mercurio. Están hechos para detonar con las chispas del tren de fuego de la mecha de seguridad.

Los detonadores ineléctricos están compuestos por una carga primaria de una sustancia inestable y altamente sensible, estas sustancia varía de acuerdo a las características de fabricación del detonador, en algunas cápsulas esta sustancia se compone de fulminato de mercurio y en otras puede ser azida de plomo. Se encuentra una segunda carga compuesta de un alto explosivo este puede ser RDX, HMX o PENT.

Varían en su longitud dependiendo de su utilización y de su fabricación, en el mercado se encuentran detonadores número 4 al 12, siendo él más común él número 8, llamado detonador común No. 8, estos son diseñados para ser iniciados por medio de la transmisión pirotécnica que le proporciona la mecha lenta.



3.42.3.13. Detonadores o cápsulas detonantes m7

Las cápsulas M7, son fabricadas para uso militar, su longitud con referencia al detonador común No. 8 es más grande cuenta con 2.350 pulgadas. Se emplean las para la detonación de explosivos.

Son a la vez el elemento detonante en determinados sistemas y dispositivos de disparo. Se clasifican las cápsulas detonantes en relación con su potencia, de acuerdo con el tamaño de la carga principal. Las cápsulas detonantes comerciales son normalmente los #6 o #8 usadas para la detonación de los explosivos más sensibles, tales como la dinamita comercial y el tetril. Las cápsulas detonantes militares especiales (M6 eléctrica y M7 inelétricas) aseguran la detonación positiva de los explosivos militares generalmente menos sensibles.

3.42.3.14. DETONADORES NONEL

El Sistema de Iniciación no eléctrico utiliza una onda de choque para transmitir una señal de activación a cargas explosivas remotas, donde dicha onda de choque es producto de la activación de un explosivo o una mezcla explosiva con o sin confinamiento inicial. Esta onda de choque es transmitida a través de un tubo plástico (caso del detonador no eléctrico) o a través de un cordón (caso del cordón detonante). Ver Figura 142 Detonador de Nonel.

El uso de un detonador no eléctrico con un tubo de impacto como medio de iniciación se ha vuelto muy popular. Se diseñó inicialmente para el uso en operaciones de minería y construcción. Actualmente, la configuración de detonador no eléctrico y tubo de impacto está fabricada y se utiliza en casi todos los tipos de ambientes de la industria comercial y operaciones militares. El detonador y el tubo de impacto se montan durante el proceso de fabricación y se venden como una unidad montada solamente.



Figura 51. Detonador de Nonel.

Fuente: Grupo Marte ESING.

Se utiliza principalmente como iniciador de explosivos, dinamita, emulsiones. Se utiliza en minería subterránea y a cielo abierto, tanto en labores de desarrollo como en producción, en voladura de banco en minería a cielo abierto y en voladuras de desarrollo horizontales, verticales e inclinadas y producción en minería subterránea.

El sistema de iniciación nonel requiere de unos elementos especiales para ser acoplado y para su iniciación primaria, la cual se realiza por medio de una pistola que internamente cuenta con un fulminante especial que inicia el polvo exógeno existente en el tubo de choque. El sistema tiene las siguientes partes:

3.42.3.14.1 Tubo de impacto

El tubo de impacto, algunos conocidos como nonel o primadet, es un tubo hueco de plástico de diámetro pequeño con color o sin color, forrado con una capa delgada de HMX y polvo de aluminio en las paredes interiores del tubo. La mezcla de polvo es de color plateado y no se le detecta ningún olor. El tubo de impacto es muy insensible a la iniciación por calor o impacto ordinario.

Se requiere de un alto impulso para energizarlo. Cuando se inicia, éste transmite una pequeña onda de impulso a través del tubo de plástico a un detonador no eléctrico acoplado. Ya encendido, se pueden producir gases de dióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrocarburo. Nunca se aconseja sujetar el tubo en la mano durante la iniciación debido al hecho de que, bajo ciertas circunstancias, se puede romper, causando que se escapen los gases. Además, ya que está funcionando, el tubo se puede derretir y causar quemaduras térmicas graves si se expone inmediatamente a la piel.



3.42.3.14.2 Elemento de retardo

El sistema de iniciación noel cuenta con una diversa gama de detonadores en cuya estructura cuenta con elemento de retardo, lo cual le permite que sea usado en todo tipo de voladuras. El sistema de retardo esta compuesto por un cilindro metálico cargado con una mezcla de sustancias mixtas pirotécnicas de longitud variable de acuerdo al tiempo especificado para cada detonador de retardo.

El sistema de retardo de los detonadores se puede identificar con facilidad por la cinta adhesiva de plástico o papel que lleva impreso el número de retardo correspondiente al detonador, la etiqueta va adherida al tubo de choque.

3.42.3.14.3 Detonador

El detonador noel está elaborada en aluminio o cobre con una longitud entre 50 y 95 mm en cuyo interior están contenidos los elementos de retardo y cargas explosivas. La carga explosiva está constituida por dos cargas ubicadas secuencialmente, un explosivo primario sensible a la llama y un explosivo secundario con potencia suficiente para iniciar los explosivos comerciales utilizados actualmente. El detonador cuenta con una manguera de cierre ubicada entre la cápsula y el tubo de choque, es un dispositivo de goma destinado a sellar la unión del tubo no eléctrico con la cápsula, y proporcionar un cierre hermético que permite que no ingreses humedad al interior del detonador.

3.42.3.14.4 Cápsula explosiva no eléctrica militar (tubo de impacto)

La cápsula explosiva no eléctrica militar es un tubo pequeño de aluminio relleno de explosivos (detonador) plegado de fábrica a una longitud de 30 pies del tubo de impacto. El tubo de impacto es un tubo delgado de plástico con una capa delgada de material explosivo especial depositada en la superficie interior. Un conector especial de plástico (llamado gancho "J") está montado al extremo sellado del tubo de impacto que está sellado con una cubierta pequeña. El gancho "J" facilita el montaje rápido a un cordón detonante.

El propósito de la cápsula MI 1 es para uso en pozos de sondeo. Para facilitar su identificación, tiene adaptadas dos banderillas plásticas de colores brillantes al tubo de impacto cerca del extremo de la cápsula explosiva. Una banderilla roja está montada a un metro de la cápsula explosiva y una banderilla amarilla a dos metros del extremo de iniciación de la cápsula explosiva.



3.42.3.14.5 Cápsula detonante nonel, tubo de choque de 30' (m11)

La M11 es una cápsula detonante de alta resistencia, engarzada en la fábrica a una extensión de 30' de tubo de choque. Un conector plástico movable, conocido como gancho en J, está adjunto al extremo libre del tubo de choque. El gancho permite la fijación rápida y fácil a un cordón detonante. Dos banderas plásticas coloradas son fijadas al tubo de choque cerca de la cápsula detonante. Se adjunta una bandera roja a un metro de la cápsula detonante, y una bandera amarilla a dos metros de la cápsula detonante. Se empacan las M11 en grupos de 6 por paquete.

Se puede usar la M11 para cebar explosivos militares reglamentarios o iniciar el cordón detonante o tubo de choque. La M11 envía un choque de iniciación o detonación ligera a través del tubo de choque a la cápsula detonante. El tubo de choque debe ser iniciado por una cápsula detonante (tipo revelador) (M11, M16, M12, M13, M14 o M18) o por un encendedor de espoleta especial M81. La detonación de la M11 es instantánea.

3.42.3.14.6 Cápsulas detonantes nonel (tubo de choque de 500' (m12))

La M12 es una cápsula detonante de baja resistencia engarzada en la fábrica a una extensión de 500' de tubo de choque. Un conector plástico especial está fijado al detonador para facilitar la fijación rápida y fácil al tubo de choque con hasta 5 M11, M12 o M13. Se distribuye la M12 en un carrete.

Se usa la M12 para transmitir un impulso de detonación de tubo de choque de un iniciador (u otra cápsula de relevo) a otra cápsula de relevo o cápsula detonante de tubo de choque de alta resistencia (tal como la M11) que inicia los explosivos militares reglamentarios. Se usa la M12 solamente como línea de transmisión en un sistema de disparo. No tiene suficiente salida para iniciar con confianza la mayoría de los explosivos militares.

La M12 funciona enviando un choque inicial o detonación ligera a través del tubo de choque a la cápsula detonante. La cápsula detonante entonces activa hasta 5 tubos de choque contenidos en el conector plástico. El tubo de choque de la M12 debe ser activado por otra cápsula detonante o el encendedor de espoleta especial M81.

NOTA: Las cápsulas de tipo de relevo de baja resistencia no pueden, con toda seguridad, activar explosivos tales como el cordón detonante. Solamente pueden activar tubos de choque.



3.42.3.14.7 Cápsula detonante nonel (tubo de choque de 1.000' (m13))

La M13 es una cápsula detonante de baja resistencia engarzada a una extensión de 1.000' de tubo de choque. Un conector plástico especial está fijado al detonador para facilitar la rápida y fácil fijación a hasta 5 tubos de choque en un conector plástico. La M13 difiere de la M12 solamente en el tamaño de su carrete.

Se usa la M13 para enviar un impulso desde un iniciador (u otra cápsula de relevo) a otra cápsula de relevo o tubo de choque de alta resistencia (tal como la M11 o M16), que activa los explosivos militares reglamentarios. Se usa la M13 solamente como línea de transmisión en un sistema de disparo. No tiene suficiente salida para iniciar la mayoría de los explosivos militares.

3.42.3.15. DETONADOR ELECTRÓNICO

El sistema de iniciación por detonador de retraso electrónico, lo podemos encontrar no eléctrico o eléctrico; utiliza como carga principal 790 mg de PENT y de carga iniciadora ácida de plomo y contiene además una célula de almacenamiento de energía eléctrica (condensador), este impulsa un oscilador en el momento adecuado, teniendo en cuenta el tiempo de retraso programado.

El detonador electrónico es utilizado con gran aceptación en trabajos de voladura subterránea en vista que no es afectado por energías externas.

3.43. PROPIEDADES GENERALES DE LOS EXPLOSIVOS

Son las propiedades físicas que identifican a cada explosivo y que se emplean para seleccionar el más adecuado para una voladura determinada, entre las principales se destacan:

- Potencia relativa
- Brisancia o poder rompedor
- Densidad
- Velocidad de detonación
- Aptitud a la transmisión o simpatía
- Sensitividad
- Estabilidad
- Sensibilidad
- Categoría de humos
- Resistencia a la humedad



3.43.1. Potencia relativa

Es la medida del contenido de energía del explosivo y del trabajo que puede efectuar, se mide mediante la prueba de Trasluz que determina la capacidad de expansión que produce la detonación de 10 gramos de explosivo disparado dentro de un bloque cilíndrico de plomo de dimensiones específicas, luego se compara la proporción de la fuerza desarrollada por el explosivo en prueba con respecto a la desarrollada por igual peso de gelatina explosiva. La gelatina se toma como un patrón ya que posee un 100% de potencia.

El resultado se expresa en centímetros cúbicos cuando se indica la capacidad o trabajo del explosivo debido al incremento del volumen del agujero inicial, o en porcentaje cuando se compara con el patrón. Así una dinamita tendrá una fuerza del 60% cuando la expansión que se provoca en el bloque de plomo es igual al 60% del volumen generado por la detonación de la gelatina explosiva.

3.43.2. Brisancia o poder rompedor

Es el efecto demoledor o triturador que aplica el explosivo sobre la roca para iniciar su rompimiento. Como factor dinámico de trabajo es consecuencia de la onda de choque, y está vinculado a la densidad y a la velocidad de detonación, o en otras palabras a la presión de detonación que muchas veces se utiliza como base comparativa.

Se determina mediante la prueba de HESS que se expresa en mm. De aplastamiento que sufre un molde de plomo cilíndrico, de dimensiones determinadas por el efecto de la explosión de 100 gramos de explosivo. El explosivo se dispara sobre un disco de acero encima de un bloque de plomo.

Los valores obtenidos también se comparan a veces con la gelatina explosiva como patrón, que en este caso produce alrededor de 25 mm de aplastamiento.

3.43.3. Densidad

Se llama densidad del explosivo a la relación que existe entre el peso de la carga y el volumen que ocupa.

En todo explosivo se distinguen 3 densidades:

3.43.3.1. Densidad absoluta o de cristal:

Se define como el peso del explosivo puro (cristalizado), que esta contenido en la unidad de volumen, sin intersticio alguno de aire.



3.43.3.2. Densidad de carga:

Se define como el peso del explosivo, que esta contenido en la unidad de volumen, correspondiente a la fracción con carga de la perforación; esta densidad es la de mayor importancia en el proceso de detonación.

3.43.3.3. Densidad gravimétrica o aparente:

La densidad gravimétrica es la relación del peso del explosivo cuando el explosivo se encuentra en polvo o en trozos y entre los cristales o trozos el espacio esta ocupado por aire.

Explosivos más densos, aunque más caros, pueden resultar más económicos, en rocas duras de alto costo de perforación, debido a que se pueden incrementar sensiblemente el burden y el espaciamiento, disminuyendo significativamente el número de tiros.

La densidad es un elemento importante para el cálculo de la cantidad de la carga de voladura, normalmente varía entre 0.75 y los 1.0 en los agentes de voladura, entre 0.9 y 1.2 en las dinamitas polvorientas y entre 1.2 y 1.5 en las dinamitas gelatinosas.

Otras consideraciones:

- Peso del explosivo por unidad de volumen, expresado en Gramos por centímetro cúbico (g/cm³).
- la densidad del ANFO a granel es aproximadamente de 0.85 g /cm³)
- Densidades menores de 1.0 g/c flotan en el agua. Los productos de densidades altas son más fácilmente presionados a muerte que los de densidades más bajas.
- La densidad de carga son los kilogramos de explosivo por metro de barreno (Kg. / m.)
- Roca dura (masiva) requiere explosivo de alta densidad y alta velocidad de detonación.
- Roca suave (estructurada) requiere explosivo de baja densidad y baja velocidad de detonación.

3.43.4. Velocidad de detonación



Es la medida de la velocidad con la que viaja la onda de detonación a lo largo de la masa o columna de explosivo, sea al aire libre o dentro de un barreno, expresada en metros / segundo.

Es una de las propiedades más importantes, debido a que de ella depende la potencia que alcanza el explosivo para romper roca y la proporción de energía que alcanza a realizar en un trabajo útil antes de que se disipe. En efecto, los explosivos son capaces de hacer lo que hacen, no por la cantidad de energía que contienen, sino a la rapidez con que la liberan.

Las velocidades de los explosivos comerciales varían entre 1.500 a 7.900 m/seg. Dependiendo principalmente de los ingredientes que lo componen, granulometría, densidad, diámetro del explosivo y grado de confinamiento. Estos parámetros tienen un efecto mucho mayor en la velocidad de los agentes explosivos que en los explosivos convencionales, lo que ha permitido, a los fabricantes, ofrecer una gran gama de explosivos, facilitando el trabajo a los usuarios, ya que las diferentes velocidades les permite controlar más fácilmente la granulometría del material tronado y la estabilidad de los taludes así como las cajas y techos de las labores.

Existe una teoría sobre la fragmentación, bastante popular en la actualidad, que indica que la roca afectada por una tronadura, primero es sometida a grandes esfuerzos por una onda de choque que se desplaza en todo sentido a partir de la columna explosiva, provocando su fragmentación parcial y agrietamiento radial, tanto mayor cuanto más veloz es el explosivo, y luego el gas se introduce en las grietas, prolongándolas y terminando por fracturar y desplazar la roca. De aquí que en el caso de que se desee tronar una roca dura, es preferible usar un explosivo veloz capaz de generar gran fracturamiento, y si se trata de una formación blanda resulta más favorable un explosivo más lento, que más bien desplace la roca. En el caso de parches es indispensable utilizar un explosivo de alta velocidad.

Existen 3 métodos prácticos para medir la velocidad de detonación, ellos son:

3.43.4.1. Oscilógrafo.

El explosivo se coloca dentro de un tubo de acero, en cuya longitud se han practicado más o menos 12 perforaciones.

Mediante un cable subterráneo que viene de las placas verticales del oscilógrafo, se introduce un polo en las perforaciones, de modo que quede en contacto con el explosivo a través de las perforaciones, el cable que sirve de contacto queda totalmente aislado del tubo mediante corcho, el otro polo se pasa a través de la masa del explosivo. Una alteración cualquiera en las placas deformará la onda en



un pequeño instante, lo que queda representado en la pantalla mediante una deformación superpuesta (peak).

3.43.4.2. Cronógrafo de chispa siemens.

Tiene una zona de medición de 0,1 a 0,000001 segundos, consiste en un circuito eléctrico establecido a través de la masa del explosivo, el que es interrumpido por la onda de detonación en 2 puntos, haciendo saltar 2 chispas sobre la superficie de un tambor recubierto con negro de humo y animado de alta velocidad de rotación. Luego conocida la distancia entre las 2 marcas y la velocidad periférica del tambor, se deduce la velocidad de detonación.

En los laboratorios del Instituto de Investigaciones y Control del Ejército, existe un cronógrafo como el descrito que ellos llaman Methegang, especial para guías detonantes.

3.43.4.3. Método indirecto de Dautriche.

Es la más común por su alcance y economía se realiza durante la prueba de DAUTRICHE, que emplea un cordón detonante de velocidad conocida o mediante la apertura o cierre de un circuito eléctrico controlado con un cronógrafo electrónico. La lectura se expresa en metros/segundos o pies/segundos, y para un mismo explosivo varía si es al aire libre o si se encuentra confinado, variando también en diferentes diámetros, por lo que las normas recomiendan efectuar las medidas en cargas de 32 mm o de 11 a 14 pulgadas de diámetro.

La prueba de DAUTRICHE consiste en el empleo de una placa de plomo de 250 mm por 40mm por 4mm con una marca en un extremo como referencia y un tubo de latón o zinc delgado de 300mm por 32mm o con dos orificios espaciados a una distancia $d= 100\text{mm}$ llenado con el explosivo a medir, y cebado con detonador. El cordón detonante de un metro de longitud de velocidad conocida y una placa de plomo de 250mm por 40mm por 4mm, con una marca en un extremo, para referencia. El cordón se inserta en los orificios del punto cebado y su punto medio se hace coincidir con la marca de la plancha asegurándolo fijamente, la onda de choque generada por el detonador viaja por la columna de explosivo iniciando el cordón en sus dos puntos de contacto, originando dos ondas que viajan a lo largo del cordón hasta encontrarse en un punto X en la plancha, pero siempre pasándose de la marca ya que la onda por donde se inserto el detonador viaja más rápido que la otra.



3.43.4.4. Simpatía o transmisión de la detonación:

Al explotar una carga explosiva aparecen ondas por percusión que cuando tienen intensidad suficiente pueden ocasionar la detonación de otra carga localizada a poca distancia de la primera. Este tipo de explosión se llama explosión por simpatía.

El método para medir esta capacidad de detonación por simpatía consiste en colocar alineados axialmente varios cartuchos del mismo tipo y diámetro sobre una carga de arena, espaciados entre sí a diferentes distancias y envueltos en papel kraft. Detonado el primero se busca detonar la máxima distancia hasta la cual es transmitida la detonación de un cartucho a otro, lo que se denomina (grado de simpatía) que en la mayoría de los explosivos industriales esta entre dos a ocho veces su diámetro según su tipo.

La transmisión puede ser “directa e inversa” de acuerdo con la ubicación del detonador en la columna. Para obtener una transmisión directa, el detonador se debe colocar axialmente alineado y con su carga dirigida hacia la mayor longitud de la carga explosiva, que es lo que usualmente ocurre al colocar el cartucho cebo al fondo del barreno; mientras que al ubicarlos al medio de la columna, solo tendremos transmisión directa por delante del cebo e inversa por detrás.

3.43.4.5. Sensitividad

La sensitividad de los explosivos se debe diferenciar de la sensibilidad; decimos que los explosivos deben ser suficientemente sensitivos para ser detonador por un iniciador adecuado. Esta capacidad varía según el producto.

Así por ejemplo, los detonadores se emplean para la mayoría de las dinamitas, mientras que los agentes de voladura usualmente no arrancan con ellos, es necesario utilizar un reforzador o booster que le de mayor presión y velocidad. La pólvora por otro lado, puede arrancar con una simple chispa o llama que provocara un régimen de deflagración.

Los detonadores más usados son el No. 6 y el No. 8 (llamado detonador común), notándose un incremento mayor en la detonación al emplear el No 8, para lo que se dice que tiene mayor sensitividad.

3.43.4.6. Estabilidad

Los explosivos deben ser estables y no descomponerse en condiciones ambientales normales. La estabilidad se prueba mediante el Test de Abel que consiste en el calentamiento de una muestra durante un tiempo determinado y a una temperatura



especifica observando el momento en que se inicia su descomposición. Por ejemplo la nitroglicerina a 80 grados centígrados durante 20 minutos.

Otras consideraciones:

- Los explosivos pueden mantenerse sin cambios químicos y mantener su sensibilidad cuando son almacenados bajo condiciones específicas.
- Los explosivos menos estables tienen una vida de almacenamiento más corta y se deterioran más rápido con el tiempo.
- Los factores que afectan la estabilidad química principalmente son: calor, frío, humedad, calidad de las materias primas, contaminación, empaque, y condiciones de almacenamiento.
- Las señales del deterioro de los explosivos son: cristalización, aumento de la densidad, y aumento de la viscosidad.

Dentro de la estabilidad de los explosivos hay que tener en cuenta otros factores que pueden alterar el estado de las sustancias:

3.43.4.7. Higroscopicidad:

Es la capacidad de absorción y retención de humedad de los explosivos, humedad que afecta tanto su sensibilidad como su estabilidad, algunos factores afectados son el enfriamiento, que produce una absorción de calor al evaporarse la humedad, produciendo una disminución en la temperatura de reacción; la discontinuidad en la descomposición que produce una reacción hidrolítica inducida por la humedad que produce ácido nítrico y nitroso; y la corrosión que produce una interacción de los productos de la hidrólisis con los componentes de los explosivos.

3.43.4.8. Volatilidad:

Para los explosivos es importante que posean baja volatilidad, de tal modo que a las temperaturas de carguío, manejo y almacenamiento sea muy baja.

Una alta volatilidad puede causar pérdidas por evaporación, desarrollo indeseable de presión dentro del envoltorio del explosivo, etc.

3.43.4.9. Cohesión:

Es una forma de establecer la mayor o menor facilidad que tiene un explosivo de mantener su forma original.



Según sean las circunstancias, el explosivo debe tener un comportamiento bien específico al respecto. Así se tiene, por ejemplo, que en el caso de tratarse de un cebo, el explosivo tiene que tener una gran capacidad para mantener su forma original impidiendo que el detonador se separe. En cambio, en un carguío a granel ya sea por el vaciado de sacos o por medio de un camión fabrica, se requiere que el explosivo fluya libremente para obtener el máximo acoplamiento con las paredes del tiro, optimizando la transmisión de la energía generada por el explosivo.

3.43.4.10. Sensibilidad

Es la capacidad que tienen los explosivos para iniciarse por medio de agentes externos como son las altas temperaturas y la fricción, de acuerdo a las sustancias explosivas que las componen, hay unas con mayor grado de sensibilidad que otras. Se tienen 2 posibilidades:

- Acción controlada: La sensibilidad a la iniciación es determinada en función de los requerimientos de su cebado, el tamaño de la carga iniciadora y la cantidad de energía óptima. Se determina colocando un cartucho de explosivo de un diámetro y longitud determinada sobre una placa de plomo, e iniciándolo con cebos de tamaño y/o potencia creciente, determinando las condiciones óptimas de iniciación en base al efecto producido sobre la placa.
- Acción incontrolada : La determinación de este tipo de sensibilidad a la iniciación pretende establecer las precauciones que se deben tomar con un determinado explosivo, en su manipulación, almacenamiento y transporte, para que no se produzcan detonaciones prematuras que pongan en riesgo la integridad física del personal , de las instalaciones y equipos. Básicamente comprende las sensibilidades al calor, al impacto o choque y a la fricción.

3.43.4.11. Sensibilidad al calor.

Los explosivos al ser calentados llegan a una temperatura en que se descomponen repentinamente con desprendimiento de llamas y sonido que se denomina punto de ignición. Normalmente la pólvora esta entre 30 a 35 grados centígrados y en los explosivos industriales entre 180 y 230 grados centígrados.

Esta cualidad es diferente al fuego o llama abierta que indica su facilidad de inflamación. Así, a pesar de su buen grado de sensibilidad al calor la pólvora es muy inflamable, explotando hasta con una chispa, lo mismo que la nitrocelulosa y la gelatina explosiva.



Un modo de medir esta sensibilidad es por medio de una marmita esférica de hierro o de cobre, de unos 14 cm. de diámetro y provisto de una tapa con 4 orificios, de los cuales uno es central y los otros periféricos, cada uno de estos orificios posee un tapón perforado que dejan paso a un termómetro ubicado en el orificio central protegido contra los efectos de la explosión, graduado de 0,5°C desde 0°C hasta 360°C, las otras tres perforaciones son usadas por 3 tubos de ensayo de 15 mm. De diámetro interior.

- Sensibilidad al choque o impacto.

Se hace mediante la prueba que consiste en la caída de un peso determinado a alturas crecientes hasta llegar a la altura a la cual se produce la respuesta explosiva.

Se usa un aparato llamado “ martillo de caída “ y se usan mazos de 2 a 10 Kg.; este método de medida de la sensibilidad al choque se presta muy bien para los explosivos de alta sensibilidad, pero para explosivos industriales como los agentes de tronadura y slurries, el nivel de impacto es muy pequeño como para lograr detonarlos.

3.43.4.12. Sensibilidad al roce.

Para esta prueba, puede emplearse un mortero de porcelana no vidriada de 10 cm. de diámetro y 6 cm de altura, con un mango de igual material, se procede sometiendo 0,55 gr. de explosivo a una fricción prudente, anotando al frotar si se producen o no decrepitaciones débiles o fuertes.

El U.S. Bureau of Mining, posee un yunque de acero de superficie lisa, sobre el cual puede resbalar otra pieza de acero en forma de zapato, montada en el extremo de un largo brazo; dicho zapato se le puede dar una aspereza suficiente, y puede ser cargado con pesos progresivos para graduar los efectos sobre el explosivo, ubicado sobre la superficie del yunque.

3.43.4.13. Sensibilidad a la iniciación por detonación.

Se determina sometiendo sucesivamente una misma cantidad de explosivo, a la acción de diferentes detonadores de creciente potencia, hasta encontrar el más débil, capaz de provocar la explosión, el material ensayado debe ser colocado en cartuchos.

Las sustancias explosivas, necesitan de un impulso inicial para llegar a su estado de detonación en mayor o menor grado.



3.43.4.14. Sensibilidad a la iniciación por simpatía.

Es la capacidad que poseen algunos explosivos de ser iniciados, sin necesidad del contacto entre el iniciador y el explosivo, los que pueden encontrarse distanciados, por cierto espacio intermedio.

La forma de medir esta sensibilidad, consiste en disponer linealmente una serie de pequeños cartuchos del explosivo iguales, y separados unos de otros por distancia crecientes; luego se provoca la detonación del primero de los cartuchos y se observa hasta donde se prolonga el efecto; finalmente se adopta como distancia máxima de detonación por simpatía, a la mayor distancia existente entre 2 cartuchos que se inician.

Los factores que influyen en los resultados de esta prueba son: naturaleza del explosivo, naturaleza del iniciador, tipos de superficie en que descansan el iniciador y el explosivo, la naturaleza del medio interpuesto entre ellos y el diámetro del explosivo (a mayor diámetro, mayor es la sensibilidad por simpatía).

Los factores que influyen en la sensibilidad son:

- Condiciones de división de la masa explosiva (tamaño del grano).
- Temperatura.
- Condición de confinamiento.
- Por la mezcla o no con otros cuerpos químicamente inertes.
- Causa desencadenantes de la transformación.

3.43.4.15. Resistencia a la humedad

Muchos tipos de trabajo de carga involucran explosivos que se dejan cargados bajo el agua por largos periodos de tiempo aun en caso de la voladura normal de roca los barrenos a menudo se llenan de agua, los explosivos plásticos también tienen gran resistencia al agua y un explosivo bien empacado en un barreno relativamente sólido a demostrado buena impermeabilidad por un periodo considerablemente mas largo que los normalmente garantizando, la resistencia al agua de un explosivo generalmente se define como la habilidad del producto para soportar la penetración del agua.

Generalmente se expresa como el número de horas que puede estar sumergida en agua estática y todavía detona confiablemente. Cuando el agua penetra un producto explosivo, primero deteriora su eficiencia y con explosión prolongada o en condiciones de humedad severa, puede ser desensibilizado a tal punto que no detone. La resistencia al agua de un producto depende no solamente del empaque y de la



habilidad inherente del explosivo a soportar el agua, sino también de las condiciones de humedad. El agua estática a bajas presiones no afecta el explosivo tan rápidamente como el agua dinámica especialmente a alta presión. La escala de clasificación generalmente aceptada en los explosivos es nula – limitada – buena – muy buena – excelente a sobresaliente.

Las propiedades de almacenamiento de los explosivos comerciales definen el periodo de tiempo en el cual el producto puede ser almacenado sin ningún efecto sobre su seguridad confiabilidad y funcionamiento aunque las características de almacenamiento han sido mejoradas, es muy importante reemplazar inventarios de tal forma que se evite el almacenamiento prolongado, los explosivos plásticos no deben ser almacenados o estar sujetos a altas temperaturas ya que se puede ablandar y las sales en la sustancia explosiva pueden penetrar el papel del cartucho, los cartuchos de esta forma se deforman y se hace difícil su uso.

3.43.4.16. Categoría de humos (vapores)

Denominase así al conjunto de productos resultante de una tronadura, que comprende los gases inocuos (que no producen daños) de vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono; algunos productos sólidos y líquidos y los gases tóxicos como el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno. Bajo la designación de clases, se pretende clasificarlos según su contenido de gases tóxicos, compuestos principalmente por monóxidos de carbón (CO) y óxido de nitrógeno (NO Y NO₂). La emisión de gases nocivos, aún por parte de explosivos bien balanceados, se debe a muchos factores entre los cuales se tiene un deficiente cebado, una inadecuada resistencia al agua, un diámetro de columna de carga demasiado pequeño o una prematura pérdida de confinamiento.

Uno de los gases producto de la explosión es el monóxido de carbono, que es incoloro e insípido, siendo en pequeñas concentraciones muy peligroso. Actúa sobre la sangre, disminuyendo su capacidad de absorber oxígeno. El oxígeno que se le debe administrar a la víctima de este gas, es una mezcla de 95% de oxígeno y 5% de dióxido de carbono. Bajo ninguna circunstancia debe permitírsele a la víctima hacer un esfuerzo innecesario, ya que es peligroso para el corazón. Los síntomas de envenenamiento por monóxido de carbono son debilidad o falta de energía, somnolencia, disminución del discernimiento, dolor de cabeza y náuseas.

La detonación de todo explosivo comercial produce vapor de agua (H₂O) v, nitrógeno (N), bióxido de carbono (CO₂) y eventualmente sólidos y líquidos. Entre los gases inocuos nombrados hay siempre cierto porcentaje de gases tóxicos llamados humos, como el monóxido de carbono (CO) y el bióxido de nitrógeno



(NO₂). De acuerdo con la proporción contenida de estos gases tóxicos sean establecido escalas de clasificación por grado de toxicidad, después de efectuado el disparo, de la siguiente manera:

I Categoría: de 0 a 0.16 pies cúbicos de CO – NO₂

II Categoría: de 0.16 a 0.33 pies cúbicos de CO – NO₂

III Categoría: de 0.33 a 0.67 a más pies cúbicos de CO – NO₂

Los agentes explosivos como el anfo son más tóxicos que las dinamitas, porque generan mayor cantidad de nitrógeno.

En este medio se le denominan emanaciones a los gases tóxicos. Los gases que se originan de la detonación de explosivos principalmente bióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua, los cuales no son tóxicos en el sentido clásico de la palabra, pero también se forman en cualquier detonación gases venenosos como el monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.



CAPITULO IV. DENSIFICACION DE SUELOS CON EL USO DE EXPLOSIVOS.

4. INTRODUCCION.

Este método busca lograr un mejor acomodo de las partículas del suelo mediante un incremento relativamente uniforme y repentino de la presión de aire, generado por explosivos y que se transmiten a través de las fases fluida y sólida del suelo. La excitación debe superar la energía mínima que se requiere para romper el equilibrio en la estructura del suelo, pero no debe “volar” el suelo.



Figura 52. Uso de explosivos.

Fuente: Propia.(cambiar foto)

Aspectos constructivos de la técnica de compactación con explosivos

Para que el uso de esta técnica sea adecuado debe tomarse en cuenta el explosivo, el suelo por densificar y la estratigrafía general del sitio. Es conveniente utilizar varias “detonaciones” consecutivas, En vez de una sola explosión. También es necesario contar con instrumentación geotécnica compuesta principalmente por bancos de niveles superficiales y profundos y piezómetros abiertos Instalados en los estratos de mayor permeabilidad. La evaluación inmediata se realiza con base a los movimientos medidos en los bancos de nivel, complementada con la



interpretación de las lecturas piezométricas. Pueden también emplearse sondeos de penetración estándar para verificar la compacidad.



Figura 53. Uso de explosivos en lugares aislados.

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. Página web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.

El método solo es eficiente en suelos granulares, con contenido de finos menor de 20%; un contenido de arcilla reduce substancialmente su eficiencia. Además, el método proporciona poca densificación por arriba de 1 m de profundidad y el material puede permanecer suelto alrededor de los puntos de explosión. Los resultados pueden no ser los deseables comparándolos con otros procedimientos, especialmente en estratos parcialmente saturados o no saturados. Por otra parte, induce daños en el medio ambiente, por lo que se recomienda su uso solo en lugares aislados (Vieitez, 1979).

La densificación de suelos con el uso de explosivos resulta eficaz en suelos granulares. Se trata en este caso de la aplicación al terreno de cargas rápidas que producen colapsos controlados debido a los procesos de licuefacción, inducidos a causa del aumento de la presión intersticial, generada como consecuencia de la explosión. Efectivamente, la onda expansiva favorece la aparición de un estado de licuefacción en el terreno; cuando se disipa el incremento de presión intersticial generado, entonces se produce una reagrupación de las partículas, con lo que se consigue una estructura más compacta y, en consecuencia, una densidad del terreno mayor.

Para que sea efectivo el procedimiento, la permeabilidad del terreno debe ser apropiada. Cabe señalar que su uso no es muy habitual y, obviamente, hay que



tener cuidado en su aplicación si se trata de zonas pobladas, o con estructuras cercanas sensibles al efecto de una posible licuefacción bajo sus cimientos.

En el uso de esta modalidad conviene tener en cuenta los avances técnicos en la detonación de explosivos y en la colocación de las cargas explosivas, con objeto de mejorar la eficacia del método y mejorar, también, la seguridad durante su ejecución. Un proyecto de actuación debe ser consultado y consensuado con las empresas especializadas en voladuras y uso de explosivos en general, en especial hay que consultar a las empresas que intervienen en el ámbito de la ingeniería civil. Ver figura 22 Uso de explosivos.



Figura 54. Uso de explosivos.

Fuente: Propia. Ejército Nacional de Colombia, líderes en el uso de explosivos

La densificación de suelos granulares con el uso de explosivo se han utilizado en obras de ingeniería como presas de tierra, puentes, edificios y estructuras petrolíferas [Gohlet al, 2000]. Esto ha sido impulsado en gran medida por la necesidad de aumentar la licuefacción sísmica en suelos granulares. Una nueva aplicación potencial de compactación explosivo se discute en el presente documento con respecto a la reducción del volumen en suelos preferiblemente granulares.



La energía liberada de las detonaciones causa licuefacción del suelo cerca de la explosión y causa una presión cíclica del suelo. Este proceso, aumenta la presión de agua de poros generando disminución de vacíos y un número de ciclos que son suficientes para que la masa de suelo sufra de licuefacción, (la presión de agua de poros es temporalmente elevada a un estrés de sobrecarga vertical en la masa de suelo lo que hace que se cree un fluido pesado). La licuefacción del suelo seguirá por un tiempo subsecuente dependiente de la disipación de la presión de agua de poros generando una re-consolidación entre la masa de suelo. Esta re-consolidación sucede entre horas y días a partir de la explosión, dependiendo de la permeabilidad del subsuelo y las condiciones de drenaje, y se refleja por un aumento de los volúmenes de agua en la superficie, o altos chorros de agua durante la explosión produciendo a corto plazo cambio de volumen producido por la explosión de cargas dentro del suelo. En distancias cortas de la detonación, la presión hidrodinámica son tan grandes como para causar una compresión en el sistema suelo- agua.

Cuando un área del suelo ha sido tratada con explosivos y la presión de agua de poros se ha disipado, se repiten las aplicaciones de secuencias de explosión controlada causando un asentamiento adicional que depende de la densidad y la rigidez del suelo. La primera pasada destruye cualquier conexión existente entre la cohesión de las partículas de suelo con el objetivo de ablandar, y generar otros procesos geológicos, y causa el mayor asentamiento del suelo. Las siguientes explosiones causan asentamiento adicional por el ciclo de cargas.

El grado de mejoramiento por explosiones depende de la densidad inicial del subsuelo granular. La densidad de depósitos sueltos pueden incrementar considerablemente las densidades relativas en un porcentaje entre 70 y 80%, entre tanto, suelos con una densidad relativa considerables de 60 o 70% pueden ser densificadas en un pequeño porcentaje, la experiencia indica que la compactación con explosivos causa cambios de volumen generalmente iguales o mayores de los deseados.

¿Cómo puede una explosión generar licuefacción para ser usada en la compactación del suelo de fundación?

Todos sabemos que cualquier tipo de explosión genera vibraciones y ondas de choque, algunas veces esta energía puede ser usada en la compactación del suelo de fundación. Primero aprenderemos que tipos de cargas de explosivos son usados y donde deben ser enterrados. Las cargas de explosivos generalmente contienen 30% de dinamita gelatinosa de tipos especiales que contienen amonita, y 60%



compuesto por dinamita, normalmente las cargas son 2/3 del espesor del estrato requerido a ser densificado para una estructura de fundación.

Con respecto a la zona de influencia de la densificación con explosivos, se puede decir que más de 25 m de profundidad 1 metro es considerado poco efectiva la operación con explosivos, así que se usa una compactación usual con rodillo

La siguiente expresión da una idea acerca del radio de influencia (R)

$$R = \left(\frac{M}{C} \right)^{1/3}$$

Donde m= masa de la carga explosiva (Kg)

C=constante (considerada 0.04 en caso de 60% dinamita)

Tomado de: <http://civil-engg-world.blogspot.com/2012/10/How-Explosion-Liquefaction-Compaction-Foundation-Soil.html>

Compactación con explosivos: diseño, implementación y efectividad

Aunque ha sido usado por 70 años, la compactación con explosivos no ha sido bien aceptada, aunque tiene bajo costo, y es fácil en el tratamiento de grandes profundidades.

En suelos granulares, la energía liberada por una detonación explosiva provoca licuefacción del suelo cerca del punto de explosión y provoca esfuerzo de cizalla cíclica del suelo. Este proceso aumenta las presiones de poros de agua y amplitudes de tensión previstas si el número de ciclos de tensión son suficientes, licua la masa de suelo. La licuefacción del suelo seguida por disipación en función del tiempo de las presiones de agua causas re-consolidación dentro de la masa de suelo. Esta re-consolidación sucede dentro de horas a días después de las detonaciones, dependiendo de la permeabilidad de los subsuelos y a las condiciones de drenaje en su entorno, y se refleja por la liberación de grandes volúmenes de agua a la superficie del suelo. "A corto plazo" el cambio de volumen también es causada por el paso de la onda de choque inducido por la explosión a través de la masa de suelo. A corta distancia de una detonación de carga, las presiones hidrodinámicas son lo suficientemente grandes como para causar la compresión del sistema suelo-agua.



4.1. LAS APLICACIONES DE COMPACTACIÓN EXPLOSIVO PARA LA REDUCCIÓN DE VOLUMENES DE RELLENOS.

A través de este de este trabajo hemos discutido las aplicaciones de la detonación secuencial de explosivos para aumentar la densificación de suelos, siendo este método más eficaz para suelos granulares, así mismo se seguirán analizando los mecanismos asociados a la compactación con explosivo, los factores que influyen en el diseño, y la respuesta que se producen por vibraciones, asentamientos y presiones de poros observadas. Por último, continuaremos describiendo las metodologías asociadas con la aplicación de la técnica para la densificación en suelos granulares.

4.2. COMPORTAMIENTO DEL SUELO DURANTE LA COMPACTACION CON EXPLOSIVOS.

Los asentamientos no se ven inmediatamente después de las detonaciones con explosivos, puede durar hasta una hora para observar los resultados, la explosión genera un exceso en la presión de agua de poros, que se disipa y genera la consolidación, y como resultado se obtienen asentamientos, que son dependientes de la permeabilidad del suelo y de las condiciones de drenaje.

4.2.1. TEORIA

Históricamente, las cargas de explosivos y el espaciamento han sido seleccionados empíricamente, derivado de las correlaciones entre la densidad de la carga del explosivo e inducido según el asentamiento después de la explosión. ver figura No.23



Figura 55. Pruebas de campo para calibración.

Fuente: Propia. Ejército Nacional de Colombia-grupo Marte

4.2.2. ANALISIS DIMENSIONAL

La detonación de un explosivo, produce dos formas de liberación de energía; la onda de choque del frente de detonación, y el trabajo hecho con la alta presión de gas formada en la explosión cuando este se expande. Cerca del tercio de la energía de la carga es disponible para el trabajo expandiendo la cavidad contenida en la carga, y este es el componente interesante para la compactación del suelo, la onda de choque es predominante a una onda de compresión, sin embargo ondas de corte son formadas en las esquinas de las cargas cilíndricas. La mayoría del trabajo en la compactación con explosivos se ha basado en el número de Hopkinson (HN) para estimar empíricamente el radio de influencia alrededor de un agujero de explosivo. HN es normalmente tomado así:

$$HN = W^{0.33} / r \quad (1)$$

Donde W = la masa de la carga (Kg)

r = distancia del punto de la cara al punto de interés.

Pero esta ecuación (1) no es dimensionalmente correcta. La caracterización de la carga explosiva es:

$$z = (W/\rho)^{0.33} \quad (2)$$

Donde: ρ es la densidad del explosivo

z = longitud de una fuente cubica equivalente.



Sin embargo adoptando W sin tener en cuenta el tipo de explosivo debe verse muy simple dada la diferenciabilidad en la resistencia de la masa de varios explosivos, es difícil discernir un efecto del tipo de explosivo en el record de experiencia porque la variación en la porción de energía radiada en la onda explosiva de una explosión y la carga lograda por otra. Así W es usada como un valor sin tener en cuenta el contenido de calor del explosivo o la presión de la detonación. Una forma equivalente del número de Hopkinson es:

$$HN = z/r = (W/\rho)^{0.33} / r \quad (3)$$

Usando un análisis dimensional, la efectividad de una explosión, E , puede ser expresada como:

$$E = f(HN, t', h/z, gh/V_s^2, \phi', \lambda, \dots) \quad (4)$$

Donde t' = tiempo dimensional

h/z = relación de profundidad de enterramiento.

Y los otros, parámetros relacionados con las propiedades elasto-plásticas del suelo, así la efectividad de la carga es una función de la densidad de la carga, el tiempo, la resistencia y la rigidez del suelo, y dos términos relacionados con la profundidad de la carga. Porque la rigidez es fuertemente dependiente a la raíz cuadrada de la tensión efectiva, una primera aproximación de la efectividad de la carga en un suelo es:

Project and year	Volume: m ³ Max. depth: m	Soil type	Site factor k , (eqn (5))	Initial avg. D_i : %	Charge density: g/m^3	Volume change: %	Final avg. D_f : %	Key considerations
Molikpaq I, Amauligak (1986)	67 000 21	Clean dredged medium fine sand	117	45	Nitropel 36	6.4	75	Limited headroom for drilling equipment, rapid EC execution, on-board safety, blast pressures on hull of structure, meeting CPT specification
Molikpaq II, Sakhalin (1998)	169 000 41	Clean dredged medium coarse sand	143	35	Super Blastex 52	8.0	75	Limiting PPVs in urban environment, adequate densification for seismic liquefaction control
Trans-X (1993)	65 000 15	Medium fine alluvial sand with silt layers	100	50	Iremite TX 37	3.7	70	Limiting hydrodynamic water pressures on ice sheet, meeting CPT specification
Quebec HQ SM-3 Dam (1995)	200 000 20	Clean alluvial fine to coarse sand	99	45	Emulsion 38	6.2	75	Limiting hydrodynamic water pressures on ice sheet, meeting CPT specification
Coldwater Creek (1992)	90 000 40	Silty sand, gravel, cobbles	81	50	Nitropel 42	3.6	65	Minimizing slope instability adequate densification for seismic liquefaction control
Kitimat Hospital (1998)	27 000 12	Layered silty sand and sand	101	> 45 (Variable)	Super Blastex 48	3.5 overall 4.7 in sands	> 70 in cleaner sand layers	Vibration control, reducing potential earthquake settlements, maximizing CPT resistances
Sato Kagyo* (1997)	1125 12	Alluvial silty sand and n.p. silt	—	~45	Emulite 53	7.0	2-3 x increase in $N_{w,50}$	Vibration control, maximizing post-blast settlements and penetration resistances
Kelowna* (1991)	8000 10	Sand to silty sand	104	25	Extragel (75) 9	5.5	50	Ground improvement against liquefaction
Elliot Lake* (1980)	1000 6	Silt tailings	—	~35 equivalent	Kinestick 5	4.2	q_c increased by 2-3 times	Behaviour of silt under earthquake loading

*Denotes field trial.

COHL, JEFFERIES, HOWIE AND DIGGLE

Tabla 10. Resumen de casos Historicos.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials

$$E = k(W/\rho)^{0.5} h^{-0.5} R^{-1} \quad (5)$$



Donde: E = es la fracción del esfuerzo máximo vertical alcanzado.

r = radio del círculo de área equivalente a una región rectangular/triangular compactada por un agujero de explosivo.

k = coeficiente relacionado con las propiedades del suelo y la amortiguación.

4.3. CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

4.3.1. Control de la vibración:

Vibraciones inducidas por detonaciones en estructuras entre 30-40m de distancia, necesitan ser controladas con una reducción de la carga, y del número de huecos detonados al mismo tiempo, también cuando la explosión es llevada a cabo en suelos con pendiente alta, el patrón de diseño es ajustado para restringir la zona de aumento en la presión de poros, minimizando el riesgo para las estructuras.

Por las razones anteriores, el número de cargas detonadas al mismo tiempo es restringido para minimizar la duración de la sacudida. Vibraciones de larga duración son más peligrosas para las estructuras adyacentes e incrementan la presión de poros bajo la estructura. El diseño de la apropiada carga y la detonación entre perforaciones, es llevada a cabo con patrones de carga generalmente se ubican usando una grilla escalonada rectangular (ver figura No.24) de perforaciones con espaciamientos de 1-9m.

Las perforaciones son llevadas a cabo hasta la profundidad donde se desea compactar el suelo, y hasta 100 mm de diámetro (con las brocas normalmente usadas). El barrenado es luego cargado con explosivo en uno o varios niveles en la perforación. Una serie de perforaciones, cada una conteniendo una o varias plataformas, es secuencialmente detonadas. El número de explosiones detonadas en cada serie depende de las consideraciones del control de la vibración y de las implicaciones sobre el efecto de la licuefacción y el asentamiento de pendientes y estructuras.

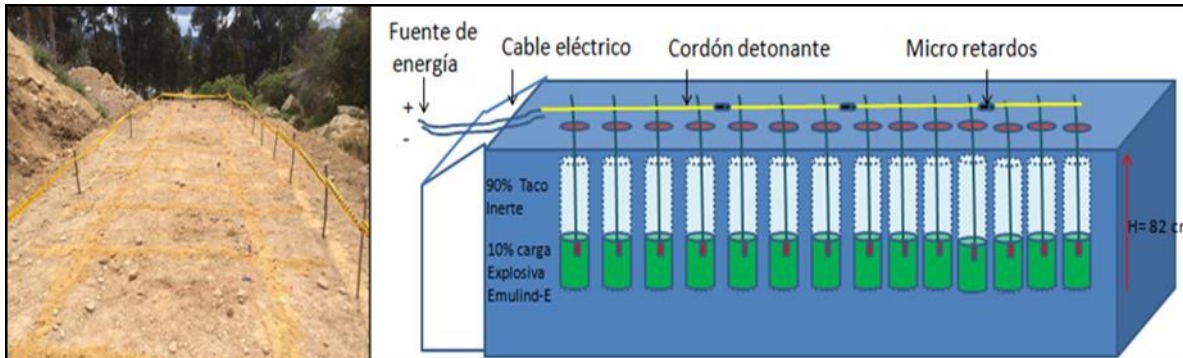


Figura 56. Pruebas de campo para calibración.

Fuente: Propia.

4.4. EXPERIENCIAS EN DENSIFICACIÓN CON EXPLOSIVOS

4.4.1. Ensayos de campo – densificación con explosivos.

4.4.2. Introducción

En orden de calificar los efectos de la densificación de suelos con el uso de explosivo, se llevaron a cabo varios estudios de campo en el mundo. Este capítulo describe uno de estos estudios de densificación con explosivos llevada a cabo en una cantera de arena y grava en Griffin, Indiana. La densificación con explosivos genera una gran cantidad de acomodamiento en el suelo e introduce gas de explosivo en los poros. Este capítulo describe el sitio de investigación, el plan de instrumentación, el diseño de carga de explosivos y la ejecución, el plan después de la detonación, los resultados de la prueba, un análisis geostadístico de los resultados, y la comparación de grado de resistencia basado en diferentes pruebas in situ.

El sitio de investigación

La siguiente sección discute el proceso de selección del campo y un sitio experimental así como la descripción del perfil de suelo y los resultados antes y después de la explosión.

4.4.3. Selección del sitio

La investigación de sitio empezó en el 2006 y fue enfocada en la selección de un suelo apropiado para los experimentos de campo. La selección del sitio fue complicada por el plan usado para la densificación con explosivos, la mayoría de los dueños de las tierras estuvieron emocionados por seguir las detonaciones de



explosivos en sus propiedades. Fue identificado un sitio ideal, una cantera de arena y grava de propiedad de MulzerCrushed Stone, Inc. Ubicada en Griffin, Indiana. La presencia de arena y grava en la cantera sugería que el suelo normalmente gradado estaría limpio. Esto era importante porque los suelos de grano fino reducen la efectividad de la densificación con explosivos y la vibración del suelo.

Adicionalmente, había evidencia de licuefacción prehistórica en el sitio, indicando que las capas de la arena fueron licuefactadas. Marcas de Paleo- licuefacción, como se muestra en la Figura 58. Característica Paleo-licuefacción en un corte vertical a lo largo de la orilla del lago en el sitio de campo Griffin (foto cortesía de Russell verde). Fueron encontradas a lo largo de los bancos del relleno de préstamo. La compañía dueña de la cantera excavo una capa de arcilla antes del drenado de arena y grava a buenas profundidades. Esto dejó cortes verticales en la arcilla alrededor del lago dragado. Contenidos en esos cortes hay cortes verticales de arena y grava. En un evento de licuefacción previo, exceso de presión de poros disipada alrededor de un punto débil en la arcilla, llevando arena y grava de las capas mas profundas, y dejando marcas de paleo-licuafaccion que son visibles alrededor del borde del lago.

Como Mulzer Crushed Stone, Inc. Fue complaciente en donar el uso de la propiedad para la investigación, el sitio que contiene depósitos de arena limpia y saturada, y tenía evidencia pre-historica indicando una potencia licuefaccion, este sitio fue seleccionado para la investigación. Pruebas en sitio, incluyendo la prueba del cono de penetración (CPT), visión CPT (Vis CPT), seismic CPT (SCPT), y la prueba del dilatómetro de Marchetti (DMT), fueron hechas en el verano del 2006; sin embargo, el área que fue probada fue limpiada para operaciones de denaje el siguiente otoño, mientras estas pruebas no cargaban una selección como sitio de experimentación, la baja resistencia de la prueba del CPT (qc) demostraba que la cantera Griffin era el sitio adecuado para la investigación.

4.2.2. Experimentación para la selección del lugar

En 2007, 14 experimentos en sitio, incluyendo VisCPT y SCPT, fueron tomadas en la cantera. Ambas áreas de prueba en 2006 y 2007 son mostradas en la Figura 57. Fotografía aérea de la arena y la grava de cantera Mulzer cascajo, Inc. en Griffin, IN (foto cortesía de Mulzer cascajo, Inc.). Resultados de las pruebas CPT-9 y CPT-11 muestran bajo qc, y son mostradas en la Figura 59. Resultados de CPT-9 y CPT-11. El área de la explosión fue entre estos lugares CPT.. La localización de estas pruebas son también resaltadas en la Figura 57. Fotografía aérea de la arena y la grava de cantera Mulzer cascajo, Inc. en Griffin, IN (foto cortesía de Mulzer cascajo,



Inc.). Densificación con explosivos es más efectivo cuando cargas grandes son detonadas con retrasos. Sin embargo fue necesario encontrar un área para acomodar grandes cargas en puntos con bajo qc. El área entre CPT-9 y CPT-11 fue seleccionada para la prueba con explosivos.



Figura 57. Fotografía aérea de la arena y la grava de cantera Mulzer cascajo, Inc. en Griffin, IN (foto cortesía de Mulzer cascajo, Inc.).

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials



Figura 58. Característica Paleo-licuefacción en un corte vertical a lo largo de la orilla del lago en el sitio de campo Griffin (foto cortesía de Russell verde).

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials

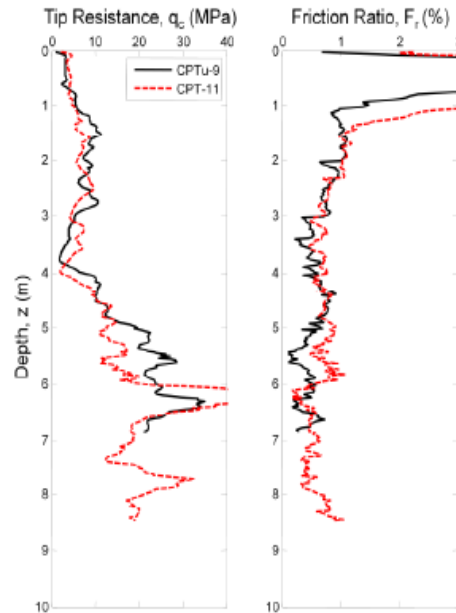


Figura 59. Resultados de CPT-9 y CPT-11. El área de la explosión fue entre estos lugares CPT.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials

4.4.4. El perfil del suelo

A través de la cantera Griffin, hay cuatro principales capas de suelo. Desde la superficie, hay: una capa de arcilla, una capa de arena suelta, una capa de arena densa, una capa de arena gravosa suelta. Perteneciente a la capa de arena gravosa hay una capa de arena gravosa de 16 a 18 m de espesor perteneciente a la capa que es muy densa para la prueba de penetración, la perforación rotatoria, y el dragado. Esas capas fueron identificadas con los datos del cono de penetración. Una caída en el índice de fricción (F_r) delinea la arcilla y la capa de arena suelta. Incrementando q_c , marca el inicio de ambas capas de arena suelta y arena gravosa suelta.

Disminuyendo q_c muestra la diferencia entre la capa de arena densa y la capa de arena gravosa suelta estas delineaciones fueron determinadas por el autor, pero fueron corroboradas a través de correlaciones empíricas relacionadas con el tipo de suelo y los resultados del CPT.

Los espesores de capa varían en todo el lugar, pero hay bastante consistencia en el área de explosión. Como se muestra en la explosión. El espesor de la arcilla, arena suelta, arena densa, y arena gravosa suelta son 1.5m, 2.5m, 6m y 4m



respectivamente, como se muestra en la Figura 61. Curvas de distribución de tamaño de grano de la arena suelta y capas de arena grava sueltas en Griffin, IN. El suelo es mas grueso a mayor profundidad. Es una arena pobremente gradada (SP para el sistema unificado de clasificación) en la capa de arena suelta y una arena pobremente gradada con grava (SP con más del 15% de grava para el sistema unificado de clasificación) en la capa de arena gravosa suelta. como se muestra en la figura 29

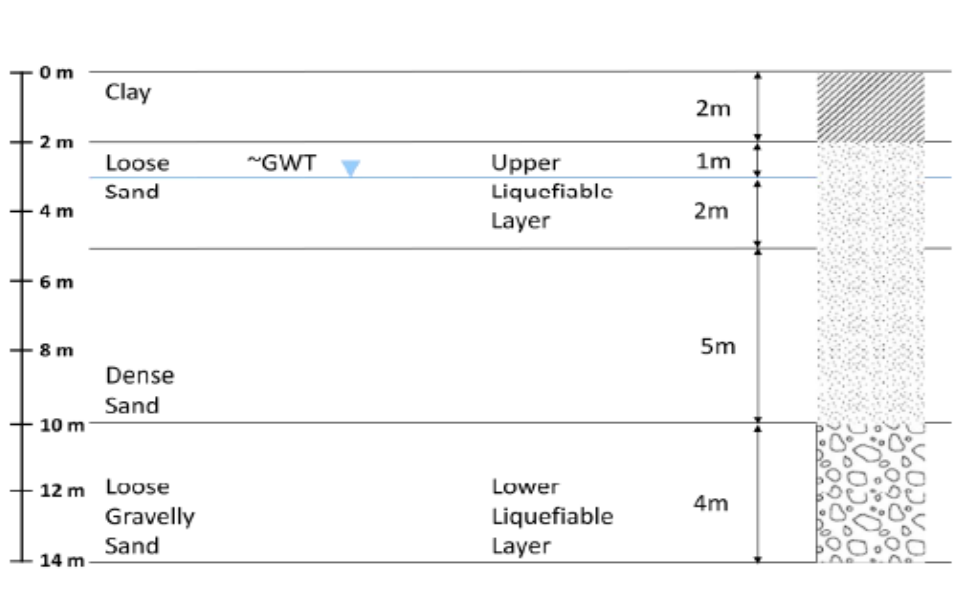


Figura 60. Suelo de estratificación en el lugar de la explosión.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials

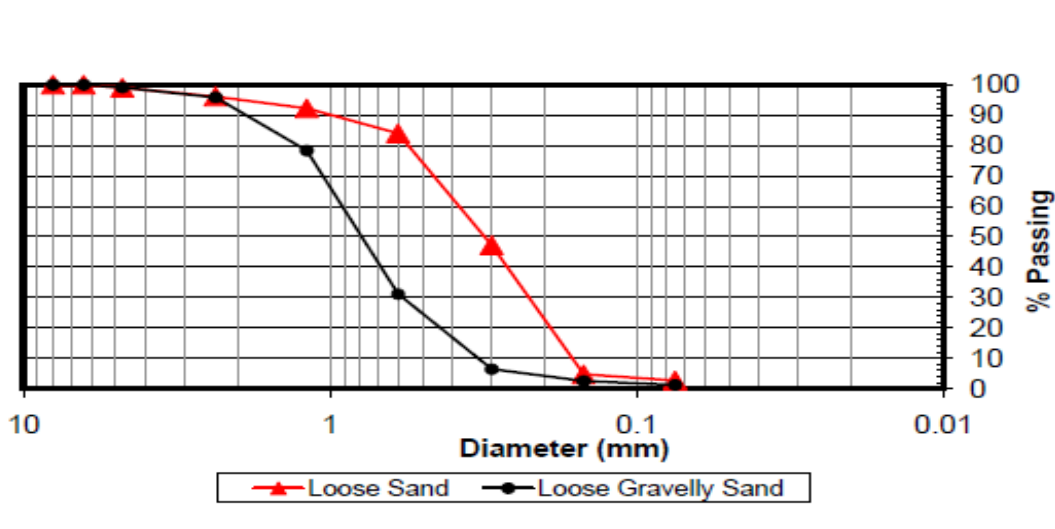


Figura 61. Curvas de distribución de tamaño de grano de la arena suelta y capas de arena grava sueltas en Griffin, IN.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials

Freser et al. (1981 y 1997) describe la historia geológica del área. La capa de arena densa y la capa de arena gravosa son hechas de arenas del Pleistoceno y gravas lavadas que fueron depositadas por el derretimiento de la capa de arena de Trafalgar. La capa de arena suelta es una arena fluvial del Holoceno temprano. Fidler (1935) dijo que el área no había sufrido de grandes cambios geológicos desde el retiro de la capa de hielo de Illinois en el periodo Holoceno temprano.

4.4.5. Ensayo del cono de penetración.

El CPT es el primer estudio in situ realizado para este estudio. Como se muestra en la Figura 62. Esquema del cono utilizado en la prueba de penetración de cono., el cono tiene 10cm² de área transversal y 60° de ángulo de vértice. El ensayo mide la resistencia q_c , F_r y la presión de poros, u . adicionalmente Vis CPT y SCPT fueron usados. Una cámara fue puesta en la punta del cono en el VisCPT permitiendo una inspección visual continua del suelo al aumentar la profundidad, como se muestra en la Figura 63. Prueba sísmica de penetración de cono (adaptado de Lunne et al., 1997).el SCPT, usando un acelerómetro dentro del cono, mide el tiempo de llegada de las ondas originadas por una fuente ubicada en la superficie. Este ensayo da un perfil V_s para complementar los datos del CPT.

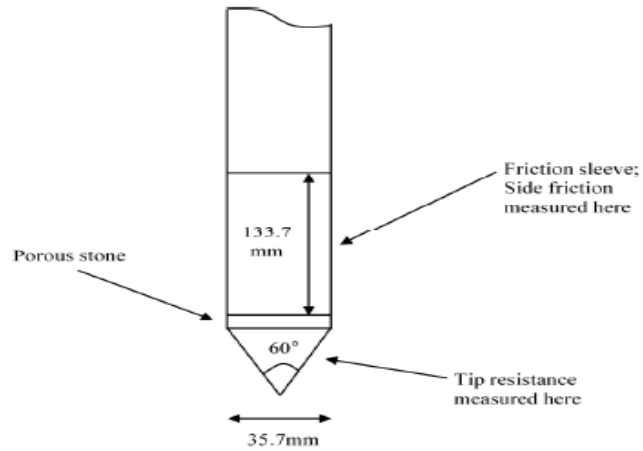


Figure 4-6. Schematic of the cone used in the cone penetration test.

Figura 62. Esquema del cono utilizado en la prueba de penetración de cono.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials

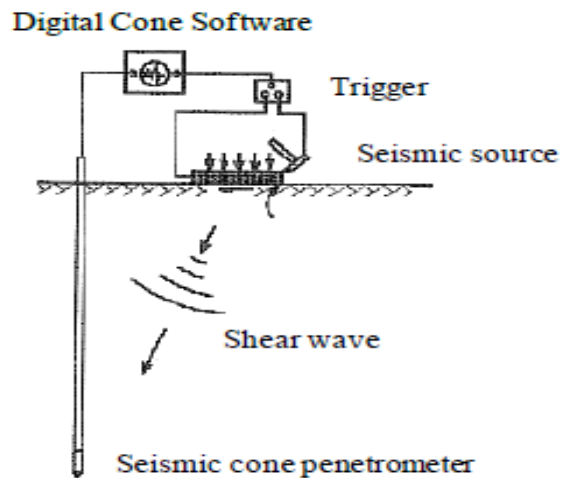


Figura 63. Prueba sísmica de penetración de cono (adaptado de Lunne et al., 1997).

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials



Con el fin de acceder a una variación espacial del área de explosión, fueron llevados a cabo varios ensayos CPT antes de la explosión. Se llevaron a cabo 5 ensayos CPT antes de la explosión, un VisCPT y un SCPT, como se muestra en la Figura 64. Disposición de pre-explosión en ensayos in situ., el rango de resultados de q_c y F_r antes de la explosión son mostrados en la Figura 65. Intervalo de los resultados de CPT pre-hornos. SCPT-15 provee el único dato V_s antes de la explosión. Los resultados de estos ensayos son mostrados en la Figura 66. Pre-blast velocidad de onda cortante de SCPT-19.

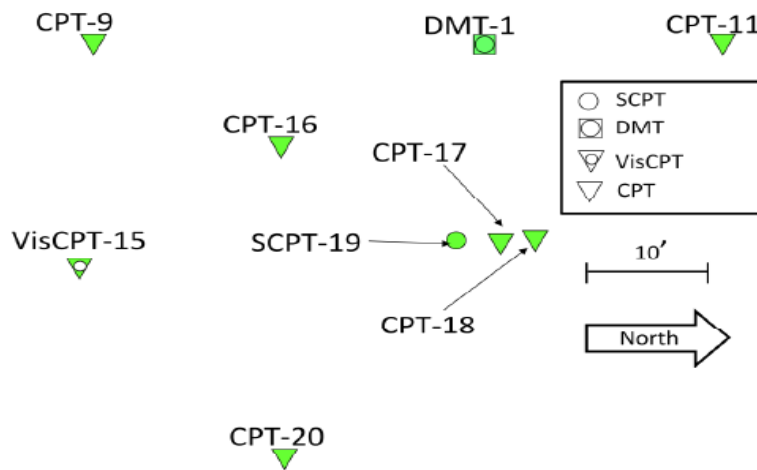


Figura 64. Disposición de pre-explosión en ensayos in situ.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials

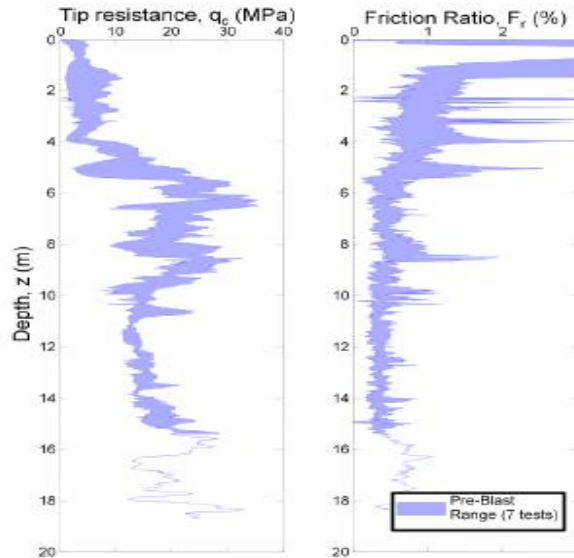


Figura 65. Intervalo de los resultados de CPT pre-hornos.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials

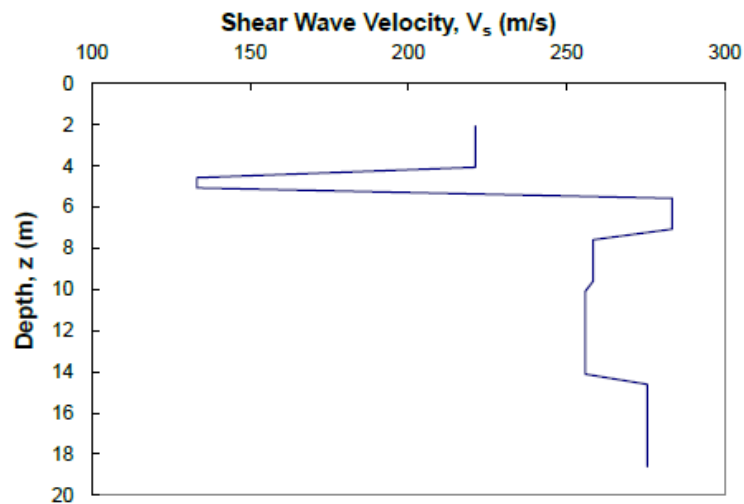


Figura 66. Pre-blast velocidad de onda cortante de SCPT-19.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials



4.4.6. Ensayo del dilatómetro

El DMT, desarrollado por Marchetti (1980), es mostrado en la Figura 67. Hoja Dilotometer (foto cortesía de Romano Hryciw).. El DMT de pala es 9.5 cm de alto, 1.5 cm de ancho con un circulo de 6cm de diámetro, con una membrana delgada en un lado. La membrana es presurizada y el operador grava la presión requerida para sacar la membrana de la pala y expandir la membrana a una distancia de 1mm de la pala. Esta presión es usada para calcular los índices DMT: ID (índice del material), KD (índice de esfuerzo horizontal), y ED (modulo del dilatómetro). Correlaciones empíricas relacionadas con el tipo de suelo, el coeficiente lateral de presión de tierra, el modulo de elasticidad del suelo, y otros. El resultado del DMT antes de la explosión son presentados en la Figura 68. Pre-BLAST resultados DMT: (a) KD, el índice de estrés horizontal, (b) ED, el módulo de dilatómetro, y (c) Identificación, el índice de material.



Figura 67. Hoja Dilotometer (foto cortesía de Romano Hryciw).

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials

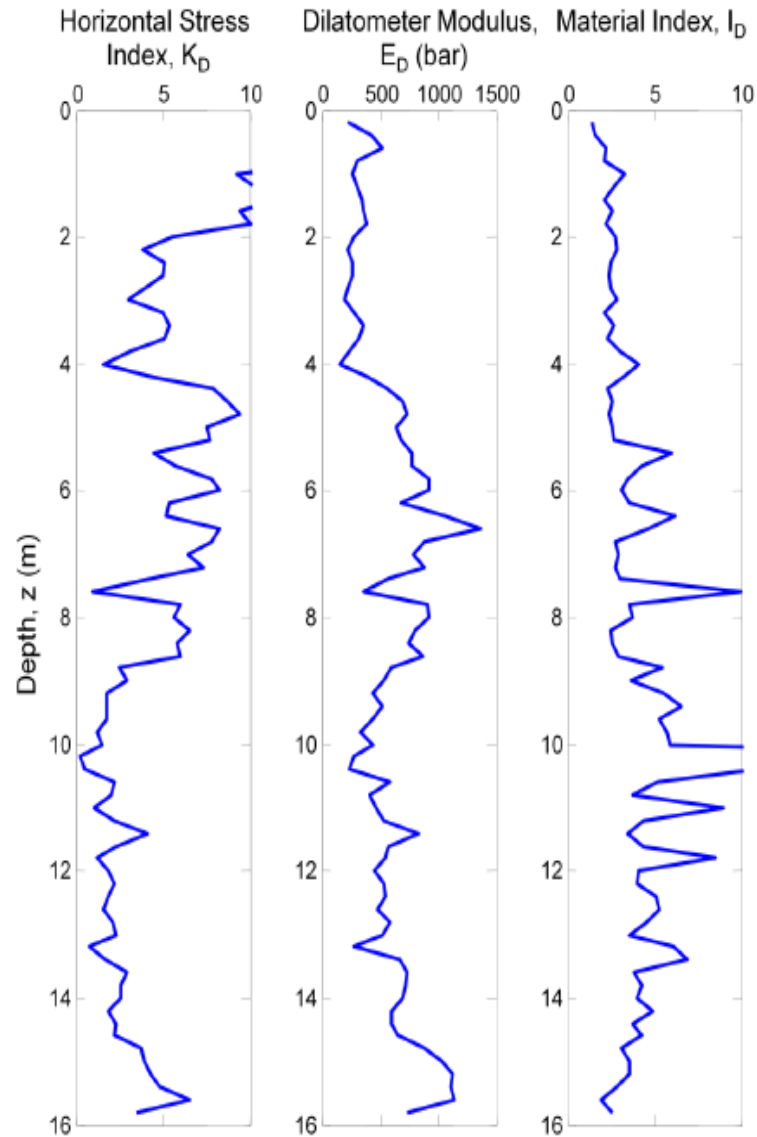


Figura 68. Pre-BLAST resultados DMT: (a) K_D , el índice de estrés horizontal, (b) E_D , el módulo de dilatómetro, y (c) Identificación, el índice de material.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials



4.4.7. Instrumentación y recolección de datos.

El plan de instrumentación fue diseñado para medir la presión de poros, la aceleración de las partículas, y el asentamiento. Esta sección describe también la instrumentación usada para medir Vs usando el método down-hole (fondo de pozo). La presión de poros se mide con el fin de cuantificar el exceso de presión de poros generado y disipado, asegurando que ese exceso de poros ha sido disipado por antes del ensayo in situ. La aceleración es un índice de disturbancia. Asentamiento provee información sobre la densificación. Down-hole Vs mediciones proveen información para compararla con las mediciones Vs realizadas con el SPDT. La adquisición de datos se hace inalámbrica y con sistemas de cable son también descritos.

4.4.8. Presión de poros

La densificación con explosivos crea una onda de choque de gran magnitud y alta frecuencia. Sin embargo, cualquier presión de poros transducida usada para esta aplicación debe ser capaz de sobrevivir a la onda de choque y tener aun suficiente precisión para medir el exceso de presión de poros residual. Rollins (2005) describe los experimentos de explosión usando cantidad de tipos de presión de poros transducidos. Ellos recomendaron el Sensotec P-050 piezo-resistivo transductor, Mostrado en la Figura 69. Transductor Sensotec presión de poro con el cono de nylon., diseñado específicamente para medir la presión de poros en suelos expuestos a la densificación con explosivos. Estos transductores son capaces de sobrevivir una onda de choque de aproximadamente 6000 psi de presión teniendo una resolución 0.1 psi. Ellos son, sin embargo, sensibles lo suficiente para medir la presión de poros y la disipada de la densificación con explosivos. Ya que el ancho de banda de los transductores es 0-300 Hz, es poco probable que la máxima presión de la onda de choque puede ser exactamente grabada; sin embargo, los instrumentos son capaces de medir la presión de poros residual generada y disipada, parámetros de mayor interés para este estudio.



Figura 69. Transductor Sensotec presión de poro con el cono de nylon.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials

Otro problema relacionado con la medición de la presión de poros es la ubicación y recuperación de los transductores. Los instrumentos son instalados en cono para facilidad de ubicación. Los conos son hechos de nylon porque son más fáciles de construir, más durables, y tiene un peso unitario cercano al del suelo. Ellos son, sin embargo, menos sensibles a ahogarse durante la licuefacción. Sin embargo, una desventaja de los conos de nylon es que no son tan fuertes como los conos de metal y no pueden resistir ser enterrados a las profundidades necesarias para este estudio. Rollins (2005) resolvió este problema con la perforación de un agujero lleno de líquido a una profundidad de más o menos un pie menos profunda que la profundidad deseada en la ubicación. Los conos luego necesitan ser empujados un pie adicional llegando a la profundidad deseada. La experiencia ha mostrado que los conos fueron lo suficientemente fuertes para resistir a ser penetrados un pie dentro del suelo, la cual es la suficiente distancia desde el lodo líquido para asegurar que la respuesta a la medición no es significativamente influenciada por el agujero lleno de lodo. Un cable de hierro fue amarrado al cono de nylon para devolverlo a la superficie. Los transductores fueron recuperados halando el cable de hierro a través el agujero lleno de lodo.



4.4.9. Aceleración.

Acelerómetros piezoeléctricos de choque pueden resistir grandes amplitudes generadas de una explosión y fueron usadas en este experimento. Figura 70. Aceleración máxima y la frecuencia máxima de las vibraciones hornos como una función de la raíz de escalado distancia cubo (adaptado de Hryciw, 1986). Muestra los datos de Hryciw (1986) sobre frecuencias y amplitudes de pulsos de explosión en suelos saturados como una función de la raíz cubica de la distancia a escala, definida como la distancia dividida la raíz cubica del peso de la carga. La frecuencia (f) de la máxima aceleración fue determinada calculando el inverso de cuatro veces el tiempo de subida, t_p (ecuación 4-1)

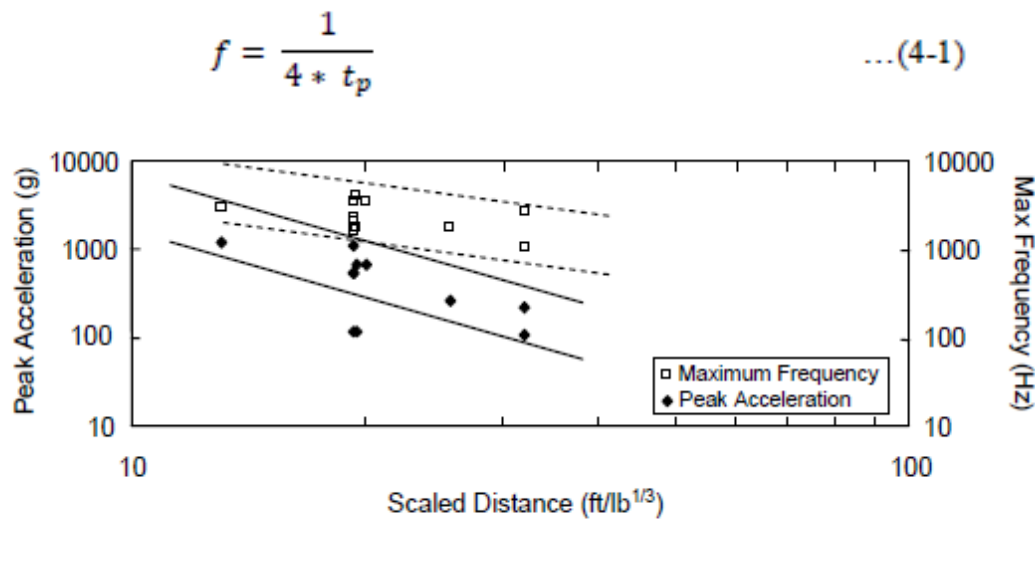


Figura 70. Aceleración máxima y la frecuencia máxima de las vibraciones hornos como una función de la raíz de escalado distancia cubo (adaptado de Hryciw, 1986).

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials

Extrapolando a una escala de distancias menor que los factores de seguridad fueron aplicados en estimar el pico de aceleración y las máximas frecuencias para contar las incertidumbres en las condiciones del terreno y energías explosivas. Fue determinado que los acelerómetros de choque tienen que capturar frecuencias más grandes que 15k Hz y picos de amplitudes de 500, 2500 y 20000 g a escala a distancias de 30, 15 y 5, respectivamente. Dytran 3200 series de acelerómetros de choque fueron seleccionados.



Los acelerómetros fueron ubicados de manera similar como en la figura 39 a los transductores de presión de poros. Una diferencia fue la importancia de orientación de los acelerómetros durante la explosión. Para la instalación, los acelerómetros fueron agarrados con 1-D y 3-D soportes de montaje, asegurando la correcta localización del cono. Los soportes de montaje fueron asegurados dentro del cono de nylon y la orientación de los acelerómetros fueron marcados sobre el exterior del cono. El cono fue llenado luego con cera para impermeabilizar los acelerómetros. Durante la instalación, se tomo cuidado de asegurar que los conos fueron instalados con la correcta orientación, para evitar que la orientación cambie durante la instalación, permitiendo la inspección de la orientación en superficie. En todos los casos, el cono del acelerómetro se recuperaron correctamente orientados.



Figura 71. Establecer para el experimento instrumento piscina (foto cortesía de Russell verde).
Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials

4.4.10. Asentamiento.

El asentamiento es usado para la medición de la densificación y fue medido de dos maneras. La primera, las elevaciones del terreno fueron gravadas usando un transito. La localización de los puntos de medición son mostrados en la Figura 72.. Localización de los puntos de la encuesta. Puntos de la encuesta se muestran en rojo se repitieron midieron tras la explosión. Las elevaciones fueron tomadas desde estacas en la tierra en un patrón regular alrededor de los huecos de explosivo. Ya que pasaron varios meses entre la medición de las distancias de elevación y el



transito no permaneci6 en el sitio, lecturas de estacas instaladas lejos del area de explosi6n fueron usadas como puntos de referencia.

Solo una teorfa temprana sugerida para el envejecimiento de la arena fue que el asentamiento continuaba por semanas a meses despu6s de la disturbancia; asi, incrementando qc o Vs podrfa ser explicado por el incremento de la densidad. Muchos asentamientos fueron medidos con el tiempo despu6s de la explosi6n. Ya que tomo aproximadamente una hora en la colecci6n de datos de los puntos de elevaci6n, las lecturas fueron tomadas en cinco localizaciones seleccionadas por varias horas despu6s de la explosi6n, como se muestra en la Figura 72.. Localizaci6n de los puntos de la encuesta. Puntos de la encuesta se muestran en rojo se repitieron midieron tras la explosi6n..

El segundo m6todo de monitoreo del asentamiento fue con los tubos de sondeo de asentamiento, mostrados en la Figura 73. Sondex equipo del tubo de liquidaci6n (de <http://www.slopeindicator.com/instruments/ext-sondex.html>). Este sistema usa anillos metalicos sobre un tubo corrugado que se asienta o estira con el suelo. Una prueba que detecta la localizaci6n de los anillos es que pasan a trav6s de un tubo localizado dentro del tubo corrugado. Estas mediciones permiten determinar el asentamiento, tan bien como incrementa el asentamiento con la profundidad.

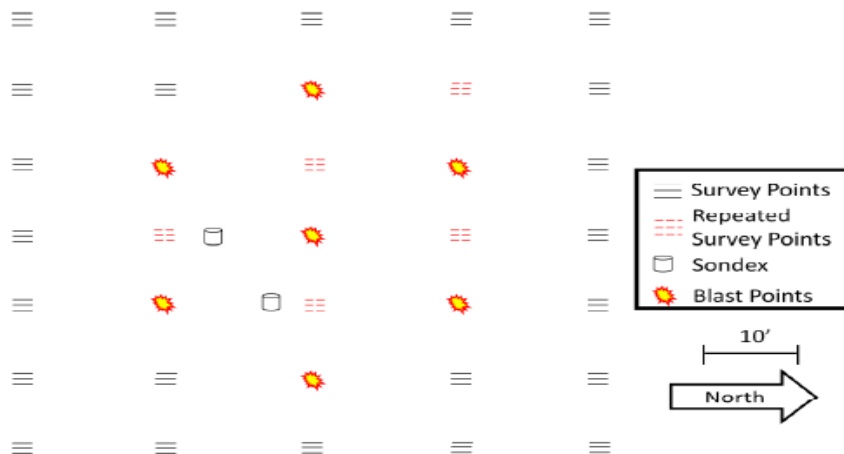


Figura 72.. Localizaci6n de los puntos de la encuesta. Puntos de la encuesta se muestran en rojo se repitieron midieron tras la explosi6n.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials



Figura 73. Sondex equipo del tubo de liquidación (de <http://www.slopeindicator.com/instruments/ext-sondex.html>).

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials

4.4.11. Diseño de explosivo y ejecución.

La siguiente sección describe el diseño, preparación, e implementación del experimento de la densificación con explosivos, la experiencia base en los métodos de diseño considerados en este trabajo son presentados a lo largo con el diseño final. Instalación de la instrumentación y la preparación de los huecos para explosivo son también discutidos. Finalmente, comentarios y observaciones son descritas de acuerdo a la ejecución del experimento de densificación con explosivos.

4.4.12. Diseño experimental.

Hay muchas guías de diseño de densificación con explosivos, sin embargo, no hay métodos ampliamente aceptados. Así, que este proyecto considero dos métodos de ensayo recientes en Gohl et al. (2000) y Narin Van Court y Michelle (1998). Adicionalmente, recomendación de Ivanov (1967) sobre el máximo peso de explosivo a una determinada profundidad fueron seguidas. Vis CPT-15 fue representativa para las condiciones del suelo del sitio antes de la explosión, y fue usado para el diseño de explosivos. Los resultados del ensayo del DMT pueden ser empíricamente correlacionados al peso unitario. DMT-2 fue usado para mostrar que el peso unitario seco fue 1.9 kN/m^3 y el peso unitario sumergido fue de 8.9 KN/m^3 . La meta de la densificación con explosivos fue incrementar la densidad y q_c en la capa licuefactible más alta. La experiencia ha mostrado que la densificación no es efectiva en depósitos más viejos, la densificación con explosivos fue también



planeada para las capas mas bajas licuefactibles. Mejoramientos no fueron esperados en estas capas, pero es posible que el asentamiento de la arena ocurra después de la disturbancia causada por las detonaciones. (i.e. Charlie et al, 1992b).

El primer paso de diseño fue estimar el máximo peso de carga en las profundidades de interés. Ivanov (1967) provee una relación entre el máximo peso para prevenir cráteres en la ecuación 4-2

$$C = 0.055h^3$$

Donde C es el peso de la carga en kilogramos y h es la profundidad de la carga en metros. Ya que la capa mas alta licuefactible era relativamente delgada y cercana a la superficie, se decidió dejar la capa mas superficial a 5m, justo debajo de la capa mas alta licuefactible en la capa de arena densa. Un beneficio adicional de poner la capa mas superficial en la arena densa fue la posibilidad de que la explosión disturbara la arena densa lo suficiente para que el asentamiento pudiera ser observado en esta también. La carga más profunda fue planeada a 12 m, la cual esta aproximadamente en el centro de la capa licuefactible mas profunda. Usando 5 m y 12 m de profundidad para la ecuación 4-2, la máxima carga debería ser de 3.5 kg en la capa mas alta y de 95 kg en la capa mas profunda. Las relaciones de Ivanov (1967) fue desarrollada para capas superficiales, lo que explica la gran estimación para una profundidad de 12 m. Nrin Van Court y Michelle(1994) reporto que la mayor densificación con explosivos uso entre 2 y 10 kg y hasta 30 kg han sido reportados.

El método de Gohl et al (2000) fue usado también para calcular el peso de la carga y el espaciamiento. Su relación, la cual es basada en un análisis dimensional, es mostrado en la ecuación 4-3:

$$E = k \left(\frac{W}{\rho} \right)^{0.33} h^{-0.5} R^{-1} \quad \dots(4-3)$$

Donde E es la fracción del máximo esfuerzo alcanzado, k es el coeficiente especifico del sitio, ρ es la densidad de la masa de explosivo en g/m³, h es el enterramiento en metros, W es el peso de la carga en gramos, y R es el radio del circulo compactado por la explosión en metros. En esos cálculos, E es igual a uno ya que el diseño pretende alcanzar el esfuerzo máximo posible. La constante especifica del sitio, k es igual a 120 despues de comparar el tipo de suelo en Griffin con suelos históricos en donde las relaciones fueron desarrolladas.



4.5. POST-EXPLOSIVA TESTING

La siguiente sección trata sobre el plan de pruebas de post-explosión y resultados. Se presentan los datos recogidos de los transductores de presión de poro, datos de liquidación, y los resultados de los distintos ensayos in situ.

4.6. PLAN DE PRUEBAS.

Hryciw y Dowding (1988) mostraron que la distancia desde un punto de explosión afecta en gran medida los resultados de ensayos in situ. Por lo tanto, todos los ensayos in situ se llevaron a cabo 10 "desde el punto de explosión cercana. Por comparación, los TTC se realizaron en 25 "y 40" de los puntos de explosión en el momento de cada suite de pruebas. Debido a que la prueba depende de la tensión horizontal, todos los TME se llevaron a cabo con el diafragma orientados radialmente hacia fuera desde el punto de explosión cercana.

4.7. DISIPACION PRESION DE PORO

Tres transductores de presión de poro se instalaron en cada una de la arena suelta y capas de arena grava sueltos. Los historiales pobres de tiempo la presión en la capa suelta de arena situado a 10 ", 28". Estos transductores de presión se instalaron más o menos 1 m por debajo de la capa freática a una profundidad de 4 m. Mediciones orificio transversal posteriores llevadas a cabo en el sitio de vibroseis noreste a una profundidad de 4m mostraron que el suelo no se saturó a esta profundidad, como se describe en el capítulo 5.5.6. La respuesta de la presión de poros transitorios en cada uno de estos transductores se puede explicar por las condiciones del suelo insaturados a esta profundidad. La tendencia con la distancia desde la explosión muestra que la explosión tiene menos efecto sobre la presión de los poros, tanto en términos de magnitud y duración de la respuesta, con mayor distancia de la explosión.

Los resultados de los tres transductores de presión instalados a una profundidad de 12 m y una distancia desde el punto más cercano de explosión 17 ", 44" y 83,5 respectivamente. Estos transductores de presión se instalaron aproximadamente 9 m por debajo del nivel freático. En PPT-4, la relación de exceso de presión de poro máximo, ru , alcanzó 0,4 y presiones de poro permanecieron elevados durante 30 segundos. En PPT-5, la presión de poro máximo exceso alcanzó 0,3 y presiones de poro permaneció elevada durante 2 minutos. Mientras PPT-6 funcionaba correctamente antes y después de la explosión, como se evidencia a través de



pruebas de laboratorio, que no registró presiones consistentes con los otros transductores de presión. Después de un pico momentáneo para una relación de presión de poro superior a 0,9, el transductor registra una presión de agua de aproximadamente 1 psi durante aproximadamente 90 segundos. Después de ese tiempo, el transductor grabó presiones consistentes con la presión hidrostática. En cualquier caso, el exceso de presión de poro en el lugar de la explosión se disipó dentro de los 3 minutos después de la explosión. Por lo tanto, cualquier cambio a la punta de resistencia en comparación con los resultados previos a la explosión no se debió a las presiones intersticiales elevadas y disminución de la tensión efectiva.

4.8. SOLUCIÓN

Como se describe en la Sección 4.3.3, la solución se controló utilizando ambas medidas de elevación de superficie y tubos de solución de Sondex, las lecturas de tránsito llevaron a cabo tras la explosión mostró 11,7 "de la solución en el centro del lugar de la explosión. No hubo asentamiento mensurable 60 "de distancia desde el punto más cercano explosión.

Inmediatamente después de la explosión, repetidas mediciones se hicieron en los lugares indicados con Cinco lecturas tomadas entre 10 minutos y 3,5 horas después de la explosión mostraron que la solución de superficie fue casi inmediata. Tres conjuntos de mediciones más elevación de la superficie se tomaron en la primera semana, sin ningún cambio significativo de las lecturas originales. Sin embargo, las mediciones a cabo un mes después de la explosión mostró que la licuefacción adicional se había producido entre una semana después de la explosión y un mes después de la explosión. Después de las mediciones tomadas en tránsito de un mes, se observó ningún asentamiento adicional de la superficie. El asentamiento máximo en el lugar de la explosión fue de 12,1".

Las medidas del tubo de asentamiento Sondex del tubo suroeste fueron consistentes con la liquidación de la superficie, mostrando 10,6 "de la liquidación inicialmente, 0,75" liquidación adicional entre una semana y un mes después de la explosión, y no colonos, después de un mes. El tubo noreste no aportó datos significativos, ya que flotaba tras la explosión, lo que hace mediciones de comparación pre-hornos inútil.

Una indicación final de asentamiento al lugar de la explosión era grietas que aparecieron en la superficie del suelo en la arcilla desecada y más o menos se producen en un círculo que rodea el área de la explosión. El estudio de estas grietas se produjo 1,5 horas después de la explosión. Una observación importante sobre el acuerdo en el lugar de la explosión es que, en su mayor parte, la solución se produjo



casi inmediatamente después de la explosión. asentamiento adicional de aproximadamente 0,75 "no representa un aumento significativo en la densidad relativa.

4.9. PRUEBA DEL CONO DE PENETRACION.

Pruebas CPT Pre-explosión consistió en seis CPT, una VISCPT, y uno SCPT. Las pruebas post-explosión se llevó a cabo inmediatamente después de la explosión de una semana y un mes, 2,5 meses, 3.5 meses, un año y dos años después de la explosión. Con la excepción de la prueba 3,5 meses, al menos cinco CPT totales se llevó a cabo en cada tiempo: un SCPT en 10 ", uno VISCPT en 10", una CPT en 10 ", una CPT en 25", y uno CPT en 40 "desde el punto más cercano explosión. El intervalo de prueba de 3,5 meses ocurrió al mismo tiempo que la prueba un mes después de vibroseis sacuden cuando la mayoría de la prueba de esfuerzo se concentró en los sitios vibroseis. Por lo tanto, sólo uno SCPT a las 10 ", uno CPT en 25", y uno CPT en 40 "se llevaron a cabo en el área de la explosión. Pruebas realizadas en la semana siguiente a la explosión ya los dos años incluido varias pruebas, además de la suite estándar. En la semana siguiente de la explosión, se llevaron a cabo tres CPT a los 10 ", dos VISCPT a las 10", uno SCPT a las 10 ", uno CPT a 25", y uno CPT a 40 "desde el punto de explosión más cercana. Dos años después de la explosión, se llevaron a cabo una CPT a las 10 ", dos VISCPT a las 10", uno SCPT a las 10 ", uno CPT a 25", y uno VISCPT a 40 "desde el punto de explosión más cercana.

Pruebas previas a la explosión consistió en 8 CPT, incluyendo uno SCPT y VISCPT. Debido SCPT-19 era representativa de las condiciones pre-hornos y porque era la prueba de pre-explosión más profundo, SCPT-19 los resultados se presentan en la **Figura 43. Partiendo del** barreno (foto cortesía de la Romana Hryciw). junto con Vs y KD. A lo largo de la prueba CPT en la cantera Griffin, poro mediciones de la presión de agua varió con la profundidad del nivel freático, pero siempre se define la línea hidrostática. Además, la relación de fricción fue consistente con los resultados.

CPT se realizaron durante una semana después de la explosión. En la primera semana después de la explosión, CPT se llevaron a cabo en 25 "y 40" de la explosión, así como 6 CPT, incluyendo uno SCPT y VISCPT, a 10 "de la explosión. el cambio dependiente del tiempo en la resistencia punta no era distinguible de las variaciones entre pruebas debido a la variabilidad espacial natural de las propiedades del suelo; Por lo tanto, todas las pruebas realizadas en la primera semana tras la explosión fueron tratados como un solo grupo. Como se muestra en la **Figura 44.** Respuesta de la presión de poro del transductor situado a 10 "desde



el punto de explosión de NE en la capa de arena suelta. la gama de qc registró 10 "de la explosión puntos siguen siendo en general consistentes en la capa de arena suelta y se dejó caer en capas más profundas en comparación con las lecturas de pre-hornos. Esto ocurrió a pesar aproximadamente 1 "de asentamiento superficie. Estos resultados son típicos siguiente densificación explosivo (es decir Denisov et al, 1963;. Mitchell y Solymar, 1984; Hryciw y Dowding, 1988; Rogers et al, 1990;. Charlie et al, 1992b;. Wheeler, 1995; Ashford et al. , 2004; Liao y Mayne, 2005; Narsilio., 2006, y Camp et al, 2008).

Durante un mes, dos meses y medio, y una prueba de año, los TTC se llevaron a cabo en 25 "y 40" de los puntos de explosión, así como 3 CPT, incluyendo uno SCPT y VISCPT, a 10 "de los puntos de explosión. Tres meses y medio después de la explosión, los TTC se llevaron a cabo en 10 ", 25" y 40 "de los puntos de explosión. Dos años después de la explosión, los TTC se llevaron a cabo en 25 "y 40" de los puntos de explosión, así como 4 CPT, incluyendo uno SCPT y dos VisCPTs, a 10 "de los puntos de explosión. Los resultados de los CPT realizadas 10 "de los puntos de hornos se muestran en la **Figura 45** para las pruebas de dos años, el intervalo de valores de qc registró 10 "desde el punto de explosión aumentan en las capas de arena grava sueltos y flojos, pero se mantuvieron en general consistente con una prueba de la semana en la capa de arena densa.

El perfil medio qc se muestra para cada intervalo de prueba en la **Figura 46**. Resistencia a la punta en la capa de arena suelta mostró poco cambio inmediatamente después de la densificación explosivo. Sin embargo, las pruebas en un mes y después tras la explosión mostraron un aumento de aproximadamente 50% en comparación con el control de calidad antes de la explosión y uno los valores de la semana. En la capa de arena densa, qc no mostró cambios claros con el tiempo. En la capa de arena de grava suelta, el control de calidad media muestra aumenta en función del tiempo. Además, los valores de qc en las capas de arena grava densos y sueltos no se acercan a los valores pre-hornos a pesar de su aumento de la densidad, se evidencia a través de la liquidación de la superficie y lecturas Sondex. Es probable que la explosión destruyó los beneficios de envejecimiento geológica en estos depósitos del Pleistoceno, haciendo que los beneficios de una mayor densidad de menos importante en comparación.

Resultados CPT para pruebas realizadas en 25 "y 40" desde el punto más cercano explosión se presentan en la **Figura 48**. Una inspección inicial de estas cifras muestra una tendencia al aumento de qc con el tiempo si se tiene en cuenta las pruebas de valores atípicos de un año. Sin embargo, una comparación de estos resultados con la ubicación de estas pruebas muestra que qc aumentó de norte a



sur. Explicaciones probable para los resultados incluyen la variación natural y la eficacia no uniforme de densificación explosivo. Es posible que el envejecimiento de arena no es la causa de estas variaciones.

En conclusión, la densificación explosivo redujo qc de la arena densa y capas de arena grava sueltos. Aumento dependiente del tiempo en la resistencia a la penetración se produjo en la capa de arena de grava suelta, pero no en la capa de arena densa. En la capa de arena suelta, inmediatamente después de la densificación explosivo, no hubo ningún cambio en la resistencia a la penetración. Sin embargo, un mes después de la explosión, qc había aumentado notablemente de los valores registrados antes de la explosión, y una semana después de la explosión.

4.10. VISIÓN CONO DE PENETRACIÓN

Se utilizó un método cualitativo de la evaluación de los datos de la vista. Durante la realización de la VISCPT, el avance del cono fue detenido cada 10 cm. Estas pausas permiten para la observación visual del suelo. En algunas de estas pausas, se observó arena para fluir o hervir, lo que indica que la arena es muy suelta y licuada durante el cono "s antelación. Aunque la falta de ebullición en arena suelta no debe ser interpretado como no susceptibles a la licuefacción inducida terremoto-el suelo, la observación de licuefacción local por el VISCPT indica alta susceptibilidad de licuefacción.

Había 7 sondeos VISCPT, Como se muestra en la **Figura 49**, antes de la explosión, hubo seis zonas de licuefacción observado con un espesor máximo de 40 cm. Todas estas áreas se localizaron tanto en la arena densa o la arena de grava suelta. La presencia de zonas donde se observó licuefacción durante la penetración de cono que se produzca en la capa de arena densa puede explicarse a través de la destrucción de los beneficios de envejecimiento geológico. La capa se clasificó como arena densa basada en la interpretación de la resistencia de la punta CPT, que se midió mientras el suelo primero estaba siendo perturbado. La cámara está situado 64 cm de distancia de la punta; Por lo tanto, la observación de la licuefacción se produjo en el suelo perturbado.

Debido a que la explosión destruyó los beneficios del envejecimiento geológico, como lo demuestra qc inferior, Vs, y KD, las zonas de licuefacción observado aumentaron después de la explosión. Datos para pre-BLAST similares, en todas las pruebas post voladura, hay una pequeña zona en la que se observó licuefacción a



partir de las más o menos 7 m de profundidad y que se extiende 30 hasta 80 cm. Las diferencias entre los resultados de la visión pre y post voladura se producen en la zona de licuefacción observado a partir de las aproximadamente 8,5 m. En el examen de la vista antes de la explosión, hay zonas esporádicas de licuefacción observado que se extiende hasta aproximadamente 15 m de profundidad. Tras la explosión, había en general una zona continua de licuefacción observado entre aproximadamente 8,5 y 15 m. De acuerdo con los resultados de otros ensayos in situ en la arena densa y capas de arena grava sueltos, no había una diferencia significativa entre los resultados con el tiempo luego de la explosión.

4.11. DISIPACIÓN CONO DE PENETRACIÓN

Tras la explosión, dos CPTs de disipación (UCPT) se realizaron utilizando los métodos descritos en Lee et al. (2008). La primera de estas pruebas, conocida como D-1 y se muestra como un ensayo de disipación en la figura 47, se llevó a cabo 75 "desde el punto de explosión más cercana con la esperanza de que no se vio afectada por la explosión, pero lo suficientemente cerca para proporcionar datos representativos. El segundo, titulado D-2 y se muestra como un ensayo de disipación en las figuras 46 y 47, se llevó a cabo 10 "desde el punto más cercano explosión. Como puede verse en la figura 4-61, los resultados de D-1 y D-2 son generalmente similares. La zona afectada por la explosión, a prueba en D-2, muestra una mayor uniformidad de la zona afectada por la explosión, a prueba en D-1.

4.12. VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE.

Velocidad de onda de corte se determinó a partir de datos SCPT y los datos de fondo de pozo. Debido SCPTs de cada intervalo de prueba se recogieron en diferentes lugares, Vs de este método muestra más variabilidad que los datos de fondo de pozo, que se mantuvo en su lugar durante todo el experimento. Ambos métodos muestran la misma tendencia de aumento Vs con el tiempo después de la explosión.

Hubo 7 sondeos SCPT, Debido a la presentación de los 7 sondeos a la vez crea un gráfico desordenado que es difícil de entender. Teniendo en cuenta tanto los datos SCPT y abajo hoyos, está claro que la explosión disminuyó Vs inicialmente. Velocidad de onda cortante luego aumentó entre una semana y un mes mediciones. Después de las primeras 24 horas, no había una clara tendencia al aumento Vs dentro de la primera semana tras la explosión. Además, se hace difícil ver una tendencia en las mediciones realizadas un mes y más tarde después de la



explosión. Estos datos muestran una tendencia similar a los datos de CPT con respecto al envejecimiento.

4.13. DILATÓMETRO TESTING

Hay 6 sondeos DMT y el índice de estrés horizontal resultante, dilatómetro índice, y perfiles de índice de materiales se presentan en las Figuras 82 a través 84, respectivamente. Debido a la presentación de todos los 6 sondeos a la vez crea un gráfico desordenado que es difícil de entender, de 3 a 4 sondeos se presentan en cada uno de los gráficos contenidos en las Figuras 82 a través 84. El DMT llevó a cabo un mes después de la explosión es común a ambos gráficos y se puede utilizar para la comparación.

En resumen, KD y ED mostraron dependencia del tiempo, mientras que ID no cambia con el tiempo. Tanto KD y ED inicialmente cayeron después de la explosión y el aumento de entre una semana y un mes. Medidas tomadas después de un mes no muestran un comportamiento dependiente del tiempo. En la capa de arena suelta, KD y ED son mayores que los valores pre-hornos, pero otras capas no se recuperan a pre-hornos valores.

4.14. RESUMEN DE LOS RESULTADOS

Utilizando datos de la CPT, VISCPT, DMT, y SCPT, resistencia de licuefacción se determinó para una cantera de arena y grava en Griffin, IN. De los tres métodos para determinar CRR por los datos de CPT, la Idriss y Boulanger método (2008) aportaron las predicciones de RRC mediana en comparación con la de Moss et al. (2006) y Robertson y Wride (1998) métodos a valores bajos qc1N y predijo la CRR más baja en los valores más altos qc1N.

El método Idriss y Boulanger (2008) se comparó con las predicciones de CRR por la otra en ensayos in situ en este estudio. Los valores de RRC predichas por los datos Vs fueron más altos que los valores de RRC predichos por las otras pruebas. Esto es debido a la mayor sensibilidad de Vs a edad geológica en comparación con CPT y DMT. CRR basado en DMT es demasiado conservador en depósitos geológicos de edad. La inserción de la cuchilla de DMT destruye los efectos beneficiosos de envejecimiento antes de probar el material; Por lo tanto, la CRR basado en DMT no incluye los efectos beneficiosos de envejecimiento que son conocidos para aumentar la resistencia de licuefacción. Datos visuales, desde la VISCPT fue consistente con la otra en los resultados de pruebas in situ. Muestra un aumento potencial de licuefacción cuando los valores qc1N son muy bajos. El VISCPT también confirma que los valores bajos qc1N son debido a la baja densidad, arena de contracción y no debido a la presencia de suelos de grano más fino. Los



resultados de este análisis demuestran los beneficios de la realización de múltiples ensayos in situ en un sitio.

4.15. CONCLUSIÓN

En este capítulo se describió el experimento densificación explosivo que se realizó en Griffin, IN. Se presentó una descripción de la investigación del sitio, la instrumentación y los métodos de recolección de datos y diseño experimental. Además, los resultados del experimento y posterior en ensayos in situ fueron presentados y discutidos. Un análisis geoestadístico de estos datos mostró con confianza 74% que las diferencias en los resultados del CPT del período de control de una semana fueron diferentes de los periodos de prueba que siguieron con el tiempo y no se debe a la variabilidad espacial. Además, comparando los resultados de los métodos de cálculo de RRC ampliamente aceptados sobre la base de las pruebas realizadas in situ en la cantera Griffin mostró que los métodos basados en Vs son más sensibles al envejecimiento geológico y métodos basados en DMT son menos sensibles al envejecimiento geológica en comparación con CPT-basado métodos. Esto se debe a que las mediciones Vs son no destructivos y no interrumpen los efectos del envejecimiento. Por el contrario, la inserción de la cuchilla de DMT se produce antes del inflado de la membrana y la recogida de datos de DMT. La penetración de la cuchilla DMT destruye beneficios de envejecimiento y no tiene en cuenta al determinar los CRR. Se mostraran algunos resultados del sistema densificación con explosivo en las Figuras 42 - 55



Figura 42. Densificación explosivo en Griffin, IN (foto cortesía de la Romana Hryciw).



Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials.



Figura 43. Partiendo del barreno (foto cortesía de la Romana Hryciw).

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials.

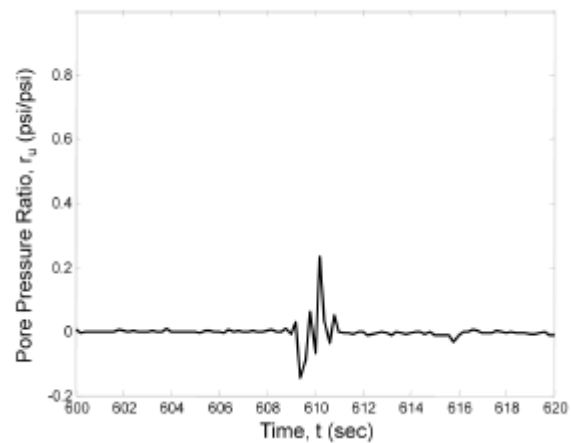


Figura 44. Respuesta de la presión de poro del transductor situado a 10 "desde el punto de explosión de NE en la capa de arena suelta.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials

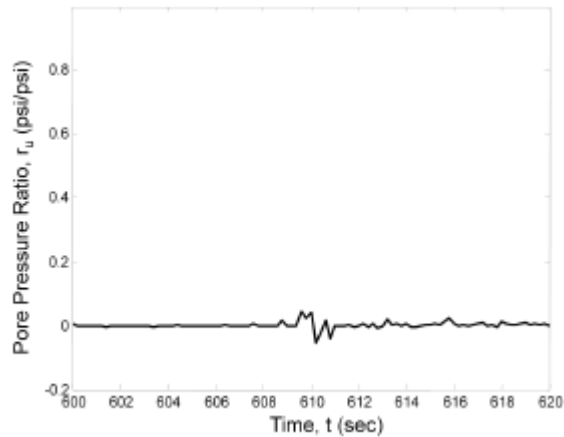


Figura 45. Respuesta de la presión de poro del transductor localizado 28 "desde el punto de explosión de NE en la capa de arena suelta.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials.

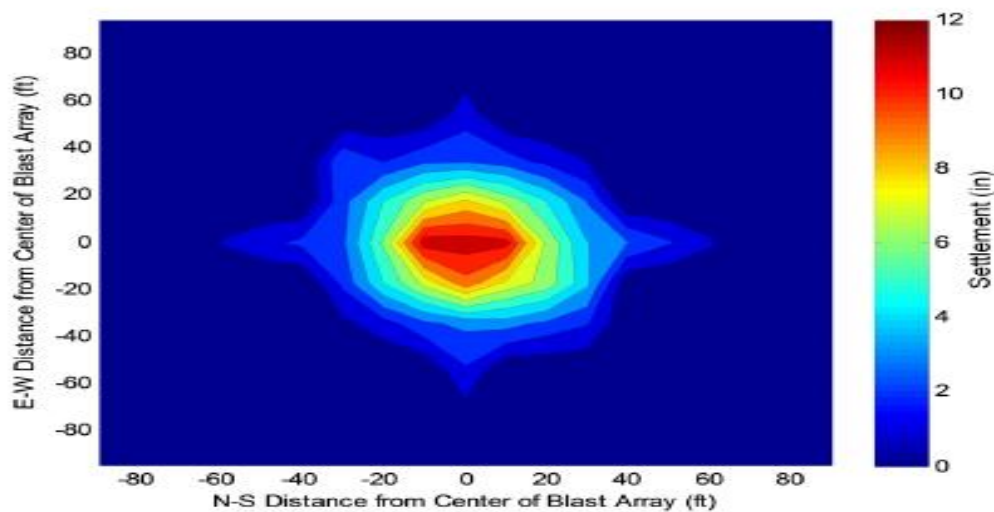


Figura 74. Liquidación tras la explosión.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials.

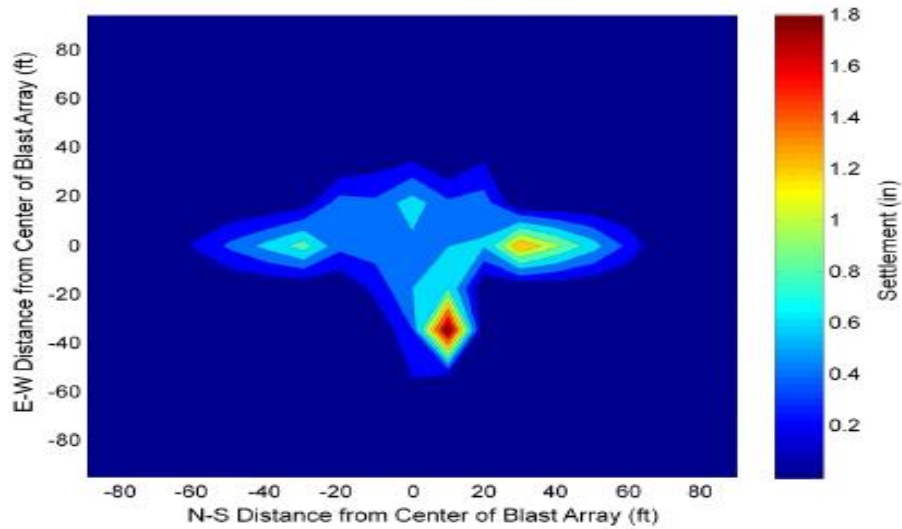


Figura 75. Solución que se produce entre una semana y un mes después de la explosión.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials.

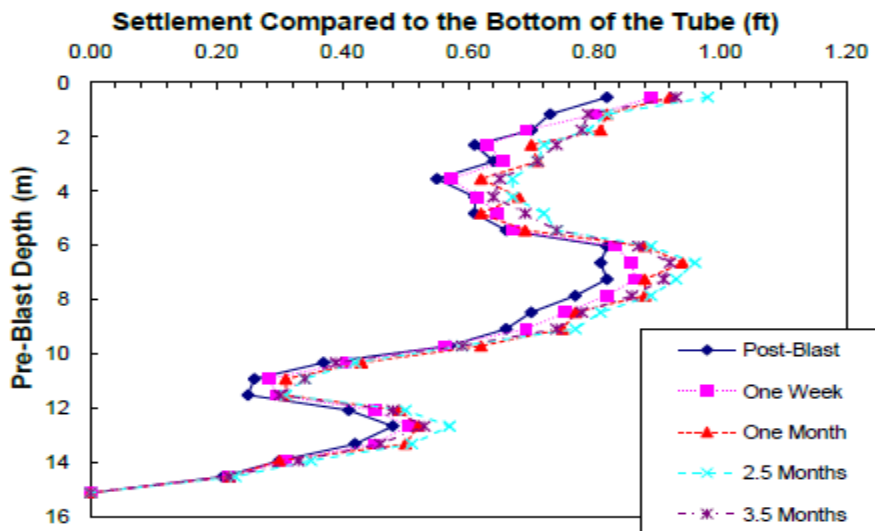


Figura 76. Liquidación total después de la explosión.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials.

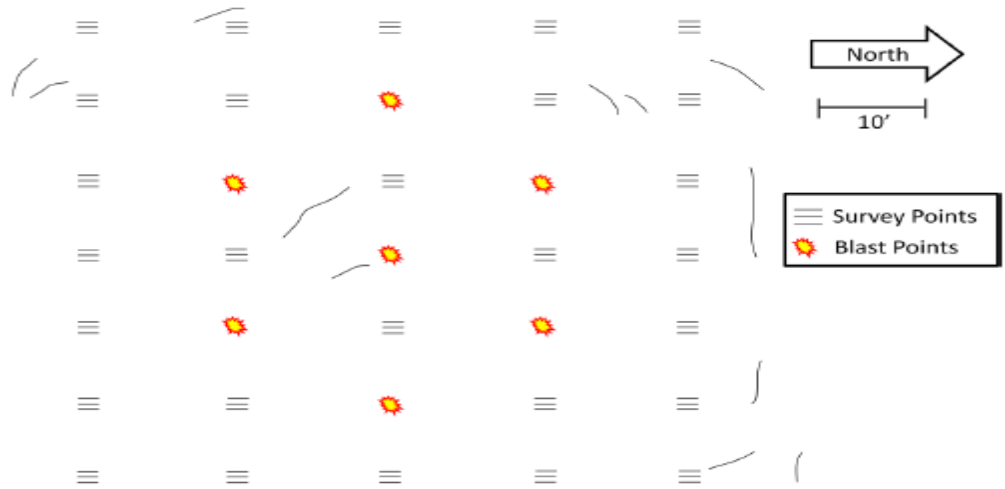


Figura 77. Grietas superficiales observados después DENSIFICACIÓN EXPLOSIVO.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials.

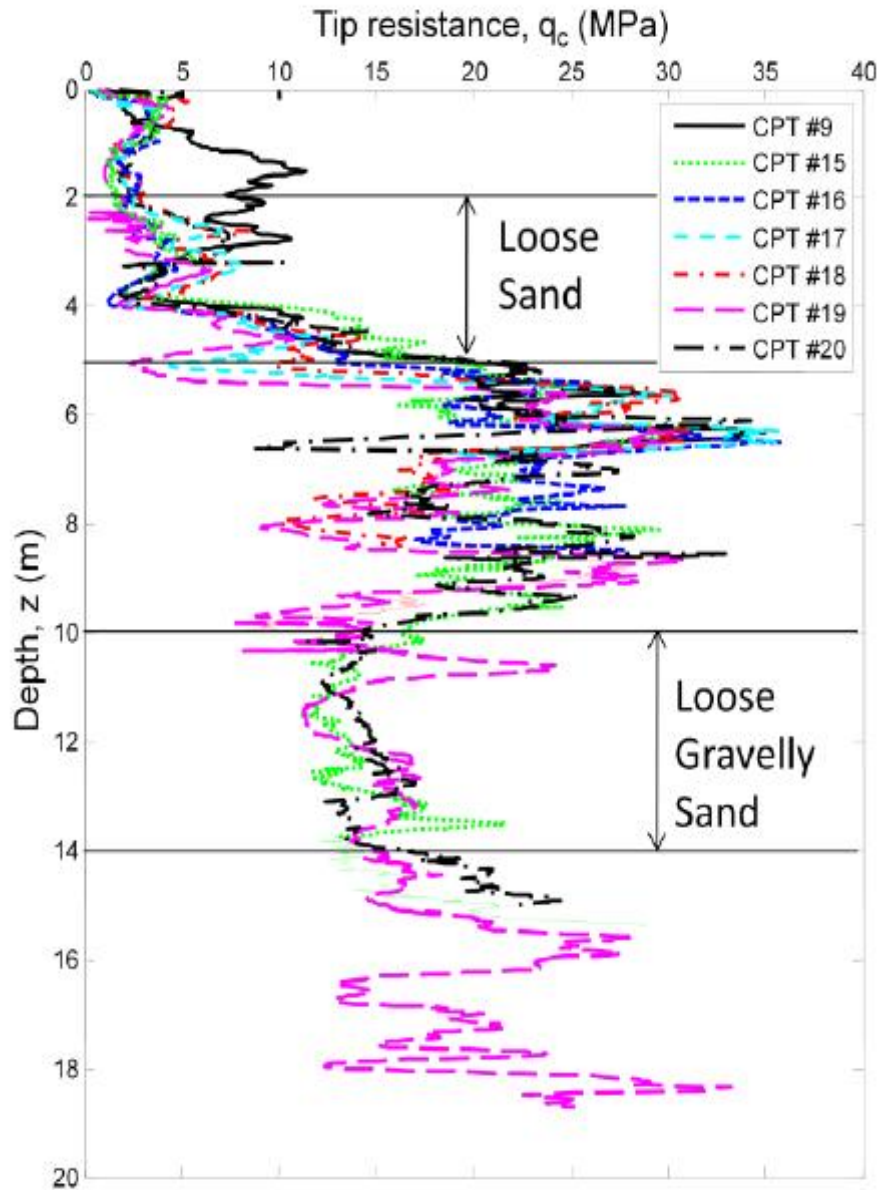


Figura 78. Resultados de TTC pre-hornos de 10 "desde el punto de explosión cercana.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials.

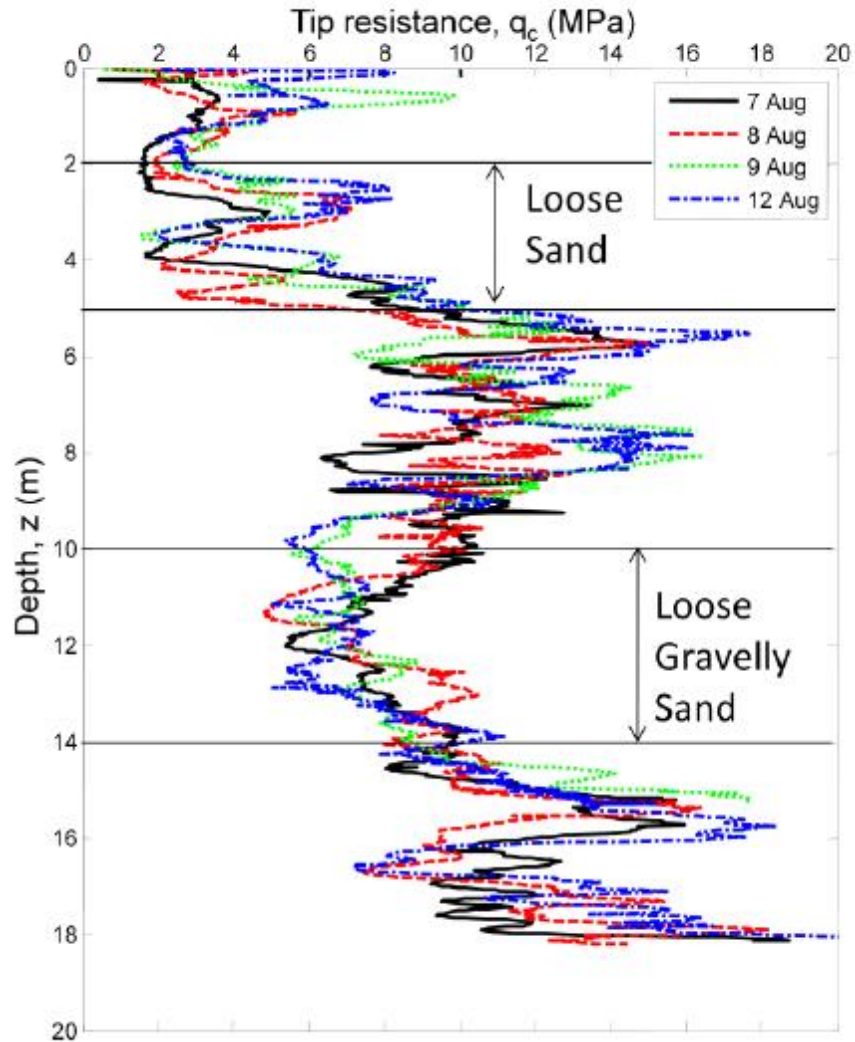


Figura 79. CPT a cabo dentro de una semana de la explosión 10 "desde el punto de explosión cercana trazada por fecha realizado.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials.

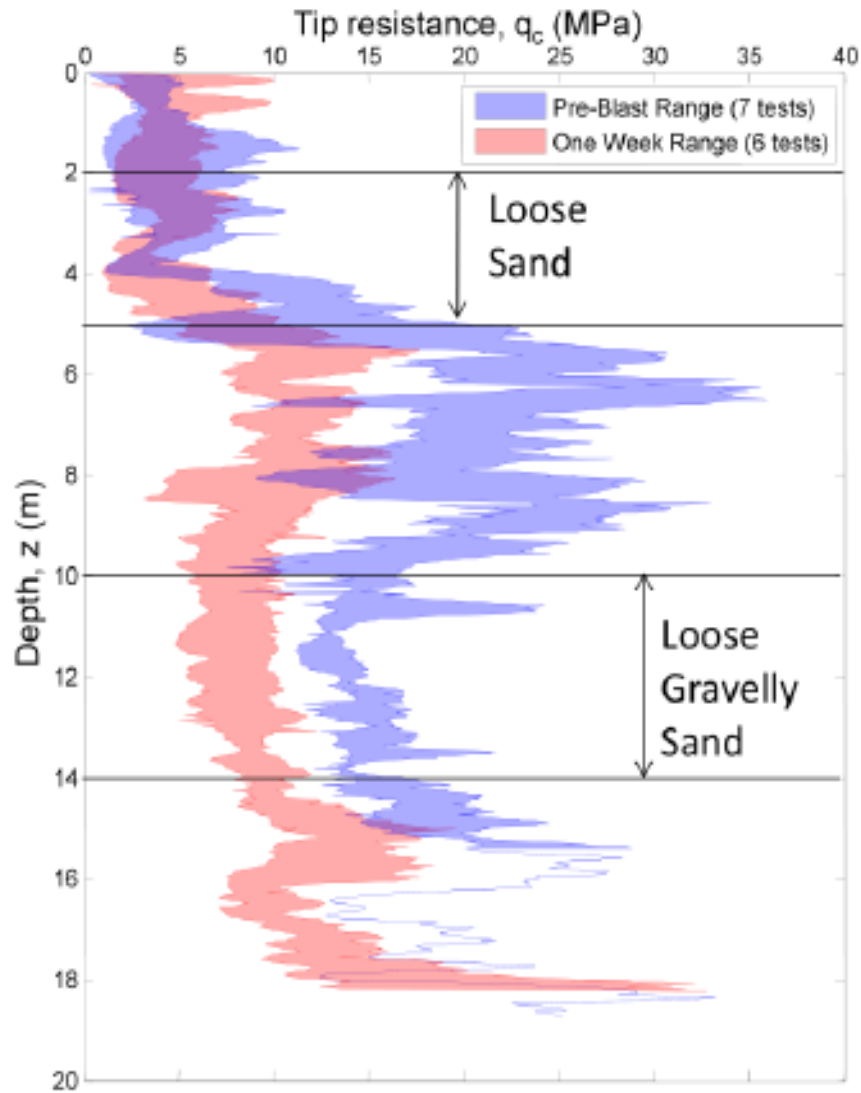


Figura 52. Pre-blast gama CPT en 10 "desde el punto de explosión cercana comparada a una semana gama CPT en 10" desde el punto de explosión cercana.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials.

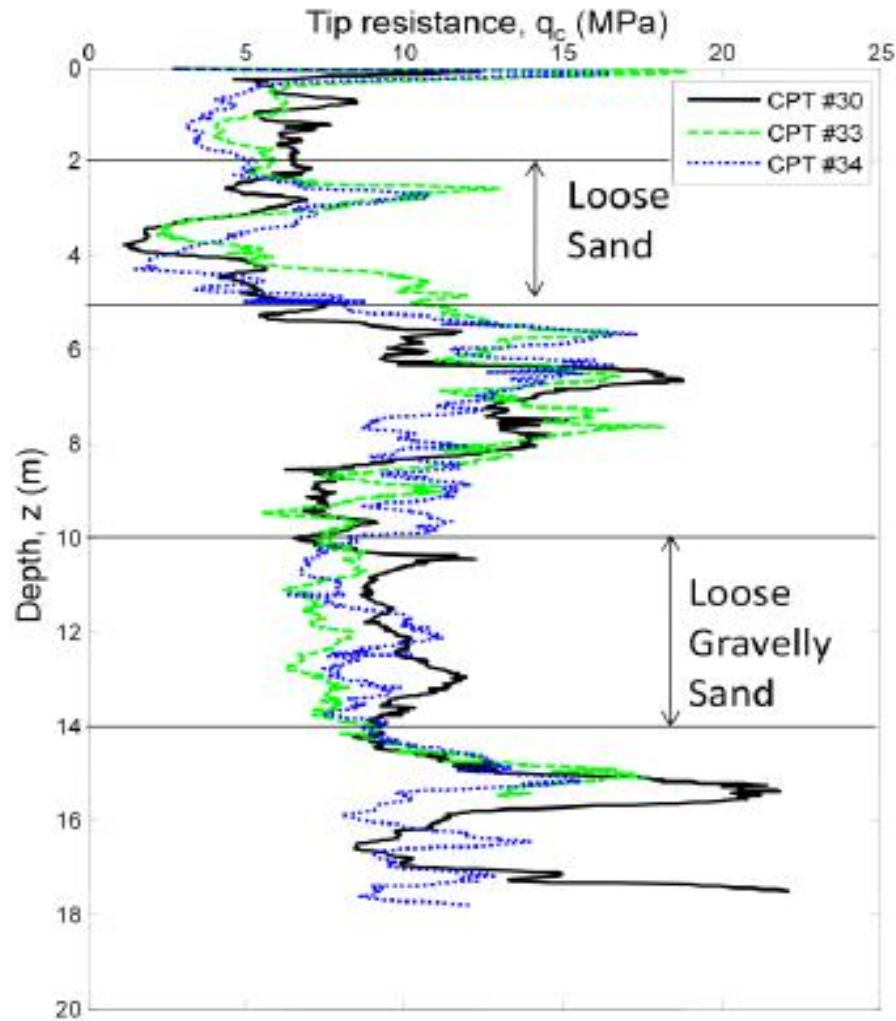


Figura 53. CPT realizó un mes después de la densificación explosivo 10 "desde el punto de explosión cercana.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials.

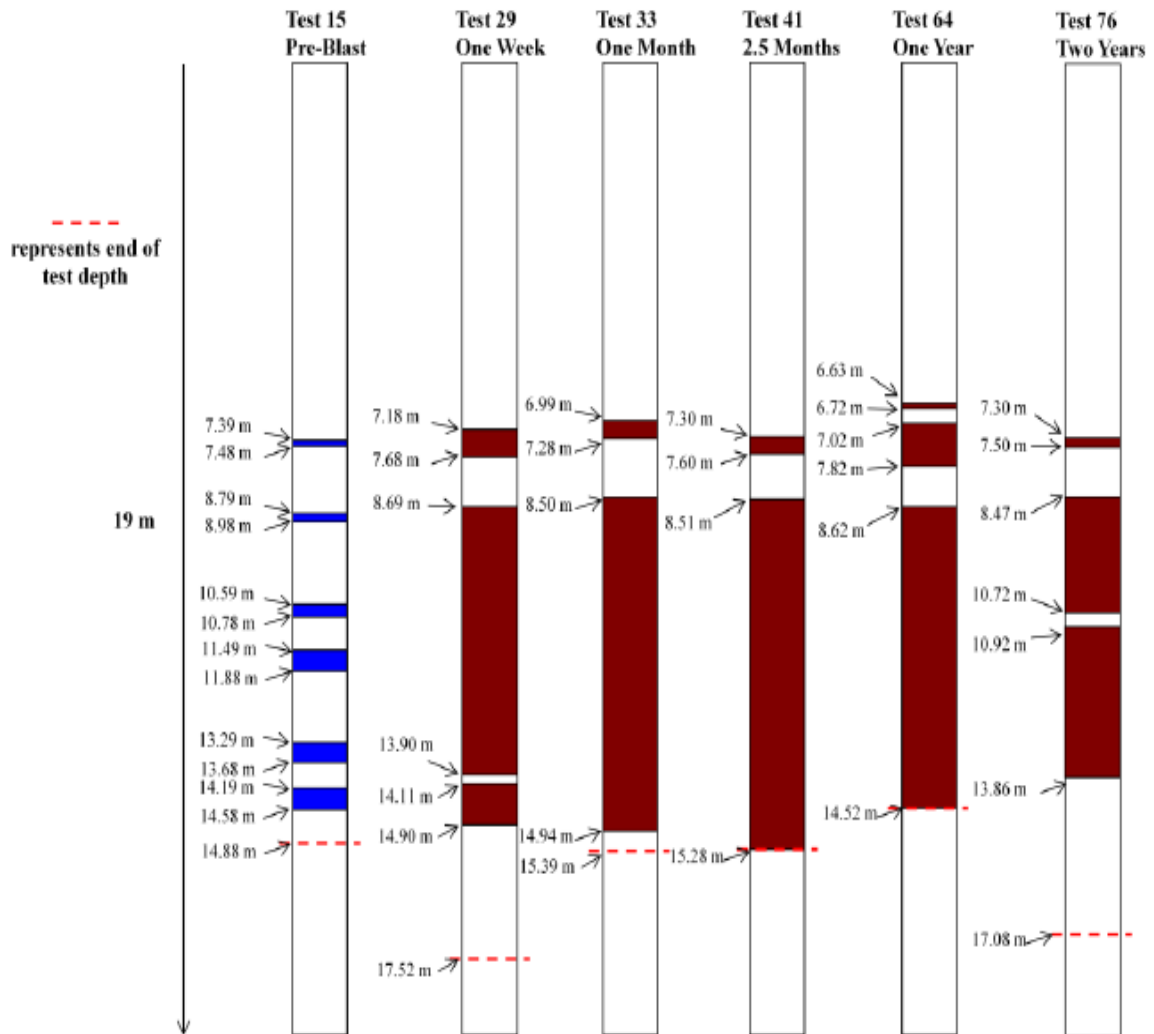


Figura 80. Los resultados de las pruebas VISCPT que muestra las áreas con evidencia visual de licuefacción (adaptado de Jung, 2010).

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials.

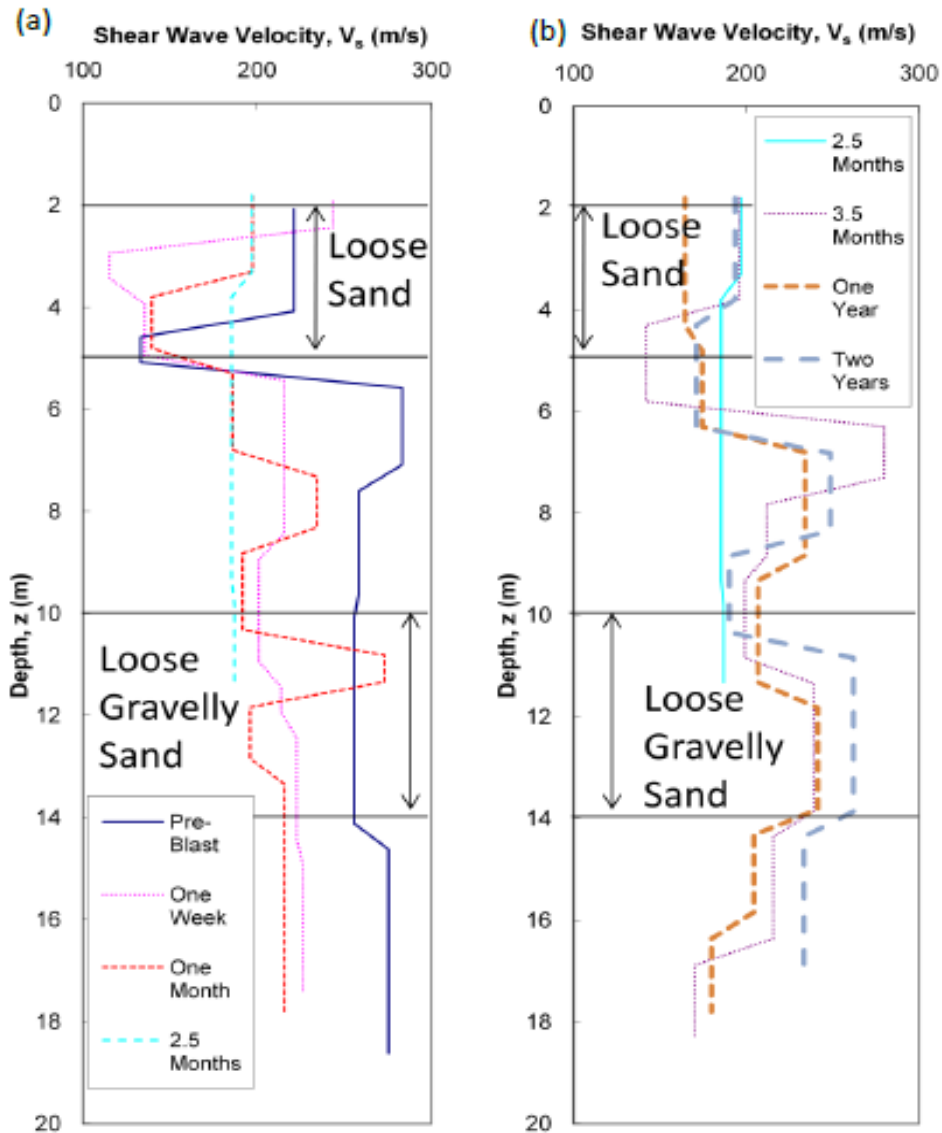


Figura 81. (a) la velocidad de onda de cizalla 2,5 meses después de la explosión y antes. (b) velocidad de la onda de cizalla 2,5 meses después de la explosión y posterior.

Fuente. DAVID A. SAFTNER Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials.



4.16. USO DE EQUIPOS PARA LA DENSIFICACION CON EXPLOSIVOS: APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PERFORACIÓN

Los dos grandes métodos mecánicos de perforación de rocas para aplicar técnicas de voladura son los Rotativos y Rotopercutivos. A continuación se describe cada uno de ellos.

4.16.1. MÉTODOS ROTOPERCUTIVOS.

Son los métodos mecánicos utilizados en casi todos los tipos de rocas. Las máquinas de perforación empleadas para este propósito ejercen su empuje a través de herramientas de trabajo ubicadas en la cabeza del sistema de desplazamiento, así como, en el fondo del barreno. El principio de perforación donde la herramienta se ubica en la cabeza, se basa en el impacto de una pieza de acero llamada pistón que golpea la cabeza de la tubería y que a su vez transmite la energía al fondo del barreno por medio de un elemento final llamado Broca de perforación.

Los equipos rotopercutivos se clasifican en dos grandes grupos según donde se encuentra colocado el martillo: Martillo en Cabeza.- En éstas perforadoras dos acciones básicas se producen fuera del barreno: rotación y percusión. Martillo en Fondo.- La percusión se realiza directamente sobre la broca de perforación, mientras que la rotación se efectúa en el exterior del barreno. Figura 82. Perforadoras con martillo en cabeza.



Figura 82. Perforadoras con martillo en cabeza.

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. pagina web. <http://www.ptolomeo.unam.mx>.



4.17. PERFORACIÓN CON MARTILLO EN CABEZA

Hay dos tipos de máquinas perforadoras con martillo en cabeza: Una con accionar neumático y otra con sistema hidráulico.

Perforadoras Neumáticas Una máquina Neumática consta de las siguientes partes: Un cilindro cerrado Un pistón que golpea a la culata del varillaje a través de la cuál se transmite la onda de choque a la varilla Una válvula que regula el paso del aire comprimido Un mecanismo de rotación El sistema de barrido que consiste en un tubo que permite el paso del aire hasta el interior del varillaje. Figura 83. Perforadoras neumaticas.



Figura 83. Perforadoras neumaticas.

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. pagina web.
http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/910/ARRIAG_AVAZQUEZ.pdf?sequence=1

4.17.1. **Perforadoras Hidráulicas** Las perforadoras hidráulicas constan básicamente de los mismos elementos constructivos que las perforadoras neumáticas. La diferencia estriba en que un motor actúa sobre un grupo de bombas



que suministran un caudal de aceite que acciona aquellos componentes. Figura 84. Perforadoras Hidráulicas.



Figura 84. Perforadoras Hidráulicas.

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. pagina web.

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/910/ARRIAGAVAZQUEZ.pdf?sequence=1>

4.18. PERFORACIÓN CON MARTILLO EN EL FONDO DEL BARRENO

Las primeras experiencias de perforación de roca utilizando martillos en el fondo del barreno fueron patentadas en 1910. Stenvick desarrolló estos martillos en 1951 y desde entonces son muy utilizados en explotaciones a cielo abierto particularmente en rocas de resistencia media con diámetro variable desde 105 a 200 mm, aunque hay modelos que llegan hasta los 915 mm. Figura 85. Perforación con martillo en el fondo del barreno.

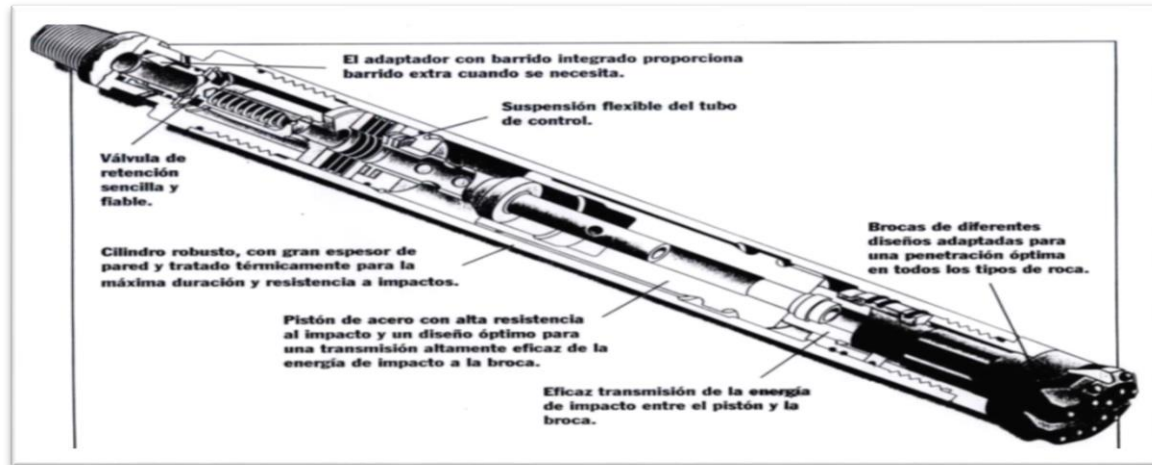


Figura 85. Perforación con martillo en el fondo del barreno.

Fuente: Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos. pagina web.

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/910/ARRIAGAVAZQUEZ.pdf?sequence=1>

El funcionamiento de un martillo en fondo se basa en que el pistón golpea directamente a la broca de perforación la misma que está en contacto con la roca y todo el sistema es accionado por aire comprimido. La limpieza de los detritos se efectúa por el escape del aire del martillo a través de los orificios que tiene la broca en su parte inferior.

Conclusiones del capítulo.

CONCLUSIONES DEL CAPITULO.



CAPITULO V.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO INVESTIGATIVO DE GRADO DENSIFICACION DE MATERIALES GRANULARES CON EL USO DE EXPLOSIVOS.

INTRODUCCION

De acuerdo a las recomendaciones del Señor Coronel (RA) GANTIVA.....Director de la Investigación, en lo que respecta a realizar apiques y trabajos de campo- Ensayo Piloto con el fin de tener elementos y resultados que permitan validar la información obtenida de manera teorica, se realizó la visita de campo a la cantera que tiene cómo nombre, Cantera Buenavista Km 27 Vía Tunja.

Se tomará como referencia geográfica el río Bogotá, para separar las partes Oriental y Occidental de la Sabana y al Sur se escogió el río Tunjuelito; éstos, sirven de referencia y no tienen un significado geológico.

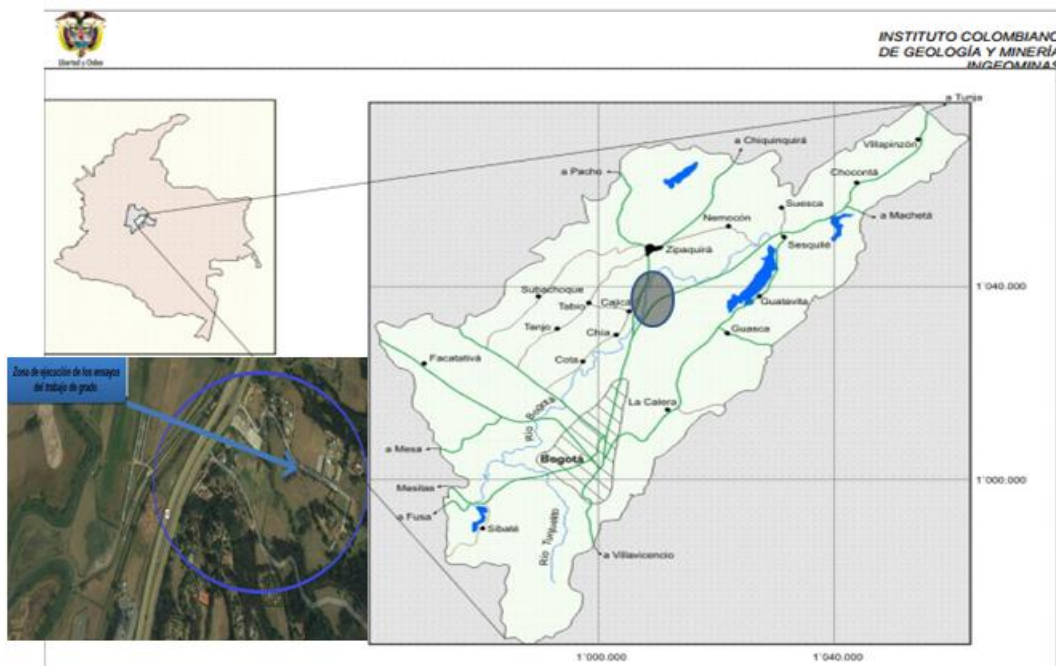


Figura 86. Localización Cantera del proyecto - Sabana de Bogotá y vías principales.

Fuente: pagina web; http://choconta.files.wordpress.com/2007/12/informe_geologia_sabana_bta.pdf

La ubicación en la que se realizara el ensayo piloto y las voladuras se encuentra contemplada en la sabana de Bogotá, El área de estudio está ubicada en la Cordillera Oriental, en la zona axial y el inicio de los flancos oriental y occidental y abarca las siguientes planchas geológicas a escala 1:100.000 publicadas por



INGEOMINAS: 209 Zipaquirá (Montoya & Reyes, 2003), 208 Villeta (Acosta & Ulloa, 2002), 227 La Mesa (Acosta & Ulloa, 2001) y 246 Fusagasugá (Acosta & Ulloa, 1998). En la zona las unidades geológicas están representadas en una secuencia sedimentaria con edades del Cretáceo Superior, Paleógeno, Neógeno y Cuaternario.



Figura 87. Cantera Buenavista Km 27 Vía Tunja

Fuente: Propia.

5.1 CRONOGRAMA DE EJECUCION

Para la estructuración y planeamiento de este proyecto se estableció en conjunto con el Director de Proyecto un cronograma para la ejecución de todas las fases incluida la experimentación de campo con la toma de laboratorios. Ver Figura...
Cronograma.....



5.2 ADECUACION Y CONFORMACION DEL TERRENO PARA PRUEBA DE CAMPO

Una vez se efectuó la visita de reconocimiento se realizó el planeamiento para el inicio de la conformación y adecuación del terreno, encontrando gran cantidad de roca lo que dificultaría el plazo previsto para la entrega del terraplén. Ver. Figura 88. Macizo rocoso presente en la cantera con estratificación y diaclasamiento continuo.



Figura 88. Macizo rocoso presente en la cantera con estratificación y diaclasamiento continuo.

Fuente: Elaboración Propia.

Uno de los mayores retos fue la adecuación del terreno, ya que presentaba varios sectores con roca, lo que dificultó más la preparación del terreno, Ver Figura 89. Macizo rocoso presente en la cantera con estratificación y diaclasamiento continuo.



Figura 89. Macizo rocoso presente en la cantera con estratificación y diaclasamiento continuo.

Fuente: Elaboración Propia.



Fue necesario incorporar a este proyecto de investigación la concecucion de maquinaria pesada la cual fue alquilada y en algunos casos suministrada con el apoyo de los Ingenieros Militares.Ver. Figura 90.Implementación de Maquinaria en este caso retroexcavadoras para la elaboración de los cortes para el ensayo piloto en la cantera.



Figura 90.Implementación de Maquinaria en este caso retroexcavadoras para la elaboración de los cortes para el ensayo piloto en la cantera.

Fuente: Elaboración Propia.

Para adecuar el sitio se fue necesario remover cerca de 500 M3 de material Ver. Figura 91.Movimiento de tierra para la preparación del sitio y la efectucción del ensayo piloto con las detonaciones.



Figura 91.Movimiento de tierra para la preparación del sitio y la efectucción del ensayo piloto con las detonaciones.

Fuente: Elaboración Propia.



Cabe anotar que el sitio escogido para realizar las detonaciones, en años anteriores también utilizaba voladuras para el corte de los taludes. Ver. Figura 92.Explotacion de materiales pétreos



Figura 92.Explotacion de materiales pétreos con el uso de explosivos
Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la visita técnica y a la configuración de la topografía se determino realizar las pruebas de voladuras buscando el menor impacto en las construcciones adyacentes. Ver.Figura 93.Localización del sitio del ensayo de los apiques y el ensayo piloto.



Figura 93.Localización del sitio del ensayo de los apiques y el ensayo piloto.
Fuente: Elaboración Propia.

Unos de los objetivos principales en la determinación del sitio fue buscar que la onda afectara lo mínimo en el entorno, para ello se construyeron varios terraplenes que mitigaran el impacto. Ver Figura 94.preparación del terreno para la conformación de los terraplenes que soporten la onda de choque producida por las voladuras.



Figura 94. preparación del terreno para la conformación de los terraplenes que soporten la onda de choque producida por las voladuras.
Fuente: Elaboración Propia.

En algunos casos fue necesaria la utilización combinada de maquinaria pesada y uso de explosivos en sectores de roca que no permitían la conformación del terreno. Ver. Figura 95. Material granular después de la explotación con maquinaria.



Figura 95. Material granular después de la explotación con maquinaria.
Fuente: Elaboración Propia.

Hasta donde las condiciones lo permitieron, se utilizaron grandes martillos rompedores para la preparación del sitio para la construcción del terraplen. Ver Figura 96. Retroexcavadora 220, equipo utilizado para la realización del corte y los apiques.



Figura 96. Retroexcavadora 220, equipo utilizado para la realización del corte y los apiques.
Fuente: Elaboración Propia.

Observamos la preparación del sitio con un gran porcentaje de ejecución Ver. Figura 97.
Materiales sobrantes de la explotación por medio de maquinaria.



Figura 97. Materiales sobrantes de la explotación por medio de maquinaria.
Fuente: Propia



A pesar de los inconvenientes con la preparación y adecuación del terreno debido a los grandes bancos de roca, finalmente se logro adecuar y tener listo el terrenos para el inicio de la construcción del terraplen. Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**



Figura 98 Terminación zona para construcción del terraplén.

Fuente. Propia



5.3 CONFORMACION DEL TERRAPLEN PARA PRUEBA DE CAMPO

Para el desarrollo de los trabajos de campo, se estableció un tramo de prueba con una dimensiones de 21 metros de largo X 4 metros de ancho y una profundidad de 1.2 metros, se eligieron 3 tipos de material con diferentes contenido de finos que varían entre el 15% Y EL 40 %. Ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

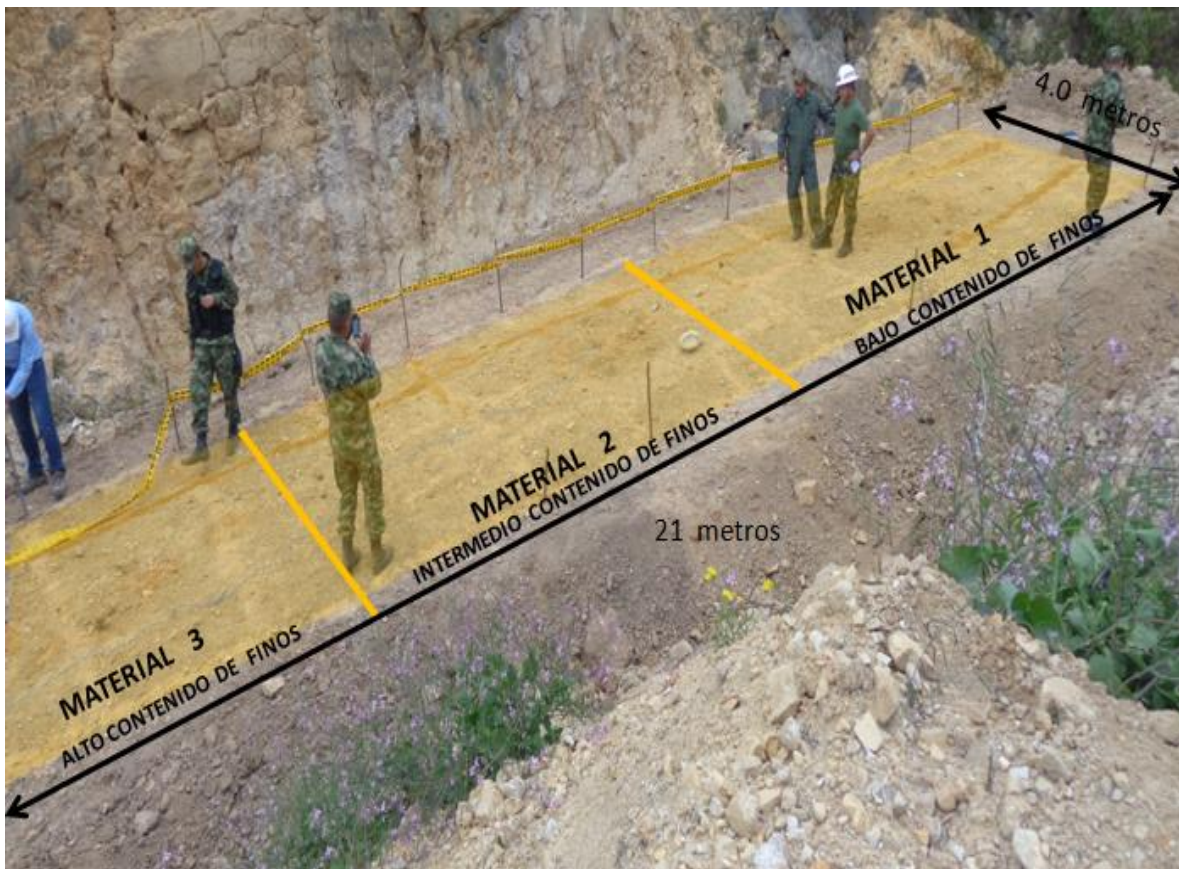


Figura 99. Esquema Tramo de prueba.

Fuente. Propia

El terraplén fue construido un mes antes de las voladuras secuenciales con el fin de permitir la consolidación de este material y acercarnos mas al estado natural del material.

Para el alistamiento del terraplén se efectuaron granulometrías de los materiales existentes dentro de la cantera con contenido variables de finos y sobre todo, que el material se encontrara categorizado dentro de los materiales granulares, ya que era una variable importante de nuestra investigación.



Figura 100. Banco donde se efectuarán las detonaciones en la cantera.

Fuente: Elaboración Propia.

Se comenzó a caracterizar los materiales existentes para que cumplieran con los parámetros exigidos y fueran viables para las pruebas de campo. Así mismo observamos las diferentes características de los materiales granulares encontrados en la zona. ver Figura 118. Acopio de material granular



¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. Figura 101. Acopio de material granular para construcción de carreteras.

Fuente :Propia

En total se escogieron tres tipos de material con diferentes granulometrías y contenido de finos En Ver. Figura 102. Diferentes acopios de material para base y subbase granular.



Figura 102. Diferentes acopios de material para base y subbase granular.

Fuente: Elaboración Propia.

GRANULOMETRIA.....Con respecto a la granulometría, los 3 tipos de material fueron caracterizados y se obtuvieron las siguientes curvas granulométricas, y los tres tipos de material se clasificaron como material GRANULAR...XXXX HABLAR MAS CON ENSAYOS...

El terraplén fue construido por capas no superiores a los 25 centímetros de espesor y se obtuvieron densidades cercanas al 90% del proctor modificado de acuerdo a los siguientes resultados

Materia 1 con contenido de finos cercano al 10%; Densidad obtenida 85%

Materia 2 con contenido de finos cercano al 25%; Densidad obtenida 85%

Materia 3 con contenido de finos cercano al 45%; Densidad obtenida 85%

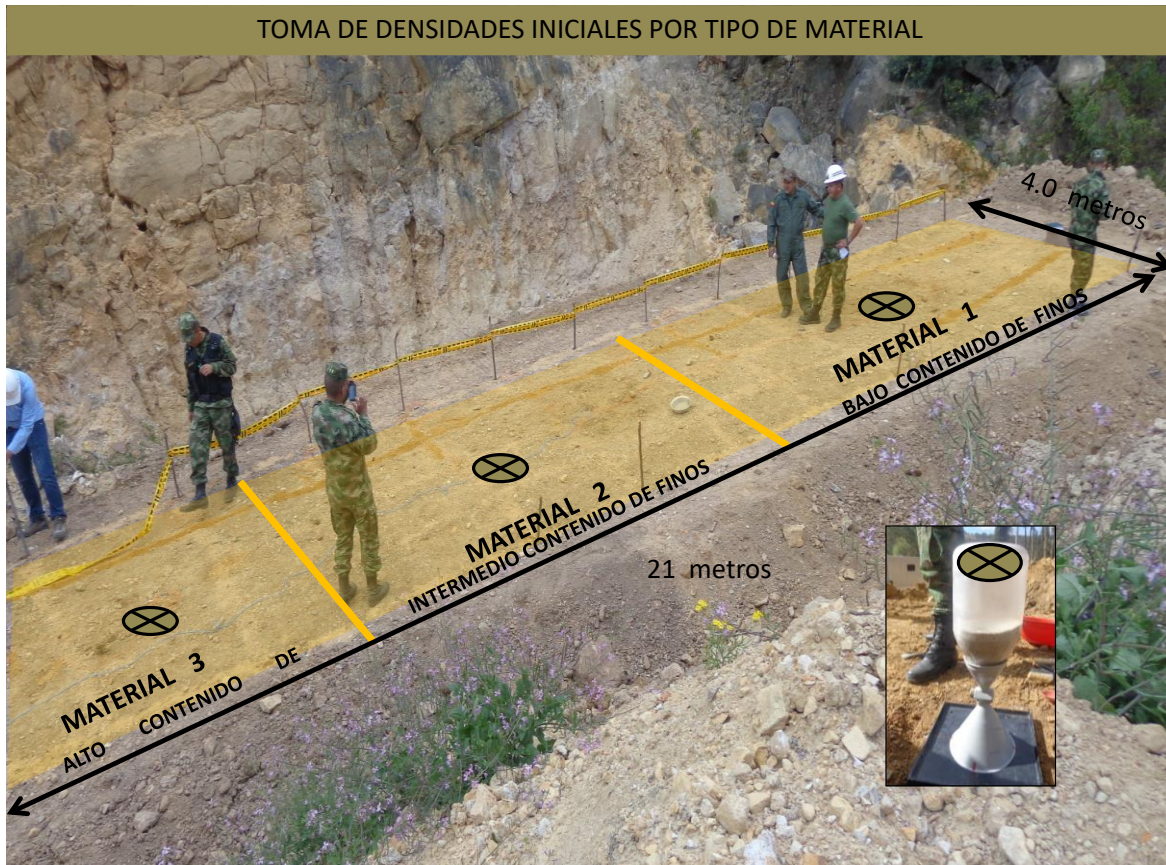


Figura 103. localización densidades en el terraplén.

Fuente: Propia

Se tomó una densidad por cada tipo de material en los centros de cada área aferente, dejando un margen de 1m a cada borde con el fin de que por falta de confinamiento se pudieran alterar el ensayo. Ver figura 150 – localización densidades en el terraplén.

Es de anotar que los resultados de las densidades obtenidas del terraplén son “antes” de aplicar detonaciones con explosivos y el material se caracterizo de acuerdo a los diferentes tipos de gradación para la prueba de campo. Ver Figura 151 Densidades del terraplén conformado.



Figura 104. Densidades del terraplén conformado.

Fuente: Propia

El resultado de las densidades mostro que el material tiene buena disposición para compactarse en la medida de su contenido de finos, que para este caso el MATERIAL 1 arrojó buenos resultados de compactación con respecto al MATERIAL 2 y 3 que contenían mayor porcentaje de finos, logrando el MATERIAL 1 un incremento en la densidad en **5%** aproximadamente con respecto a los otros tipos de material.



Figura 105. Toma Densidades.

Fuente: Propia

Para la realización de los ensayos de densidad, se contacto a la Escuela de Ingenieros Militares del Ejército Nacional, quienes nos suministraron el personal y los equipos de laboratorio para la obtención de las muestras y la respectiva caracterización de cada tipo de material que se utilizo para las pruebas, se utilizo principalmente el cono de arena y humidómetro para la obtención de los diferentes parámetros de compactación y humedades del material utilizado. Figura 152 Toma Densidades.

5.4 PRUEBAS DE CARGA PARA DEFINIR TIPO DE EXPLOSIVO

Una vez conocidos los parámetros iniciales de compactación del terraplén construido, se procede a establecer la cantidad y el tipo de explosivo a utilizar, para ello se caracterizaron los tres tipos de material y se procedió a realizar los barrenos a una profundidad que oscilo entre 1.10 y 1.4 metros, para esta actividad se efectuaron en total 5 barrenos con diferentes cantidades de ANFO e INDUGEL. Ver Figura 153 – Pruebas de carga de explosivos.

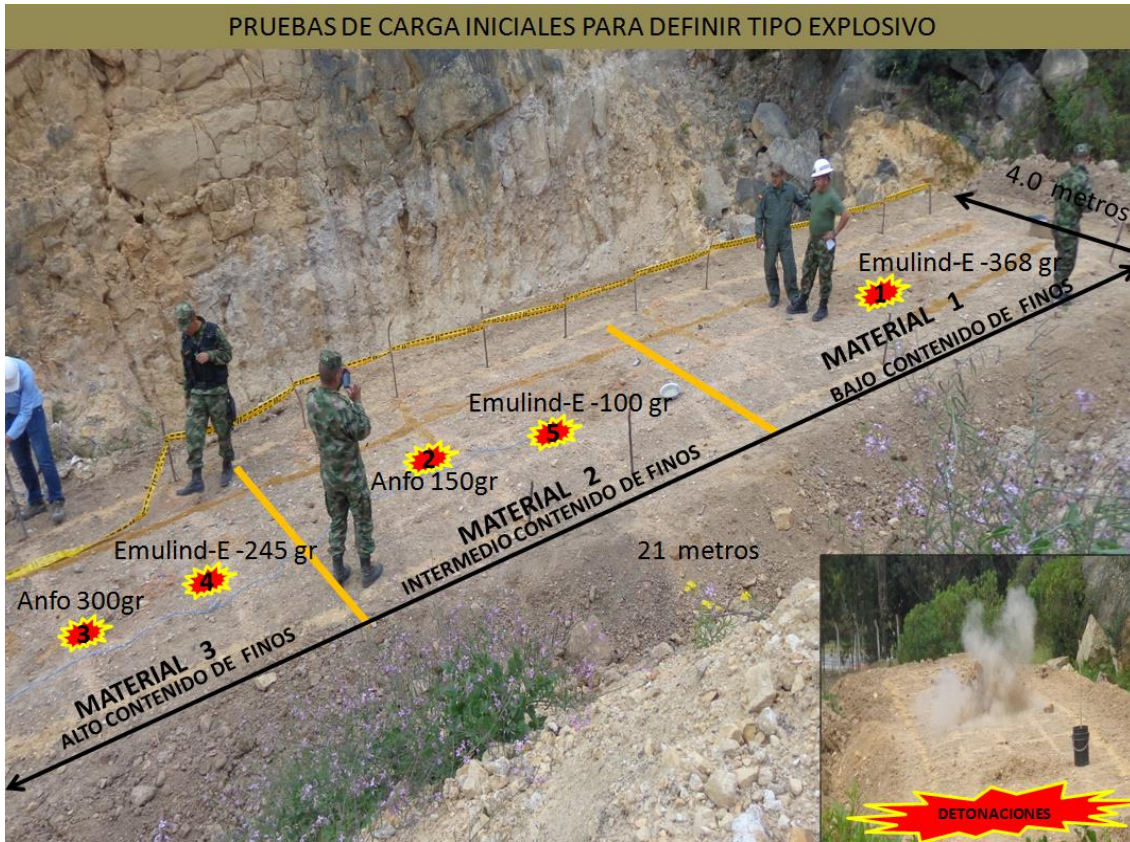


Figura 106. Pruebas de carga de explosivos.

Fuente: Propia



5.4.1 PRIMERA PRUEBA DE CARGA

Para determinar la carga explosiva de esta primera prueba se toma como referencia la formula practica de cálculo de carga para barrenos, la cual consiste en tomar la longitud del barreno y dividirlo en tres partes iguales, de las cuales las dos terceras partes corresponden a la carga explosiva y la otra parte al retacado, con esta aplicación nos permitiría remover el terreno y generar una rotura radial como efecto de la transferencia de la onda de detonación a las paredes del barreno. Ver Figura 154 – Esquema sistema de voladura Prueba 1.

En razón a esto y con el objetivo de buscar una carga optima que permita realizar un asentamiento del terreno se determino utilizar para esta primera prueba el 40% de la carga explosiva y el 60% de retacado, el explosivo seleccionado para esta prueba fue Emulind-E de 32 x 250 el cual es fabricado por INDUMIL y que de acuerdo al diámetro de perforación es el ideal para este tipo de trabajos. A continuación se establecen los parámetros para esta prueba, así:

Diámetro del barreno = 3 Cm

Altura del barreno = 127 cm

Carga explosiva Emulind-E= 367,5 gramos

Taco inerte = 70 Cm

Iniciación de la carga explosiva: Detonador de tubo de Choque de 25 MS.

Iniciación del disparo: Detonador eléctrico

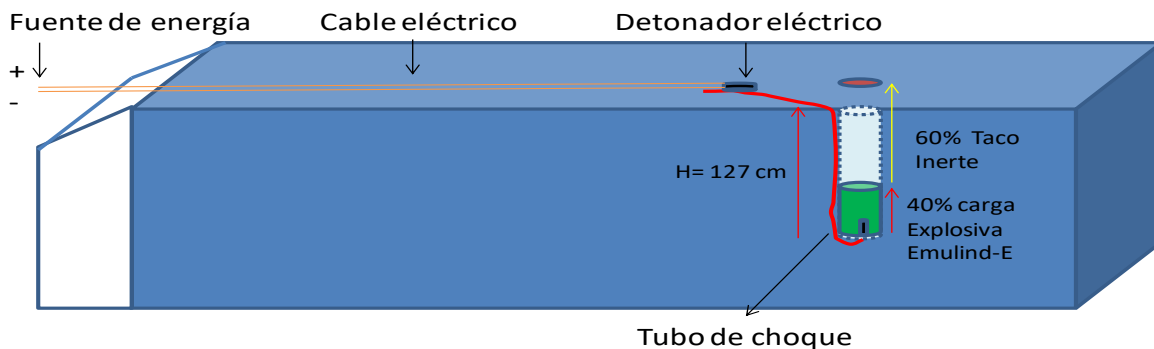


Figura 107. Esquema sistema de voladura Prueba 1.

Fuente: Propia

Las perforaciones o barrenos fueron ejecutados de manera manual ya que los sistemas de perforación rotativo tuvieron daños mecanicos, sin embargo se Alcanzaron buenas profundidades, el explosivo utilizado fue Carga explosiva



Emulind-E en una cantidad de 367,5 gramos, adicionalmente se trabajo con un diámetro de barreno de 3 centímetros y se utilizo un detonador eléctrico.



Figura 108. secuencia proceso detonación Prueba 1.

Fuente: Propia

Descripción del tren de fuego: Con un explosor se emite una pequeña descarga eléctrica, la cual llega hasta el detonador produciendo una chispa al sobrecalentar la resistencia la que inicia el explosivo primario, originando el calor suficiente para iniciar el explosivo base o secundario del detonador y este a su vez inicia el cordón detonante de 3 gramos, el cual se encuentra empalmado al tubo choque el cual transmite la detonación al detonador de fondo el que inicia la carga explosiva de emulind-E.

Dentro de los resultados que se obtuvieron de esta voladura podemos decir que el objetivo que se esta buscando con esta primera prueba **no se logra** ya que observamos que los efectos de la carga explosiva generan rotura en copa o cráter con un una zona de deformación y agrietamiento con una mínima proyección hacia



arriba llamada profundidad del cráter. La onda explosiva generó la expulsión del material superficial dejando un gran cráter y un número de fisuras que no son aconsejables por los daños que puede ocasionar al material. Ver Figura 155 – secuencia proceso detonación.

Básicamente se obtuvo los siguientes resultados:

Diámetro del cráter : **1.10 metros**

Profundidad del Cráter: **0.22 metros**

Ver Figura 156 – Resultado detonación prueba 1.



Figura 109. Secuencia proceso detonación Prueba 1.

Fuente: Propia

5.4.2 SEGUNDA PRUEBA DE CARGA

Con el fin de buscar obtener óptimos resultados, en esta prueba se hace el cambio de explosivo conservando el mismo esquema de carga en lo que corresponde al 60% de Retacado y 40% de carga explosiva. Ver Figura 157 – Esquema sistema de voladura Prueba 2.

Para esta prueba se emplean 150 gramos de explosivo ANFO fabricado por IINDUMIL, se inicia con un Booster de 50 cm de cordón de 3 gr en el fondo del barreno y un detonador eléctrico. Los demás parámetros se describen a continuación:

Diámetro del barreno = 3 Cm

Altura del barreno = 129 cm

Carga explosiva ANFO= 150 gramos



Taco inerte = 64 Cm

Iniciación de la carga explosiva: Cordón detonante de 3 gr.

Iniciación del disparo: Detonador eléctrico

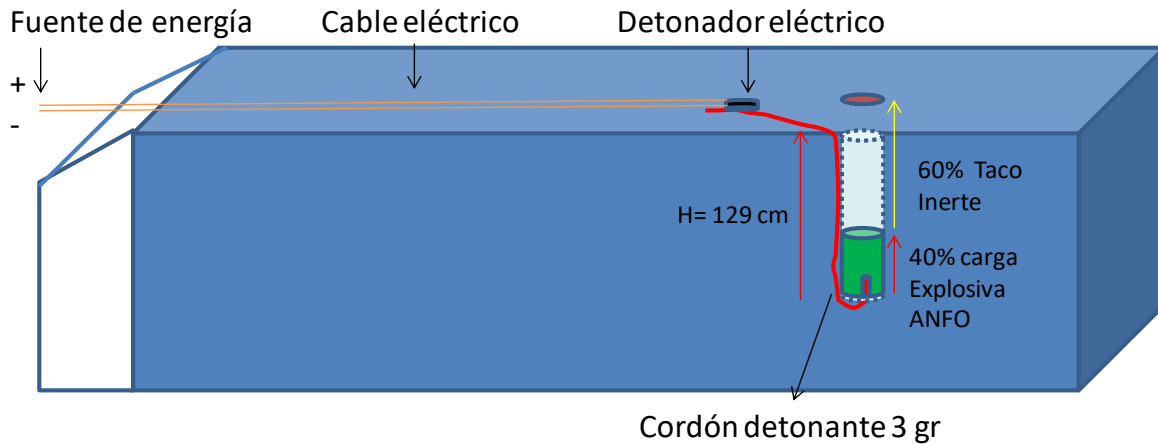


Figura 110. Esquema sistema de voladura Prueba 2

Fuente: Propia

Las perforaciones o barrenos fueron ejecutados de manera manual ya que los sistemas de perforación rotativo tuvieron daños mecánicos. Ver Figura 158 – secuencia proceso detonación Prueba 2. El explosivo utilizado fue Carga explosiva con ANFO en una cantidad de 150 gramos, adicionalmente se trabajo con un diámetro de barreno de 3 centímetros y se utilizo un detonador eléctrico.



Figura 111. secuencia proceso detonación Prueba 2

Fuente: Propia

Descripción del tren de fuego: Con un explosor se emite una pequeña descarga eléctrica, la cual llega hasta el detonador produciendo una chispa al sobrecalentar la resistencia la que inicia el explosivo primario, originando el calor suficiente para iniciar el explosivo base o secundario del detonador y este a su vez inicia el cordón detonante de 3 gramos con el cual a través de un Booster da inicio a la carga explosiva de ANFO.

Resultado: Podemos determinar que no cumple en vista a que los efectos de la explosión no alcanzan a realizar el trabajo que se requiere, solo se observa escape de la onda explosiva por el mismo barreno.

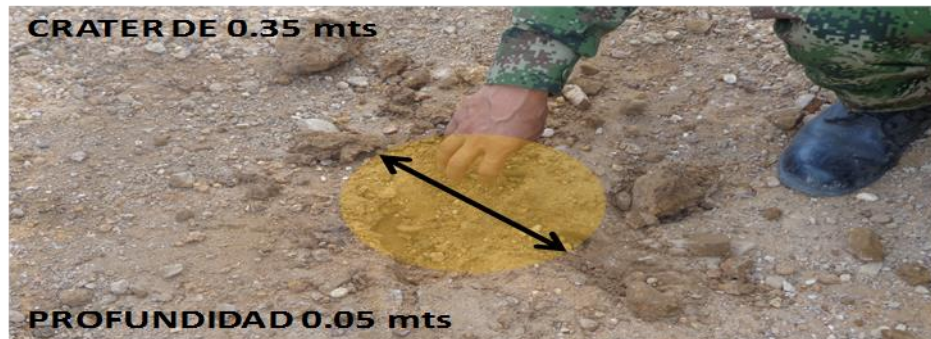


Figura 112. secuencia proceso detonación Prueba 2.

Fuente: Propia

La onda explosiva generó la expulsión del material superficial en pocas cantidades dejando un cráter pequeño y un número de fisuras que no son aconsejables por los daños que puede ocasionar al material. Ver Figura 159 – secuencia proceso detonación Prueba 2.

Básicamente se obtuvo los siguientes resultados:

Diámetro del cráter : 0.35 metros

Profundidad del Cráter: 0.05 metros

5.4.3 TERCERA PRUEBA DE CARGA

Descripción de la prueba: Buscando obtener un mayor efecto en esta prueba con respecto a la anterior se hace el cambio de la cantidad de explosivo con un esquema de carga en lo que corresponde al 50% de Retacado y 50% de carga explosiva. Ver Figura 160 – Esquema sistema de voladura Prueba 3

Para esta prueba se emplean 300 gramos de explosivo ANFO fabricado por IINDUMIL, se inicia con un Booster de 50 cm de cordón de 3 gr en la parte superior de la carga y un detonador eléctrico. Los demás parámetros se describen a continuación:

Diámetro del barreno = 3,5 Cm

Altura del barreno = 1.10 cm

Carga explosiva ANFO= 300 gramos

Taco inerte = 47 Cm

Iniciación de la carga explosiva: Cordón detonante de 3 gr.

Iniciación del disparo: Detonador eléctrico

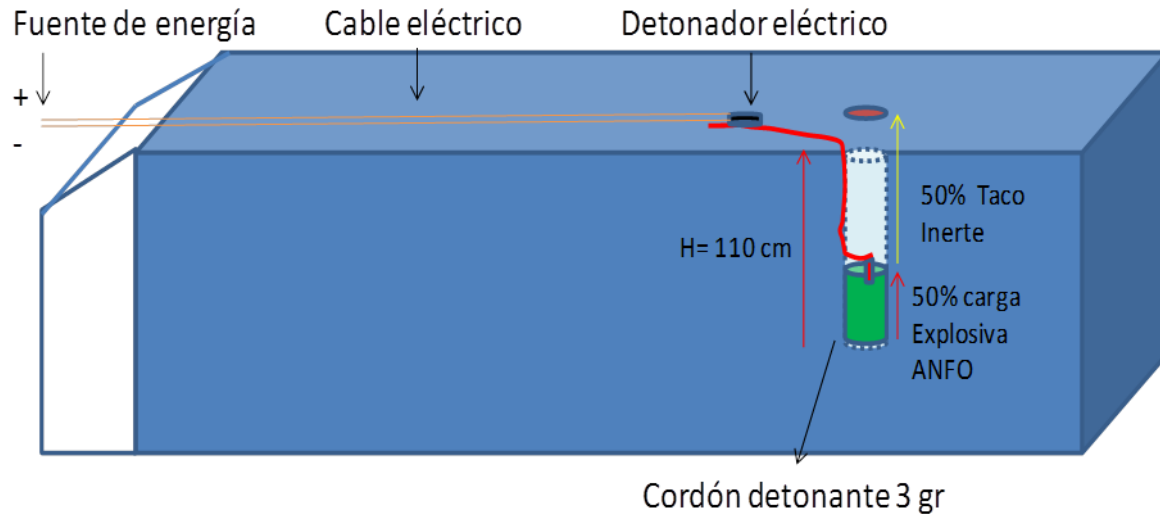


Figura 113. Esquema sistema de voladura Prueba 3

Fuente: Propia

Descripción del tren de fuego: Con un explosor se emite una pequeña descarga eléctrica, la cual llega hasta el detonador produciendo una chispa al sobrecalentar la resistencia la que inicia el explosivo primario, originando el calor suficiente para iniciar el explosivo base o secundario del detonador y este a su vez inicia el cordón detonante de 3 gramos con el cual a través de un Booster da inicio a la carga explosiva de ANFO.



Figura 114. secuencia proceso detonación Prueba 3

Fuente: Propia

Resultado: Se pudo determinar que no cumple en vista que los efectos de la explosión no alcanzan a realizar el trabajo que se requiere, la carga explosiva genera rotura en copa o cráter con una zona de deformación y agrietamiento con una mínima proyección hacia arriba. Ver Figura 162 – resultado proceso detonación Prueba 3. Solo se observa escape de la onda explosiva por el mismo barreno.



Figura 115. resultado proceso detonación Prueba 3



Fuente: Propia

La onda explosiva genero la expulsión del material superficial en pocas cantidades dejando un cráter pequeño y un número de fisuras que no son aconsejables por los daños que puede ocasionar al material. Ver Figura 159 – secuencia proceso detonación Prueba 2.

Básicamente se obtuvo los siguientes resultados:

Diámetro del cráter : 0.45 metros

Profundidad del Cráter: 0.10 metros

5.4.4 CUARTA PRUEBA DE CARGA

Descripción de la prueba: Habiendo comparado dos tipos de explosivos, en esta prueba continuamos con explosivo Emulind-E, teniendo en cuenta que en la primera prueba se sobrepaso el efecto que buscamos, reducimos la cantidad de explosivo con un esquema de carga en lo que corresponde al 71% de retacado y 29% de carga explosiva.

Para esta prueba se emplean 245 gramos de explosivo Emulind-E fabricado por IINDUMIL, se inicia con un detonador de tubo de choque de 25 Ms en la parte superior de la carga y un detonador eléctrico. Los demás parámetros se describen a continuación:

Diámetro del barreno = 3 Cm

Altura del barreno = 117 cm

Carga explosiva Emulind-E= 245 gramos

Taco inerte = 72 Cm

Iniciación de la carga explosiva = Detonador de tubo de choque de 25 Ms

Iniciación del disparo = Detonador eléctrico

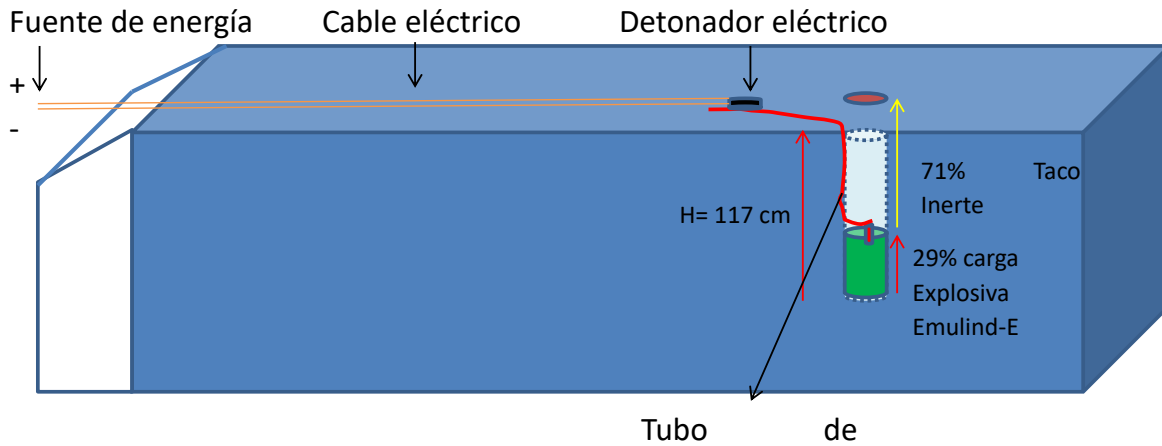


Figura 116. Esquema sistema de voladura Prueba 4

Fuente: Propia

Descripción del tren de fuego: Con un explosor se emite una pequeña descarga eléctrica, la cual llega hasta el detonador produciendo una chispa al sobrecalentar la resistencia la que inicia el explosivo primario, originando el calor suficiente para iniciar el explosivo base o secundario del detonador y este a su vez inicia el cordón detonante de 3 gramos, el cual se encuentra empalmado al tubo choque el cual transmite la detonación al detonador de fondo el que inicia la carga explosiva de emulind-E. Ver Figura 164 – secuencia proceso detonación Prueba 4





Figura 117. secuencia proceso detonación Prueba 4

Fuente: Propia

Resultado: Podemos determinar que al reducir la carga explosiva de 367 gramos a 245 gramos se redujo la rotura en copa o cráter y la deformación y agrietamiento, por tal motivo haremos otra prueba buscando encontrar la carga ideal. Observamos que con 245 gramos de emulind-E aunque disminuyo la profundidad del cráter, todavía con esa carga hay mucha expulsión de material granular, lo cual afecta los resultados esperados. Adicionalmente todavía se generan muchas grietas que pueden ocasionar la fracturación de los agregados. Dentro de los resultados que se obtuvieron de esta voladura podemos decir que el objetivo que se está buscando con esta cuarta prueba todavía **no se logra** ya que observamos que los efectos de la carga explosiva generan rotura en copa o cráter con un una zona de deformación y agrietamiento con una proyección considerable de material hacia arriba llamada profundidad del cráter.

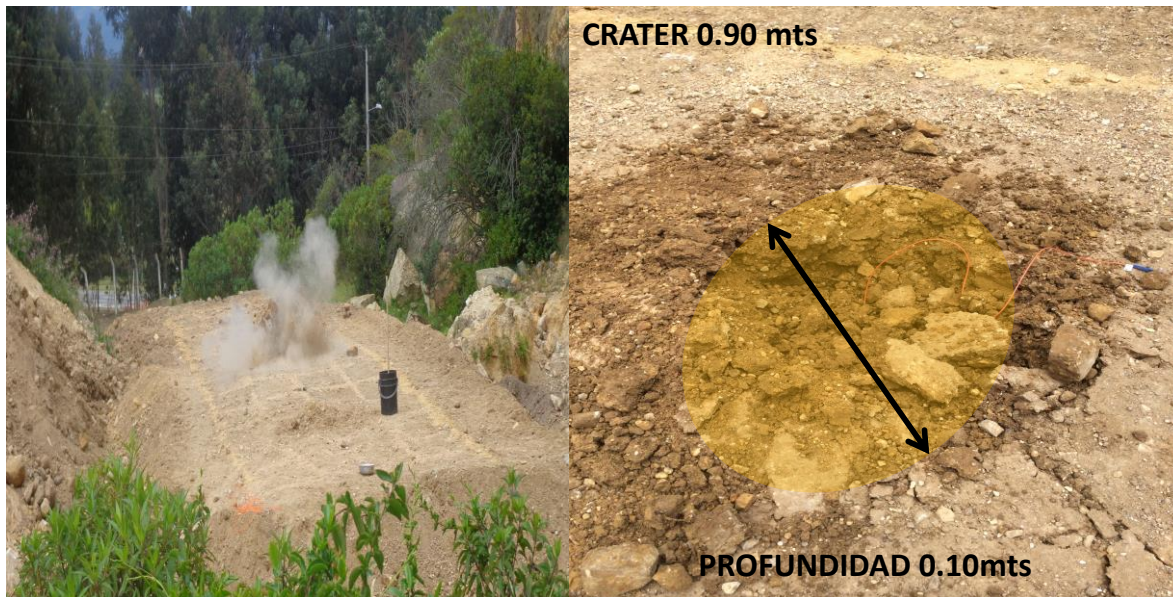


Figura 118. resultado proceso detonación Prueba 4

Fuente: Propia

La onda explosiva genero la expulsión del material superficial dejando un gran cráter y un número de fisuras que no son aconsejables por los daños que puede ocasionar al material. Figura 165 – resultado proceso detonación Prueba 4



Básicamente se obtuvo los siguientes resultados:

Diámetro del cráter : 0.90 metros

Profundidad del Cráter: 0.10 metros

5.4.5 QUINTA PRUEBA DE CARGA

Descripción de la prueba: En esta prueba continuamos con explosivo Emulind-E, seguimos bajando la cantidad de explosivo con un esquema de carga en lo que corresponde al 88% de Retacado y 12% de carga explosiva. Ver Figura 166 – Esquema sistema de voladura Prueba 5

Para esta prueba se emplean 100 gramos de explosivo Emulind-E fabricado por IINDUMIL, se inicia con un detonador eléctrico en la parte superior de la carga. Los demás parámetros se describen a continuación:

Diámetro del barreno = 3 Cm

Altura del barreno = 112 cm

Carga explosiva Emulind-E= 100 gramos

Taco inerte = 82 Cm

Iniciación del disparo = Detonador eléctrico

Iniciación de la carga explosiva: Detonador de tubo de Choque de 25 MS.

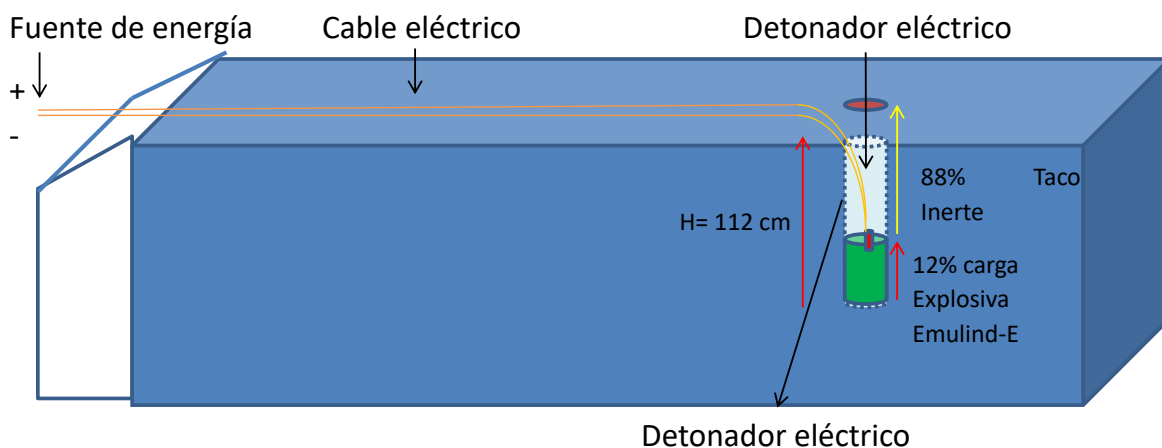




Figura 119. Esquema sistema de voladura Prueba 5

Fuente: Propia

Descripción del tren de fuego: Con un explosor se emite una pequeña descarga eléctrica, la cual llega hasta el detonador produciendo una chispa al sobrecalentar la resistencia la que inicia el explosivo primario, originando el calor suficiente para iniciar el explosivo base o secundario del detonador y este a su vez inicia la carga explosiva de emulind-E. Ver Figura 167 – secuencia proceso detonación Prueba 5



Figura 120. Secuencia proceso detonación Prueba 5

Fuente: Propia

Resultado: Podemos determinar que al reducir la carga explosiva de 245 gramos a 100 gramos se obtuvo un excelente resultado con respecto al objetivo que se pretende demostrar, puesto que se logro controlar la expansión en copa o cráter y la deformación y agrietamiento, obteniéndose una fase positiva en la detonación que remueve el terreno sin afectar su estructura y sin producir expulsión de material.

La onda explosiva no genero expulsión de material superficial dejando un gran circulo de material removido pero sin fisuras, adicionalmente observamos que el cráter no tiene profundidad con respecto al nivel original del terreno natural. Ver Figura 168 – resultado proceso detonación Prueba 5

Básicamente se obtuvo los siguientes resultados:

Diámetro del cráter: 0.90 metros

Profundidad del Cráter: 0.00 metros

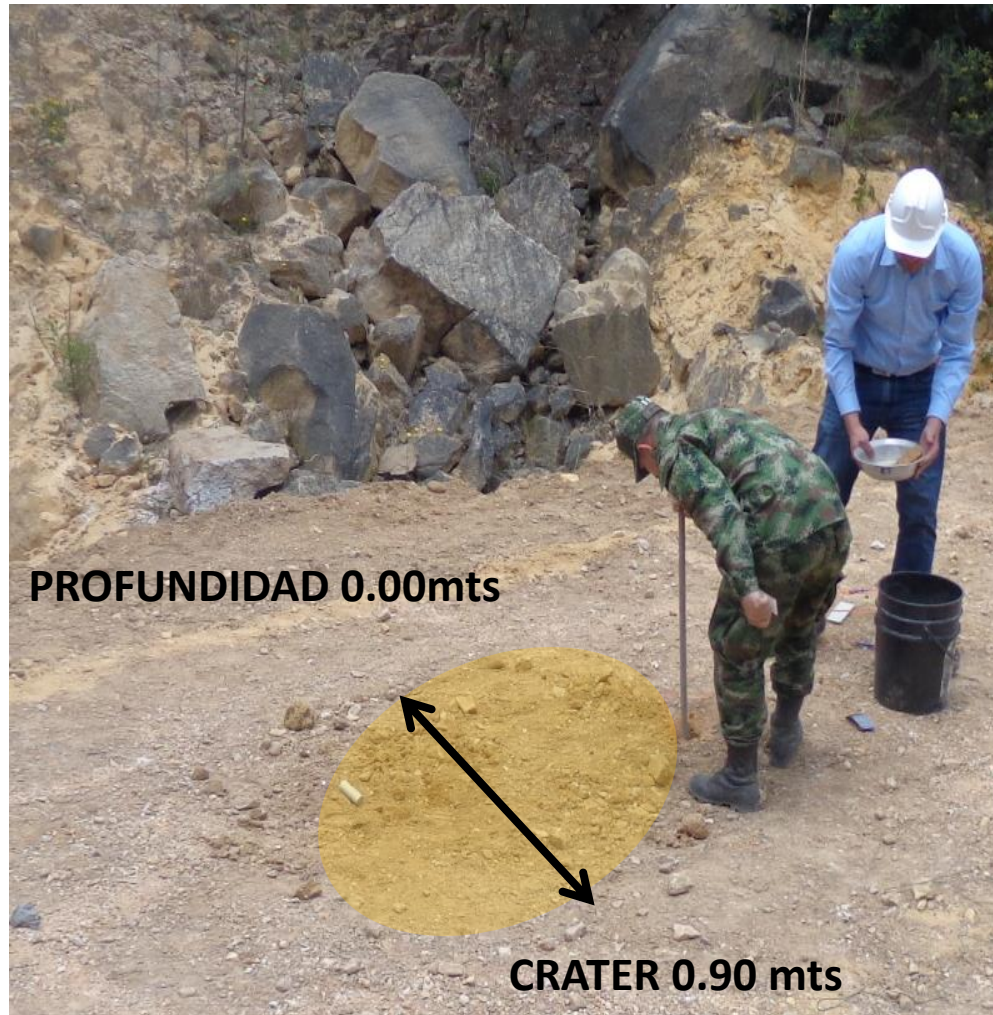


Figura 121. resultado proceso detonación Prueba 5

Fuente: Propia

Por lo que a esta fase de nuestra experimentación podemos concluir que el tipo de Explosivo será Emulind –E en una cantidad de 100 gramos, La siguiente fase de experimentación será la de desarrollar la detonación secuencial definitiva.



5.5 DISEÑO DETONACION SECUENCIAL DEFINITIVA

Una vez obtenido el tipo y cantidad de explosivo para la experimentación se procedió a establecer una línea de voladura con puntos de detonación distanciados a .1.30 metros, con una cantidad de 100 gramos de Emulind –E. Ver Figura 169 – resultado proceso detonación Prueba 5

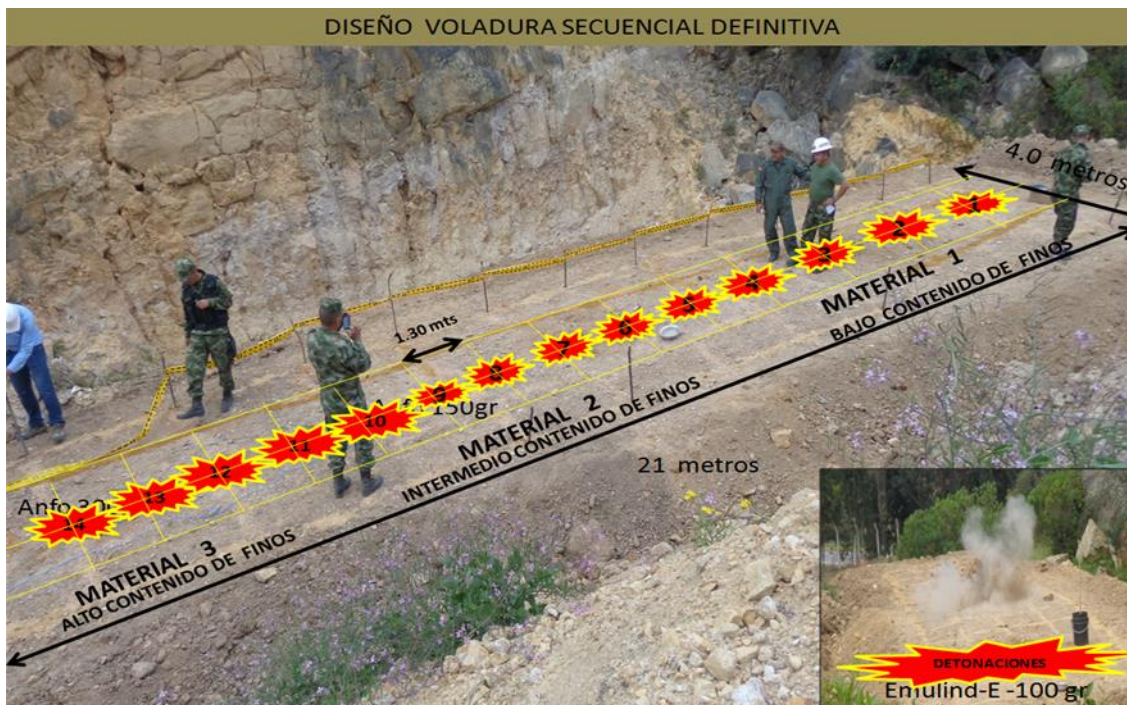


Figura 122. resultado proceso detonación Prueba 5

Fuente: Propia

Así mismo, para la voladura secuencial definitiva se establecieron los siguientes parámetros adicionales:

Diámetro del barreno = 3 Cm

Altura del barreno = 112 cm

Carga explosiva Emulind-E= 100 gramos

Taco inerte = 82 Cm

Iniciación del disparo = Detonador eléctrico

Iniciación de la carga explosiva: Detonador de tubo de Choque de 25 MS.



Como se puede observar en la Figura 170 – Esquema voladura secuencial Final son 14 barrenos distanciados a 1.3 mts y se utilizara Emilind –E en una cantidad de 100 gramos, y se utilizaran micro retardos con el fin de disminuir el efecto de la explosión.

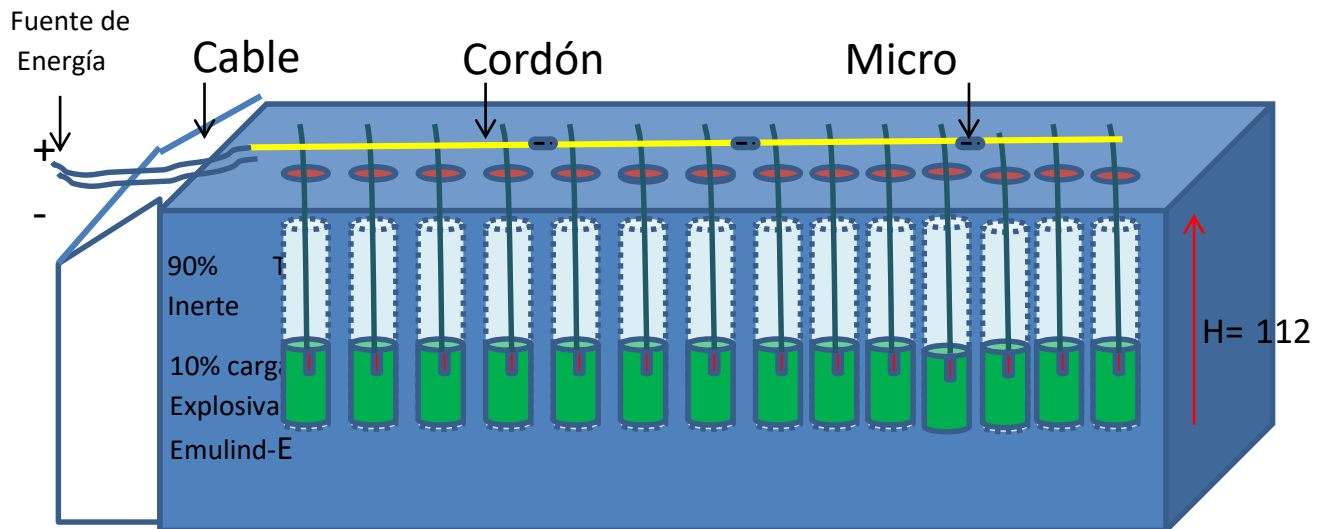


Figura 123. Esquema voladura secuencial Final

Fuente: Propia

Descripción de la prueba: En esta prueba se realizan 14 detonaciones simultaneas con espaciamientos de 1.3 metros con explosivo Emulind-E, con un esquema de carga en lo que corresponde al 90% de Retacado y 10% de carga explosiva. Ver Figura 171 – secuencia proceso detonación Final

Para esta prueba se emplean 100 gramos de explosivo Emulind-E fabricado por IINDUMIL.



En la figura 171 observamos el proceso constructivo para el armado del sistema de la voladura secuencial compuesta por 14 barrenos distanciados a 1.3 metros.



Figura 124. Proceso constructivo para el armado del sistema de voladura

Fuente: Propia

Descripción del tren de fuego: Con un explosor se emite una pequeña descarga eléctrica, la cual llega hasta el detonador produciendo una chispa al sobrecalentar la resistencia la que inicia el explosivo primario, originando el calor suficiente para iniciar el explosivo base o secundario del detonador y este a su vez inicia la línea principal de cordón detonante la cual tiene 3 micro retardos de 45 Ms, Figura 172- Esquema para detonación. Una vez iniciada esta línea se da paso a la detonación de cada uno de las cargas en los barrenos los cuales están conectados al cordón con detonadores de tubo de choque de 250 ms, 300 ms y 350 ms..

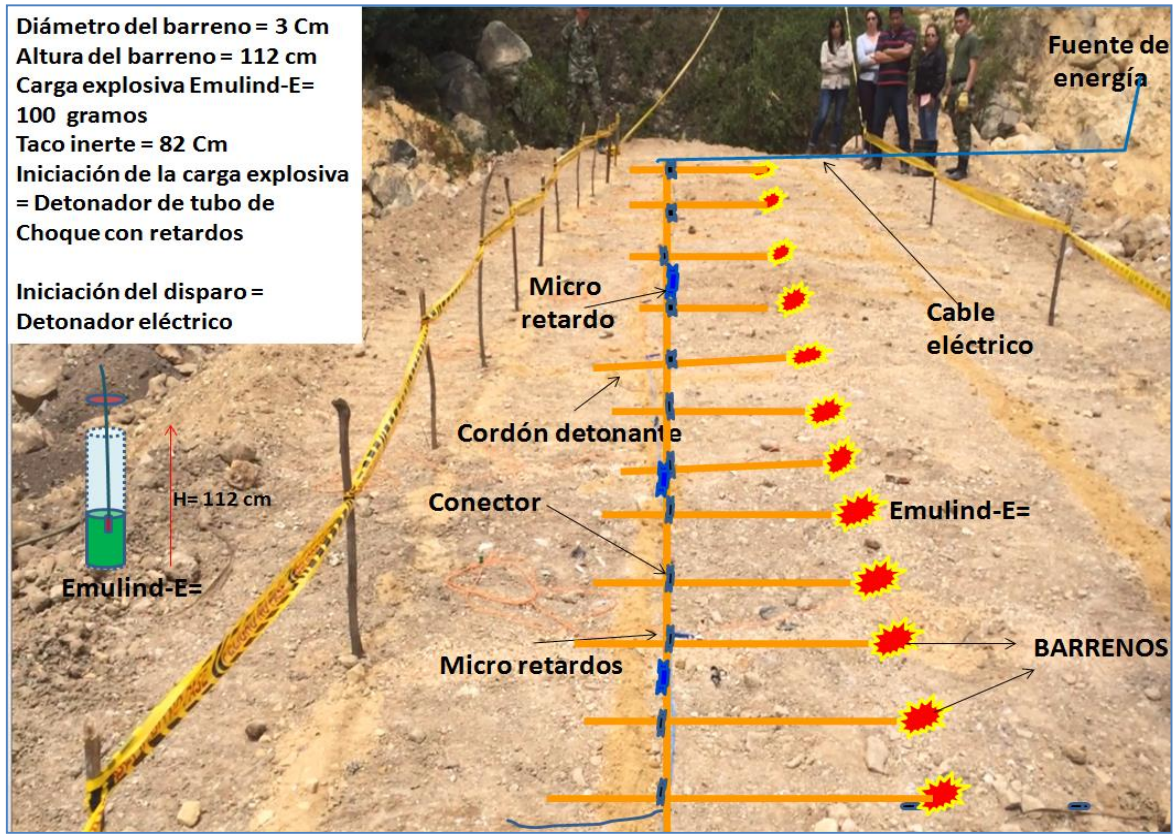


Figura 125. Esquema para detonación

Fuente: Propia

Una vez se termina el proceso de la instalación de la malla para realizar la voladura secuencial, se procedió a verificar todo nuevamente, tomando las respectivas medidas de seguridad y se procedió a “Detonar”. Ver Figura 173- Verificación y Detonación Final.



Figura 126. Verificación y Detonación Final.

Fuente: Propia



CAPITULO VI. RESULTADOS.

INTRODUCCION

En este capítulo se realizaron los ensayos de laboratorio al suelo granular seleccionado para el relleno de los apiques y el ensayo piloto en la cantera Buenavista km 27 vía Tunja, ubicada en la sabana de Bogotá; con estos ensayos preliminares del trabajo investigativo de densificación de suelos granulares con el uso de explosivos, se solicitó el suministró de los materiales explosivos con sus respectivas cargas con las cuales se va a realizar la voladura estos se evidencian en la Tabla 11. Materiales explosivos solicitados para las voladuras del trabajo investigativo densificación de suelos granulares con el uso de explosivos.

Se gestionó y coordinó la obtención de los explosivos y el material granular al cual se le realizaran los ensayos respectivos de densidad y compactación una vez se hallan realizado las voladuras, Con base en las relaciones de humedad y masa unitaria seca en los suelos; se realizaron los ensayos del análisis granulométrico de suelos por tamizado I.N.V.E.-213-07, contenido de agua (humedad) del suelo I.N.V.E – 122 -07; determinación del límite líquido de los suelos I.N.V.E -125 -07; determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos I.N.V.E. 126 -07.

CANTIDAD	ELEMENTOS	UNIDAD	CANTIDAD DE LETRAS
25	ANFO(KILOS)	Kg	VEINTICINCO
500	CORDON DETONANTE 3GRS	gr	QUINIENTOS
50	DETONADOR ELECTRICO	UN	CINCuenta
250	MECHA DE SEGURIDAD	UN	DOS CIENTOS CINCuenta



Tabla 11. Materiales explosivos solicitados para las voladuras del trabajo investigativo densificación de suelos granulares con el uso de explosivos.

Contamos con los equipos de maquinaria pesada requeridos, para la realización de los apiques y el ensayo piloto, en donde utilizaremos una estructura de 3,50 m de ancho por 10 m de largo y 1 m de profundidad.



DENSIFICACION DE SUELOS GRANULARES CON EL USO DE EXPLOSIVOS.

SEGUNDO INFORME TRABAJO INVESTIGATIVO DE GRADO.

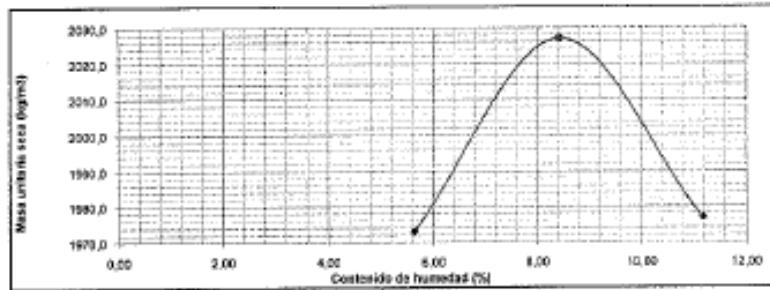
 LABORATORIO DE SUELOS ESCUELA DE INGENIEROS MILITARES Cra 50 N° 13-26 Bogotá. Tel: 4833583 ext 115 Telefax: 2623308	INFORME DE RESULTADO DE ENSAYOS RELACIONES DE HUMEDAD - MASA UNITARIA SECA EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACION) I.N.V.E.-142-07		 COLOMBIA	VERSIÓN	4
	CÓDIGO	MDN-COPII-CE-JEM-JEDOC-CEML-ESING-LAB-FT23		FECHA	2012-12-10

Identificación del contrato: CANTERA CAJICA Orden A-002 Código de la muestra: 3
 Localización de la obra: CANTERA CAJICA Sondao N.A Muestra 3
 Localización del sondeo: N.A Prof. N.A metros
 Descripción de la muestra: ARENA ARCILLOSA COLOR AMARILLO Fecha de ejecución de la muestra: 2014-08-05
 Fecha de recepción de la muestra: 2014-08-05

Tipo de Prócer MODIFICADO
 Método empleado D

Punto No.	1	2	3	4	5
Humedad					
Recipiente No.	48	51	58		
Masa del recipiente (g)	105,7	107,5	90,6		
Masa del recipiente y del suelo húmedo (g)	594,7	460,6	577,3		
Masa del recipiente y del suelo seco (g)	568,6	433,2	528,4		
Contenido de humedad (%)	5,54	8,41	11,17		

Peso Unitario	1	2	3
Masa del molde y del suelo húmedo (g)	7734	7973	7973
Masa del molde (g)	3326	3336	3336
Masa del suelo húmedo (g)	4398	4637	4637
Volumen del molde (m ³)	0,002110	0,002110	0,002110
Masa unitaria húmeda del suelo compactado (kg/m ³)	2084,4	2197,6	2197,6
Masa unitaria seca del suelo compactado (kg/m ³)	1973,1	2027,1	1976,9



Contenido de Humedad Óptimo(%): 8 10,06 Masa Unitaria Seca Máxima (kg/m³): 2027 19,438
 K PARA 95 % 3,48 K PARA 95 % 0,00

Observaciones:


 Laboratorista:
 Realizó


 Coordinador Calidad: CP. LEIMER BALTIMA
 Visto bueno de calidad


 Jefe de laboratorio: YEISON BORDA
 Revisó y Aprobó

Nº pag: 1 de 1

Este informe no podrá reproducirse parcial o totalmente sin la aprobación por escrito del laboratorio de suelos ESING
 Los resultados reportados corresponden solo a las muestras ensayadas en el laboratorio y a este orden de servicio



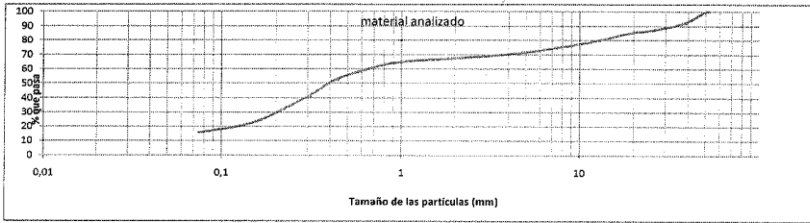
DENSIFICACION DE SUELOS GRANULARES CON EL USO DE EXPLOSIVOS.

SEGUNDO INFORME TRABAJO INVESTIGATIVO DE GRADO.

 LABORATORIO DE SUELOS ESCUELA DE INGENIEROS MILITARES Cra 50 N° 18-06 Bogotá. Tel.: 4469060 ext 115 Telefax: 2623308	INFORME DE RESULTADO DE ENSAYOS ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO I.N.V.E.-213-07 CONTENIDO DE AGUA (HUMEDAD) DEL SUELO I.N.V.E. - 122-07 DETERMINACIÓN DEL LIMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS I.N.V.E.-125-07 DETERMINACIÓN DEL LIMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS I.N.V.E.-128-07	VERSIÓN 3
	CÓDIGO MDN-CGFM-CE-JEM-JEDOC-CEMIL-ESING-LAB-FT42	FECHA 2010-08-10

Identificación del contrato:	CANTERA	Orden	N.A	Código:	1
Localización de la obra:	CAJICA	Sondeo	N.A	Muestra	1
Localización del sondeo:	N.A	Profundidad	N.A	metros	
Descripción de la muestra:	ARENA LIMOSA CON GRAVA COLOR CARMELITO				
Fecha de recepción de la muestra	2014-07-24				

GRANULOMETRÍA NORMA INVE-213-07						
Fecha de realización del ensayo:						2014-07-24
Masa total de la muestra seca (g):						680
Abertura del tamiz (mm)	(pulgadas)	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje que pasa	k para 95%(t student)
50	2"	0,0	0,0	0,0	100,0	±0,178
37,5	1 1/2"	553,8	8,0	8,0	92,0	±0,178
25	1"	328,3	4,8	12,8	87,2	±0,178
19	3/4"	139,6	2,0	14,9	85,1	±0,178
12,5	1/2"	356,3	5,2	20,1	79,9	±0,178
8,5	3/8"	205,1	2,9	23,0	77,0	±0,178
4,75	No 4	374,1	5,4	28,4	71,6	±0,178
2,36	No 8	227,1	3,3	31,7	68,3	±0,178
2	No 10	36,5	0,5	32,3	67,7	±0,178
1,18	No 16	120,0	1,7	34,0	66,0	±0,178
0,825	No 20	156,0	2,3	36,3	63,7	±0,178
0,6	No 30	334,5	4,9	41,1	58,9	±0,178
0,425	No 40	442,1	6,4	47,5	52,5	±0,178
0,3	No 50	787,8	11,5	59,0	41,0	±0,178
0,15	No 100	1235,4	18,0	77,0	23,0	±0,178
0,075	No 200	493,60	7,2	84,1	15,9	±0,178



Ensayo	Límite líquido I.N.V.E.-125-07	Límite Plástico I.N.V.E.-126-07	Contenido de agua I.N.V.E.-122-07
Fecha de realización del ensayo:			
Recipiente No.			
Masa del recipiente (g)			
Masa del recipiente y del suelo húmedo (g)	N.A	N.A	N.A
Masa del recipiente y del suelo seco (g)			
Número de golpes			
Contenido de Agua (%)			



RESULTADOS								
Límite Líquido (%)	N.A	Incertidumbre: ±0,178	K PARA 95% de gravas 2,45	Porcentaje de gravas 28,4 %	Clasificación USC:	SM	Índice de liquidez	N.A
Límite plástico (%)	N.A	Incertidumbre: ±0,178	K PARA 95% de arena 3,18	Porcentaje de arena 55,7 %	Clasificación AASHTO:		modulo de finura	3,09
Índice de plasticidad (%)	N.A	Incertidumbre: ±0,178		Porcentaje de finos 15,9 %	Índice de compresión (%)	N.A		
Humedad natural (%)	0	Incertidumbre: ±0,178	±0,000	Totál 100,0 %	Consistencia relativa	N.A		

Observaciones:

Realizó:
 Coordinador Calidad: C.P.I. Leimer Bautista
 Visto bueno de calidad

Jefe de laboratorio: Yeison Borda
 Revisó y Aprobó:

N° pag: ___ de ___



DENSIFICACION DE SUELOS GRANULARES CON EL USO DE EXPLOSIVOS.

SEGUNDO INFORME TRABAJO INVESTIGATIVO DE GRADO.

FUERZAS MILITARES DE COLOMBIA EJÉRCITO NACIONAL



JEFATURA DE INGENIEROS

Stamp: FUERZAS MILITARES DE COLOMBIA EJERCITO NACIONAL CENTRO NACIONAL CONTRA AEI Y MINAS. RECIBIDO POR: [Signature] FECHA: 08 AGO 2014 HORA: 7:05?



Radicado No. 2014702074142121: MDN-CGFM-CE -JEING-DIRCO Al contestar, cite este Numero de Radicado completo

Bogotá D.C. 28-07-14

Señor Coronel HANSEL ANTONIO RODRIGUEZ HERRERA Director Centro Nacional Contra Artefactos, Explosivos Improvisados y Minas - CENAM Gn.,

Asunto: apoyo actividades líneas de Investigación Científica.

Teniendo en cuenta que la Jefatura de Ingenieros del Ejército se encuentra apoyando al personal de oficiales en diferentes áreas de capacitación profesional en pro de aumentar el nivel de conocimiento de este personal, así mismo algunos de estos oficiales en la actualidad se encuentran terminando sus maestrías y están adelantando los trabajos de investigación en Infraestructura Vial en la Universidad Santo Tomas en el área específica del proyecto de grado titulado "DENSIFICACION DE SUELOS GRANULARES CON EL USO DE EXPLOSIVO". Por lo anteriormente descrito, se requiere que ese Comando en coordinación con la Escuela de Ingenieros Militares participen en esta línea de investigación con la asesoría y el suministro de los siguientes materiales explosivo para hacer la experimentación de campo de este importante proyecto investigativo, así:

- Anfo.....01 Buito
Cordón Detonante (3gr).....400 metros
Mecha de Seguridad.....100 metros
Handidect (de diferentes tiempos de retarco).....25 metros
Detonadores Inefectricos.....50 unidades

Las pruebas de campo se realizaran en Cajica y con personal idóneo especialista en este tipo de actividades y la asesoría del Señor Coronel (RA) DIEGO AURELIO GANTIVA ARIAS Director de Proyecto de Grado de la Universidad de Santo Tomas, así mismo las actividades de coordinación pueden ser realizadas con el Señor Teniente Coronel Hugo Yepes Suica.

Cordialmente,

Mayor General GUILLERMO ARTURO SÚAREZ FERREIRA Jefe de Ingenieros del Ejército

Elaboró: TC. HUGO YEPES SUICA
Votó: TC. RODRIGO CEPEDA ASCENCIO



FE EN LA CAUSA "PATRIA, HONOR, LEALTAD, Dios en todas nuestras actuaciones" Guardia Policía Militar No. 13 Carrera 50 No. 18-06 Edificio Sabio Caldas 5 piso Fax. 4261800 ext 34150 www.ingenierosmilitares.mil.co





DENSIFICACION DE SUELOS GRANULARES CON EL USO DE EXPLOSIVOS.

SEGUNDO INFORME TRABAJO INVESTIGATIVO DE GRADO.

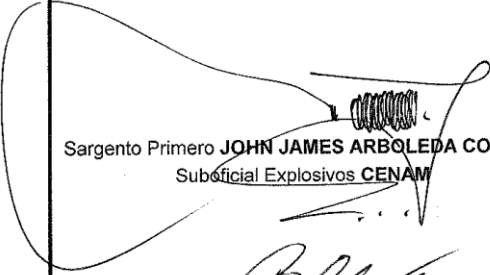
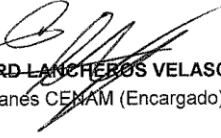
**FUERZAS MILITARES DE COLOMBIA
EJERCITO NACIONAL**

**JEFATURA DE INGENIEROS
CENTRO NACIONAL CONTRA AEI Y MINAS**

LUGAR Y FECHA BOGOTA D.C. 03 SEP. 2014

ORDEN DE SUMINISTRO No. 089 REFERENCIA: MUNICION ESPECIAL INGENIEROS

ORDEN DE PEDIDO SAP: 4800169437

ALMACEN: BAABS2	DESTINO : ESING	CARGO A: ESING
CANT.	ELEMENTOS	CANTIDAD EN LETRAS
25	ANFO (kilos)	VEINTE Y CINCO
500	CORDON DETONANTE 3 GRS	QUINIENTOS
50	DETONADOR ELECTRICO	CINCUENTA
250	MECHA DE SEGURIDAD	DOS CIENTOS CINCUENTA
XXXXXXXXXX	XX	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
 Sargento Primero JOHN JAMES ARBOLEDA CORTES Suboficial Explosivos CENAM		
 Capitán EDWARD LANCHEROS VELASQUEZ Director Planes CENAM (Encargado)		
		VALIDO UNICAMENTE CON SELLO SECO VALIDO POR UN MES



"FE EN LA CAUSA"

2014 PATRIA, HONOR, LEALTAD "Dios en todas nuestras actuaciones"

www.cenam@ejercito.mil.co AV. CLL 50 No 18-06 segundo piso Edificio Lara Rozo





DENSIFICACION DE SUELOS GRANULARES CON EL USO DE EXPLOSIVOS.

SEGUNDO INFORME TRABAJO INVESTIGATIVO DE GRADO.

FUERZAS MILITARES DE COLOMBIA EJÉRCITO NACIONAL



ESCUELA DE INGENIEROS MILITARES

No 003615 MDN-CGFM-CE-JEM-JEDOC-CEMIL-ESING-AYU

Bogotá, D.C. Agosto 29 de 2014

Señor Coronel HANSEL ANTONIO RODRIGUEZ HERRERA Director Centro Nacional Contra Artefactos, Explosivos Improvisados y Minas - CENAM Gn.,

Asunto: apoyo material explosivo.

En atención al oficio No. 2014702074142121: MDN-CGFM-CE -JEING-DIRCO emitido por el Señor Mayor General Jefe de Ingenieros del Ejército, donde se ordenó la coordinación entre CENAM y ESING para el apoyo técnico de laboratorio y de material explosivo para ejecutar la experimentación de una tesis de grado que se está adelantando por parte del Señor Teniente Coronel HUGO YEPES SUICA actividad que está enmarcada dentro del proyecto de grado titulado "DENSIFICACION DE SUELOS GRANULARES CON EL USO DE EXPLOSIVO". Se solicita a ese Comando sea suministrado los siguientes materiales explosivo para hacer la experimentación de campo de este importante proyecto investigativo, así:

- Anfo.....01 Bulto
Cordón Detonante (3gr).....400 metros
Mecha de Seguridad.....100 metros
Handidect (de diferentes tiempos de retardo).....25 metros
Detonadores Ineléctricos.....50 unidades



Certificado SC 6310-14-6



"FE EN LA CAUSA" "2014 AÑO DE LA MORAL Y EL BIENESTAR DEL SOLDADO COLOMBIANO" Dirección Carrera 50 N°. 18 - 06- 4468011 - MK 0620202-06202219 www.esing.mil.co



Certificado GP 113-14-6



Las pruebas de campo se realizaran en Cajica y con personal idóneo especialista en este tipo de actividades con la asesoría del Señor Coronel (RA) **DIEGO AURELIO GANTIVA ARIAS** Director de Proyecto de Grado de la Universidad de Santo Tomas y asesor de la Escuela de Ingenieros Militares.

Cordialmente,

Teniente Coronel **RICARDO ROQUE SALCEDO**
Director Escuela de Ingenieros Militares

Elaboro: AA-08 LINA FERNANDA MORA CORTES
REVISO CP. SANCHEZ DIAZ EDGAR

SN



Certificado SC 6310-14-6



"FE EN LA CAUSA"
"2014 AÑO DE LA MORAL Y EL BIENESTAR DEL SOLDADO COLOMBIANO"
Dirección Carrera 50 N°. 18 - 06 - 4468011 - MK 0620202-06202219
www.esing.mil.co



Certificado GP 113-14-6



ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

CAPITULO VII.

7.1 INTERPRETACION DE DATOS OBTENIDOS.

En este capítulo se analizaron los ensayos de laboratorio al suelo granular seleccionado para el relleno de los apiques y el ensayo piloto en la cantera Buenavista km 27 vía Tunja, ubicada en la sabana de Bogotá; con estos ensayos preliminares del trabajo investigativo de densificación de suelos granulares con el uso de explosivos, se solicitó el suministró de los materiales explosivos con sus respectivas cargas con las cuales se va a realizar la voladura estos se evidencian en la Tabla 11. Materiales explosivos solicitados para las voladuras del trabajo investigativo densificación de suelos granulares con el uso de explosivos.

Los resultados generados luego de los ensayos de laboratorio preliminares para el suelo granular que se va a utilizar como relleno en las pruebas de los apiques y el ensayo piloto se determinaron con base en los siguientes ensayos: **Con respecto a las relaciones de humedad –masa unitaria seca en los suelos (ensayo modificado de compactación) I.N.V.E. -142 -07**; En este ensayo se obtuvo un contenido de humedad óptimo del 8%, una masa unitaria seca de 2027 kg.

Con respecto al análisis granulométrico de suelos por tamizado I.N.V.E. -213 -07 contenido de agua (humedad) del suelo I.N.V.E. -122-07 Determinación del límite líquido de los suelos I.N.V.E. -125 -07 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos I.N.V.E. 126 -07. Los resultados obtenidos del análisis granulométrico establecieron la siguiente información: un porcentaje de gravas del 28,4%; un porcentaje de arena de 55,7% y porcentaje de finos de 15,9% para un total de muestreo del 100%. De acuerdo a la clasificación unificada de suelos es una arena limosa (SM). Con base en la teoría y antecedentes de este método se establece que se limita el material de suelos granulares con menos del 20% de limos y menos del 5% de arcillas; por lo cual se observa que el porcentaje que pasa el tamiz 200 es el 15,9 % y 84,1% de porcentaje retenido acumulado correspondiente al Tamiz 200; En este primer ensayo para el límite referenciado en la teoría y antecedentes se cumple ya que está por debajo del 20% de contenido de limos, para esto Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**



GRANULOMETRIA NORMA INVE-213-07							
Fecha de realización del ensayo:							2014-07-24
Masa total de la muestra seca (g):							6880
Apertura del tamiz	Masa retenida	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje que	Incertidumbre	k para 95%(t	
(mm)	(g)	retenido	retenido	pasa	±(%)	student)	
(pulgadas)			acumulado				
50	2"	0,0	0,0	0,0	100,0	±0,178	1,65
37,5	1 1/2"	553,8	8,0	8,0	92,0	±0,178	1,65
25	1"	328,3	4,8	12,8	87,2	±0,178	1,65
19	3/4"	139,6	2,0	14,9	85,1	±0,178	1,65
12,5	1/2"	359,3	5,2	20,1	79,9	±0,178	1,65
9,5	3/8"	200,1	2,9	23,0	77,0	±0,178	1,65
4,75	No 4	374,1	5,4	28,4	71,6	±0,178	1,65
2,36	No 8	227,1	3,3	31,7	68,3	±0,178	1,65
2	No 10	36,5	0,5	32,3	67,8	±0,178	1,65
1,18	No 16	120,0	1,7	34,0	66,0	±0,178	1,65
0,825	No 20	156,0	2,3	36,3	63,7	±0,178	1,65
0,6	No 30	334,5	4,9	41,1	58,9	±0,178	1,65
0,425	No 40	442,1	6,4	47,5	52,5	±0,178	1,65
0,3	No 50	787,9	11,5	59,0	41,0	±0,178	1,65
0,15	No 100	1235,4	18,0	77,0	23,0	±0,178	1,65
0,075	No 200	493,60	7,2	84,1	15,9	±0,178	1,65

Tabla 12. Análisis Granulométrico del suelo granular en estudio.

Fuente: Laboratorio de suelos Escuela de Ingenieros Militares.

Se logró un excelente resultado con respecto al objetivo que se pretende demostrar, puesto que se logro controlar la expulsión de fragmentos en la copa o cráter y la deformación y agrietamiento, obteniéndose una fase positiva en la detonación que remueve el terreno y una fase negativa que vuelve a recuperar los espacios produciendo el asentamiento del terreno.

Una vez ocurrida la "Detonación", se tomaron las densidades Finales al material del Terraplén, obteniendo las siguientes densidades:

Materia 1 con contenido de finos cercano al 10%; Densidad obtenida 85%



Materia 2 con contenido de finos cercano al **25%**; **Densidad obtenida 85%**

Materia 3 con contenido de finos cercano al **45%**; **Densidad obtenida 85%**

Ver Figura 173- densidades finales después de la detonación

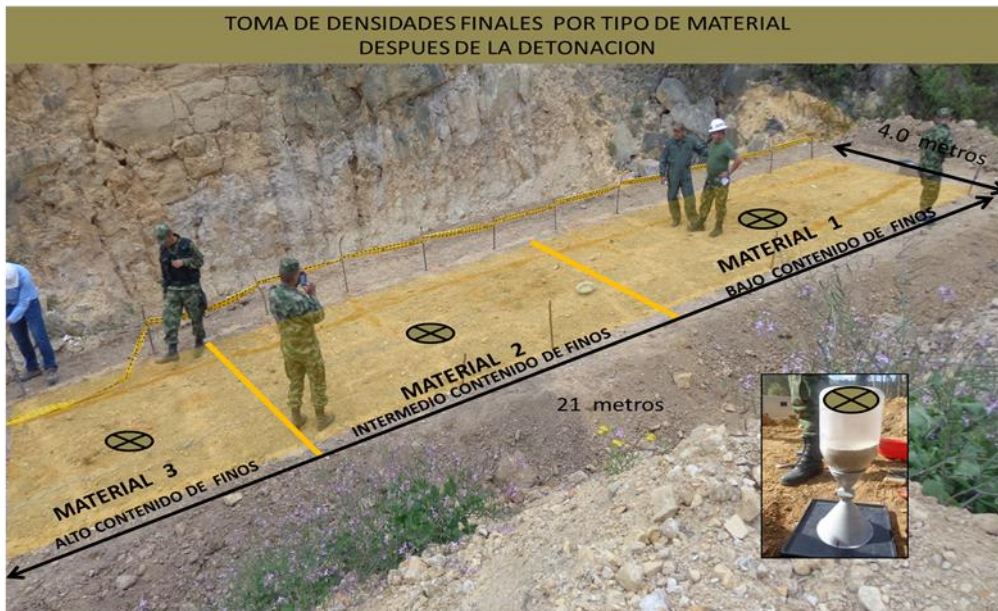


Figura 127. densidades finales después de la detonación

Fuente: Propia

Por último, se volvieron a tomar densidades **8 días** después de las detonaciones con el fin de verificar si el terraplén incrementa sus densidades de campo con el paso del tiempo, lo anterior con el fin de verificar la teoría encontrada en los documentos teóricos de esta investigación, Al respecto se evidencio que prácticamente no aumentaron las densidades sobre estos sectores. Es de aclarar que los resultados de las densidades tomadas a los 8 días son los siguientes:

Materia 1 con contenido de finos cercano al **10%**; **Densidad obtenida 85%**

Materia 2 con contenido de finos cercano al **25%**; **Densidad obtenida 85%**

Materia 3 con contenido de finos cercano al **45%**; **Densidad obtenida 85%**



En la grafica 1 observamos los resultados de la toma de densidades a los tres tipos de materiales con diferentes contenidos de finos antes de las detonaciones secuenciales.

INCLUIR GRAFICAAAAAAA

Grafica 1 – Resultados de densidades iniciales antes de las detonaciones

Fuente: Propia

Los resultados de las densidades arrojaron mejores resultados de compactación en los materiales con menos cantidades de finos que para este caso es el MATERIAL 1.

En la Grafica 2 se hace una comparación entre las densidades obtenidas en campo antes de las detonaciones con los resultados finales de las densidades finales obtenidas después de la detonación secuencial.

INCLUIR GRAFICAAAAAAA



Grafica 2 – Comparación densidades antes y después de la detonacion

Fuente: Propia

Se observa que aunque con un porcentaje bajo de incremento, efectivamente las densidades aumentaron en un promedio del 5% después de las detonaciones con explosivo.

En la Grafica 3 se hace una comparación entre las densidades obtenidas en campo antes de las detonaciones con los resultados finales de las densidades finales obtenidas después de la detonación secuencial y una tercera curva que corresponde a los resultados de la densidades tomadas 8 dias después de haber aplicado las detonaciones con material explosivo.

INCLUIR GRAFICAAAAA



Grafica 3 – Comparación densidades antes y después de la detonación incluyendo un periodo posterior de 8 días

Fuente: Propia

Se observa que aunque con un porcentaje bajo de incremento, efectivamente las densidades aumentaron en un promedio del 5% después de las detonaciones con explosivo.



CONCLUSIONES

Mediante la experimentación y los resultados obtenidos se logro establecer que la densificación de suelos con el uso de explosivo si funciona, ya que los resultados arrojaron un incremento promedio de 5% en los niveles de compactación iniciales, aunque el incremento fue bajo con respecto a lo que se tenía proyectado, es recomendable continuar las siguientes fases de este trabajo con mayores detalles y proyectos a mayor escala.

Es de gran relevancia señalar la importancia del tema en estudio, y poder concluir que la densificación de los suelos es primordial en el proceso de la construcción de las carreteras, ya que se logran avances en las técnicas utilizadas en la construcción; como es el caso de las técnicas de la densificación de suelos con el uso de explosivos. Los métodos de mejoramiento de suelos pueden utilizarse en diferentes tipos de terrenos o rellenos, pero debe realizarse un estudio geotécnico completo para seleccionar el adecuado a cada proyecto jugando un papel importante las tecnologías aplicadas para la construcción de proyectos de infraestructura.

La aplicación de los explosivos en las voladuras para construcción de obras de ingeniería constituye una de las más importantes aplicaciones y ha permitido ejecutar la fragmentación de la roca, ya sea mineral o estéril, para facilitar el movimiento de tierras en proyectos de construcción de carreteras, presas, túneles, etc. es importante señalar que el uso de los explosivos en la minería ha reducido de forma consecutiva el tiempo para realizar trabajos de voladura que anteriormente llevaban largos periodos de tiempo para realizarlos. La minería encontró en el uso de los explosivos el elemento fundamental para la explotación de materiales y minerales, gracias al uso de explosivos de características sísmicas evoluciono el trabajo en canteras y en la localización de hidrocarburos por parte de las ondas generadas por las sustancias explosivas las cuales tienen la capacidad de transmitir señales que son captadas por medio de un receptor electrónico. En los últimos años vemos como se ha incrementado el uso de explosivo a nivel mundial para la densificación de suelos.



La densificación de suelos con el uso de explosivos posee ventajas con respecto a otros métodos de mejoramiento debido a la disponibilidad del equipo, maquinaria, herramientas y materiales, siempre y cuando se cuente con el personal idóneo y información adecuada y suficiente de las condiciones del subsuelo. En la densificación de suelos granulares con el uso de explosivos, los resultados pueden no ser los deseables porque pueden inducir daños en el medio ambiente, por lo que se recomienda su uso solo en lugares aislados.

Estudios en otras parte del mundo como el de Griffin presentaron una descripción de la investigación del sitio, la instrumentación y los métodos de recolección de datos y diseño experimental arrojando un análisis geoestadístico de estos datos que mostraron una confianza del 74%, en el incremento de las densidades una vez se aplico la densificación de suelos con el uso de explosivo.

Los resultados obtenidos en la toma de densidades nos permitieron evidenciar que el método solo es eficiente en suelos granulares, con contenido de finos menor de 20%; un contenido de arcilla reduce substancialmente su eficiencia. La aplicación al terreno de cargas rápidas que producen colapsos controlados debido a los procesos de licuefacción, y la onda expansiva favoreció la aparición de un estado de licuefacción en el terreno produciendo una reagrupación de las partículas, con lo que se consigue una estructura más compacta y, en consecuencia, una densidad del terreno mayor.

Se verifico la teoría si ocurre re-consolidación entre horas y días a partir de las detonaciones, para lo cual los resultados de las densidades a los 8 días arrojaron un leve incremento en el nivel de compactación, claro está que el campo de prueba contaba con buenas condiciones de permeabilidad del subsuelo y las condiciones de drenaje permitieron la evacuación rápida de las aguas lo cual permitió evaluar estos parámetros.

Para que sea efectivo el procedimiento, la permeabilidad del terreno debe ser apropiada. Cabe señalar que su uso no es muy habitual y, obviamente, hay que tener cuidado en su aplicación si se trata de zonas pobladas, o con estructuras cercanas sensibles al efecto de una posible licuefacción bajo sus cimientos.



En el uso de esta modalidad conviene tener en cuenta los avances técnicos en la detonación de explosivos y en la colocación de las cargas explosivas, con objeto de mejorar la eficacia del método y mejorar, también, la seguridad durante su ejecución. Un proyecto de de este tipo debe ser consultado y consensuado con las empresas especializadas en voladuras y uso de explosivos en general, en especial hay que consultar a las empresas que intervienen en este ámbito de la ingeniería civil.



BIBLIOGRAFIA

Español:

- **CARLOS IVAN HENRIQUEZ PANTALEON.** Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Mejora de Terrenos Potencialmente licuables con inyecciones de compactación. Madrid, Enero de 2007.
- **VEITEZ UTESA, LUIS** “Mejoramamiento masivo de suelos” Sociedad Mexicana de Suelos, A.C. 1979 pp 7-10,41-99,117-155.
- **STAMATOPULOS, ARIS C, KOTZIAS, PANAGHIOTIS C.** “Mejoramamiento de Suelos” editorial Limusa 1990. Pp18-42
- **EJÉRCITO NACIONAL escuela de Ingenieros** “Manual de Conocimiento y empleo de explosivos” EJC3-166 2007.
- “Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos” Sociedad Mexicana Mecánica de Suelos, A.C.1957.pp. 111 -114.

Inglés:

- **DAVID A. SAFTNER** Time-Dependent Strength Gain in Recently Disturbed Granular Materials A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Civil Engineering) in The University of Michigan 2011
- **RON J. ELLIOTT, ASCT, LEWIS CLARKE,** pacific blasting & demolition ltd., blair gohl, ph.d., p.eng., ed fulop, explosive compaction inc., neil k. singh, p. eng., klohn crippen berger ltd., & frank huber, p. eng., greater vancouver water district “Explosive Compaction of Foundation Soils for the Seismic Upgrade of the Seymour Falls Dam” citado el 14 de julio de 2014, Disponible en la página web: <http://www.explosivecompaction.com/Papers/Explosive%20Compaction%20of%20Foundation%20Soils%20Seymour%20Falls%20Dam.pdf>



- **D.L. SHAH, A.V. SHROFF “SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING”** Citado el 14 de julio de 2014, disponible en la página web:
http://books.google.com.co/books?id=avhw6ggsqk8c&pg=pa140&lpg=pa140&dq=densification+of+granular+material+with+the+use+of+explosives&source=bl&ots=_puneiuva&sig=icz223hikwzjv68l-ajelbsm0y4&hl=es-419&sa=x&ei=gzf1u7fsapffsate2okyag&ved=0cd8q6aewag#v=onepage&q=densification%20of%20granular%20material%20with%20the%20use%20of%20explosives&f=false
- **V. F. NESTERENKO “DYNAMICS OF HETEROGENEOUS MATERIALS” CITADO EL 14 DE JULIO DE 2014,** disponible en la página web:
http://books.google.com.co/books?id=lugyhk8qnp8c&pg=pa315&lpg=pa315&dq=densification+of+granular+material+with+the+use+of+explosives&source=bl&ots=fntbrum-le&sig=vwlpjligaqkcojdw83_rhdno9fy&hl=es-419&sa=x&ei=gzf1u7fsapffsate2okyag&ved=0ceuq6aewaw#v=onepage&q=densification%20of%20granular%20material%20with%20the%20use%20of%20explosives&f=false
- **W. BLAIR GOHL AND DAVID A. WARD, EXPLOSIVE COMPACTION INC.,** surrey, b.c., canada, ronald j. elliot, pacific blasting and demolition ltd., burnaby, b.c., canada “applications of explosive compaction for tailings volume reduction”
<http://www.blastdensification.com/papers/tailings%20vol%20reduct.pdf>
- ROBERT E. KIMMERLING.” blast densification for mitigation of dynamic settlement and liquefaction”. **Disponible en la página web:**
<http://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/348.1.pdf>
- Vitali F. Nesterenko Department of Mechanical and Aerospace Engineering, La Jolla, CA 92093, U.S.A. University of California, San Diego, MRS Symp. Proc., vol. 759 (MRS, Pittsburgh, PA, 2003), pp. MM4.3.1- 4.3.12. , Shock (Blast) Mitigation by “Soft” Condensed Matter <http://arxiv.org/ftp/cond-mat/papers/0303/0303332.pdf>

Alemán.



- Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) Bürgermeister-Ulrich-Straße 160 Bearbeitung/Text/Konzept: Alexander Schwendner LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH 90431 Nürnberg, Arbeitshilfe für die Untersuchung, von Sprengplätzen Anhang 2.3 – Fachliche Hintergrundinformationen – Vergleich von Untersuchungsmethoden http://www.stmuv.bayern.de/umwelt/boden/vollzug/doc/anlage_2.3_arbeitshilfe_untersuch_sprengplaetze.pdf
- Klaus Haberer, Uta Bottcher. Das Verhalten Von Umweltchemikalien in Boden und Grundwasser. http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/PublikationenForschung/Band23.pdf?__blob=publicationFile

Italiano.

- Patricia BALANDIER pour DDE de la Martinique - SECQUIp, TRAITEMENT DES SOLS ET FONDATIONS. http://www.planseisme.fr/IMG/pdf/TRAITEMENT_DES_SOLS_ET_FONDATIONS.pdf

Francés.

- J.PHYSNFRANCE 7 (1997) Colloque C3, Supplément au Journal de Physique I11 d'août 1997, C.J. Shih, V.F. Nesterenko and M.A. Meyers, "Shear Localization and Comminution of Granular and Fragmented Silicon Carbide", <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/25/55/56/PDF/ajp-jp4199707C399.pdf>



ANEXOS.