

CARACTERIZACIÓN DE ROCAS DESDE EL PUNTO DE  
VISTA DE SU ABRASIVIDAD  
“UN ESTUDIO DE CASO”  
DISEÑO PROTOTIPO MÁQUINA PARA DETERMINACIÓN DEL DRI  
(ÍNDICE DE LA TASA DE PERFORABILIDAD).

DAVID FERRO RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE AQUINO  
MAESTRIA EN INFRAESTRUCTURA VIAL  
BOGOTA, COLOMBIA 2019

CARACTERIZACIÓN DE ROCAS DESDE EL PUNTO DE  
VISTA DE SU ABRASIVIDAD  
“UN ESTUDIO DE CASO”  
DISEÑO PROTOTIPO MÁQUINA PARA DETERMINACIÓN DEL DRI  
(ÍNDICE DE LA TASA DE PERFORABILIDAD).

DAVID FERRO RODRÍGUEZ

Tesis para Optar al Título de:  
Magister en Infraestructura Vial

Director:  
Dr. Álvaro de la Cruz Correa Arroyave  
Ingeniero de Minas y Metalurgia  
Doctor en Mecánica - Énfasis en Mecánica de Rocas

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE AQUINO  
MAESTRIA EN INFRAESTRUCTURA VIAL  
BOGOTA, COLOMBIA 2019

## CARTA DE ACEPTACIÓN

Bogotá., D.C., 11 de noviembre de 2019.

Señores:

**MAESTRIA DE INFRAESTRUCUTARA VIAL.**

Ant.: Ing. Adriana del Pilar Soacha Ortega

Ciudad.

Cordial Saludo,

Por este medio, deseamos presentar ante el comité del programa el trabajo de grado titulado CARACTERIZACIÓN DE ROCAS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE SU ABRASIVIDAD “UN ESTUDIO DE CASO”.DISEÑO PROTOTIPO MÁQUINA PARA DETERMINACIÓN DEL DRI (ÍNDICE DE LA TASA DE PERFORABILIDAD), quien fue desarrollado por el estudiante DAVID FERRO RODRÍGUEZ, identificado con la cédula de ciudadanía 93.392.987.

En calidad de Director, avalo la presentación de este documento para ser sometido a jurados evaluadores. El trabajo cumple con el desarrollo de los objetivos y con la parte metodológica requerida.

Agradeciendo su respuesta,

Atentamente,

ÁLVARO CORREA ARROYAVE  
Director trabajo de grado.

  
DAVID FERRO RODRÍGUEZ  
Estudiante Maestría en Infraestructura Vial.

## DEDICATORIA

Dedico especialmente este triunfo al padre celestial, quien me ha dado la oportunidad de existir y no solo eso sino, que ha guiado mi trasegar por este estrecho y duro pero finalmente placentero sendero que es la vida.

A mis padres por ser instrumentos de Dios para ser el vehículo en el cual transitó mi infancia donde fortalecieron los cimientos de la lealtad, responsabilidad y honestidad, principios y valores que reflejan el amor divino de Dios.

Con los cuales es más fácil lograr las metas anheladas “gracias por ese legado”.

A mis hermanos compañeros incansables de travesuras, disgustos y reconciliaciones, por que pase lo que pase nunca dejaran de estar allí.

A mi hijo Tomás por ser el inspirador de proyectos maravillosos, como el que un día me propuso Dios para que fuera padre.

A todos y cada uno de mis amigos y compañeros con quienes comparto vivencias, experiencias y una que otra sonrisa cuando esta vida arraiga y se torna ardua, sabemos que ser amigos es un privilegio pues los amigos se escogen no se imponen.

Por ultimo dedico este gran logro a todas aquellas personas que no creyeron en mí, a estas que no aportaron y que pretendieron destruir antes que construir, no con el sabor dulce de la ironía, pero sí, con el mensaje sincero “duele menos amar que morir de odio”.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por darme el don preciado de la vida y la sabiduría en momentos de tomar decisiones importantes que llevan a hacia el crecimiento del ser.

Agradezco a mis padres, por el amor la paciencia y tolerancia, que en todo momento tuvieron conmigo en esta búsqueda incansable por alcanzar un pequeño grano de ciencia.

A mis hermanos, por el apoyo incondicional en mi vida, que con su amor y respaldo pude alcanzar esta una más de las metas propuestas.

A mi hijo Tomás, por ser mi mejor amigo, mi confidente y cómplice, esa personita especial que en los momentos de mayor fatiga siempre hace que mi rostro se marque con una sonrisa.

A profesores como es el caso de los Ingenieros Álvaro Correa y Juan Miguel Sánchez, a la profesora María Victoria Mejía, quienes se convirtieron en el pilar de este proyecto, a todos y cada uno de los que pasaron aportando un granito para finalmente construir esta roca que hoy gracias a Dios llego a ser.

A mis amigas y amigos que cuando necesité que me escucharan estuvieron prestos para apoyarme o dame una voz de aliento, a ellos y a ellas dedico especialmente este triunfo que es de todos.

Y por supuesto al centro de la ciencia y el saber, a mi prestigiosa universidad Santo Tomás de Aquino, donde recorrí sus aulas en busca de saciar la sed del conocimiento.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
Carta de Aceptación .....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento.....	v
Tabla de Contenido.....	vi
Índice de Figuras .....	vii
Índice de Tablas.....	xii
Resumen .....	xv
Abstract.....	xvi
Introducción .....	1
<b>CAPITULO I</b> .....	<b>3</b>
Planteamiento del Problema.....	3
Objetivos.....	3
Objetivo General .....	3
Objetivos Específicos .....	3
Justificación de la Investigación .....	3
<b>CAPITULO II</b> .....	<b>5</b>
Marco teórico.....	5
Antecedentes de la Investigación .....	5
Bases Teóricas.....	7
Ensayo Abrasividad LCPC “BROYABILITÉ”.....	35
Marco Histórico .....	65
Definición de Términos Básicos .....	70
<b>CAPITULO III</b> .....	<b>73</b>
Resultados y Análisis .....	73
Capítulo Petrografía .....	88
Análisis Petrográfico de Cuatro Areniscas del Grupo Guadalupe ..	88
Marco Geológico .....	130
Diseño Prototipo Máquina para Determinación del DRI (Índice de la Tasa de Perforabilidad).....	134
<b>CAPITULO IV</b> .....	<b>145</b>
Conclusiones y Recomendaciones.....	145
Conclusiones.....	145
Recomendaciones.....	148
Referencias Bibliográficas .....	149

## INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Descripción esquemática de los cuatro principales mecanismos de desgaste (Zum Gahr, 1987) .....	9
Figura 2. Representación de las técnicas de corte porabrasi3n. Extraído del artículo de Roberto VelázquezCabrera (2009).....	10
Figura 3. Investigaciones de la Abrasividad a diferentes escalas. Adaptado de (Plinninger R. J., 2008) .....	11
Figura 4. Diagrama QAPF basado en Streckeisen en 1976 .....	13
Figura 5. a) VHN Vs Mohs cónicas Vs VHNR (Nielsen, 2006), 5:b) vida de servicio de picas (Plinninger, Spaunt y otros, 2002).....	15
Figura 6. Mohs Vs Rosiwal (Thuro & Plinninger, 2003) .....	16
Figura 7. Vida de Servicio de Picas Cónicas vs Q*. Thuro & Plinninger, 2003 .....	17
Figura 8. Desgaste de picas cónicas en mg vs índice Fschim. (Schimazek &Kntz, 1970).....	18
Figura 9. Costos de Picas Cónicas Vs RCS y Fschim (Cornejo A.,1988).....	19
Figura 10. Vida de servicio de picas cónicas vs RAI. (Plinninger &Thuro, 2002) .....	20
Figura 11. a) Aparato Cerchar (Plinninger R,J., 2008) b) Muestra de roca. (Ruehl•&Alber, 2006).....	21
Figura 12. Esquema del ensayo (Mathier, 2002) .....	22
Figura 13. Valores estimados de CAI para distintas rocas. (Plinninger y otros, 2003).....	23
Figura 14a. Cerchar con celda triaxial 14b. Relaci3n CAI Vs Presi3n de confinamiento (Ruehl&Alber, 2006) .....	26
Figura 15. Correlaci3n empírica entre CAI y RAI. (Plinninger & Thuro, 2004) .....	27
Figura 16. Ensayo de friabilidad S20 (Filip, 2003) .....	28
Figura 17. Ensayo de Perforabilidad SJ Dahl, et al., 2007.....	28
Figura 18. Abaco de Cálculo del D.R.I. (Bruland, 1998) .....	29
Figura 19. Esquema de ensayos de abrasividad AV y AVS del NTNU. (Nielsen B., 2006) .....	30
Figura 20. Valores orientativos de CLI para distintos tipos de rocas. (Johannessen, 1986) .....	31

Figura 21. BWI vs DRI resultados experimentales. (Ozdemir&Nilsen, 1993).....	32
Figura 22. Ábaco de Cálculo del B.W.I. (Bruland, 1998).....	32
Figura 23. Ábaco de vida útil de discos de corte vs CLI. (Movinkel T, 1986) .....	33
Figura 24. Pieza original .....	34
Figura 25. Pieza original, SAT. Adaptado de (Nielsen B., 2007) .....	34
Figura 26. Síntesis de ensayos, ábacos e índices para el método NTNU .....	35
Figura 27. Aparato de ensayo LCPC (Mathier, 2002).....	35
Figura 28. Correlación empírica entre CAI y LCPC. Plinninger & Thuro, 2004 .....	39
Figura 29. Diagramas de clasificación de la abrasividad del suelo. con D = 50% (Käsling & Thuro, 2010).....	41
Figura 30. Curvas granulométricas antes y después del ensayo para materiales con bajo y alto contenido de minerales abrasivos. (Thuro, Singer, Käsling & Bauer, 2006) .....	42
Figura 31. La curva granulométrica antes y después del ensayo LCPC, muestra con partículas redondeadas y con alto contenido de cuarzo .....	42
Figura 32. Curva granulométrica antes y después del ensayo LCPC, muestra con partículas redondeadas y con alto contenido de cuarzo. (Thuro, Singer, Käsling, & Bauer, 2006).....	43
Figura 33a. Ensayo con herramientas reales (CSM, 2012) .....	45
Figura 33b. Ensayo de corte usando una Pica de ataque original (Mineral Ground Tunnelling, 2008).....	45
Figura 34. Ensayo Drop test. Muestra de herramientas reales, para ensayos. (Lovat, Inc., 2009).....	46
Figura 35. Equipo para simular a escala de laboratorio el proceso de corte y a su vez estimar los parámetros necesarios para la simulación. Sistema de referencia, dirección de movimiento y partes componente del equipamiento empleado .....	49
Figura 36. Comportamiento de las diferentes fuerzas en cada uno de los ejes de sistemas de referencia .....	50
Figura 37. Comportamiento de las diferentes fuerzas con la distancia de corte recorrida .....	50
Figura 38. Desgaste de herramienta después de ensayo.....	51
Figura 39. Resultados de algunas pruebas de desgaste realizadas	

a nivel de laboratorio ZFS .....	52
Figura 40. Equipo de laboratorio para la realización de los ensayos de desgaste .....	53
Figura 41. Imagen de Tuneladora UP” – UP5.....	55
Figura 42. Imagen Tuneladora UP1, UP3 – U P4 .....	55
Figura 43. Trituradora o chandador en fucionamiento2017-2019 Finning International.....	56
Figura 44. Esquema de Tuneladora de Sarmiento en Funcionamiento .....	57
Figura 45. Cortadora portátil sobre retroexcavadora .....	57
Figura 46. Máquina Rozadora de Ataque Puntual 6.6M/MT720 .....	58
Figura 47. Algunos tamaños de Picas para Rozadoras .....	58
Figura 48. Sistema de dientes de Escarificadora .....	59
Figura 49. Dientes de retroexcavadora instalados enel cobo del equipo .....	59
Figura 50. Esquema de la medida de Dureza Brinell.....	61
Figura 51. Esquema de la escala de Mohs.....	62
Figura 52. Secciones estratigráficas generalizadas yesquemáticas del Cretácico superior en laSabana de Bogotá. (Geología de la sabana deBogotá Informe, 2005) .....	74
Figura 53. Posición geográfica de la extracción del material de estudio Grupo Guadalupe .....	74
Figura 54. Orden jerárquico del proceso de investigación .....	75
Figura 55.a Carta de colores metodología de Munsell.....	82
Figura 55.b. Carta de colores metodología de Munsell.....	83
Figura 56. Micrografías .....	90
Figura 57. Micrografías .....	90
Figura 58. Micrografías .....	91
Figura 59. Micrografías .....	92
Figura 60. Micrografías .....	93
Figura 61. Micrografías .....	93
Figura 62. Micrografías .....	94
Figura 63. Micrografías .....	95
Figura 64. Micrografías .....	96
Figura 65. Micrografías .....	96
Figura 66. Micrografías .....	97
Figura 67. Micrografías .....	98
Figura 68. Micrografías .....	99
Figura 69. Micrografías .....	99

Figura 70. Micrografías .....	100
Figura 71. Micrografías .....	101
Figura 72. Estabilidades de la muestra .....	103
Figura 73. Esquema del suelo .....	105
Figura 74. Clasificación de rocas según su resistencia por diferentes autores. (Gannon et al., 1999) .....	110
Figura 75. Clasificación del material de acuerdo con a laresistencia a la compresión.....	111
Figura 76. Calculo del factor de conversión global entre Is y UCS para 35 tipos de rocas distintas (Thuro y Plinninger, 2001).....	113
Figura 77. Gráfico de correlación para el martillo Schmidentre resistencia a compresión, densidadde la roca y rebote .....	117
Figura 78. Rangos de frecuencia de los diversos métodos de investigación en ingeniería de rocas .....	119
Figura 79. Relación entere Densidad y Velocidad de onda Compresional. Datos reportados en Ramírez et al. , (2000) (Análisis de datos realizados para la Presente Investigación).....	120
Figura 80. Relación entre resistencia a la compresión simple y Velocidad (Vp) en Datos reportados en Ramírez et al. (2000). (Análisis de datos realizados para la Presente Investigación).....	121
Figura 81. Relación entre resistencia a la compresión Simple y la Densidad. Datos reportados en Ramírez et al., (2000). (Análisis de datos realizados en la Presente Investigación) .....	121
Figura 82. Consumo de picas en función de la resistencia a la compresión simple y la abrasividad Cerchar CAI.....	122
Figura 83. Correlación entre el consumo de discos de corte para TBM, resistencia a la compresión simple y elíndice de durabilidad Cerchar (CAI) paradistintos tiposde roca. (Maidl, Schmidt, Ritz &Herrenkecht 2001) .....	124
Figura 84. Comparativa entre los índices de Schimazek y cerchar .....	125
Figura 85. Dureza Mohs Vs Abrasividad Rosiwal .....	126
Figura 86. Vida de servicio de las picas Vs contenido de cuarzo .....	127
Figura 87. Costos de Picas Cónicas Vs RCS y Fschim (Cornejo A., 1988).....	127
Figura 88. Base principal por una estructura .....	135
Figura 89. Vista frontal de la maquina .....	142
Figura 90. Vista frontal vista superior .....	142

Figura 91. Vista ángulo de giro con muestra regular .....	143
Figura 92. Vista ángulo de giro con espécimen irregular .....	143
Figura 93. Vista perspectiva quede un ángulo superior donde se aprecia orificio que permite contacto entre la brocay la muestra.....	144

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las Rocas en Función del Contenido de SO <sub>2</sub> .....	14
Tabla 2. Rozabilidad de las rocas en función del índice de Fschim.....	17
Tabla 3. Clasificaciones de Abrasividad en Rocas basadas en el CAI .....	22
Tabla 4. Clasificación cualitativa de la Rocas basadas en DRI y VHNR....	32
Tabla 5. Clasificación de Abrasividad en Rocas a partir del Índice LAC o Abrasión .....	37
Tabla 6. Correlación entre LAC y CAI .....	40
Tabla 7. Clasificación según el LBC .....	40
Tabla 8. Crítica del ensayo LCPC. (Plinninger & Thuro, 2002) .....	44
Tabla 9. Correlación cualitativa de LCPC abrasividad vs vida de servicio de herramientas. (Thuro & Plinninger, 2007) .....	45
Tabla 10. Parámetros del ensayo ZFS .....	51
Tabla 11. Resultados de desgaste del útil en el ensayo ZFS .....	52
Tabla 12. Las propiedades térmicas de la superficie e interfase del contacto.....	54
Tabla 13. Composición química del aceroueza Knoop.....	60
Tabla 14. Normas y rangos de carga para la Dureza Knoop .....	63
Tabla 15. Subdivisión de la perforabilidad de la roca .....	69
Tabla 16. Describe los procesos que permiten el desarrollo de la investigación tales como son: Método, Finalidad, Descripción del método.....	76
Tabla 17. Resumen de procesos para llegar a la finalidad de la Investigación .....	79
Tabla 18. Tamaño de grano para rocas sedimentarias.....	80
Tabla 19. Tamaño de grano Muestras de arenisca tomadas para la investigación grupo Guadalupe .....	81
Tabla 20. Fábrica en una roca. Adaptado de: Field description of soil and rock (2005).....	81
Tabla 21. Denominación de colores.....	82
Tabla 22. Determinación del color de las Muestras de arenisca tomadas para la investigación Grupo Guadalupe .....	83
Tabla 23. Nivel de meteorización en las muestras de roca. Adaptado de: Field description of soil and rock (2005).....	84
Tabla 24. Nivel de meteorización en las muestras de roca seleccionadas para la investigación.....	84

Tabla 25. Descripción en términos de fuerza. Adaptado de: Field description of soil and rock (2005) .....	85
Tabla 26. Caracterización Fuerza y textura del material seleccionado para la investigación .....	85
Tabla 27. Orden de elementos para la descripción rocas .....	86
Tabla 28. Orden de elementos para la descripción rocas .....	86
Tabla 29. Orden de elementos para la descripción rocas .....	87
Tabla 30. Orden de elementos para la descripción rocas .....	87
Tabla 31. Secciones delgadas de arenisca del grupo Guadalupe .....	89
Tabla 32. Resumen del análisis petrográfico .....	102
Tabla 33. Verificación de contenido de carbonatos .....	103
Tabla 34. Estabilidad de la roca en muestras seleccionadas del Grupo Guadalupe para la investigación .....	104
Tabla 35. Valores de pesos de las muestras del grupo Guadalupe en estudio .....	106
Tabla 36. Pesos específicos de rocas y piedras naturales .....	106
Tabla 37. Peso específico de las muestras obtenidas de Grupo Guadalupe .....	106
Tabla 38. Porosidad de la roca en muestras seleccionadas del Grupo Guadalupe para la investigación .....	107
Tabla 39. Contenido de Absorción para las muestras seleccionadas del Grupo Guadalupe para la investigación .....	108
Tabla 40. Resultados Y Correlaciones Con Otros Ensayos .....	109
Tabla 41. Grupo Guadalupe. Compresión simple, Mpa .....	110
Tabla 42. Clasificación de la roca según su resistencia a la compresión simple (Sandvik) .....	110
Tabla 43. Muestras de arenisca tomadas para la investigación grupo Guadalupe Compresión simple, Mpa .....	111
Tabla 44. Resistencia a la Compresión Simple en Mpa Contra Carga puntual en Mpa .....	112
Tabla 45. Resultados de carga puntual .....	112
Tabla 46. Resultados de carga puntual Is y Is (50) .....	112
Tabla 47. Ejemplos de Is para algunos tipos de roca .....	113
Tabla 48. Resistencia a la tracción indirecta o brasilera otb, en Mpa .....	114
Tabla 49. Grupo Guadalupe Tracción indirecta, Mpa .....	115
Tabla 50. Grupo Guadalupe Tracción indirecta, Mpa .....	115
Tabla 51. Valores típicos de número de rebotes medidos con martillo tipo L para diferentes rocas .....	116
Tabla 52. Número de rebotes del martillo Schmidt para muestras	

seleccionadas del Grupo Guadalupe para la investigación.....	117
Tabla 53. Velocidad Sónica en diferentes Rocas.....	118
Tabla 54. Grupo Guadalupe Velocidad Sónica, m/s .....	119
Tabla 55 Velocidad Ultrasonido de las Muestras .....	120
Tabla 56. Correlación entre LAC y CAI .....	123
Tablas 57. Índice de abrasividad de materiales seleccionados del Grupo Guadalupe para la investigación .....	124
Tablas 58. Índice de Schimazek (Fschim) de materiales seleccionados del Grupo Guadalupe para la investigación .....	125
Tabla 59. Valor dureza Mohs, Dureza Knoop valor Rosiwal para los diferentes minerales, la cual permite correlacionar con la figura 68 .....	126
Tabla 60. Cuadro comparativo de resultados de ensayos realizados a la Formación Arenisca Dura .....	129
Tabla 61. Cuadro comparativo de resultados de ensayos realizados a la Formación Arenisca labor .....	129
Tabla 62. Síntesis de las unidades litoestratigráficas de interés en la presente investigación .....	132
Tabla 63. Peso de elementos estructurales del equipo según la densidad del acero .....	137
Tabla 64. Los valores son aproximados del mercado.....	138
Tabla 65. Elementos hacen parte de la máquina.....	138

## RESUMEN

En este trabajo se ostentan los resultados de ensayos tales como (Comprensión Simple, Resistencia a la Tracción, Carga Puntual, Método para determinar el número de rebote (Martillo Schmidt), Velocidad Ultrasonido, Índice de Schimazek e Índice de Abrasividad Método Cerchar CAI), realizados a especímenes de rocas del Grupo Guadalupe, como estudio de caso, y con la finalidad de determinar su abrasividad frente al desgaste de herramientas de perforación y corte. También se establecen las relaciones existentes con resultados bajo los parámetros de sus propiedades físico-mecánicas, así mismo se exhiben sus tipologías mineralógicas, a través de Lupa Estereoscópica Binocular, Marca Stemi 305, posteriormente en el laboratorio de la empresa GMAS SAS, se elaboran las secciones delgadas de cada una de ellas, para su caracterización petrográfica, en el laboratorio de investigación de la Universidad Santo Tomás, y bajo el microscopio petrográfico, marca CarlZeissGmbH, Axion Scope-A1. Realizado por la geóloga de la universidad Nacional de Colombia y profesora del Universidad Santo Tomás de Aquino María Victoria Mejía Ramírez.

Como eje central de la investigación se determina el Índice de abrasividad del material seleccionado y se correlaciona con los demás ensayos realizados a estos materiales; con la caracterización mineralógica y petrográfica de las muestras se caracteriza el mismo de acuerdo a su forma, tamaño, selección y grado de esfericidad del grano del material.

La investigación da a conocer el Diseño prototipo de equipo para la determinación del DRI (índice de la tasa perforabilidad), prototipo que se propone como producto final de este trabajo de investigación y del que se recomienda su construcción, como Aporte a las futuras investigaciones sobre la abrasividad de los macizos rocosos.

## **ABSTRACT**

This work shows the results of tests such as (Simple Comprehension, Tensile Strength, Punctual Load, Method to determine the bounce number (Schmidt Hammer), Ultrasound Speed, Schimazek Index and Abrasivity Index Cerchar Method CAI), made to specimens of rocks of the Guadalupe Group, as a case study, and in order to determine their abrasiveness against wear and tear of drilling and cutting tools. It also establishes the existing relationships with results under the parameters of their physical-mechanical properties, as well as their mineralogical typologies, through Binocular Stereoscopic Magnifying Glass, Stemi Brand 305, later in the laboratory of the GMAS SAS company, thin sections are made of each of them, for its petrographic characterization, in the research laboratory of the Santo Tomás University, and under the petrographic microscope, CarlZeissGmbH brand, Axion Scope-A1. Made by the geologist of the National University of Colombia and professor at the University of Santo Tomás de Aquino María Victoria Mejía Ramírez.

As the central axis of the investigation, the Abrasivity Index of the selected material is determined and correlated with the other tests carried out on these materials; with the mineralogical and petrographic characterization of the samples, it is characterized according to its shape, size, selection and degree of sphericity of the grain of the material.

The research reveals the prototype design of the equipment for the determination of the DRI (drivability rate index), a prototype that is proposed as the final product of this research work and whose construction is recommended, as Contribution to future research on the abrasiveness of rock massifs.

## INTRODUCCIÓN

Como lo expresa el ingeniero Álvaro de la Cruz Correa Arroyave quien indica que la caracterización de la roca desde el punto de vista de su abrasividad o la aptitud al desgaste de herramientas de corte o conminución (brocas, cortadoras, discos etc.), son inexistentes en el país, para determinar el material del macizo rocoso.

La ingeniería ha sido motivo de análisis durante mucho tiempo, en la búsqueda incansable de establecer su mejor uso potencial y pretender pronosticar las causas que inducen a fallas en elementos de corte y perforación de rocas. Comoquiera que con estos estudios y análisis se ha alcanzado a caracterizar las cualidades, cada material sometido a distintos esfuerzos y a variables situaciones climáticas, en la actualidad el fenómeno de abrasión que presentan los materiales de los macizos rocosos es una de las principales causantes de desgaste en las herramientas de corte.

Si bien es cierto, la importancia de la maquinaria para las Constructoras y Entes Estatales a la hora de la ejecución de Proyectos de ingeniería como son los movimientos de terrenos, es alta, lo es aún más en la explotación de materiales ya sea a cielo abierto o en excavaciones subterráneas, debido a que el desgaste que sufren los elementos de corte y perforación, aumentan los costos. Esta situación que afectan directamente los proyectos en su programación y análisis financiero, por tal motivo es relevante tener en cuenta la abrasividad del macizo rocoso antes de ejecutar el plan, para trazar unas directrices claras frente a la duración de las piezas de corte de la maquinaria y el posible periodo de duración en ejecutar las actividades en mención, y con esto tener una sistematización económica y duración del proyecto clara en cuanto al desgaste se refiere.

Así mismo es importante resalta los periodos de “standby” de la maquinaria durante los trabajos de perforación y estos pueden clasificarse en mantenimientos preventivo planificados y mantenimientos correctivos debido a incidentes imprevistos, estos últimos resultan ser de gran importancia cuando se evalúa el progreso de una perforación, estos no son considerados en los planes. Uno de los aspectos más exigentes del mantenimiento desde el punto de vista operativo es el de herramientas de corte, ya que su revisión y posible sustitución siempre implica paradas de la máquina, estas operaciones son con frecuencia una tarea lenta y difícil. Por lo tanto, es deseable programar el mantenimiento de la cabeza de corte

con la máxima precisión posible. Para llevar a cabo tal programación, dos aspectos son necesarios: la identificación de “umbrales de desgaste” de las herramientas y un método que permita estimar el desgaste para cada herramienta como consecuencia de la operación. El objetivo de este estudio es investigar cómo enfrentarse a este problema cuando el medio es heterogéneo y la excavación es mecanizada mediante EPB, (González, 2014).

Desde lo anterior, se hace supremamente importante lograr una caracterización de la abrasividad de las rocas con el fin de identificar la magnitud de desgaste en los elementos de perforación y corte, dese su utilidad en los diferentes proyectos que actualmente se desarrollan a lo largo y ancho del territorio colombiano teniendo en cuenta, que los suelos de nuestro país son muy diversos y por tal razón no se puede fijar una directriz clara del comportamiento de las herramientas frente al material rocoso, es importante conocer la abrasividad de cada macizo con el fin de proyectar los elementos de perforación y corte, su deterioro y programación de los periodos en los cuales dichas piezas deben ser reemplazadas. La presente investigación se ha generado de acuerdo a los propósitos de intercomunicación vial que desarrolla en la actualidad la nación.

De tal manera que en la presente investigación se optará por muestras de material rocoso de la formación Guadalupe con los cuales se fundará la caracterización abrasiva en el tipo de material mencionado, para ello, se ha planteado un marco teórico que permita identificar los métodos para dicho cotejo, como también el método de estudio de caso múltiple que permite entender y ahondar en los argumentos tomados para el estudio.

En la descripción del método en la presente investigación es un estudio de caso, dado a la recopilación y registro de datos tomados de los especímenes seleccionados para la misma, existe una realidad que descubrir e interpretar en la exploración, las cuales varían en su forma, selección, esfericidad y contacto de los granos así como su contenido mineralógico, el investigador parte del interés sobre la caracterización del material desde el punto de vista de su abrasividad y el desgaste de las herramientas, y con el ánimo de caracterizar cada vez mejor el material, diseña un prototipo de máquina para la determinación del Índice de perforabilidad.

## **CAPITULO I**

### **Planteamiento del Problema**

¿En qué medida afecta la abrasividad la eficiencia de las herramientas de corte como brocas, cortadoras o piezas de recambio en las trituradoras y los molinos de materiales rocosos?

### **OBJETIVOS**

#### **Objetivo General**

Realizar la caracterización de rocas desde el punto de vista de su abrasividad (estudio de caso) y diseñar el prototipo de máquina para determinar la tasa de perforabilidad (DRI),

#### **Objetivos Específicos**

- ◆ Identificar las características de abrasividad de los materiales de la formación seleccionada
  
- ◆ Reconocer las características físico-mecánicas del material rocoso, tal como la resistencia a la compresión simple, a la tracción, carga puntual, Densidad; así como la velocidad sónica, la dureza Schmidt el índice de abrasividad cerchar "CAI" y el índice de Schimazek.
  
- ◆ Establecer las relaciones existentes con resultados bajo los parámetros mecánicos y físicos de las rocas.

#### **Justificación de la Investigación**

El proceso investigativo hace un aporte al conocimiento del desgaste de los elementos de perforación y corte de la maquinaria tal como Tuneladoras "T.B.M", taladros, retroexcavadoras y demás elementos que se utilizan para el corte del material rocoso.

La contribución se hace valiosa en las actividades de excavación y explotación del material en las construcciones de túneles frente a su actor de resistencia por así denominar la abrasividad de la roca, cargado de un valor semiótico y moral, como plantea Cortina (2000).

En el estudio se resalta la importancia de las construcciones de túneles, a su vez se toma en cuenta la abrasividad en las rocas como ente primordial en el desgaste de las pizas de corte y perforación que actúan sobre el material rocoso en sus diversas formas, la investigación escenifica roles, estrategias e, incluso, problemas y soluciones ante las dificultades propias de la exploración de los casos tomados, según García (2007). Por ello, es de gran relevancia identificar varios aspectos, dentro de los cuales encontramos, la forma, la resistencia, calidad, y ubicación geográfica; y desde allí, crear y diseñar estrategias que permitan optimizar los procesos para intervenir este tipo de rocas, según De Armas, Lorences & Perdomo (2003).

De tal manera que el presente estudio es pertinente para la ingeniería, debido a la necesidad de brindar una herramienta de análisis crítico sobre la abrasividad en las rocas, el desarrollo de tecnología para la perforación en primera medida, y luego, hacer de esto una dinámica y práctica activa, para mejorar la forma de proceder en las actividades de perforación y corte, que afectan directamente los elementos que realizan estas funciones.

Todo lo anterior estimulará a las empresas constructoras a desarrollar de manera óptima y adecuada las actividades primordiales de excavación en diferentes contextos viales a fin de afrontar los efectos de la globalización y procesos contemporáneos, dichos aspectos conforman un escenario en el que se hace ineludible conocer el material en el cual se desarrollara un proyecto con el fin de trazar directrices correctas en el uso de un buen proceso de perforación basado en las características de la roca, con esta información poder planificar los tiempos y materiales de perforación que se emplearan en dichas actividades.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### **Antecedentes de la investigación**

Para empezar se realizara un paneo de las diferentes experiencias e investigaciones de orden científico que se han realizado alrededor del mundo por parte de diferentes universidades, institutos y empresas estatales sobre la abrasividad, sin embargo, este término no es exclusivo de las rocas, sino también es aplicable para el suelo como también otros espacios que permitan entender de manera más profunda la aplicación de este concepto en contextos propios de la ingeniería.

Desde lo anterior, para Sánchez (2015), la abrasividad de las rocas es un parámetro con una fuerte repercusión económica en proyectos de obra civil y minería, ya que afecta a la perforabilidad y/o excavabilidad de las rocas. También en el sector de la piedra natural, en lo que se refiere al mecanizado de las rocas en las labores de extracción y procesado, e incluso a la hora de valorar el desgaste de un pavimento expuesto a tráfico peatonal. La determinación de la abrasividad de las rocas es imprescindible para establecer los métodos de perforación, seleccionar los útiles y condiciones de corte y/o procesado más adecuados; en definitiva, tanto para optimizar el procesado de la piedra como para calcular los costos de una obra o de un producto final cuando se trabaja con materiales rocosos.

El efecto de una acción abrasiva depende del equipo con el que se realiza, los parámetros de trabajo e invariablemente, de las características intrínsecas del material; sin embargo, no existen muchos estudios que relacionen la abrasividad con las propiedades de las rocas, y sobre todo, no existe un criterio universalmente aceptado por los distintos autores, existiendo discrepancias sobre el grado de influencia de las distintas características de las rocas en la abrasividad.

Las rocas graníticas constituyen uno de los grupos de rocas de mayor abrasividad (junto con gneises, anfibolitas y cuarzoarenitas) y por tanto, precisan un mayor consumo de útiles para el corte y perforación, siendo en este caso aún más relevante optimizar estos procesos. En este trabajo, se estudia la influencia de las características petrográficas (mineralogía, tamaño de grano, microfisuración, grado de alteración) y propiedades físicas significativas (densidad y porosidad, resistencia a la flexión, tracción, compresión, velocidad de propagación de ondas ultrasónicas) de cinco rocas graníticas gallegas utilizadas como roca ornamental, en su

resistencia a la abrasión, medida según el método de referencia de la norma europea de piedra natural EN 14157: método del disco de abrasión ancho. Los resultados obtenidos han permitido modelizar de forma concluyente el comportamiento de la abrasividad de las rocas graníticas a partir de sus características petrográficas y propiedades físicas, a partir de modelos de regresión lineal múltiple ( $R^2=0,95$ ), (Sánchez, 2015).

Así mismo, la abrasividad de terrenos para túneles construidos con tuneladoras es un factor determinante para los costos, cuando los desgastes reiterados de las estructuras de la máquina, junto con el elevado consumo de herramientas de corte alcanzan cifras significativas. Por ello, el autor se refiere, por una parte, a las insuficientes experiencias desarrolladas hasta ahora en España para el control de la abrasividad así como, a los métodos que actualmente se están aplicando con interés creciente en toda Europa para una medición sistemática de la misma a lo largo de la obra.

Propone el análisis por difractómetros de Rayos X de la muestra global del material excavado por una TBM como sistema que permite una evaluación estadística de este nuevo parámetro a considerar en los costos de un túnel y estudia, por otra parte, la necesidad de abordar también este problema a nivel de proyecto, para poder establecer un control adecuado entre previsiones y resultados. Finalmente expone los controles llevados a cabo en algunas obras españolas recientes, proponiendo un conjunto de medidas necesarias para evaluar debidamente los desgastes reiterados de la TBM a lo largo de la obra, (Saavedra, 2012).

En otra investigación se desarrolló un modelo para estimar la capacidad abrasiva de suelos con características vérticas (Cotové - Santafé de Antioquia) durante el proceso de labranza en función de sus propiedades físicas, mecánicas y estructurales, y de las condiciones de operación de herramientas de arado cincel. Las propiedades del suelo presentaron en general una variabilidad relativamente alta. Utilizando componentes principales se demostró la presencia de dos tipos de suelos: franco arcilloso y franco limoso.

VARIABLES CONSIDERADAS: densidad aparente ( $D_a$ ); humedad gravimétrica ( $W$ ); contenido de materia orgánica ( $MO$ ); fragmentos de roca ( $FR$ ); tierra fina ( $T$ ); morfología ( $M$ ) y dureza de partículas ( $Ha$ ); potencia ( $P$ ) y velocidad de trabajo; dos tipos de suelos; y pérdida de peso de la herramienta ( $Y_h$ ). El índice de abrasividad se determinó con base en imágenes de herramientas desgastadas, comparación

entre tratamientos, análisis dimensional y regresiones multivariadas, presentó alta correlación con tasas de desgaste, donde las variables FR/T y M en general tuvieron el mayor peso. Se observó presencia de desgaste severo en los vértices inferiores de herramientas, con redondeo y deformación plástica (González, 2012).

Pero lo anterior trae algunas consecuencias en la maquinaria, para el caso en la investigación realizada por González, Claudia, Arroyo, Marcos, & Gens, Antonio. (2013) sobre el empleo de Tuneladoras TBM (Tunnel Boring Machine) es cada vez más frecuente aunque su optimización requiere la evaluación precisa de varios riesgos geotécnicos entre ellos, el efecto de la abrasividad del suelo en el costo y la planificación de un proyecto dado.

El desgaste de las herramientas es más difícil de calcular que el resto de parámetros de la maquinaria, debido a la complejidad de la interacción entre herramienta de corte y terreno. En este trabajo se usan datos de un caso real de túnel en terrenos mixtos suelo-roca para examinar el resultado de varias metodologías de predicción de la penetración de TBM. También se examinan algunas predicciones de desgaste y se describe y aplica un nuevo método para la evaluación de la abrasividad de geomateriales que puede aplicarse tanto a materiales sueltos como a rocas.

Desde lo anterior, es importante reconocer que los procedimientos para lograr una buena perforación y determinar la abrasividad en las rocas, desde allí, generar diferentes resultados que permitan a las empresas tomar estrategias que permitan reducir los desgastes de la maquinaria, para ello se han propuesto la pregunta guía de la investigación y los respectivos objetivos.

## **BASES TEORICAS**

### **Que es la abrasión**

Según la real academia de la lengua española (RAE), ubica el origen del término abrasión en el verbo latino *abradêre*, y la define como la “acción de raer o desgastar por fricción”. Golovanevskiy y Bearman (2008) explican que la abrasividad es una propiedad que refleja el efecto abrasivo de las rocas y minerales al contacto con otros materiales y, por lo tanto, de gran importancia en la vida útil de los materiales y eficiencia en el procesado de minerales y equipos de trabajo.

La abrasividad tiene como finalidad primordial actuar sobre otros materiales con diferentes clases de esfuerzo mecánico triturado, molienda, corte, pulido.

Teniendo lo anterior se puede expresar que La abrasividad del material rocoso es de suma importancia para el comportamiento de los elementos de excavación o perforación, que serán empleados en un macizo rocoso, puesto que los tiempos de inactividad de una máquina por consecuencias de cambio o reparación intervienen directamente en los costos del proyecto.

De manera que para lograr optimizar un sistema para la resistencia al desgaste por abrasión se debe identificar primordialmente los mecanismos de remoción de material actuante sobre la superficie. Cuando son las partículas dura las que efectúan el daño, se debe considerar las propiedades mecánicas y físicas del material, de igual manera ser tenidas en cuenta características como la dureza coeficiente de endurecimientos por deformación y tenacidad a la fractura entre otros.

Teniendo en cuenta las variables de importante la observación muy detallada de las superficies puesto que podría determinarse si los mecanismos de remoción de material son predominantemente dúctiles (con deformación plástica y micro-corte) o frágiles.

Utilizando toda esta importante información, es posible establecer las características de la superficie deseables para llegar a una condición óptima de resistencia al desgaste, manteniendo siempre la relación costo / beneficio en un punto de equilibrio (Toro, 2003).

A continuación se puede evidenciar los conceptos básicos sobre mecanismos de desgaste Dependiendo de los diferentes tipos de acciones sobre la superficie, se pueden clasificar los procesos de desgaste de acuerdo a lo que puede denominarse “modos de desgaste” (Zum Gahr, 1987).

La clasificación fundamental acoge concisamente las clases de desgaste. Según la norma DIN 50320 (1979) existen sólo cuatro mecanismos de desgaste básicos y la combinación de éstos genera todos los procesos de desgaste conocidos. Estos mecanismos son: adhesión, abrasión, fatiga superficial, y reacción triboquímica. La figura 1, muestra un esquema de estos mecanismos.

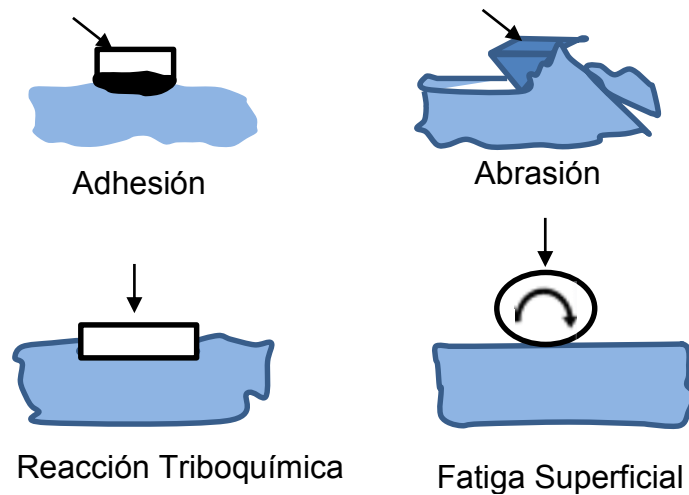


Figura 1. Descripción esquemática de los cuatro principales mecanismos de desgaste (Zum Gahr, 1987).

Hugo Albert Gonzales Sánchez (2012), Adelanto de un modelo para determinar la abrasividad de suelos con características vértices (tesis Doctoral). Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería de Materiales Universidad Nacional Medellín.

La influencia de la abrasividad del material rocoso es muy conocido, asociada a Esfuerzos in-situ a la confluencia de fallas y diaclasas y a la litología (particularmente la presencia de lentes de arcilla saturada) sobre el consumo y pérdida de brocas y cortadoras, en Colombia su determinación no es muy frecuente, razón por la cual no existen laboratorios especializados que realicen estas determinaciones.

### **Abrasión en las rocas**

Se puede indicar que la abrasión en las rocas, es la modificación de las partículas de las mismas por el desgaste que se puede generar desde lo mecánico, adicionalmente, se puede generar por el rozamiento de dos partículas, de manera que las rocas toleran un proceso de cambio y transformación, existe otro concepto que se puede identificar, es el desgaste ocasionado por la fricción de las partículas, como se evidencia en la figura 2.

En conceptos diferentes se tiene que, cuando el viento impulsa arena y polvo contra las rocas y el suelo, a este proceso se le denomina abrasión eólica o corrosión.

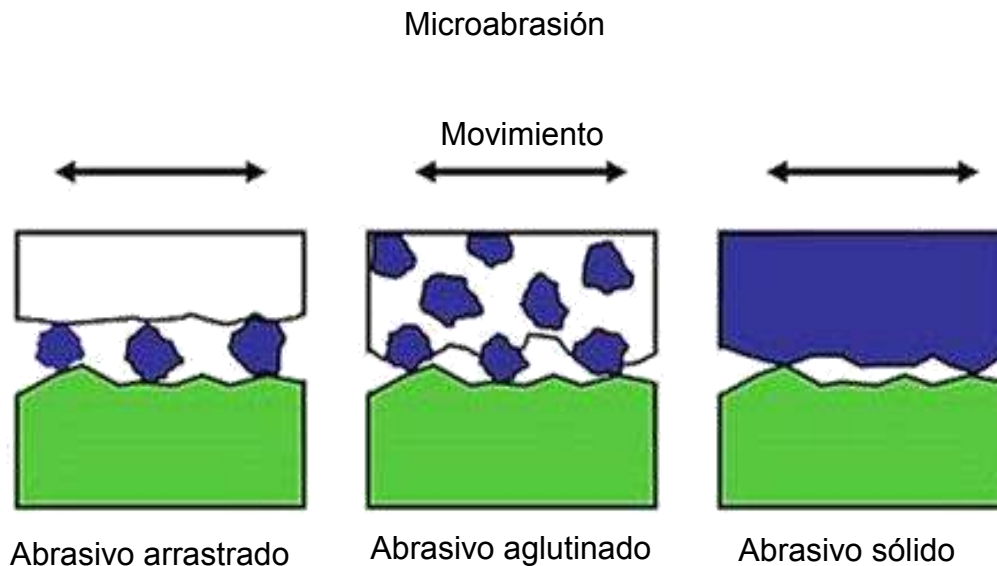


Figura 2. Representación de las técnicas de corte por abrasión. Extraído del artículo de Roberto Velázquez Cabrera (2009).

### Importancia de la abrasión

Como se ha mencionado anteriormente la importancia de la abrasión en las rocas tiene un valor absoluto, puesto que de esta depende el rendimiento o avance de los proyectos donde están implícitas las actividades de corte y/o perforación de las rocas, como es claro en los proyecto traduce tiempos e incremento en los costos operacionales. Se conoce que la definición de las leyes de contacto entre elementos incluyen las fuerzas de cohesión y fricción, aspectos muy importantes que permiten modelar la fractura y la descohesión o pérdida de cohesión de los materiales. Gracias a esta consideración el modelo da la posibilidad de delimitar la formación de micro-fisuras y fisuras que provocan finalmente el colapso Sánchez, Herrera, Recarey& Iglesias, 2014, de igual manera los autores afirman que:

En el caso particular del desgaste en los elementos de trabajo de los instrumentos de labranza las investigaciones reportadas hasta el momento, han estado dirigidas a estudiar su magnitud e intensidad, tanto en órganos de trabajo que difieren en forma y geometría a las herramientas de labranza, como en los elementos empleados en el corte de rocas, la excavación en minas y en materiales que difieren del suelo agrícola en lo referente a sus características mecánicas (García de la Figal, 1978; Recarey et al., 2001; Burrel, 2003; Graff, 2010), por tal motivo, los modelos empleados en las investigaciones antes referidas tienen como inconveniente para aplicar en suelos agrícolas que no tienen en cuenta la adherencia del suelo a la herramienta de labranza. La inclusión de esta propiedad

en dichos modelos permitirá la simulación del desgaste de las herramientas de labranza en los suelos agrícolas. Conociendo los modelos que se desarrollaron en MED para lograr simulaciones de dificultades relacionados con los geomateriales, como es el caso del desgaste de los elementos de labranza durante su interacción con el suelo, toman como datos de entrada parámetros referidos a la macro y microestructura del suelo y de la interface suelo herramienta de labranza.

Para Sánchez, Herrera, Recarey & Iglesias, 2014, los parámetros macroestructurales se determinan mediante ensayos experimentales (Coetzee et al., 2007; Graff, 2010) y los microestructurales por lo general mediante la estimación a partir de los macroestructurales (Recarey et al., 2001; Burrell, 2003).

### Ensayos para determinar la abrasión

En el presente apartado se identifican ensayos con los cuales se puede desarrollar la determinación o valoración del desgaste y abrasión en las rocas, los cuales se categorizan en diferentes tipos y escalas, algunos de estos ensayos están orientados a las rocas duras y otros a las blandas, en la siguiente figura 3, se encuentran los diferentes ensayos.

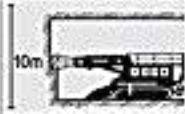
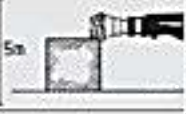




Ensayos in situ a escala real. usando maquinaria y herramientas originales L ~ 10m.	Ensayos a gran escala. Usando maquinaria y herramientas originales L ~ 5m.	Ensayos sobre modelo, usando herramientas y maquinaria a escala reducida. L ~ 2m.	Ensayos sobre modelo usando herramientas de corte originales, pero no maquinaria. L ~ 0,2m.	Índices usando herramientas simplificadas en laboratorio. L ~ 4cm.	Métodos composicionales: Índices geotécnicos, correlaciones L ~ 4mm
					
				en esta escala encontramos los siguientes ensayos	
				Ensayo CERCHAR	Ensayo LCPC: "Broyabilité"
					Sistema NTNU ensayos AV, AVS, SAT

Figura 3. Investigaciones de la Abrasividad a diferentes escalas. Adaptado de (Plinninger R. J., 2008).

### Métodos basados en índices geotécnicos

En los métodos basados en índices geotécnicos se puede evaluar la abrasividad, a partir de parámetros físicos y/o características intrínsecas de la roca o suelo. La diferencia que existe entre estos métodos, es la selección de parámetros de entrada que se encaja en las fórmulas y sus diferentes pesos. Estos métodos

presentan una ventaja, es la relativa sencillez y economía del procedimiento de medida. Y en contra vía presentan una desventaja, la cual es que estos no realizan observaciones directas de desgaste, por lo que relacionarlas con observaciones de desgaste en obra es complejo. A través del tiempo se han propuesto variados métodos, estos son algunos de los más empleados:

- ◆ Contenido de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- ◆ Contenido de Minerales Abrasivos,
- ◆ Contenido Equivalente de Cuarzo ( $Q^*$ )
- ◆ Número de Dureza Vickers de la Roca (VHNR),
- ◆ Índice de Desgaste Schimazek ( $F_{\text{schim}}$ )
- ◆ Índice de Abrasividad de la Roca (RAI)

Los primeros tres métodos son de índice composicionales puros; el siguiente está basado en un ensayo mecánico, y posteriormente los métodos quinto y sexto combinan características mecánicas y composicionales. A continuación se describe cada uno de estos métodos:

### **Índices composicionales puros**

Al clasificar químicamente el material rocoso (Roca), se adoptan como minerales de referencia la sílice libre ( $\text{SiO}_2$ ) y los feldespatoideos, se establece un Índice de saturación ( $I_{\text{sat}}$ ) el cual es calculado en función de la existencia de cuarzo ( $Q$ ) o de feldespatoideos ( $F$ ), según las fórmulas (Calleja & Cuesta, 2012)

(Gillespie&Styles, 1999) (Woolley, 1996):

$$I_{\text{sat}} = \frac{100 * Q}{Q + A + P}$$

$$I_{\text{sat}} = \frac{100 * F}{F + A + P}$$

Donde

$Q$  = cuarzo + tridimita + cristobalita,

$A$  = feldespato alcalinos = ortosa + microclina + anortoclasa + sanidina + albita,

$P$  = plagioclasas,

$F$  = Feldespatoideos = nefelina + leucita + sodalita + analcima, etc.

Dado que  $Q$  y  $F$  son incompatibles, en ninguna roca se podrán encontrar ambos minerales presentes, donde haya  $Q$  no habrá  $F$  y viceversa. Teniendo lo anterior, el contenido de  $\text{SiO}_2$  en las rocas define tres tipos de rocas (Gillespie&Styles, 1999):

- ◆ Sobresaturadas: contienen sílice libre. Las asociaciones mineralógicas son: cuarzo, feldespato cuasi ortosa, biotita, hornblenda, piroxenos. Cuando tienen un  $\text{Isat} > 5\%$  en  $Q$ . Ver diagrama  $QAPF$ .
- ◆ Saturadas: no contienen sílice libre, ni feldespatoideos. Las asociaciones mineralógicas son: ortosa, plagioclasa sódica, hornblenda. Cuando los valores de  $\text{Isat}$  en  $Q$  se sitúan entre  $0\%$  y  $5\%$ . Ver diagrama  $QAPF$ .
- ◆ No saturadas: asociaciones mineralógicas que contienen feldespatoideos: plagioclasas cálcicas, piroxenos, olivinos. Cuando tienen valores de  $\text{Isat}$  de  $0\%$  a  $100\%$  ver en Figura 4, el diagrama  $QAPF$ .

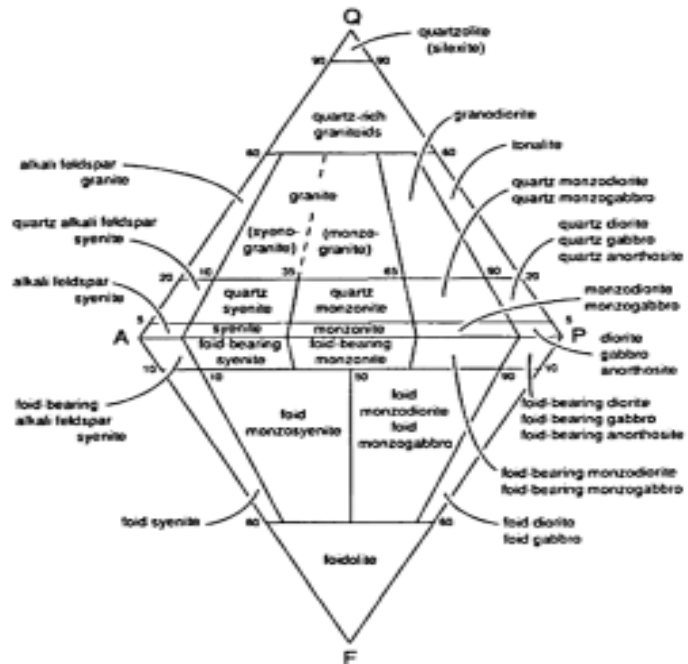


Figura 4. Diagrama  $QAPF$  basado en Streckeisen en 1976. En la tabla 1, se encuentra la clasificación de las rocas según (López Jimeno 2003).

Tabla 1. Clasificación de las Rocas en Función del Contenido de SO<sub>2</sub>

Tipo de roca	Porcentaje de Sílice SO <sub>2</sub> (%)
Arenisca Silíceea	98
Otras areniscas	80 – 95
Arcosas	70 – 80
Granito	70
Grawvaca, Granodiorita	60 – 70
Pizarra, Sienita	50 – 65
Basalto, Gabro	50
Arcilla	40
Caliza, Dolomía	2 - 10

Fuente: Rendimiento, desgaste y abrasividad en excavación..(González, p, 2014).

### **Dureza Vickers**

La dureza de un mineral a la indentación o también llamada Dureza Vickers, nos da un número llamado “VHN” que se define como la relación de una carga aplicada a un indentador o penetrador (gramo o kilogramo fuerza) dividido por el área de contacto de la impresión (mm<sup>2</sup>). El penetrador Vickers es una pirámide de diamante con un ángulo de 130° entre caras opuestas por lo que se observa una hendidura perfecta como un cuadrado con diagonales iguales. Las observaciones se efectúan mediante un microscopio para medir la depresión causada en una superficie pulida de la muestra de ensayo por el indentador de diamante a una determinada carga en kg. (IMMA, 1997).

Una relación casi lineal Existe entre el número “VHN” y la Dureza de Mohs, en escala logarítmica, ver figura 5.a. Al igual que con la dureza de Mohs, la utilización de VHN para estimaciones de abrasividad y de desgaste de los útiles de corte en máquinas de ataque puntual tiene un carácter meramente indicativo. (Nielsen, Dahl, &Holzhäuser, 2007). A partir del número “VHN” de dureza Vickers se puede calcular en rocas (VHNR), un buen ejemplo de cálculo lo da Bruland, 1998 que a continuación se transcribe:

“Una muestra de gneiss contiene 30% de cuarzo, 63% de plagioclasa, 2% de anfibolita y 5% de biotita. Pues el VHNR se determina como la sumatoria de los VHN de dichos minerales afectados por el porcentaje en que están presentes en la roca en cuestión, es decir:

VHNR= 0,3 VHN (Cuarzo) + 0,63 VHN (Plagioclasa) + 0,02(Anfibolita) + 0,05 (Biotita)”.

(Plinninger, Spaunt y otros, 2002) recomiendan el empleo de diagramas de estimación del tipo que se muestra en la figura 5.b, de la vida de servicio de las picas cónicas que se emplean en rozadoras, propuestos por Johannessen en 1995.

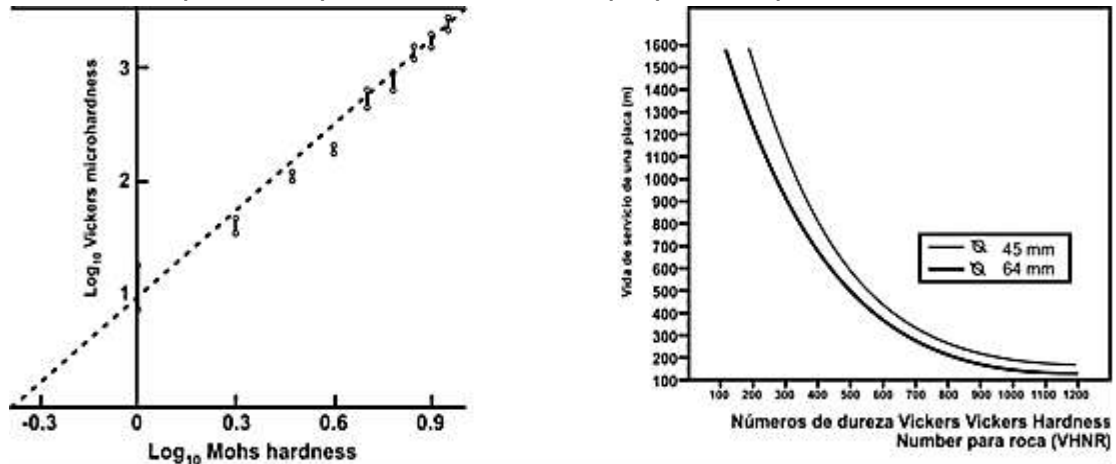


Figura 5: a) VHN Vs Mohs. 5:b) vida de servicio de picas cónicas Vs VHNR (Nielsen, 2006), (Plinninger, Spaunt y otros, 2002).

### Determinación del Índice $F_{schim}$ de Schimazek

Schimazek y Knatz, (1976), presentaron el Índice  $F_{schim}$  para determinar la rozabilidad de las rocas y ha encontrado buena aplicación en el estudio de la conveniencia de trabajar con rozadoras o minadoras, se define como:

$$F_{schim} = Q^* d_{50} R_T$$

Dónde:

$F_{schim}$  = Índice de Desgaste (N/mm),

$Q^*$  = Contenido en equivalente de cuarzo del contenido de minerales abrasivos (%).

$d_{50}$  = diámetro medio del grano de cuarzo (mm).

$R_T$  = Resistencia a la tracción (N/mm<sup>2</sup>).

La cantidad de cuarzo equivalente  $Q^*$ , que es la suma de los porcentajes volumétricos afectados por un factor de ponderación de acuerdo a su diferente dureza Rosiwal, es:

$$Q^* = 1,00Q + 0,33F + 0,4P + 0,03C$$

En la figura 6, se correlaciona la Dureza de Mohs con la Abrasividad de Rosiwal.

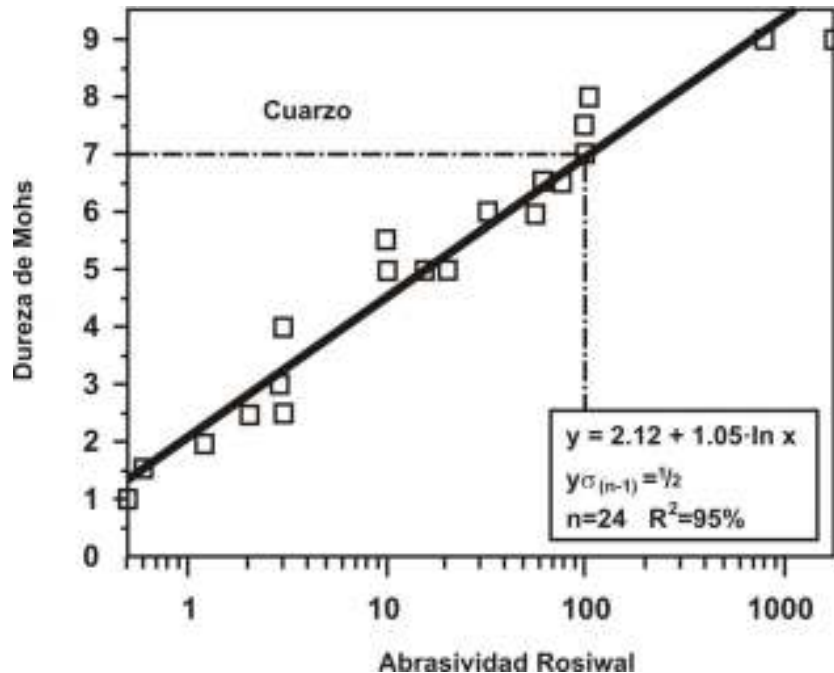


Figura 6. Mohs Vs Rosiwal (Thuro & Plinninger, 2003).

La dureza Rosiwal (Rosiwal, 1896) está directamente relacionada con la dureza dada por la escala de Mohs como se muestra en la figura 6, en la que se observa que el Cuarzo ( $Q$ ) tiene un valor unitario de dureza Rosiwal. Donde  $Q$  es Cuarzo,  $F$  es Feldespato,  $P$  es Filosilicato y  $C$  es Carbonato. Para cuantificar las fracciones volumétricas de los distintos minerales se recurre al estudio con microscopio sobre láminas delgadas de la roca, aunque también se usa el método de difracción por rayos X.

Thuro & Plinninger, 2003, dieron a conocer una monografía hecha sobre ocho proyectos de túneles. Trabajo en el cual se relaciona la vida útil de servicio de picas cónicas empleadas en el método convencional de excavación (drill and blast) sobre 42 tipos de rocas versus sus respectivos valores de  $Q^*$  obteniendo la siguiente correlación con un coeficiente  $R^2$  de 95%, ver figura 7, la vida de servicio de picas frente al contenido de cuarzo.

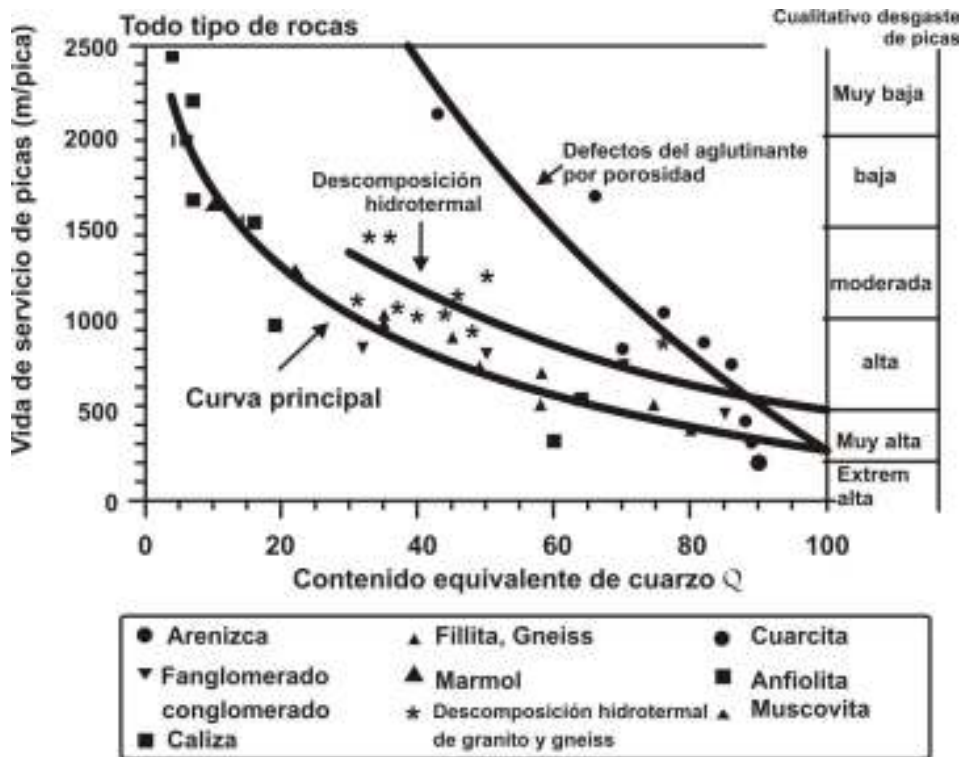


Figura 7. Vida de Servicio de Picas Cónicas vs Q\*. Thuro & Plinninger, 2003.

La siguiente tabla 2, muestra una escala del índice de Schimazek  $F_{schim}$  que podría aplicarse según (Cornejo A., 1988) para estimar en una primera aproximación la excavabilidad de una roca cuando se emplean máquinas de ataque puntual.

Tabla 2. Rozabilidad de las rocas en función del índice de  $F_{schim}$ .

Coeficiente de Abrasividad $F_{schim}$ (kp/cm)	Rozabilidad	
	Calificación	M <sup>3</sup> /h
0,2 - 0,3	Muy buena	45 – 65
0,3 - 0,4	Buena	45 – 65
0,4 - 0,5	Moderada	45 – 65
0,5 - 0,6	Regular	45 – 65
0,6 - 0,8	Mala	45 – 65
0,8 – 1,0	Muy mala	45 – 65

**Rozabilidad de las rocas en función del índice  $F_{schim}$**

Según Schimatzek & Knatz, 1970, proponen la siguiente figura 8, donde se establece la correlación entre el índice de desgaste  $F_{schim}$  y el desgaste efectuado sobre las picas cónicas que actúan en la RDC de una rozadora:

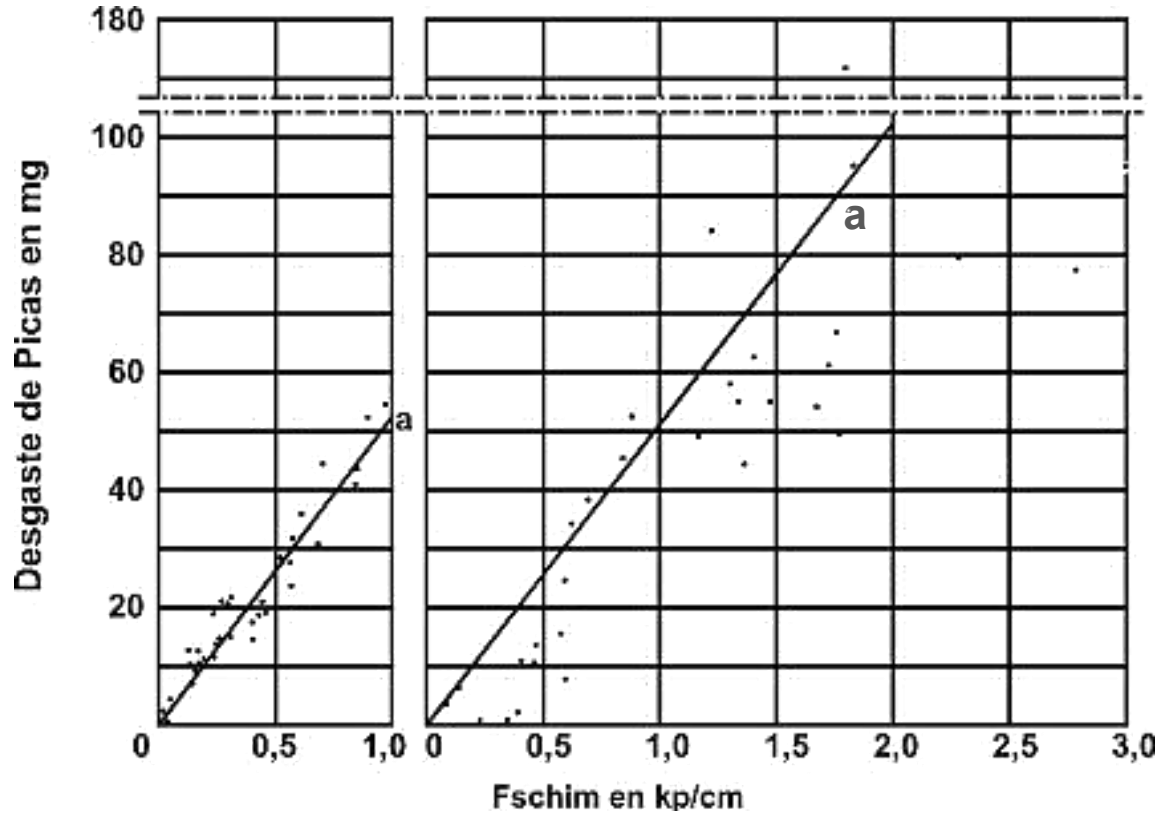


Figura 8. Desgaste de picas cónicas en mg vs índice  $F_{schim}$ . (Schimazek & Knatz, 1970).

El tipo de materiales utilizados para los ensayos de laboratorio fueron areniscas sintéticas y en rocas del carbonífero de Ruhr por (Schimatzek & Knatz, 1970). Cabe anotar, que este esquema da como resultante una agrupación de puntos donde la curva que mejor se ajusta es la expresión lineal, “Desgaste de picas (mg) = 51  $F_{schim}$  (N/mm)”, según (Wittke, 2007), este esquema es muy limitado, por lo que no es viable convertir la medida de desgaste de picas en (mg) a un valor práctico como es la Velocidad de excavación, por ejemplo, en ( $m^3/h$ ). (Cornejo A., 1988), expuso otra utilidad para el índice  $F_{schim}$ , lo expuesto por Cornejo lo recopila Ghering en la siguiente figura 9, desarrollada con el fin de estimar los costos de las picas para rozadora a partir del índice  $F_{schim}$  y de la RCS de la roca, por lo tanto se halla otro tipo de utilidad en el campo de las rozadoras con el índice de  $F_{schim}$ .

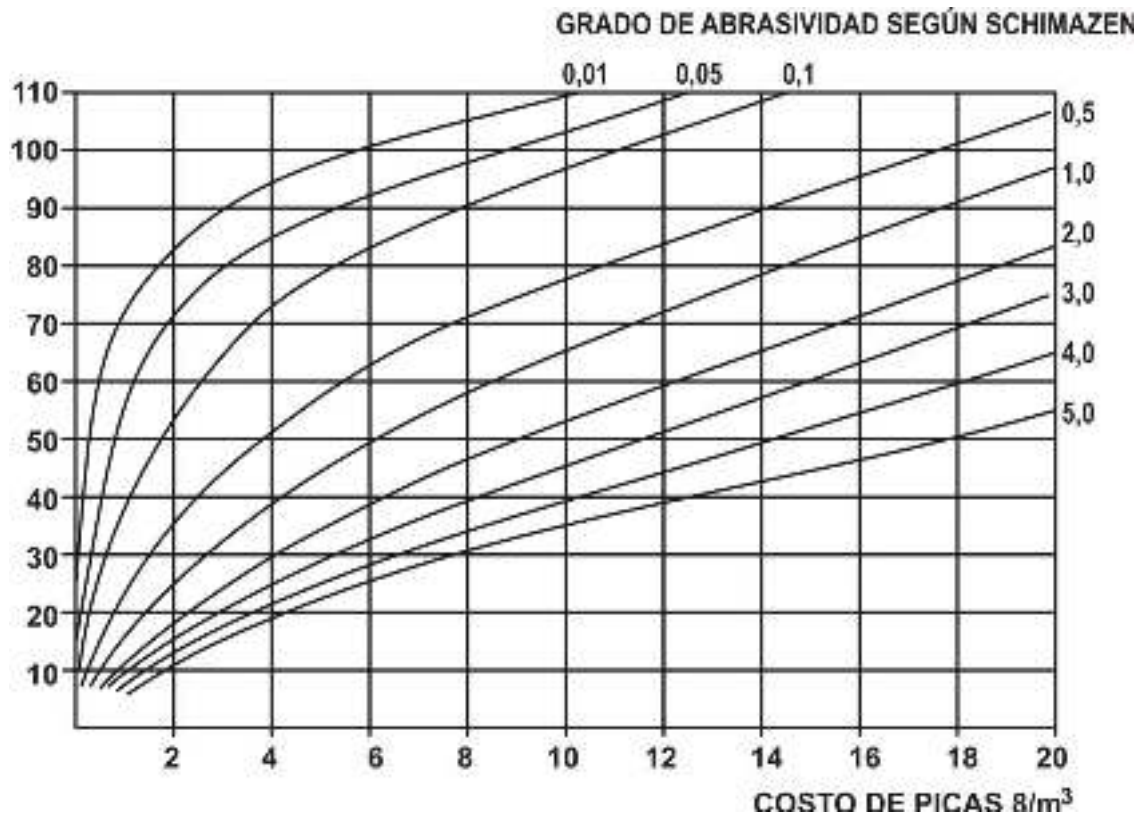


Figura 9. Costos de Picas Cónicas Vs RCS y  $F_{schim}$  (Cornejo A., 1988).

#### Índice de Abrasividad de la Roca – RAI

(Plinninger & Thuro, 2002), (Plinninger & Thuro, 2004), implantaron un índice compuesto, denominado Índice de Abrasividad de la Roca (RAI), el cual se puede obtener con el producto entre la resistencia a la compresión simple (RCS) y el contenido equivalente de cuarzo ( $Q^*$ ),

$$RAI = RCSQ^*$$

El índice de abrasividad de la roca, RAI es un índice geotécnico de desgaste, que considera la resistencia a la compresión simple de la roca como un parámetro que tiene en cuenta la adhesión entre granos y/o los minerales en el material. (Plinninger & Thuro, 2002). La siguiente figura 10, enseña la correlación empírica que vincula a RAI con la vida de servicio estimada para picas cónicas. Se observa una propuesta de escala de abrasividad RAI vs escala de vida de servicio de las herramientas.

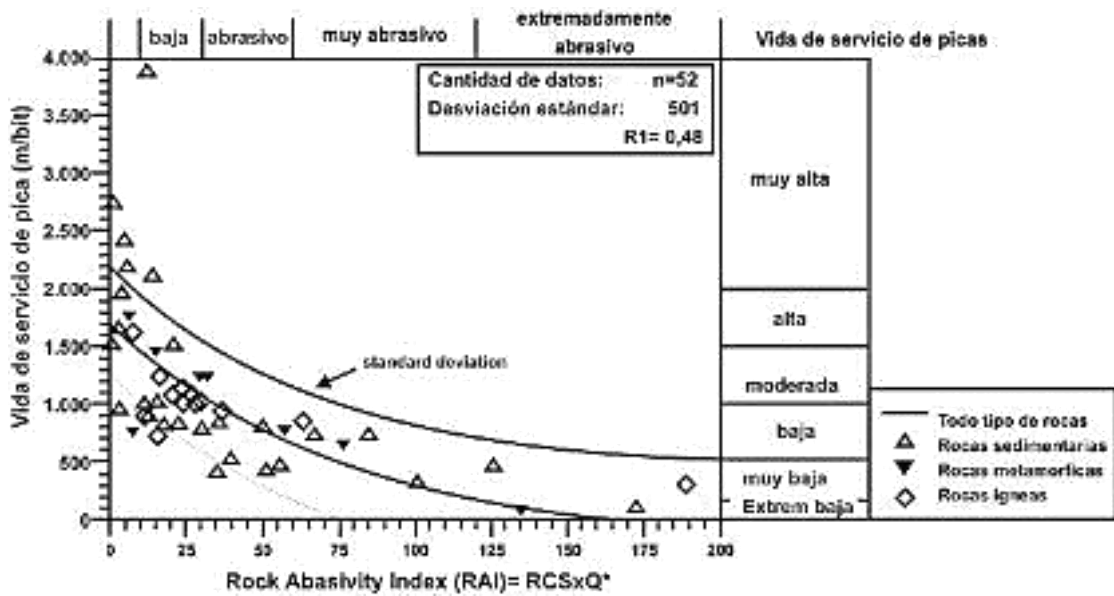


Figura 10. Vida de servicio de picas cónicas vs RAI. (Plinninger & Thuro, 2002).

(Köppl, 2013) ha presentado el índice “Soil Abrasivity Index”: SAI, como un índice geotécnico que tiene en cuenta la abrasividad del suelo mediante el contenido equivalente de cuarzo.

$$SAI = \left(\frac{Q^*}{1000}\right)^2 t_c D_{60}$$

Donde  $Q^*$  es el contenido equivalente de cuarzo,  $t_c$  un valor indicativo para la resistencia al corte del suelo [ $kN/m^2$ ],  $D_{60}$  es el tamaño del grano a la fracción que pasa al 60% en [mm].

### Índice de Abrasividad Cerchar - CAI

En la actualidad el ensayo para evaluar la abrasividad de las rocas más aplicado es el índice de abrasividad Cerchar (CAI), comoquiera que este inicialmente fue creado para hallar el índice de abrasividad en las rocas, de igual manera se ha pretendido utilizar para conocer el índice en suelos.

El ensayo en mención fue inventado en Francia (Valantin A., 1971), donde se estandarizó (AFNOR, 2000). En el ensayo se pasa una aguja de acero, terminada en forma cónica con un ángulo de 90 grados, bajo una carga estática de 70N, sobre la superficie de una muestra recorriendo lentamente una distancia de 10mm. La aguja debe estar hecha de un acero con resistencia a la tracción de 200  $kg/mm^2$

(2GPa) y dureza Rockwell (HRC) de 54 - 56. El ensayo completo consiste en hacer pasar la aguja cinco (5) veces sobre una misma muestra y medir el desgaste de la aguja observando mediante microscopio la longitud del diámetro de la punta de la aguja luego de cada pasada; la observación del desgaste de la aguja se realiza en dos direcciones por lo que la medida resultante es la media de 10 determinaciones mediante binocular (Valantin A., 1971).

La muestra suele ser cilíndrica como se observa en la figura 11b, aunque se han realizado ensayos en muestras de forma irregular e incluso, prismáticas. Con este ensayo se calcula el valor del índice de abrasividad CAI normalizado en (CERCHAR, 1986) como la medida del diámetro, expresado en décimas de mm (1/10mm), de la superficie de la punta de acero resultante del desgaste. El esquema de ensayo se muestra en la figura 12, de igual forma en la figura 11a, se observa el equipo para el ensayocerchar y en la figura 11b, se observa la muestras después de realizado el ensayo.

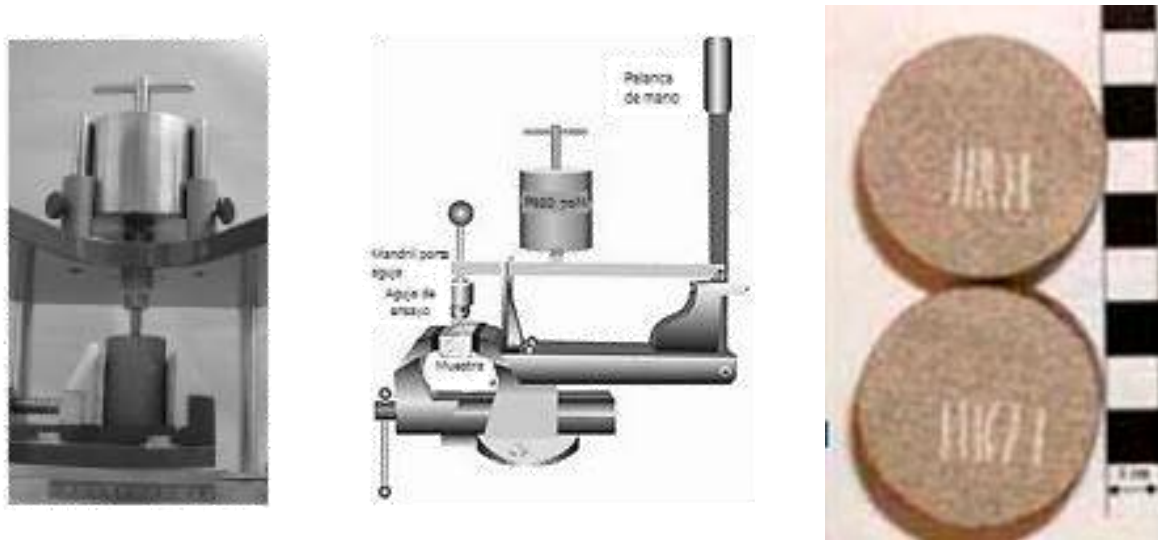


Figura 11.a) Aparato Cerchar b) Muestra de roca.  
(Plinninger R.J., 2008)(Ruehl & Alber, 2006).

En la actualidad se tiene en cuenta dos clasificaciones de abrasividad extensamente empleadas las cuales se basan en los resultados del ensayo cerchar, (Plinninger R. J., 2008). En primer lugar se encuentra la clasificación que se dio originalmente del Centre d'etudes et Recherches de Charbonnages en Francia (CERCHAR, 1986), y posteriormente se encuentra la que fue desarrollada por la compañía Sandvik Mining and Construction (SMC) (Restner, 2007), las dos

clasificaciones mencionadas se pueden evidenciar en la Tabla 3. Como se observa ambas utilizan términos similares, como quiera que la segunda es más matizada.

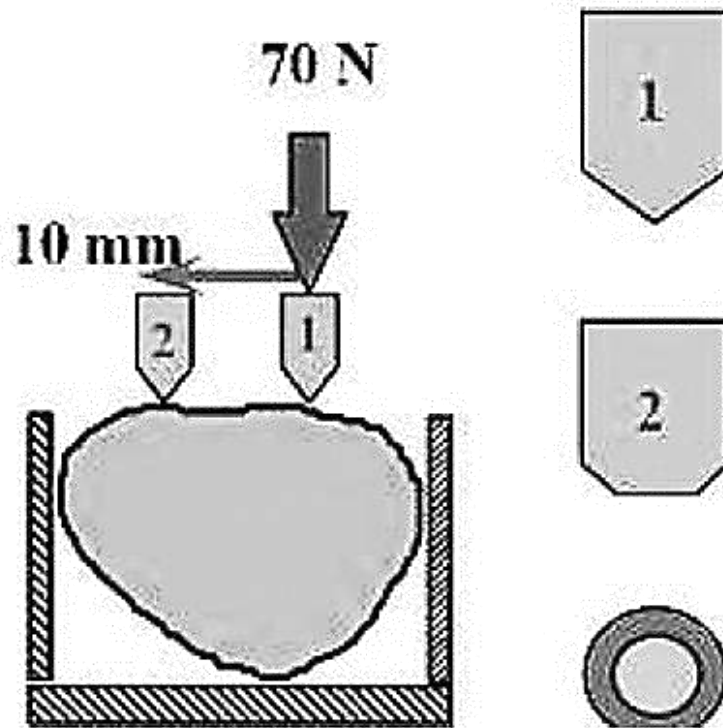


Figura 12. Esquema del ensayo (Mathier, 2002).

Tabla 3. Clasificaciones de Abrasividad en Rocas basadas en el CAI.

Centre d'études et Recherches de Charbonnages de Francia (1971)		Sandvik Mining and Construction (SMC) (2007)	
CAI []	Clasificación	CAI []	Clasificación
0,3 – 0,5	No muy abrasivo	< 0,5	No abrasivo
0,5 – 1,0	Ligeramente abrasivo	0,5 – 1,0	Poco abrasivo
1.0 – 2.0	Abrasividad media	1.0 – 1.3	Moderadamente abrasivo
2.0 – 4.0	Muy abrasivo	1.3 – 1.8	Considerablemente abrasivo
4,0 – 6,0	Extremadamente abrasivo	1,8 – 2,3	Abrasivo
		2.3 – 3.0	Muy abrasivo
		3,0 – 4,5	Altamente abrasivo
		> 4,5	Extremadamente abrasivo

La figura 13 exhibe una de las diversas tablas con las que se dispone en la literatura donde se definen los rangos estimados del índice de abrasividad (CAI), para diferentes tipos de roca.

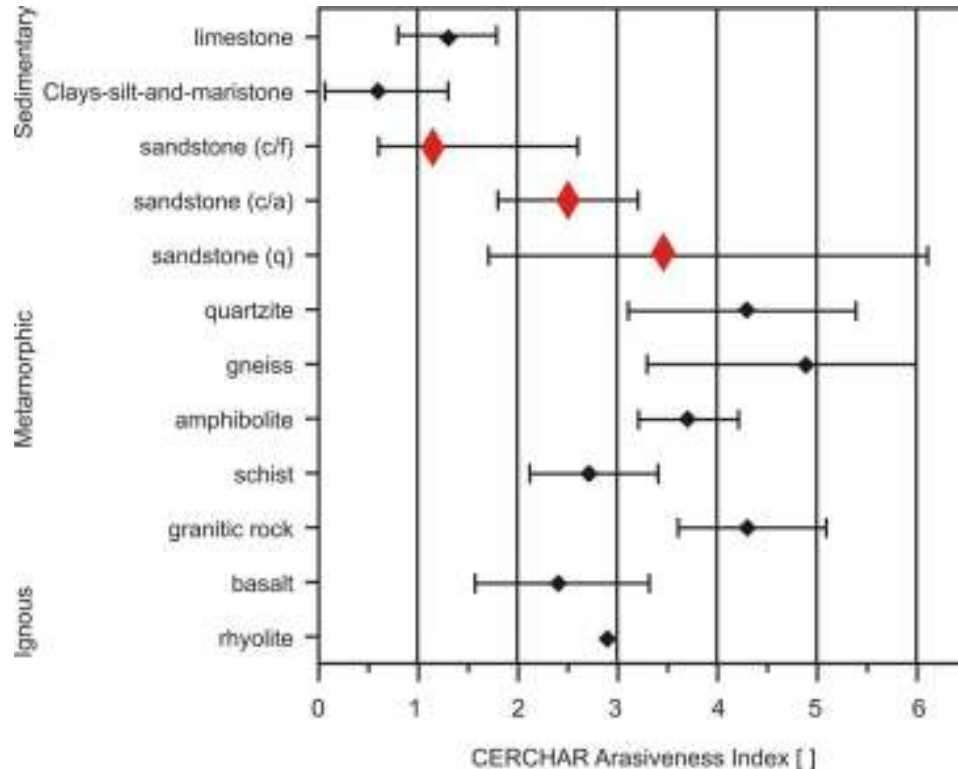


Figura 13. Valores estimados de CAI para distintas rocas. (Plinninger y otros, 2003).

(Plinninger & Thuro, 2004), afirman que la sencillez del principio del ensayo, su bajo precio y las cantidades necesarias de muestra de roca son relativamente pequeñas, esta sería la principal razón para que este ensayo se convierta en el más utilizado ampliamente en la ingeniería de túneles.

Con una historia de aplicación hay muchas experiencias y correlaciones disponibles para comparar los resultados de ensayos con otros índices de desgaste. (Plinninger R. J., 2008).

Cabe anotar, que existen componentes que no están claramente especificados en la norma del (AFNOR, 2000) y por lo tanto son propios del criterio de cada laboratorio, e inclusive del juicio de cada laboratorista que desarrolla el ensayo, estas variaciones están dadas, principalmente en la calidad de la punta de acero, la velocidad del rayado, el número de veces que se practica a la superficie de la muestra, etc.; por tal efecto los resultados obtenidos juegan un papel muy importante.

En consecuencia, el ensayo CERCHAR ha sufrido diferentes cambios a lo largo de su historia.

Así, P.E. Bougard, 1974, alteró el ensayo empleando un material de acero más blando que el planteado por el ensayo Cerchar, a fin de comprender más claramente las diferentes características de las rocas con menor abrasividad. Fueron de gran trascendencia las modificaciones realizadas por la Escuela de Minas de Colorado en el año 1980. En los Estados Unidos este fue el primer laboratorio en adoptar el ensayo.

Sin embargo, West, 1989, ejecutó un gran número de ensayos, para lograr desarrollar una versión propia de equipo, en la que emplearía un acero diferente al utilizado por el Instituto Cerchar Francés ya que el que proponía este Instituto no estaba disponible. Sin embargo West logró representar con su artefacto modificado los mismos resultados en el ensayo CAI en las que empleó muestras de granitos conocidos; no obstante halló valores diferentes en otros ensayos con materiales de superficies rugosas y lisas. En base a los experimentos realizados se dio inicio la empresa de fabricación de este equipo para la realización del ensayo, el cual presentaba una aguja de dureza Rockwell de tan sólo 43, claramente esta modificación fue advertida a los interesados en dichos ensayos.

En la actualidad existe en el mercado tres diferentes tipos de aparatos para la realización del ensayo cerchar, los cuales adoptan los dos tipos de aguja acerada con durezas Rockwell de 56 y la de dureza Rockwell 43, sin mencionar que existen laboratorios que efectúan los ensayos sobre muestras con superficies frescas o con rugosidad y de igual forma hay otros que desarrollan los procesos sobre superficies lisas y pulidas. Las variaciones entre los resultados han sido cuidadosamente exploradas en comparativos estudios.

Según Rostami, 2005, desarrolló un programa para evaluar cuantitativamente la diferencia entre valores obtenidos en una misma muestra, para ensayos Cerchar efectuados en diferentes lugares del mundo. Varios antes se dieron lugar para participar en realización de un estudio conjunto, las entidades que participaron fueron, Escuela de Minas de Colorado (CSM), la Universidad de Ciencia y Tecnología de Noruega (NTNU), el Instituto de Tecnología de Noruega (SINTEF), el Laboratorio de Ensayos Geotécnicos de New Jersey (URS), UK y el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), el motivo que llevó a la realización de estos laboratorios, se dio por que tanto la NTNU como

la URS utilizan la máquina Ergotech con una aguja de dureza Rockwell 43, mientras que CSM y la UPM emplean la aguja con dureza Rockwell 54-56.

Para la realización de los ensayos fueron seleccionadas cuatro tipos de roca estándar en Noruega, las cuales fueron: tonalita, basalto, caliza, cuarcita. De igual manera se remitieron algunas muestras de material de roca metamórficas a tres laboratorios en la ciudad de Nueva York.

Estos ensayos fueron efectuados sobre superficies de caras lisas y rugosas para cada una de las muestras, las cuales fueron llevadas de laboratorio en laboratorio, teniendo sumo cuidado de que fueran las mismas muestras evaluadas en los diferentes laboratorios.

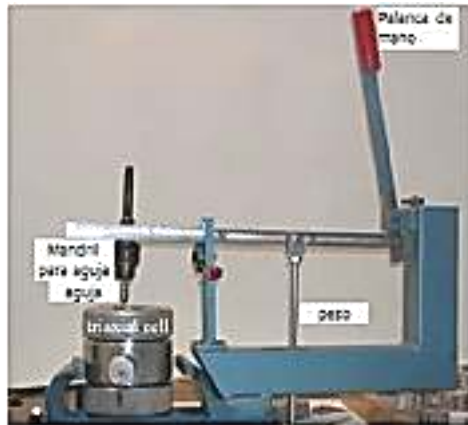
Obteniendo resultados muy distintos en cada laboratorio, por tal razón se vio la necesidad de reintegrar y así unificar los procedimientos del ensayo CAI y su aplicación.

Se pudo demostrar que las superficies intervienen en los resultados de los ensayos dependiendo si esta es rugosa o lisa, para el caso de la superficie rugosa se obtienen valores superiores con respecto a la de superficies lisas.

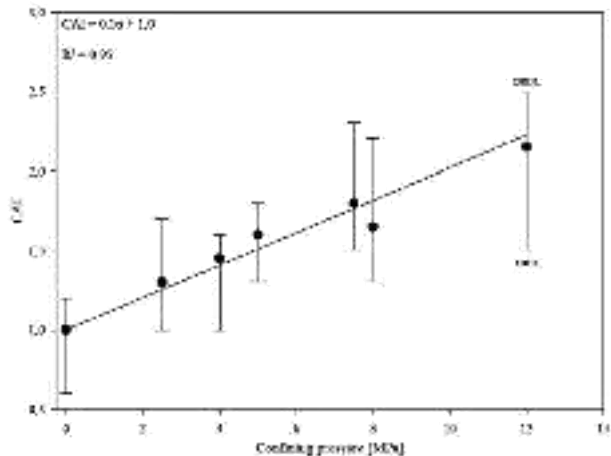
Dichas diferencia tendieron a acrecentar a medida que los ensayos se realizaron en rocas de mayor dureza y mayor abrasividad. Esta diferencia se hizo más notoria en los ensayos en los cuales se empleó agujas con dureza menor, lo cual se considera lógico puesto que las agujas de dureza menor (dR. 43) sufren un desgaste más notorio que las de mayor dureza (dR.56) sobre la misma superficie rugosa. Se obtuvo un efecto de "patinaje" al someter al ensayo la muestra de cuarcita en su superficie lisa.

También se pudo observar que en los laboratorios donde se empleó aguja de dureza Rowell (43), se halló valores de CAI superiores que los laboratorios que utilizaron agujas de dureza Rowell (56), además sus rangos de valor son mayormente dispersos. Estos resultados dejaron evidenciar la importancia de la sensibilidad del operario que efectúa el ensayo, como se demuestra en uno de los laboratorios en los que se realizó el ensayo a menor velocidad, y este reflejó que a movimientos de más lentos de la aguja, mayor fue el valor de la abrasividad (velocidad inversamente proporcional a la abrasividad), para esa ocasión hasta el orden de un 40%. (Ruehl&Alber, 2006), se dieron a la tarea de investigar la relación existente entre el CAI y la presión de confinamiento aplicada a la roca. Según se

ilustra en la figura 14a. Se empleó una celda triaxial tipo Hoek (Hoek & Franklin, (1968), donde se depositó una muestra, la cual fue sometida a diversas presiones la figura 14b. Ilustra la relación de CAI Vs la presión confinada.



a) Aparato CAI+celda triaxial



b) Relación CAI vs Presión de confinamiento

Figura 14a. Cerchar con celda triaxial 14b. Relación CAI Vs Presión de Confinamiento (Ruehl&Alber, 2006).

El aumento de CAI con la presión de confinamiento se expresó como una ecuación lineal

$$CAI\sigma = m\sigma + CAI$$

Donde:

- CAI $\sigma$  = es el índice de abrasividad Cerchar bajo presión de confinamiento  $\sigma$ ,
- m = es la pendiente de la línea recta.
- $\sigma$  =es la carga de la roca en Mpa.

Desde un punto de vista más amplio, no se ha de descuidar que todas las investigaciones mediante CAI caracterizan una matriz rocosa pero no el conjunto de un macizo rocoso, ignorando la presencia y distribución de discontinuidades, su orientación, sentido y espaciamiento en relación con el sentido de corte. (González .P, 2014)

Cabe anotar que la aplicación del ensayo cerchar en el material suelo se ha limitado al ensayo de piezas únicas como es el caso de bolos, aclarando que no posee factibilidad en procedimiento para mezclas de muestras de material suelo o pequeños granos. (Thuro & Käsling, 2009).

La figura 15. Deja evidenciar la correlación empírica existente efectuada por (Plinninger & Thuro, 2004) en las cuales intervienen el CAI del ensayo de abrasividad Cerchar y el Índice RAI para rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, como se observa la dispersión es muy elevada.

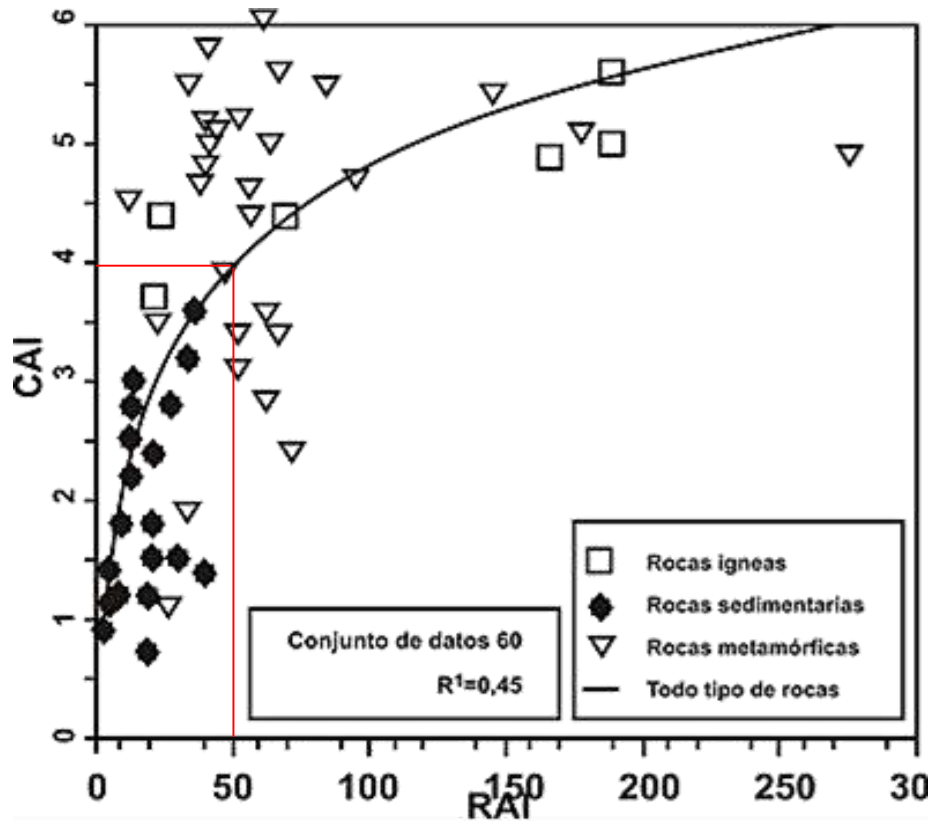


Figura 15. Correlación empírica entre CAI y RAI. (Plinninger & Thuro, 2004).

### Caracterización de Abrasividad según el Modelo “NTNU”

La Universidad de Trondheim (NTNU), en su instituto tecnológico noruego, Laboratorio de Ingeniería Geológica realizó un método para valorar la perforabilidad a percusión de las rocas

Por otra parte Lien, 1961, el cual Consiste en la elaboración de un numero de ensayos en el laboratorio que permitan determinar diferentes índices, los cuales serán correlacionados mediante la utilización de ábacos. Desde el año 1980 estos estudios se han adelantado primordialmente para pronosticar el rendimiento que podría tener una TBM desarrollando actividades en material de roca dura. La ejecución de la metodología NTNU opta por una muestra de 15 a 20kg con la cual se efectúan pruebas de laboratorio tales como:

El ensayo de Friabilidad, o S20. (N. von Matern y A. Hjelmér en 1942), en Suecia propusieron el ensayo de Friabilidad o S20, el cual fue sometido a varias modificaciones, hasta que en el año de 1950 fue adoptado para la determinación de la fragmentabilidad, haciendo parte de la método NTNU (Dahl F, 2003), (Dahl, Grøv, & Breivik, 2007).

El mismo está sustentado en tomar una muestra representativa de 500g percibida entre los tamices 11,2 y 16mm, la muestra es sometida a 20 impactos sucesivos de una pesa de 14kg que se deja caer desde una altura de 25cm, el proceso se repite de 3 a 4 veces y se toma el valor medio del porcentaje de muestra < de 11,2mm, denominado S20.

Ensayo de perforación Sievers o SJ, (Sievers, 1950). En este ensayo una broca de 8,5mm de diámetro y 110° de ángulo de Bisel, sometida a un empuje sobre la roca de 20kg y haciéndola girar 200 rpm, efectuando de 4 a 8 perforaciones para cada probeta. El valor SJ es la longitud media de los taladros, expresada en décimas de mm. Sus esquemas se evidencian en las figuras 16., 17:

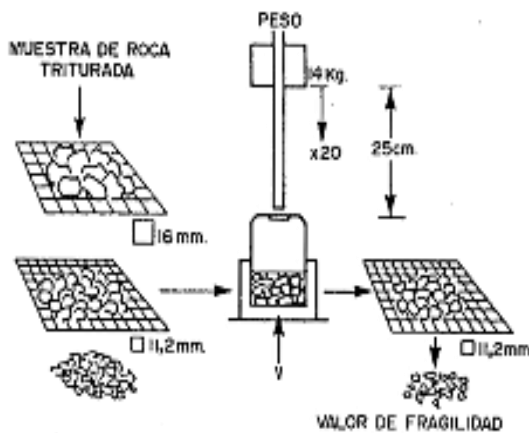


Figura 16. Ensayo de friabilidad S20 (Filip, 2003).

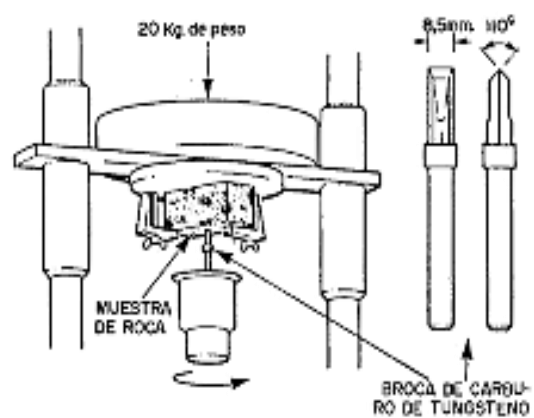


Figura 17. Ensayo de Perforabilidad SJ (Dahl, et al., 2007).

El índice de perforabilidad D.R.I. (Drilling Rate Index). El índice de tasa de perforación (D.R.I) del material roca es determinado a partir de los valores expuestos por S20 y SJ mediante el ábaco que se evidencia en la figura 18. El D.R.I. sustenta una coincidencia con el valor de friabilidad S20 cuando el valor de

SJ es igual a 10, dicho valor es típico para materiales de granitos o sienitas cuarcíticas.

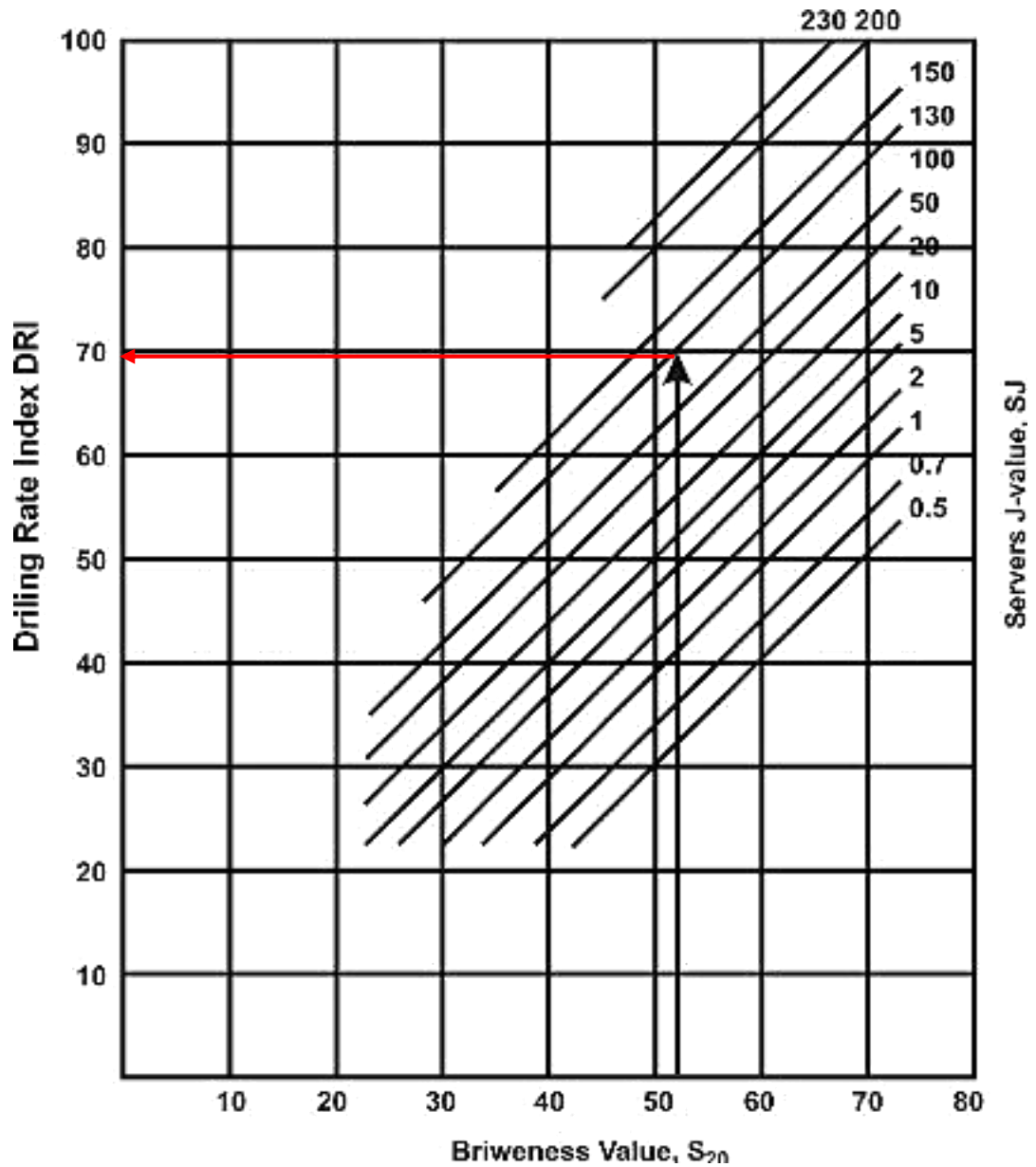


Figura 18. Abaco de Cálculo del D.R.I. (Bruland, 1998).

Ensayo AVS (AbrasionValue Steel) este ensayo fue desarrollado en el departamento de geología de la universidad de NTH entre los años 1958 y 1961 por Lien, R y Selmer-Olsen, R. (Dahl F., 2003) (Lien, 1961).

Este consiste en hacer pasar roca triturada a menos de 1mm, sobre un disco de acero, bajo una pieza de igualmente material acerado la cual es sometida a un empuje de 10kN durante 1 minuto y a 20 revoluciones por minuto. El esquema de ensayo se muestra en la figura 19.

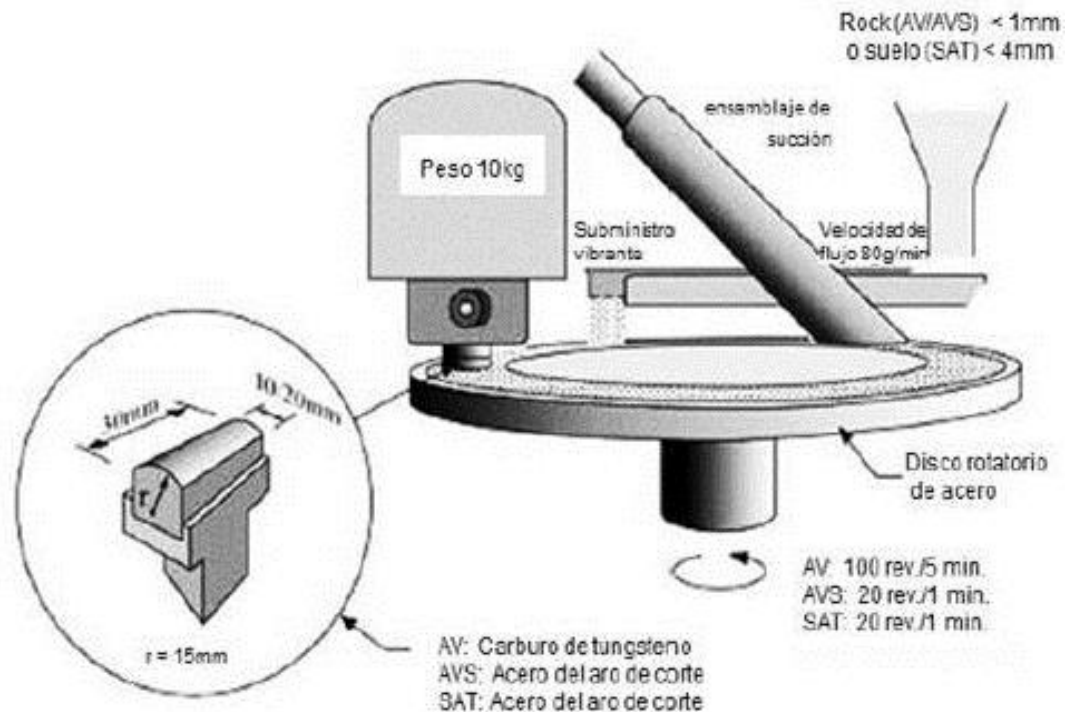


Figura 19. Esquema de ensayos de abrasividad AV y AVS del NTNU. (Nielsen B., 2006).

La muestra de acero se extrae de un disco de corte. El valor de AVS es el valor promedio de 2 a 4 medidas de la pérdida de peso en mg de la muestra de acero ensayada. Con los valores de SJ y AVS se determina el Cutter Live Index (CLI) que expresa el tiempo de vida de servicio del acero constituyente de un disco de corte:

$$CLI = 13,84 \left( \frac{S_j}{V_S} \right)^{0,3847}$$

Se puede analizar los valores de los rangos de CLI, para las diferentes rocas sometidas al ensayo que proceden de perforaciones realizadas en túneles en Noruega en trabajos ejecutados por (Movinkel T, 1986). En la figura 20 se encuentran los valores orientativos para los diferentes tipos de rocas.

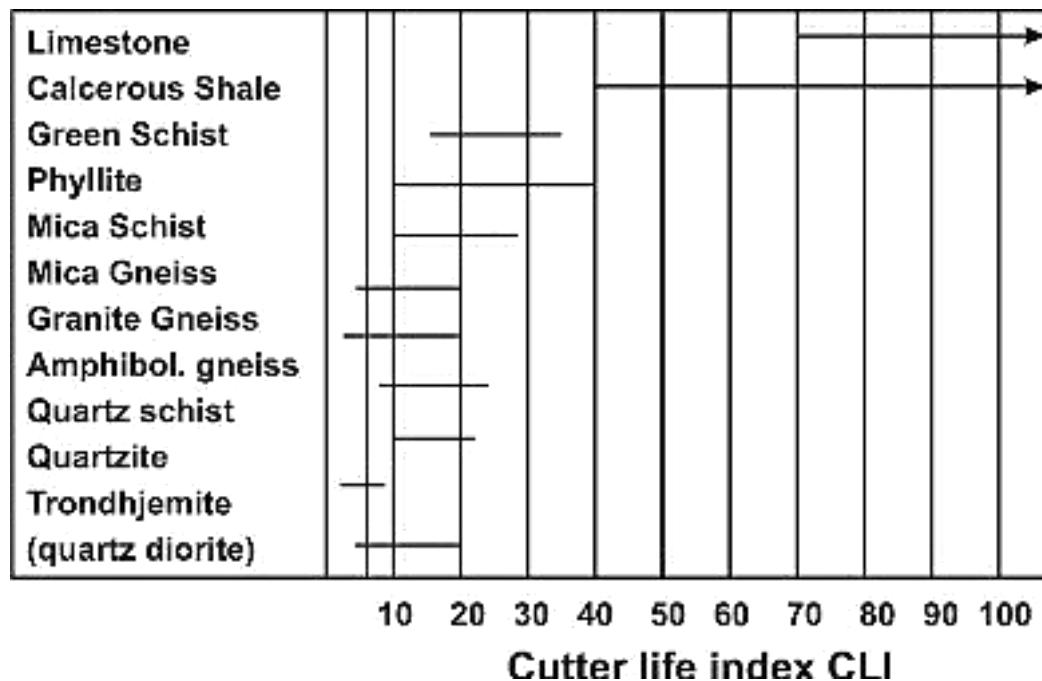


Figura 20. Valores orientativos de CLI para distintos tipos de rocas. (Johannessen, 1986).

El equipo que determina los ensayos de AVS (valor de abrasividad del acero) y AV. Para el último ensayo la pieza de metal de carburo de tungsteno es de una pica, el que es sometido a desgaste, reemplazando el acero del aro del disco de corte empleado en el ensayo AVS. AV es calculado como la media de 2 a 4 determinaciones del valor obtenido de la pérdida de peso del material, en mg, tras someterla durante 5 min a 100 Rpm sobre una muestra de polvo de roca triturada. (Nielsen B., 2006).

Bit WearIndex (BWI). El índice de desgaste de Bit, se evalúa a partir de los valores de DRI y AV, utilizando el ábaco ilustrado en la figura 22, después de la realización de ensayos a 200 muestras extraídas de la zona de Escandinavia, es sugerido el ábaco en mención. (Lien, 1969) como se puede observar en la figura 21., Luego Bruland, 1998 presenta la relación entre BWI y AV, lo que da origen al diagrama de doble entrada de la figura 22.

BWI refleja la vida útil de la picas en los metros de perforación. (Dahl F, 2003), pero no parece haber sido desarrollado más que en la literatura.

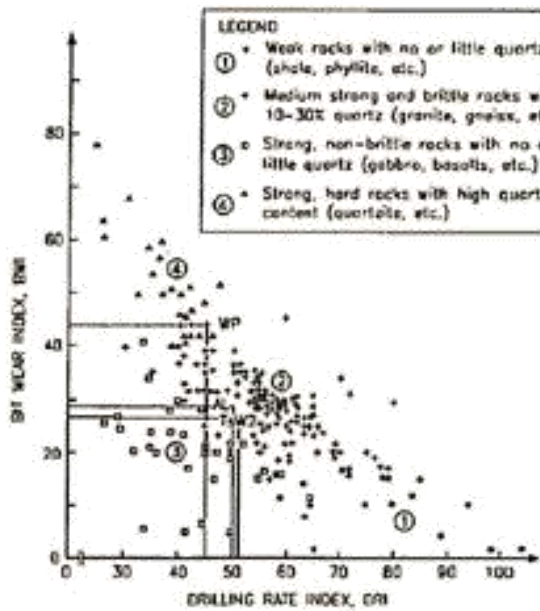


Figura 21. BWI vs DRI resultados experimentales. (Ozdemir&Nilsen, 1993).

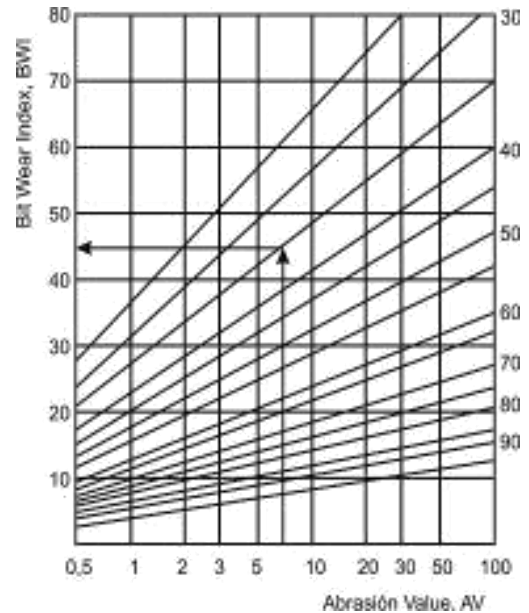


Figura 22. Ábaco de Cálculo del B.W.I. (Bruland, 1998).

En la actualidad no es empleado el número (BW<sub>i</sub>), en su remplazo se utiliza el número (VHNR) explicado anteriormente, así lo aseveró Bruland en su reporte 13a-98. posteriormente, (Zare & Bruland, 2007) expusieron una escala cualitativa aplicada en método de excavación convencional de perforación y voladura en la que se define la aptitud del macizo rocoso para ser intervenido con procesos de voladura y esto en función de los valores medios entre el DRI y VHNR, ilustrados en la tabla 4:

Tabla 4. Clasificación cualitativa de la Rocas basadas en DRI y VHNR.

Condición	Buena	Media	Mala
Aptitud del Macizo	Buena	Media	Mala
Blastability index, SPR	0.38	0.47	0.56
DRI	65	49	35
CHNR	250	550	850

La síntesis de los valores AV/AVS enuncian los desgastes experimentados por una pieza de carburo de tungsteno o el acero de un disco de corte, respectivamente, al ser sometido a la abrasividad que es ocasionada por un polvo de roca triturada. (Nielsen, Dahl, & Holzhäuser, 2006) y, estos combinados con las medidas de perforabilidad (SJ) o friabilidad (S<sub>20</sub>) que permiten establecer los

índices BWI/CLI los que son relacionados directamente con la vida útil de las herramientas con la utilización de nuevos ábacos como el de la figura 23. De igual modo estos resultados sirven para la predicción de rendimientos de TBM. Por medio de un modelo avanzado en NTNU, son el factor atrayente de este método.

La metodología presenta dos inconvenientes de priorización: en primer lugar se precisa que la realización de los ensayos sea con equipos especializados, y en segundo lugar se requiere que el tamaño de la muestra sea relativamente grande para poder realizar todos los ensayos que se requiera.

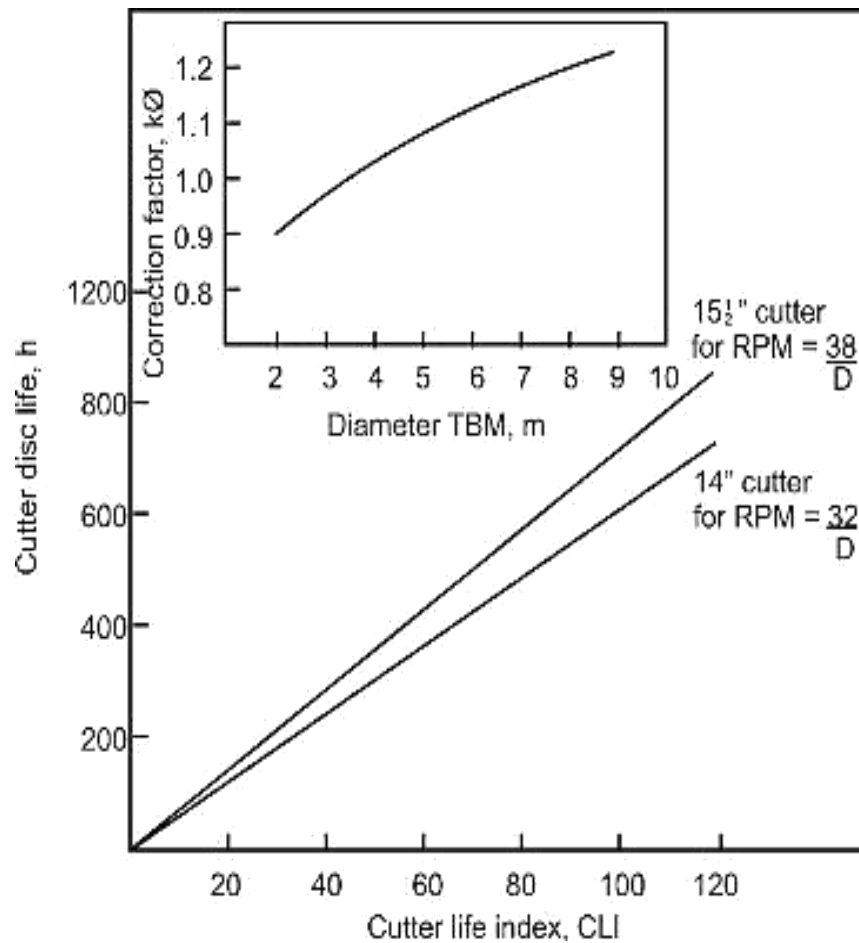


Figura 23. Ábaco de vida útil de discos de corte vs CLI. (Movinkel T, 1986).

Últimamente se ha avanzado una variable del AV/AVS en el estudio para los suelos, el NTNU Soil Abrasion Test (SAT) que cotejado con el AVS se ha transformado en solo un detalle: que en lugar de utilizar polvo de roca triturada a < 1mm se emplea una muestra de suelo tamizada a < 4mm. Primeramente se elaboró

el ensayo con una muestra de suelo el cual presentaba tamaños ligeramente superiores a 1mm fueron (Nielsen, Dahl, &Holzhäuser, 2006), se presentó un inconveniente, el ancho de la pieza metálica impedía el paso del geomaterial, por tal motiva el ensayo era un fracaso porque el material se atascaba, por lo que los mismos investigadores modificaron las piezas de ensayo como se refleja en la figura 25, donde la pieza metálica es sometida al cambio de ensanchamiento de 10 a 20mm, esta modificación permite trabajar con material de suelo con grano mayor como son las arenas pero sólo hasta un tamaño de 4mm figura 24, muestra la pieza original, y la figura 25 enseña la nueva pieza SAT adaptado de (Nielsen, Dahl, & Holzhäuser, 2007).

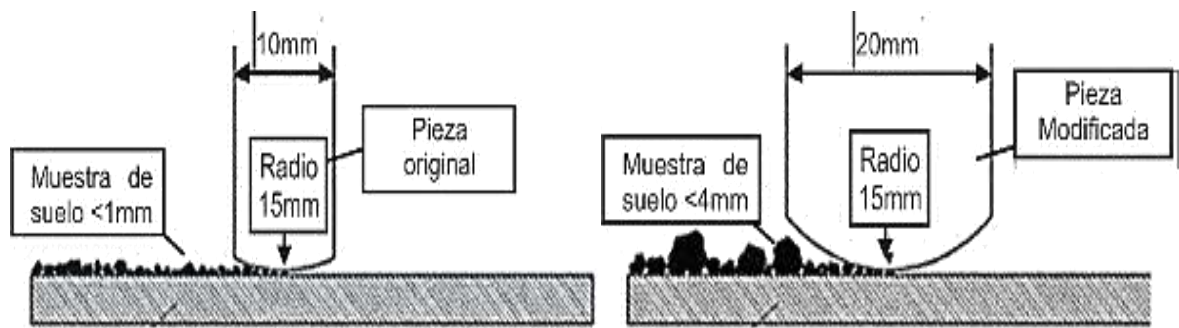


Figura 24. Pieza original.

Figura 25. Pieza original, SAT. Adaptado de (Nielsen B., 2007).

Inicialmente la muestra se debe prepara primero mediante la desintegración con un martillo de dureza blanda, posteriormente mediante un proceso de molienda en un recipiente en el que son colocadas bolas de acero y si fuere necesario se recurre a una tercera metodología la cual permite pasar la muestra del material suelo por una trituradora, todo lo anterior con el propósito de lograr el tamaño ideal del grano < 4mm. La determinación del valor de SAT se realiza como se describe el AVS en la figura 19., y para calcular el valor de SAT se efectúa con la medida de los valores de la pérdida de peso en mg obtenidos de 2 a 4 ensayos paralelos, los cuales no deberían tener una desviación mayor de 5 unidades.

Este ensayo ha dejado una experiencia limitada (Nielsen, Dahl, &Holzhäuser, 2007).La figura 26 procura resumir la interacción entre ábacos y los ensayos de laboratorio que compone la metodología que permite el desarrollo de sus variados índices.

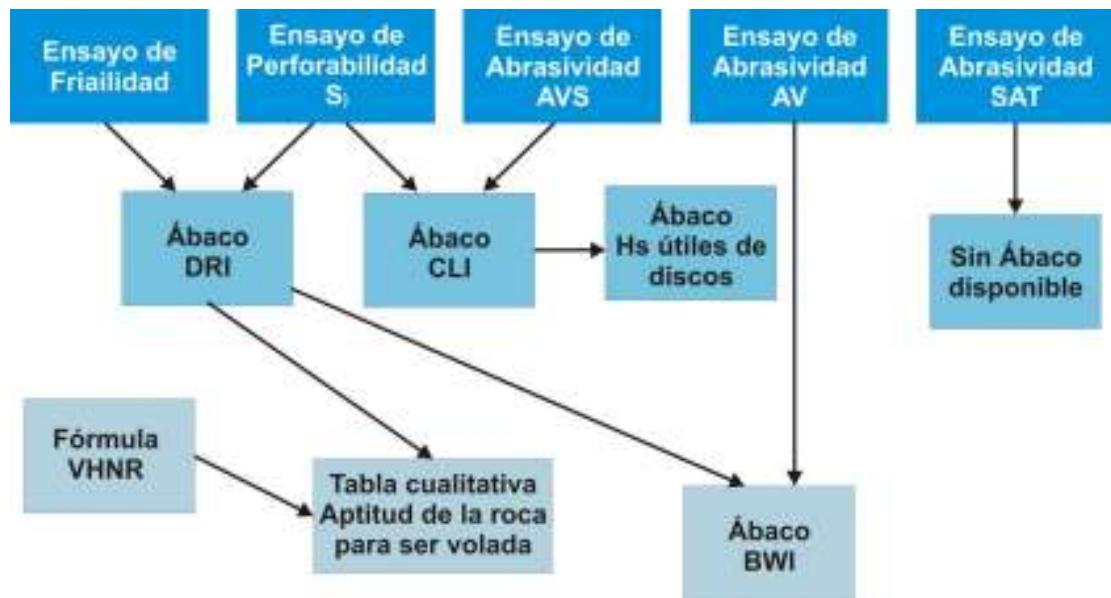


Figura 26. Síntesis de ensayos, ábacos e índices para el método NTNU.

### ENSAYO ABRASIVIDAD LCPC “BROYABILITÉ”

Fue realizado un ensayo LCPC y desarrollado en Francia en 1970 por el prestigioso Laboratoire Central de Ponts et Chaussées para investigar y clasificar la abrasividad de roca triturada, en la figura 27 se observa el aparato ensayo LCPC.



Figura 27. Aparato de ensayo LCPC (Mathier, 2002).

El ensayo se denomina “Broyabilité” se realizó bajo La Norma Francesa (AFNOR, 1990) se describe el aparato de ensayo LCPC, el cual, se conoce con el nombre de "abrasímetro". El abrasímetro posee un motor de 750W de potencia y un eje que soporta una paleta metálica que rota durante 5 minutos a una velocidad

de 4500 rpm dentro en una vasija cilíndrica en la cual se depositan las partículas del material granular a través de un embudo. La paleta metálica es un rectángulo con dimensiones 50 x 25 x 5mm y está hecha de acero estandarizado con dureza Rockwell B60-75; esta paleta de acero se cambia al finalizar cada ensayo.

Por normativa, la muestra de material granular debe secarse al aire y ha de pesar  $500g \pm 2$ .

El estado natural del material granular, se debe molerse previamente a la fracción entre 4 y 6,3mm, luego debe tamizarse hasta conseguir  $500 \pm 2g$  de esa fracción del material. La pérdida del material de acero de la paleta metálica se debe a la resistencia del material granular sometido a la rotación en la vasija, por lo que cuanto más abrasiva sea la muestra, mayor será la pérdida de material. Para la determinación de la abrasividad, la paleta metálica ha de ser pesada antes y después del ensayo. La pérdida de peso de la paleta metálica es una medida de la abrasividad de la muestra ensayada.

La definición de Coeficiente de Abrasividad LCPC (LAC o Abr) al cociente de la pérdida de masa de la paleta metálica por la masa del suelo (500g):

$$Abr = (m_0 - m) / M$$

Dónde:

$m_0$  = masa de la paleta metálica antes del ensayo en [g],

$m$  = masa de la paleta metálica después del ensayo [g],

$M$  = masa de la muestra = 500g, expresado en toneladas (=0,0005t).

Los expuesto por Thuro, Singer, Käsling, & Bauer, 2006 la variación de este coeficiente es entre 0 y 2000g/t para roca natural y para suelo. Existen dos clasificaciones de abrasividad a partir del valor LAC o también llamado valor Abr propuestas en la literatura. El investigador Büchi, Mathier, & Wyss en 1995 presentan la primera clasificación, en Munich de 2006 fue presentada la segunda clasificación en el cual se responde a un esquema desarrollado, ambas clasificaciones se recogen en la tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de Abrasividad en Rocas a partir del Índice LAC o Abrasión.

(Büchi, Mather, & Wyss, 1995)		TUM (2006)	
Abr (g/t)	Clasificación	Abr (g/t)	Clasificación
<500	Muy baja abrasividad	0 – 50	No abrasivo
500 – 1000	Baja abrasividad	50 – 100	Ligeramente abrasivo
1000 – 1500	Abrasividad media	100 – 250	Poco abrasivo
1500 - 2000	Alta abrasividad	250 – 500	Abrasivo
> 2000	Muy alta abrasividad	500 – 1250	Muy abrasivo
		1250 – 2000	Extremadamente abrasivo

Fuente: Rendimiento, desgaste ya abrasividad en excavación... (González, p, 2014).

Se establece la determinación de un segundo coeficiente bajo la norma AFNOR – 1990, que se obtiene a partir del análisis granulométrico antes y después del ensayo sobre la muestra de material triturado. Se denomina Br (o, más tarde LBC) y se calcula como:

Dónde m es la masa de las partículas inferiores a 1,6mm, generadas luego del ensayo de abrasividad, expresadas en g y M es la masa inicial de la muestra 500g. A este coeficiente se le ha denominado también LCPC Breakability Coeficient (LBC). Investigadores como Thuro y otros en el 2006, en el intento de respetar la granulometría natural de una muestra de suelo y no tener que triturar la fracción gruesa – aspecto problemático, como se indica a continuación, algunos investigadores han propuesto modificar el ensayo empleando vasijas de 1m de diámetro capaces de admitir muestras de suelo de 63mm para lo que corresponde unas dimensiones de la paleta metálica de 50 x 25 x 5cm.

Evidentemente este cambio encarece mucho el ensayo de Thuro, Singer, Käsling & Bauer, 2006. La norma francesa describe solamente el aparato de ensayo y los procedimientos vinculados a éste, pero no se prescribe el manejo o preparación de la muestra de ensayo. Una descripción del tratamiento de la muestra, si se trabaja con roca se da en Büchi, Mathier, & Wyss en 1995 y, si se trata de suelo en Thuro, Singer, Käsling, & Bauer, 2006.

La norma prescribe que la muestra de suelo o roca se ha de reducir a material granular pero no describe la metodología para conseguir esta reducción, luego se ha de tamizar y separar la fracción comprendida entre 4 a 6,3mm mientras que las fracciones inferior a 4mm y superior a 6,3mm son descartadas. Sin embargo los

autores citados analizan los resultados que se obtienen si no se descartan estas fracciones.

Por otra parte, Thuro, Singer, Käsling, & Bauer en 2006, presentaron algunas recomendaciones sobre la preparación de las muestras que se resume a continuación:

- ◆ Ensayos con muestras de suelo completas desde el punto de vista de la granulometría, es decir, que incluye fracciones superiores a 6,3mm e inferiores a 4mm, la cual nos darán valores representativos de todos los tamaños de grano, incluso de muestras constituidas por mezclas de suelos.
- ◆ Ensayos de fracciones de muestras de suelo como por ejemplo 4/8, 8/16, 16/32, 32/64, >64mm, nos darán un valor de abrasividad de cada fracción. La suma ponderada de estos valores nos lleva a un valor de abrasividad de la muestra total.

Según las investigaciones realizadas por los autores Käsling & Thuro, (2010) & Thuro K, Singer, Käsling & Bauer (2006) emplearon la muestra completa, encontrando útil el siguiente procedimiento: después de tamizar toda la muestra, la fracción de grano por encima de 6,3mm se tritura, hasta conseguir que este material consiga un tamaño menor al de 6,3mm. La angulosidad de los granos molidos representa más o menos la anterior granulometría, compensando un mayor tamaño de grano por un aumento de angulosidad de tamaños triturados.

Esto implica, por supuesto, un cambio básico de la composición natural del suelo. Finalmente el resultado del ensayo se puede considerar representativo de la distribución original del grano y se acerca a la muestra original. El ensayo con las distintas fracciones por separado fue realizado por Thuro, Singer, Käsling, & Bauer, (2006) tras la granulometría y el análisis petrográfico de la muestra completa, la grava gruesa fue separada en fracciones de 4/16mm, 16/32mm, 32/64mm y >64mm. Las 4 muestras fueron preparadas para conseguir que el material esté por debajo del tamaño 6,3mm.

Seguidamente, llevaron a cabo 4 ensayos LCPC. A partir de esta experiencia comentaron que para conseguir 4 muestras de 500g cada una, se contó con un total de 2 a 2,5kg de muestra de cada fracción, sin embargo, sumado al resto de ensayos realizados, ellos recomendaron partir de 20kg de muestra entera con todos los tamaños. Büchi, Mathier, & Wyss, (1995) realizaron un trabajo de comparación entre los resultados de los ensayos LCPC y Cerchar para evaluar la abrasividad

en rocas y suelos. Solamente el ensayo LCPC les permitió ensayar mezclas de suelo conteniendo diferentes tamaños de grano y por lo tanto más adecuadas y representativas muestras de suelo, en la figura 28 se muestra la correlación empírica de CAI con Abr (o LAC) del ensayo LCPC.

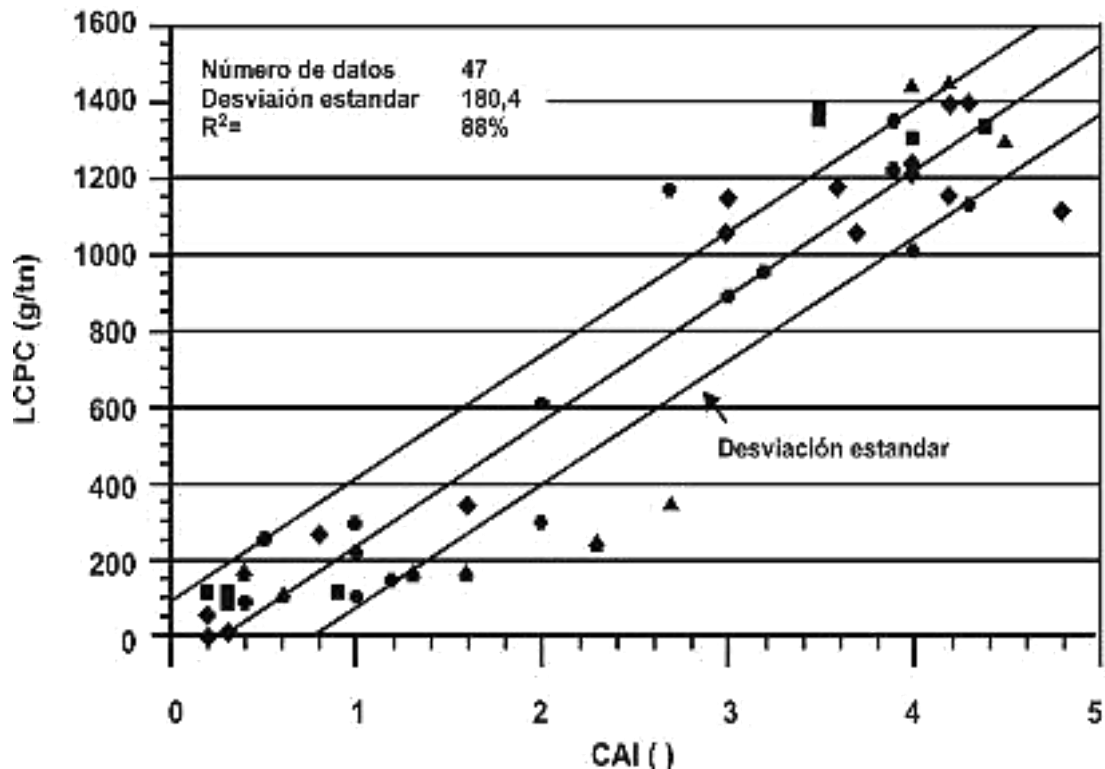


Figura 28. Correlación empírica entre CAI y LCPC. Plinninger & Thuro, 2004.

Dentro de este marco de normas Thuro, Singer, Käsling, & Bauer en el 2006, propusieron una correlación lineal entre los valores de CAI y Abr, relacionando además las escalas de abrasividad basadas en Abr la propuesta por TUM en (2006) y en CAI la propuesta por Centre d'etudes et Recherches de Charbonnages de Francia (1971), como se muestra en la tabla 6.

A partir de este trabajo, los autores Thuro K., Singer, Käsling, & Bauer en 2007 recomiendan el empleo de la segunda clasificación de Abr TUM (2006) en vez de la original de Büchi, Mathier, & Wyss en 1995, debido a que no hallaron una conexión entre la escala original de Büchi, Mathier, & Wyss en 1995, y la escala de CAI. Además, recientemente Käsling en 2013, afirma la invalidez de dicha comparación debido a veracidad que actualmente perturban los valores de CAI.

Tabla 6. Correlación entre LAC y CAI.

Abr (g/t)	CAI (0,1mm)	Clasificación de Abrasividad	Clasificación
0 – 50	0,0 – 0,3	No abrasivo	Material orgánico
50 – 100	0,3 – 0,5	No muy abrasivo	Arcillitas, margas
100 – 250	0,5 – 1,0	Ligeramente abrasivo	Pizarras, calizas
250 – 500	1,0 – 2,0	Abrasividad media	Esquistos, areniscas
500 – 1250	2,0 – 4,0	Muy abrasivo	Basalto, arenisca cuarcita
1250 – 2000	4,0 – 6,0	Extremadamente abrasivo	Cuarcita, amfiolita

En cuanto a la medida de fragmentación del material, LBC, tiene un rango entre 0 y 100%, que puede ser dividido en 5 clases, como se aprecia en la tabla 7.

Tabla 7. Clasificación según el LBC.

LBC (%)	Clasificación de rotura
0 -25	Muy baja
25 – 50	Baja
50 – 75	Media
75 – 100	Alta
>100	Muy alta

Asimismo, Thuro K., Singer, Käsling, & Bauer en el año 2006, representaron los valores del coeficiente Abr de LCPC en función del valor D50 que es el tamaño de la muestra original en la fracción retenida que corresponda al 50% en peso en la curva granulométrica, obtenido para distintos tipos de suelo y diferentes tamaños de grano, en ese mismo contexto Thuro & Käsling, 2009, completaron el diagrama propuesto en 2006 para diámetro D50, y finalmente en el año 2010 presentaron el diagrama que se ilustra en la figura 29.

En él se relacionan el diámetro promedio de los granos expresado como el D50 en mm versus el valor de Abr en g/t obtenido del ensayo de la muestra correspondiente. Se ensayaron diferentes tipos de suelos para obtener las distintas curvas representadas en el diagrama.

Los valores de CAI que aparecen en el gráfico se obtuvieron mediante las respectivas determinaciones en cada tipo de muestra. La utilidad de un diagrama semejante es que conociendo el tipo de suelo y su granulometría se puede tener una idea estimada de la abrasividad del mismo.

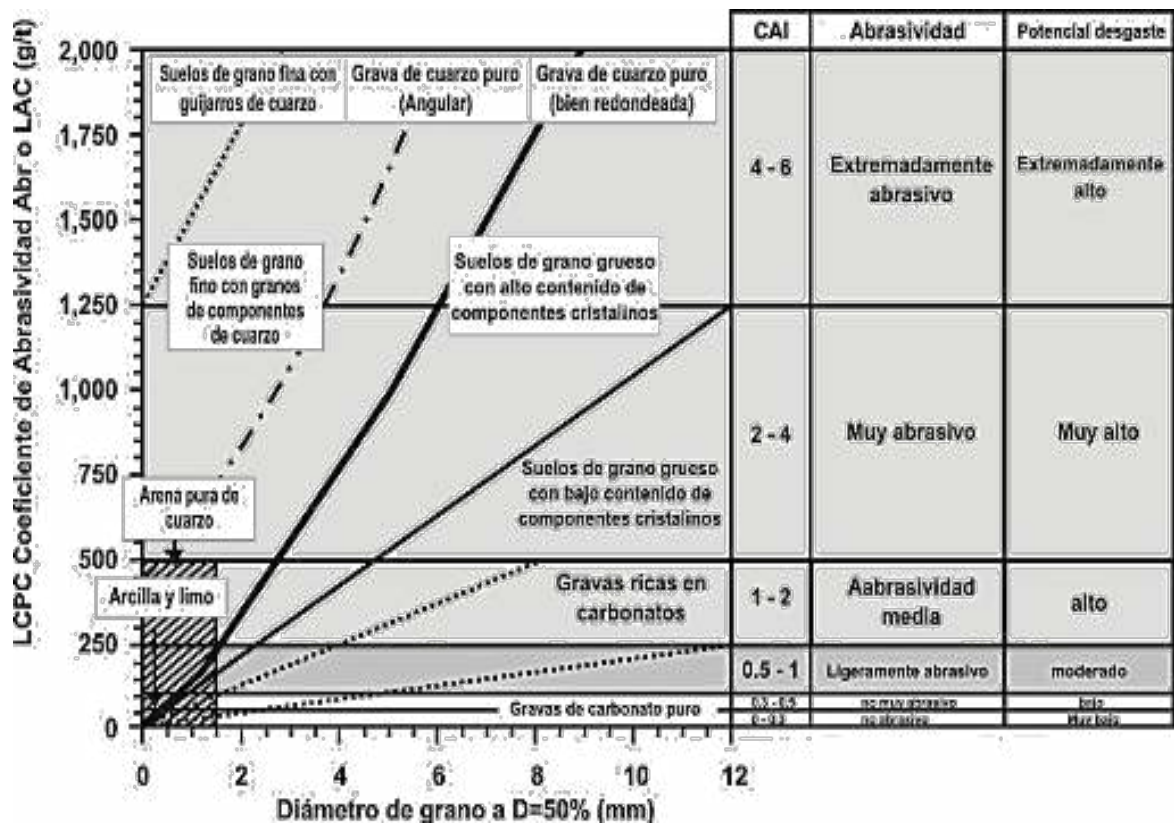


Figura 29. Diagramas de clasificación de la abrasividad del suelo. ConD = 50% (Käsling & Thuro, 2010).

En el análisis de la figura arroja como resultado que los materiales ricos en carbonatos dan un rango bajo en abrasividad independiente del tamaño del grano, por el contrario, los materiales silíceos, sobre todo con granos angulosos muestran una dependencia significativa del índice con el tamaño del grano. En resumen, hay una influencia clara con la forma del grano y el diámetro de las partículas de suelo original, a pesar de que se haya sometido a las muestras al proceso de molienda para alcanzar su tamaño inferior a 6,3mm.

En tal sentido en los factores con incidencia sobre LBC, es relevante la figura 30, que enseña las curvas granulométricas de dos muestras, una de caliza y la otra de cuarzo, antes y después del ensayo LCPC. El proceso de rotura durante el ensayo es evidente por la cantidad de finos generados, y el valor de LBC el cual es más alto en la muestra de cuarzo. Se observa, no obstante, que ambas muestras generan una fracción fina de tamaño semejante. El cuarzo resulta en una curva mejor graduada que la caliza.

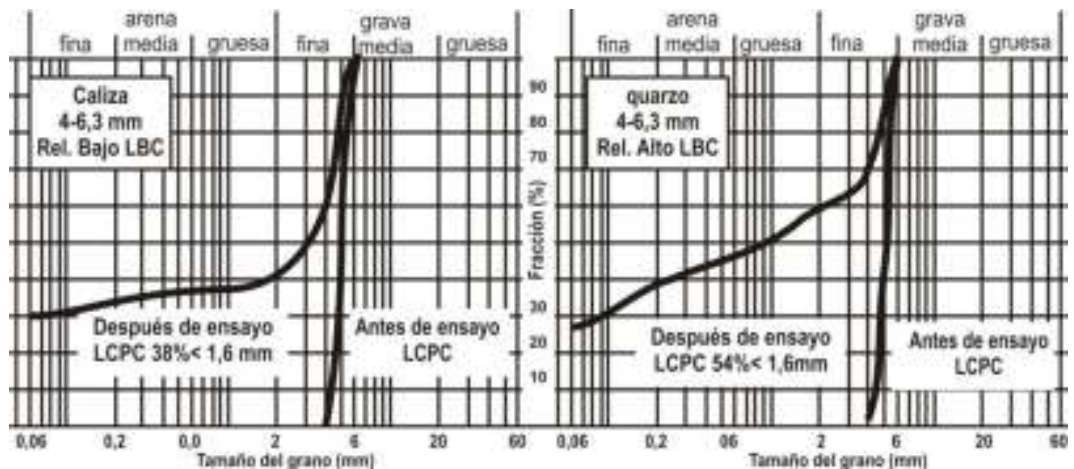


Figura 30. Curvas granulométricas antes y después del ensayo para materiales con bajo y alto contenido de minerales abrasivos. (Thuro, Singer, Käsling, & Bauer, 2006).

También describen que las curvas granulométricas antes y después del ensayo para materiales con bajo y alto contenido de minerales abrasivos. Se ilustra en la figura 31 y 32 La influencia de la granulometría original en las que se representan resultados del ensayo sobre dos muestras, una de grava y otra de arena, incluyendo curvas granulométricas inicial y final, sus minerales componentes y los coeficientes Abrasión o LAC y LBC del ensayo LCPC. Tanto la grava como la arena se han ensayado empleando la muestra entera y moliendo los granos  $> 6,3\text{mm}$  por lo que el tamaño de las muestras iba de 0 a  $6,3\text{mm}$ . De estas gráficas se deduce que en suelo la abrasión granular se produce sobre todo en el material granular grueso tal como gravas y no tanto en arenas.

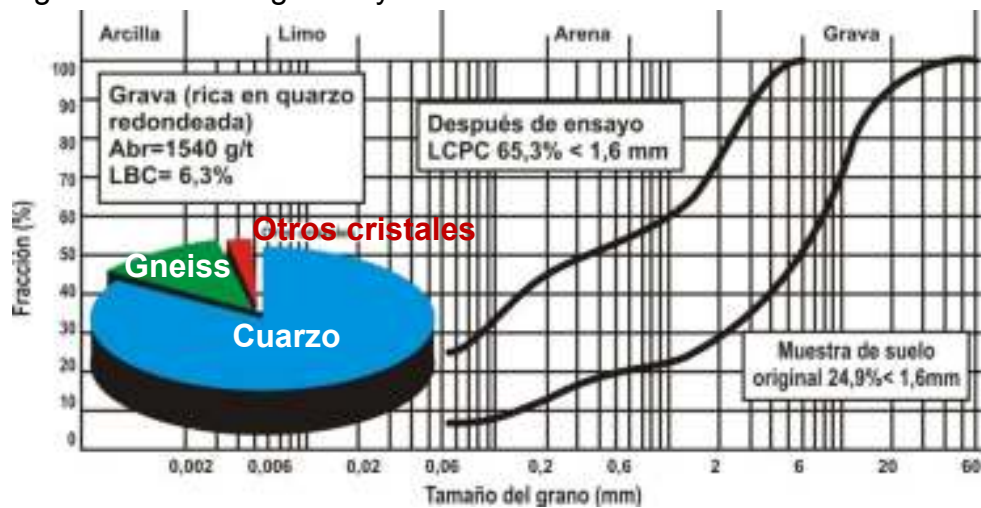


Figura 31. La curva granulométrica antes y después del ensayo LCPC, muestra con partículas redondeadas y con alto contenido de cuarzo.

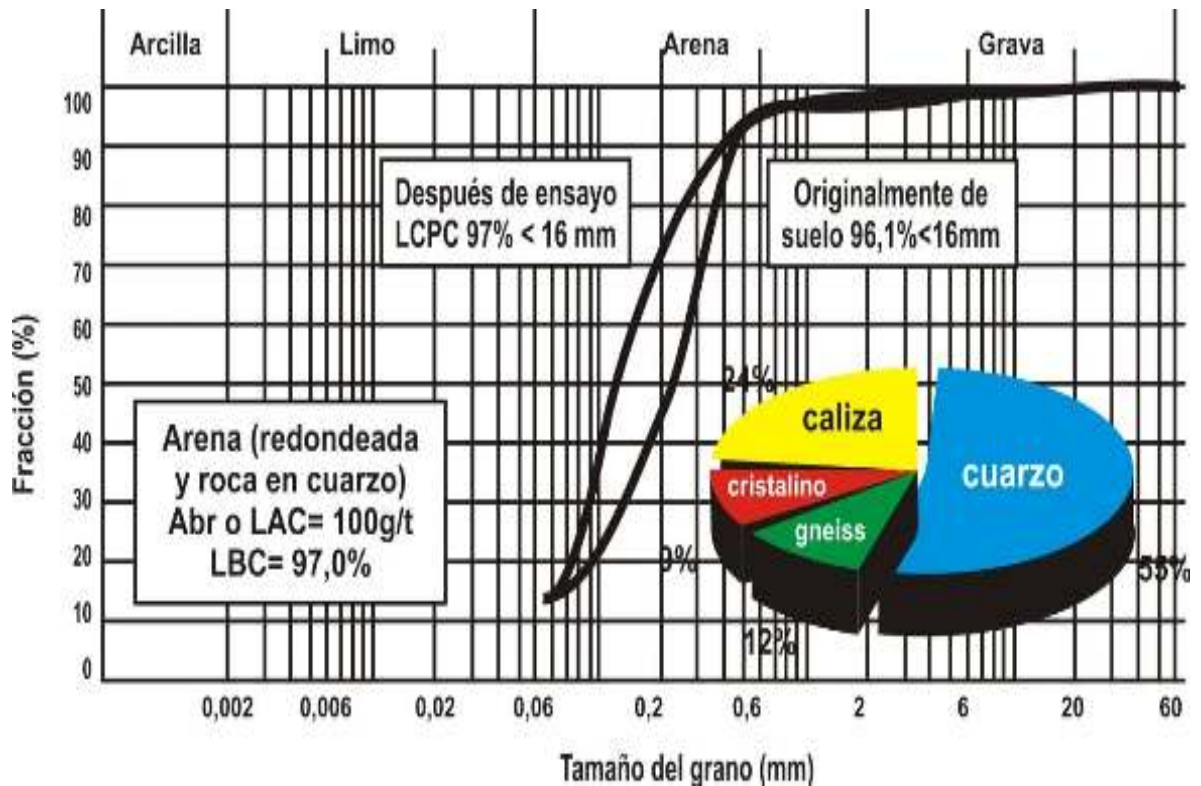


Figura 32. Curva granulométrica antes y después del ensayo LCPC, muestra con partículas redondeadas y con alto contenido de cuarzo. (Thuro, Singer, Käsling, & Bauer, 2006).

Seguidamente para la aplicación en roca dura algunos autores como Ewendt en 1989 ó Plinninger & Thuro en 2002, no están de acuerdo con el principio de ensayo LCPC como no adecuado para predecir el desgaste de herramientas en excavaciones principalmente porque algunas de las más importantes propiedades de la roca se destruyen durante la preparación de la muestra y por lo tanto se ignoran en la determinación del índice de abrasividad en la tabla 8.

A pesar de esto, en la última década se viene usando este ensayo con mayor frecuencia, si bien, no hay todavía estudios disponibles en los que se haya examinado con datos de obra el valor predictivo de los valores índices obtenidos en este ensayo.

Tabla 8. Crítica del ensayo LCPC. (Plinninger & Thuro, 2002).

<b>Parámetro del Suelo</b>	<b>Impacto del parámetro considerado</b>	<b>Decripción</b>
Dureza Y abrasividad del grano		
Tamaño del grano absoluto y distribución del tamaño del grano	Mayoritriamente ignorada	Los materiales < de 4mm son descartados, material > 6,3mm es molido a la fracción 4-6,3mm.
Forma y redondez del grano	Mayoritriamente ignorada	Solamente las partículas de gravafina (4-6mm) son ensayadas en forma original, el material más grueso es triturado y por tanto se ensaya con una forma angulosa.
Cohesión y ángulo de fricción del suelo	Mayoritriamente ignorada	La muestra original es destruida durante su preparación.
Densidad natural del suelo	Ignorada	Cambia significativamente durante el muestreo y la preparación de la muestra.
Contenido de agua natural	Ignorada	Cambia significativamente durante el muestreo y la preparación de la muestra.

Fuente: Rendimiento, desgaste y abrasividad en excavación..(González, p, 2014).

### **Ensayos empleando herramientas originales**

Sólo unos pocos institutos de investigación y fábricas de máquinas disponen de este tipo de equipamientos ya que representan procedimientos no estándares y de aplicación a casos particulares o singulares.

Cada aparato de ensayo de esta categoría es único y su construcción, operación y mantenimiento son costosos. Un buen ejemplo es el aparato de corte lineal LCT de la Escuela de Minas de Colorado ilustrado en la figura 33a, o el de ensayo de picas de la empresa Sandvick en la figura 33b, como se ha comentado en un capítulo anterior este tipo de ensayos han proveído un conocimiento básico acerca de los procesos de fragmentación y corte de la roca y la interacción entre roca y herramienta.

Por otra parte, los resultados relevantes respecto al rendimiento y desarrollo de la operación de corte (fuerzas, penetraciones, volúmenes excavados...) en ocasiones también se han obtenido en estos ensayos resultados relevantes sobre el desgaste de las herramientas empleadas.



Figura 33a. Ensayo con herramientas reales(CSM, 2012). Pica de ataque original (MineralGround Tunnelling, 2008)

Siendo así, a partir de estos ensayos se obtienen correlaciones como las que se muestran en la tabla 9, Thuro & Plinninger en 2007, en la que se relaciona la abrasividad del terreno a excavar con la herramienta y el sistema de excavación que se pretenda emplear, si bien el ensayo para determinar la abrasividad puede ser uno de los descritos anteriormente en este capítulo, por ejemplo en la Escuela de Minas de Colorado, la abrasividad se determina mediante el ensayo Cerchar.

Tabla 9. Correlación cualitativa de LCPC abrasividad vs vida de servicio de herramientas. (Thuro & Plinninger, 2007).

Abrasividad	Pica para excavación (perforación y voladura) (ref. 45 mm)	Pica de ataque puntual (rozadura)	Discos de corte TBM (ref 17")
	Vida de servicio de la pica en metros perforados (m/pica)	(Picks/m <sup>3</sup> )	Vida de servicio de discos (Km/disc)
Muy Baja	> 2000	<0,01	> 2000
Baja	1500 – 2000	0.01 – 0.05	1500 – 2000
Moderada	1000 – 1500	0.05 – 0.15	1000 – 1500
Alta	500 – 1000	0.15 – 0.30	500 – 1000
Muy Alta	200 – 500	0.3 – 0.5	200 – 500
Extremadamente alta	< 200	> 0.5	< 200

Fuente: Rendimiento, desgaste y abrasividad en excavación..(González, p, 2014).

Cabe destacar, otro ejemplo de ensayos realizados con herramientas reales es el que realizó Lovat para estudiar el desgaste de herramientas tipo “ripper” cuando son sometidas a trabajar en suelos con matriz cohesiva y clastos de

tamaños importantes y bolos, véase la figura 33. El ensayo se denomina “Drop Test” consiste en hacer caer desde una altura de 5 pies una pesa de diferentes valores de masa. Desde 20 a 42 libras y se evalúa el daño y el desgaste en los inciertos de widia, mediante inspección visual. (Lovat, Inc., 2009).



Figura 34. Ensayo Drop test. Muestra de herramientas reales, para ensayos. (Lovat, Inc., 2009).

De este modo, el objetivo de realizar este ensayo fue el estudio del comportamiento de esta categoría de herramienta frente a una situación geotécnica como la comentada arriba, donde la característica preponderante del terreno no eran los altos valores de abrasividad sino la presencia repentina y continua de clastos y bolos de diferentes tamaños y posiblemente con distintos valores de abrasividad entre ellos.

El proyecto en el que se emplearon estas herramientas fue el túnel de metro de la ciudad de Terrassa que se analizará en detalle en esta tesis. El material geotécnico cuyo efecto en las herramientas de corte se pretendió simular en laboratorio mediante este ensayo se trata de materiales terciarios del tipo Mioceno y materiales cuaternarios que serán descritos en el siguiente capítulo.

### **Estudios a escala real**

Por otra parte, la complejidad y precio de estos ensayos los hace infrecuentes. El punto de partida para realizar estos ensayos es que se debe contar con las herramientas y maquinaria originales y con el método de excavación real que se pretende aplicar. En estas investigaciones se pueden distinguir ensayos in situ (como pre cortes o galerías de exploración), y ensayos a gran escala (con

grandes muestras de roca o suelo). Debido a esto, dependiendo de cómo sea de grande la muestra o el área de ensayo, estos estudios representan un método limpio para obtener datos fiables del desgaste de las herramientas y procedimientos de excavación ya que pueden reproducir todos los factores que influyen en la excavación.

Asimismo, para conseguir resultados fiables, se debería contar con un programa, seguimiento y revisión periódica que establezca el procedimiento de ensayo desde el inicio de los trabajos. El programa debería contener al menos una descripción detallada de la maquinaria y el tipo de herramientas a emplear y una caracterización del medio geológico. Durante el desarrollo del ensayo se habría de contrastar las circunstancias geológicas encontradas. El informe debería concluir con el cálculo y clasificación de las tasas de desgaste de las herramientas y un análisis estadístico de la forma de estos desgastes. Un ejemplo de ensayo a gran escala es el realizado por Herrenknecht a finales de 1990 con el objeto de mejorar la tecnología de las máquinas TBM en roca dura.

Es necesario resaltar que el ensayo se llevó a cabo en colaboración con la Universidad Técnica de Karlsruhe, Alemania. (Burger, 2006). Para comprender mejor el mecanismo que causa grietas o daños en las RDC se diseñó un programa de ensayos de laboratorio, ellos detectaron una deflexión global en la RDC, el resultado de los ensayos se tradujo en mejoras en el sistema de soldadura y refuerzo de áreas localizadas de la estructura de la RDC en las cercanías de los lugares donde se alojan las herramientas de corte (ver figura 5.36), las mejoras se implementaron a modo de prueba, en el diseño de dos cabezas de corte de TBM para el proyecto Lötschbergtunnel en Suiza.

El diámetro de los túneles fue de 9,4m, las máquinas excavaron en rocas graníticas duras en gran parte del recorrido, también en granodioritas y gneiss. Las mejoras implementadas limitaron la ocurrencia del desgaste a niveles de desgaste de herramientas solamente sin alterar la estructura de la RDC (Burger, 2006).

#### **Método de Elementos Discretos -MED-**

Una novedosa aplicación del Método de Elementos Discretos (MED) al estudio de desgaste en superficies que son sometidas a impactos. Específicamente se implementa el modelo de desgaste de Archard en el MED con el fin de estudiar el desgaste de superficies que están sometidas a impactos de partículas sobre superficie planas o curvas; aplicaciones directas de este estudio se encuentran en

la práctica en los levantadores (lifters) de un molino para la minería, procesos de tratamiento y/o limpieza de superficie como arenado, granallado, etc.

Se diseña un experimento que consiste en hacer incidir a una determinada velocidad, un cuerpo sobre una superficie compuesta por un gran número de partículas que presentan fuerzas de cohesión entre ellas y que por lo tanto se mantienen unidas y de esta forma simulan un cuerpo sólido, al impactar el cuerpo sobre las pequeñas partículas, estas se desprenden dependiendo de la cantidad de golpes e intensidad de ellos. Los resultados muestran la influencia que tienen las variables cinemáticas y dinámicas, propias de un elemento en movimiento, con respecto al desgaste que provoca sobre una superficie al impactarla, concluyéndose sobre las ventajas de este método de cálculo y los fenómenos que este puede capturar de mejor forma, como también de otras formas de abordar el fenómeno del desgaste en programas MED.

#### **Standard Test Method for Measuring Abrasion - ASTM G65**

Cumpliendo con las normas técnicas ASTM G65, se diseñó, construyó y puso en funcionamiento una máquina tribológica de desgaste abrasivo, se realizaron ensayos, demostrando la confiabilidad de la máquina bajo esta norma. La máquina permitirá realizar ensayos confiables de desgaste, siendo otra herramienta para evaluar las características de los materiales y así mejorar el conocimiento de la tribología, además se podrá analizar el comportamiento de diferentes materiales, y de esta manera predecir el ciclo de vida de piezas de maquinaria que están sometidas a este tipo de desgaste, para saber cuándo cambiar una pieza y ahorrar dinero y tiempo a las industrias.

#### **Ensayos de desgaste de laboratorio ZFS (simulaciones a escala real)**

Se han desarrollado una serie de pruebas experimentales con el objetivo de calibrar el modelo y la implementación computacional del método de los elementos distintos acoplada con el problema de desgaste y la influencia de la temperatura en el estudio de la durabilidad de las herramientas de cortes de diferentes equipos. Las pruebas realizadas, se han ejecutado con control de varias variables en tiempo real. En los ensayos se controlan las diferentes componentes de fuerzas, el desgaste en la dirección normal, la temperatura, la pérdida de masa de la herramienta de corte. Este control de las diferentes variables de respuesta en los diferentes ensayos con diferentes calidades de aceros realizando el corte sobre diferentes tipos de terrenos, permite obtener los parámetros técnicos necesarios para realizar simulaciones a escala real.

Sin pasar por alto que el equipamiento con que se realiza el ensayo tiene un control numérico en tiempo real de las fuerzas y temperatura. El control del desgaste de la herramienta de corte en la dirección normal, el área de desgaste y la pérdida de masa son variables que se estudiaron de forma discreta en el tiempo. La ilustración del equipamiento utilizado para este estudio se refleja en la figura siguiente (34):

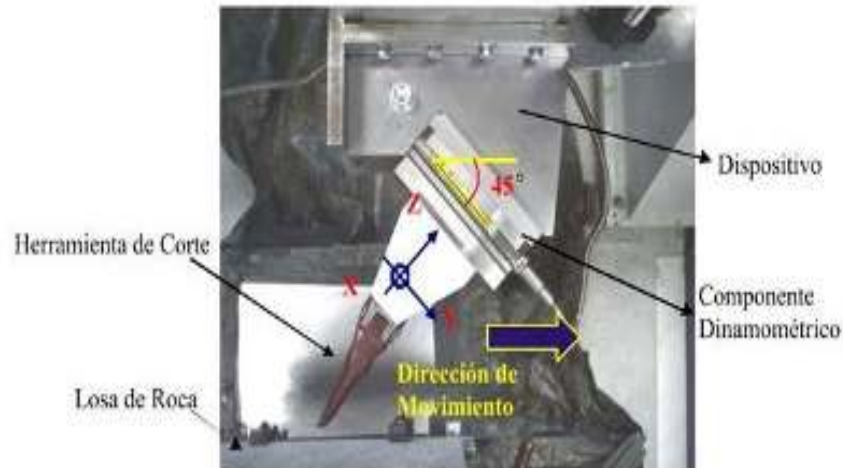


Figura 35. Equipo para simular a escala de laboratorio el proceso de corte y a su vez estimar los parámetros necesarios para la simulación. Sistema de referencia, dirección de movimiento y partes componente del equipamiento empleado.

Fuente: Rendimiento, desgaste y abrasividad en excavación..(González, p, 2014).

El diente utilizado para el ensayo es el MG5V, variando el tipo de acero utilizado. Los aceros utilizados son los siguientes:

1. MET 91
2. MET 71
3. D1B (Duramet 1B)
4. D2B (Duramet 2B)

De este modo, se procede con un control numérico de las fuerzas en cada uno de los ejes del sistema de referencia. Con posterioridad conociendo las componentes de las fuerzas en cada dirección y el ángulo de corte de la herramienta se puede determinar la fuerza en la dirección normal. Los resultados del control de fuerzas para el caso de un ensayo se muestran a continuación en las figuras 35 y 36 donde se relacionan fuerza y tiempo.

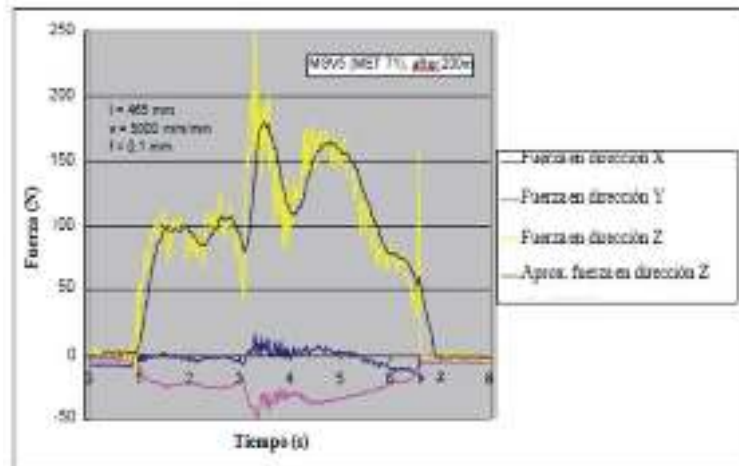


Figura 36. Comportamiento de las diferentes fuerzas en cada uno de los ejes de sistemas de referencia.

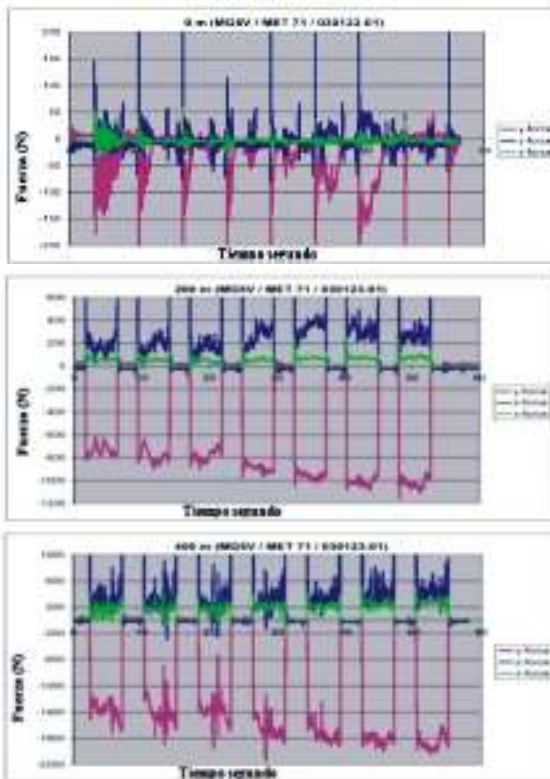


Figura 37. Comportamiento de las diferentes fuerzas con la distancia de corte recorrida.

Fuente: Rendimiento, desgaste y abrasividad en excavación..(González, p, 2014).

Se muestra el comportamiento de los componentes de las fuerzas en función de la distancia recorrida por el elemento de corte. El control de la temperatura se realiza con un sensor de control de temperatura colocado en el equipo. Este control

de la temperatura se realiza de tiempo real y al igual que las fuerzas se obtuvieron los resultados de la temperatura con la distancia recorrida por el elemento de corte. En la figura 37. Se observa la influencia de la temperatura en la herramienta de corte.



Figura 38. Desgaste de herramienta después de ensayo.

Fuente: Rendimiento, desgaste y abrasividad en excavación..(González, p, 2014).

En la tabla 10, se describe los parámetros del ensayo. Los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos de desgaste realizados a nivel de laboratorio se tabularon en tablas y con posterioridad se realizaron las curvas de comportamiento de las diferentes variables de respuestas controladas durante el ensayo. De forma ilustrativa se presentan los resultados tabulados de un ensayo de desgaste, estos se ven reflejados en la tabla 11.

Tabla 10. Parámetros del ensayo ZFS.

Prueba	030303-01
Referencia	MG5V
Acero	Duramet 2B
Material	Granito
Control de Fuerzas	$F_y = 750 \text{ N}$

Numero de pases	5
Distancia de corte/ pase [mm]	465
Distancia del pase [mm]	32.5
Velc. De Corte [mm/min]	5000
Velocidad [mm/min]	10000

Fuente: Aplicación del método de los elementos discretos a problemas de desgaste.

Tabla 11. Resultados de desgaste del útil en el ensayo ZFS.

Distancia de corte[m]	0	100	200	300	400	500	600
				invertido		invertido	
<b>Herramienta</b>							
Peso t [kg]	0.53458	0.53394	0.53378	0.53321	0.53299	0.53283	0.53275
Longitud a [mm]	---	118.37	117.82	116.65	116.63	114.94	116.30
Longitud b [mm]	125.95	124.54	124.04	122.64	121.52	121.49	121.24
temperatura [°C]	---	103	74	103	78	85	82
<b>Desgaste en la dirección normal</b>							
longitud [mm]	---	5.0	5.5	3.0	5.5	5.0	6.0
<b>Angulo del diente</b>							
$\alpha$ [°]	---	130.5	134.0		133.5		135,0 (128,0) *
$\beta$ [°]	---	---	---	152.0		155,0 (155,5) *	

Fuente: Aplicación del método de los elementos discretos a problemas de desgaste.

\* - Los valores en los paréntesis estaban en función de la geometría del diente real.

En el estudio experimental se han realizado varios ensayos en diferentes tipos de rocas y la herramienta de corte se ha conformado con diferentes calidades de aceros. Los resultados obtenidos en algunos de los ensayos de desgaste realizado se pueden observar en la figura 37, donde se relaciona el porcentaje de pérdida de masa y el tiempo en minutos.

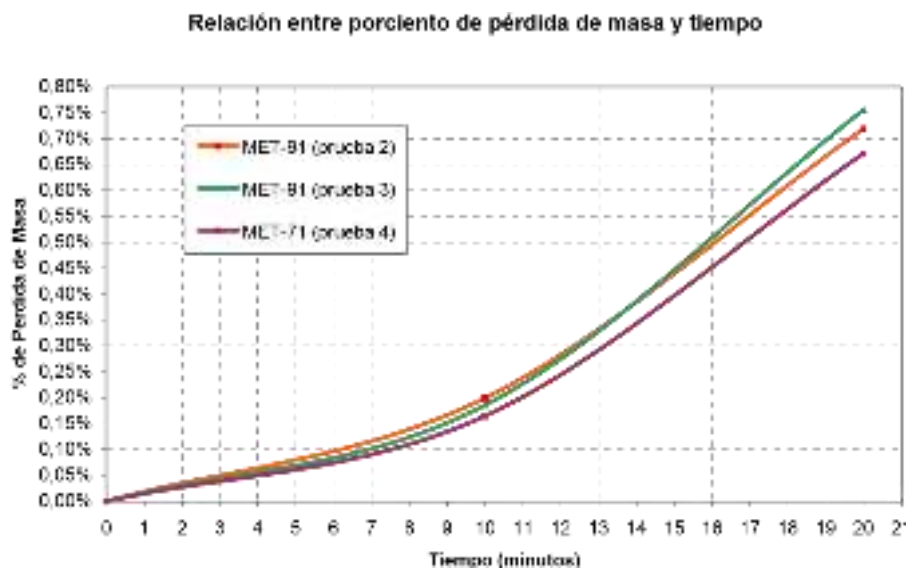


Figura 39. Resultados de algunas pruebas de desgaste realizadas a nivel de laboratorio ZFS.

Fuente: Fuente: Rendimiento, desgaste y abrasividad en excavación. (González, p, 2014).

### **Soporte técnico de los estudios de abrasión.**

En la investigación realizada sobre desgaste de las diferentes herramientas de corte de rocas primeramente se realiza un estudio comparativo preliminar de diversos tipos de aceros en la figura 38, se puede ver el equipamiento de laboratorio utilizado para los ensayos de laboratorio se puede ver en la figura siguiente:



Figura 40. Equipo de laboratorio para la realización de los ensayos de desgaste. Fuente:Fuente: Rendimiento, desgaste y abrasividad en excavación..(González, p, 2014).

Para la manipulación de este equipo fue dotado de un sistema de control de fuerzas, velocidades, además de un control de la temperatura. El control de estos parámetros unidos a la determinación del desgaste en la dirección normal y la pérdida de peso del elemento de corte permite calcular los parámetros deseados para realizar una correcta simulación. Estos parámetros determinados por ensayos de laboratorios controlados posibilitan caracterizar las variables necesarias para la simulación, que a su vez permitirán simular procesos de corte en roca a escala real, es decir, ensayos de campo de diferentes tipos de equipos.

El objetivo principal de este estudio preliminar es la comparación de diferentes tipos de aceros y conocer el comportamiento de la resistencia al desgaste de los mismos. Para ello se somete a ensayo diferentes tipos de calidades de aceros con una misma configuración de geométrica del diente: Estas calidades de los aceros son los clasificados por:

- MG5V-MET91
- MG5V-MET71
- MG5V-D1B

- MG5V-D2B

La primera denominación en la clasificación es el tipo de diente y la segunda corresponde a tipo de acero. Al realizar el estudio termo-mecánico del proceso de corte de rocas es necesario conocer las propiedades mecánicas y térmicas de los aceros y rocas. Estas propiedades se caracterizan por la capacidad calorífica, la conductividad térmica, el coeficiente de conductividad térmica en el contacto roca herramienta de corte y para la transmisión a la superficie de la herramienta. Estas propiedades de forma resumida son las que se expresan en la tabla 12, propiedades térmicas de la superficie e interface de contacto.

Tabla 12. Las propiedades térmicas de la superficie e interface del contacto.

◆ Aceros	
Capacidad Calorífica	$c= 450 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,
Conductividad de calor	$\kappa= 60 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , (lowcarbonsteel 66.9)
Densidad	$\rho=7830 \text{ kg}/\text{m}^3$
(Calor especifico	$c=0.12 \text{ cal}/(\text{gK})=0.12\cdot4.1868\cdot1000 \text{ W}/(\text{mK})=502$
◆ Arenisca	
Capacidad Calorífica	$c=1970 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,
Conductividad de calor	$k = 5.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Densidad	$\rho=2500 \text{ kg}/\text{m}^3$
Suelo arenoso	
Capacidad Calorífica	$c=1004 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,
Conductividad de calor	$\kappa= 0.58 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , Densidad
	$\rho=1820 \text{ kg}/\text{m}^3$
◆ Mármol	
Capacidad Calorífica	$c= 860\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,
Conductividad de calor	$\kappa= 3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , Densidad
	$\rho= 2700 \text{ kg}/\text{m}^3$
◆ Toba	
Capacidad Calorífica	$c= 950 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,
Conductividad de calor	$\kappa= 0.5 - 2.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 2 W/(mK) Densidad
	$\rho=2500 \text{ kg}/\text{m}^3$
◆ Arena seca	
Capacidad Calorífica	$c= 800\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,
Conductividad de calor	$\kappa= 0.35 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,
Densidad	$\rho=1600 \text{ kg}/\text{m}^3$

$$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J}$$

Los valores típicos del coeficiente de transmisión de calor para la transferencia forzada con aire o gas es:  $h \text{ (fsurf-convection)} = 10 - 100 \text{ W/ (m}^2\text{K)}$ .

### Equipos requeridos por ensayo

Para la realización y ejecución de un proyecto minero implica el desarrollo de diversas etapas y en cada una de ellas, se requieren equipos especializados para llevarlas a cabo, aunado a esto, que cumpla con todos los requerimientos técnicos, parámetros y normas de control de forma rigurosa. Dentro de estas maquinarias, se destacan las perforadoras y las Tuneladoras, dos tecnologías que son claves en la industria minera.

Esto indicado por expertos en la materia, de tareas de exploración y extracción, que hacen posible que en esta actividad minera sea fundamental el uso de perforadoras y sondajes. En este ámbito, existe un gran número de técnicas de perforación, pero las más comunes y más empleadas son: rotación con recuperación de testigo (con corona de diamante), rotación y rotopercusión, como se tiene en las figuras 39 y 40. Giorgio Piaggio vicepresidente del Comité de Túneles y Espacios Subterráneos de Chile, CTES, afirma que las perforadoras se destacan por su versatilidad en terreno y capacidad de excavar secciones de gran área en un tiempo razonable.



Figura 41. Imagen de Tuneladora UP5 – UP5.



Figura. 42. Imagen Tuneladora UP1, UP3 – U P4.

Fuente: Rendimiento, desgaste y abrasividad en excavación..(González, p, 2014).

Cabe anotar la importancia de los equipos y los elementos de excavación, corte y perforación, los cuales se ven directamente involucrados en los procesos de creación de túneles en los tratamientos al macizo rocoso, y por tal razón se ase relevante mencionarlos en esta investigación.

### **Trituradoras de Piedra**

Es una máquina empleada en la minería, construcción o para el proceso industrial de la roca, puede procesar materiales rocosos u otros sólidos, una trituradora, chancadora o chancador, es una máquina que procesa el material tomado en taños grandes y lo reduce según sea la necesidad del proyecto, en la figura 43. Se parecía una se aprecia una trituradora o chancador en funcionamiento.



Figura 43. Trituradora o chancador en funcionamiento 2017-2019 Finning International

### **Tuneladora**

Las tuneladoras también conocidas como “topos” están diseñadas para realizar excavaciones en rocas duras o medianas, las cuales no necesitan maor sostenimiento durante sus actividades. Presentan una diferencia fundamental con los escudos la cual es que carecen de un cilindro de acero tras las ruedas de corte que realiza las actividades de entibación provisional.

Mediante cilindros empuje se transmite la fuerza a la cabeza de corte La reacción producida se transmite al hastial del túnel mediante los grippers (fuerza de anclaje).

Los grippers también compensan el par producido por la cabeza de corte, que se transmite a éstos a través de la viga principal, la figura 42. Presenta un esquema de la tuneladora en funcionamiento.

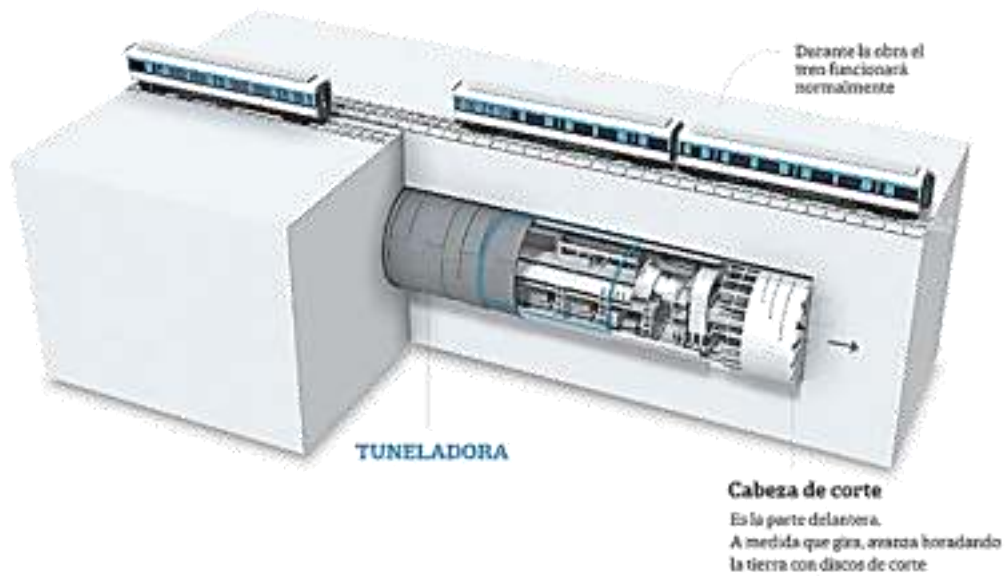


Figura 44. Esquema de Tuneladora de Sarmiento en funcionamiento

### Cortadoras

El equipo de trabajo portátil que se utiliza para cortar determinados materiales mediante el movimiento rotatorio de un disco abrasivo, que para el caso sería corte de material rocoso en la figura 43. Se puede observar una cortadora instalada en una retroexcavadora en proceso de corte.



Figura 45. Cortadora portátil sobre retroexcavadora.

### Rozadoras

Denominadas también *minadores de ataque puntual* en el sector extractivo, son máquinas de excavación que desarrollan el proceso de arranque mediante una cabeza giratoria provista de herramientas de corte de metal duro, picas que inciden

sobre la roca, y que va montada sobre un brazo articulado o extensible, la figura 44. Refleja un esquema de Rozadora.

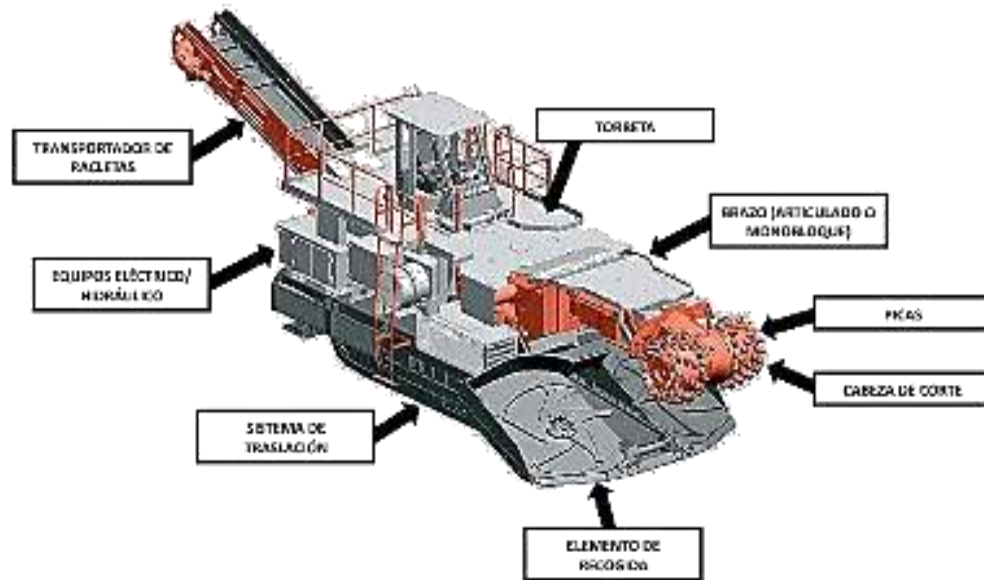


Figura 46. Máquina Rozadora de Ataque Puntual 6.6M/MT720

### Picas para Rozadoras

Entre los equipos para obra pública se encuentran las picas para rozadora. Se utiliza para carretera, minería y túneles en la figura 45. Se puede observar algunos tamaños de picas para rozadoras.



Figura 47. Algunos tamaños de Picas para Rozadoras.

### Dientes de Escarificadora

Estos dientes presentan una inclinación y apariencia plana en su extremidad y su longitud oscila entre 12 y 18 pulgadas. Como se puede evidenciar en la Figura 48.



Figura 48. Sistema de dientes de Escarificadora

### **Dientes de Retroexcavadora**

Estos son más pequeños que los de la escarificadora y presenta una forma cónica triangular, como se observa en la figura 49.



Figura 49. Dientes de retroexcavadora instalados en el cobo del equipo

Se presenta de manera informativa la tabla de composición química del acero.

Tabla 13. Composición química del acero.

Identifyingelementes, %

AISI	UNS	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Ni
<b>Water-hardening tool steels</b>										
W1	T72301	0.60-1.40(a)	...	...	...	...	...	...	...	...
W2	T72302	0.60-1.40(a)	...	...	...	...	...	0.25	...	...
W5	T72305	1.10	...	...	...	...	0.50	...	...	...
<b>Shock-resisting tool steels</b>										
S1	T41501	0.50	...	...	...	...	1.50	...	2.50	...
S2	T41502	0.50	...	...	...	1.00	...	...	...	0.50
S3	T41503	0.55	...	0.80	...	2.00	...	...	...	0.40
S6	T41506	0.45	...	1.40	...	2.25	...	1.50	...	0.40
S7	T41507	0.50	...	...	...	...	3.25	...	...	1.40
<b>Oil-hardening cold work tool steels</b>										
O1	T31501	0.90	...	1.00	...	...	0.50	...	0.50	...
O2	T31502	0.90	...	1.60	...	...	...	...	...	...
O6(b)	T31506	1.45	...	0.80	...	1.00	...	...	...	0.25
O7	T31507	1.20	...	...	...	...	0.75	...	1.75	...
<b>Air-hardening medium-alloy cold work tool steels</b>										
A2	T30102	1.00	...	...	...	...	5.00	...	...	1.00
A3	T30103	1.25	...	...	...	...	5.00	1.00	...	1.00
A4	T30104	1.00	...	2.00	...	...	1.00	...	...	1.00
A6	T30106	0.70	...	2.00	...	...	1.00	...	...	1.25
A7	T30107	2.25	...	...	...	...	5.25	4.75	1.00(c)	1.00
A8	T30108	0.55	...	...	...	...	5.00	...	1.25	1.25
A9	T30109	0.50	...	...	...	...	5.00	1.00	...	1.40
A10(b)	T30110	1.35	...	1.80	...	1.25	...	...	...	1.50
<b>High-carbon high-chromium cold work steels</b>										
D2	T30402	1.50	...	...	...	...	12.00	1.00	...	1.00
D3	T30403	2.25	...	...	...	...	12.00	...	...	...
D4	T30404	2.25	...	...	...	...	12.00	...	...	1.00
D5	T30405	1.50	...	...	...	...	12.00	...	...	3.00
D7	T30407	2.35	...	...	...	...	12.00	4.00	...	1.00
<b>Low-alloy special-purpose tool steels</b>										
L2	T61202	0.50-1.10(a)	...	...	...	...	1.00	0.20	...	...
L6	T61206	0.70	...	...	...	...	0.75	...	...	0.25(c)
<b>Mold steels</b>										
P2	T51602	0.07	...	...	...	...	2.00	...	...	0.20
P3	T51603	0.10	...	...	...	...	0.60	...	...	1.25
P4	T51604	0.07	...	...	...	...	5.00	...	...	0.75
P5	T51605	0.10	...	...	...	...	2.25	...	...	...
P6	T51606	0.10	...	...	...	...	1.50	...	...	3.50
P20	T51620	0.35	...	...	...	...	1.70	...	...	0.40
P21	T51621	0.20	...	1.30(A)	...	...	...	...	...	4.00
<b>Chromium hot work tool steels</b>										
H10	T20810	0.40	...	...	...	...	3.25	0.40	...	2.50
H11	T20811	0.35	...	...	...	...	5.00	0.40	...	1.50
H12	T20812	0.35	...	...	...	...	5.00	0.40	1.50	1.50
H13	T20813	0.35	...	...	...	...	5.00	1.00	...	1.50
H14	T20814	0.40	...	...	...	...	5.00	...	5.00	...
H19	T20819	0.40	...	...	...	...	4.25	2.00	4.25	4.25
<b>Tungsten hot work tool steels</b>										
H21	T20821	0.35	...	...	...	...	3.50	...	9.00	...
H22	T20822	0.35	...	...	...	...	2.00	...	11.00	...
H23	T20823	0.30	...	...	...	...	12.00	...	12.00	...
H24	T20824	0.45	...	...	...	...	3.00	...	15.00	...
H25	T20825	0.25	...	...	...	...	4.00	...	15.50	...
H26	T20826	0.50	...	...	...	...	4.00	1.00	18.00	...

(continued)

(a) Other carbon contents may be available. (b) Contains free graphite in the microstructure to improve machinability. (c) Optional.  
Source: Ref D4.11

En la tabla 13 se encuentran las composiciones químicas de los aceros para herramientas. Se describen los elementos que la integran.

Donde:

AISI = Norma que también es conocida por ser una clasificación de aceros y aleaciones de materiales no ferrosos

C= Carbono.

M<sub>n</sub>= Manganeso.

S<sub>i</sub>= Silicio.

C<sub>r</sub>=Cromo.

V=Vanadio.

W=Wolframio.

M<sub>o</sub>= Molibdeno.

C<sub>o</sub>=Cobalto.

N<sub>i</sub>= Níquel.

### Dureza brinel.

Las pruebas de Dureza Brinell en materiales de fibra natural como las maderas y los Bambúes, son de gran importancia en las aplicaciones industriales, principalmente en la producción de pisos en parquet. La Guadua Angustifolia con sus buenas propiedades físicomecánicas es un material con excelentes posibilidades de aplicación industrial.

Dentro de las especies de Bambú, el PhyllostachysPubescens es una de las más estudiadas en los países asiáticos para la producción de pisos. En muestras de pisos de parquet de ésta misma especie se conocen algunas investigaciones en el BFH-Instituto Federal de Investigaciones de Alemania, la figura 48 permite apreciar la medida de Dureza Brinell

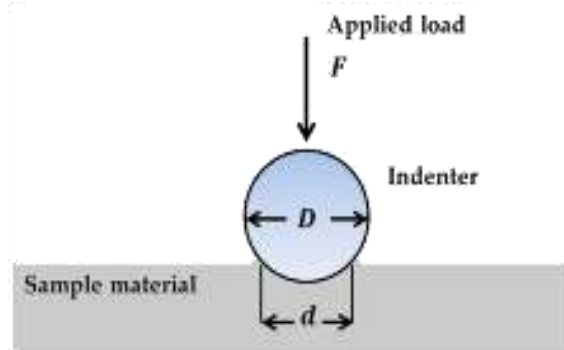


Figura 50. Esquema de la medida de Dureza Brinell

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{N/mm}^2)$$

Dónde:

HB = Dureza Brinell en (N/mm<sup>2</sup>) o en (MPa)

F = Fuerza constante sobre el material en (N)

D = Diámetro de la bola en (mm)

d = Diámetro de la huella en (mm)

### Dureza Mohs

Dureza es la resistencia que opone un material a dejarse rayar por otro. Para medir la dureza de un material se utiliza la escala de Mohs, escala de 1 a 10, correspondiendo la dureza 10 al material más duro, que según esta escala es el diamante, como permite ver la figura 49.

Otra definición más técnica sería: La capacidad de un material para resistir la deformación plástica, por lo general por indotación. El término también puede referirse a la resistencia al rascado, a la abrasión, al corte y/o a la penetración.



Figura 51. Esquema de la escala de Mohs.

Asimismo, partiendo de que la "Dureza" es la resistencia de un material a ser rayado. La prueba se lleva a cabo mediante la colocación de una punta de un material de los 10 anteriores (le llamaremos A) sobre una superficie sin marcas de otro material y el intento de producir un rasguño sobre él (le llamaremos material B). Aquí están las cuatro situaciones que es posible que observar al comparar la dureza de dos muestras:

- ◆ Se ha intentado rayar el material B con el material A. Si no sabemos nada sobre la dureza del B empezaremos por el más blando (menos duro) el Talco.
- ◆ Si el material A (talco) no raya al material B, entonces B es más duro que el material conocido A.
- ◆ Se colocó como material A otro más duro, por ejemplo yeso.
- ◆ Si el material A (Yeso) no raya al material B, entonces B es más duro que el material conocido A.

### **Dureza Knoop**

Según Knoop, el ensayo de dureza es una alternativa al ensayo Vickers dentro del rango de microdureza, como se presenta en la tabla 14. Además se

puede realizar en la misma máquina de ensayo de microdureza o dureza universal. Se utiliza básicamente para superar las fracturas en los materiales quebradizos, y para facilitar los ensayos de dureza en las capas finas.

Como en el ensayo de dureza Vickers, el penetrador utilizado en el ensayo de dureza Knoop es un diamante piramidal. No obstante, en vez de ser simétrico, éste es alargado. La dureza Knoop (HK) se calcula midiendo ópticamente la longitud de la diagonal larga de la penetración.

Tabla 14. Normas y rangos de carga para la Dureza Knoop

Standard	Load Range	
<b>ISO 4545</b>	1 gf - kgf	(0.0098 - 9.807 N)
<b>ASTM E384</b>	1 gf - ≤1 kgf	(0.0098 - 9.807 N)

### Estado del arte

Esta investigación se presenta en una continuidad en el estudio de la abrasión severa “Gouging”. Para ello, se desarrolló un prototipo funcional que tritura roca para efectuar pruebas de abrasión severa respectivas. Se analiza el diseño, del trabajo realizado por Márquez 2002, mediante un análisis funcional considerando las mejores opciones para poder llevarlo a su consolidación real. Se generó un nuevo diseño de algunas piezas, a fin de poder construir el prototipo de máquina tribológica de abrasión severa.

Utilizando los avances tecnológicos del momento, se fabrican y se ensamblan las partes de la máquina, obteniéndose un equipo muy parecido al establecido por la norma ASTM G-8197, similar al usado por las empresas mineras, preparado para efectuar la trituración de roca. Este equipo permitió realizar pruebas desgaste abrasivo a probetas de aceros D-3, O-1 y A-36 montadas en sus quijadas, consiguiendo la trituración de roca, de un tamaño de 50 mm a 3.2 mm, provocando así el desgaste abrasivo a los materiales de prueba; Lográndose un funcionamiento eficiente del mismo. Obteniéndose las tasas de desgaste para los aceros mencionados, (Figuroa, 2007).

En este trabajo de investigación se determina el pH de abrasión de las fracciones arenosas de un conjunto de perfiles de alteración y suelos desarrollados sobre rocas graníticas de la provincia de A Coruña (Galicia, NW de España). Se observa que tanto estos valores como el del pH de abrasión de la muestra total, sin materia orgánica, constituyen un buen índice del grado de evolución del material, presentando la ventaja, sobre otros índices, de su fácil y rápida determinación, por lo que parece un dato a tener en cuenta especialmente en los estudios a gran escala de cartografía y usos potenciales del suelo, (Romero, Taboada & Macías, 1987).

Por otra parte, Urviola & Reynaldo (2017) en su investigación tuvo por finalidad realizar un análisis en las canteras de roca “San Luis de Alba, Totorani y Cataratas”; teniendo la necesidad de resolver problemas relacionados a la potencialidad y la calidad de los afloramientos rocosos para su empleo en obras viales de la ciudad de Puno al 2036.

El principal objetivo de este trabajo de investigación es realizar el análisis en los afloramientos rocosos mencionados por prospección geofísica y laboratorio, los que dependen de parámetros geológicos, petrográficos, geomecánicos, geofísicos, especificaciones de calidad según la EG – 2013; para su posterior empleo en la infraestructura vial de la ciudad de Puno.

La clasificación geológica se determinó a partir de su formación cuyos afloramientos pertenecen al Grupo Tacaza y Grupo Barroso; la petrografía se determinó a partir de secciones delgadas observado en el microscopio de luz polarizada; la clasificación geomecánica por Bieniawski y GSI son: Cantera San Luis de Alba RMR = 75, Clase II; GSI= 70; Cantera Totorani RMR = 59, Clase III, GSI = 54; Cantera Cataratas RMR = 65, Clase II, GSI = 60; las especificaciones de calidad según la EG - 2013 determinados en el laboratorio de mecánica de suelos y pavimentos en la Dirección Regional de Transportes, Comunicaciones Vivienda y Construcción - Puno y laboratorio de geomecánica de rocas de la facultad de minas para cada cantera de roca son: Abrasión Cantera San Luis de Alba = 83.32 %, Abrasión Cantera Totorani = 71.05%, Abrasión Cantera Cataratas = 78.76 %; Durabilidad de la roca Cantera San Luis de Alba = Muy Alta; Durabilidad de la roca Cantera Totorani = Alta; Durabilidad de la roca Cantera Cataratas = Muy Alta, con el empleo de prospección geofísica a través de la tomografía geoelectrica se determinó el volumen disponible de material, cuyos resultados fueron: Cantera San Luis de Alba = 576 000 m<sup>3</sup>, Cantera Totorani = 600 000 m<sup>3</sup>, Cantera Cataratas = 750 000 m<sup>3</sup>.

## MARCO HISTÓRICO

### **La Roca existe primero que el Suelo**

Desde el principio de los tiempos, el hombre las ha ido sustrayendo de las entrañas del Planeta para su beneficio. Aquellas rocas primarias se denominan Magmáticas, y a las más comunes se las conoce como granitos. El proceso de erosión de nuestro planeta fue transformando durante siglos esas rocas en arenas, mezclándolas con aguas y cal, fusionándolas de nuevo, cementándolas de forma natural con sílice y carbono, creando en definitiva, un gran número de variedades rocosas. La geología añade a ese primer grupo de rocas magmáticas, otros dos grupos principales como: Rocas sedimentarias y rocas metamórficas. A las primeras se las denomina comúnmente PIEDRAS; a las segundas mármoles y cuarcitas. Las tres variedades fundamentales de rocas son la materia prima de muchos oficios.

Se ha sabido que el primer uso que se hizo de las rocas ayudó a fundamentar el despertar de la humanidad, cuando los ancestros usaban por primera vez un canto rodado para golpear el animal que se quiere comer; el hombre descubriendo más características del material Rocoso, logra transformar dicha la misma en la primera herramienta que usó, permitiéndole acciones tales como ablandar la carne del animal y cortarla; teniendo un material desgajado de la roca madre por la acción del calor y el frío, se podía definir su forma y textura, pero observando un canto plano, desgastado por las corrientes del río. Pronto aprende a reproducir esos fenómenos naturales y dar forma a la Roca, imitando así la presión que el agua introducida en los poros de la roca ejerce contra esta cuando se dilata al helarse. El ser humano en su búsqueda natural, asimila que al frotar una piedra contra otra más blanda para alisarla, tal y como hace el agua del río contra las rocas del fondo.

De igual forma, desde que aprendió cómo cortar, tallar y pulir las piedras, no hemos dejado de hacerlo. Usamos herramienta más sofisticada, empleamos menos tiempo, pero en el fondo, seguimos frotando piedra contra piedra, para poder deslizar la mano por sus superficies, y poder sentir algo frío, pero extrañamente aterciopelado.

De esto se depende que, con el transcurrir del tiempo y por las necesidades climatológicas, se crean las cavernas por intervención del hombre, cuando no hallaba refugios naturales. Y cuando se estaba muy lejos de cualquier lugar montañoso, en las vastas praderas, y el frío desgastaba los cuerpos por la noche, se observó que se podía usar esas otras piedras diminutas, que constantemente

pisaba “la arena”, el sustrato de roca erosionado por el viento que cubre todo el planeta.

Sin embargo, el hombre no pasaba por alto esos detalles importantes, uniendo nuevas ideas y el conocimiento de su potencial produjo nuevas formas, como esta, que mezclando esa tierra con agua, y dejando que el calor del sol secase esa mezcla, el hombre fabricó su primer ladrillo. Y con ese ladrillo aprendió a fabricarse cobijo haya dónde no lo tenía; de igual forma fabricó tazones donde no disponía de cráneos de animales

Cuando supo utilizar el fuego que las tormentas provocaban en árboles y pastizales, descubrió también el principio de la unión de elementos por el calor: las tierras más espesas, (las arcillas), quedaban mucho más duras si se secaban al calor de un buen fuego. Casi sin pensar el tiempo, enfocado en ver más allá de lo que ocurriría después de crear algo, siguió avanzando en otros campos, a los cuales también les dedicó enfoque y concentración, por ejemplo; necesitó mucho tiempo para perfeccionar el tallado de la piedra. Hasta que logró extraer la esencia más dura de ellas, hasta que se fundió y separó los primeros elementos metálicos de estas, se dispuso a crear nuevas herramientas de gran utilidad más duros para cortarlas, pulirlas y darlas forma.

Aparecen entonces, no solo grandes construcciones, dotadas de pórticos y ventanales, sino que la imaginería del ser humano, presente desde los búfalos pintados en la cueva de Altamira, piedra erosionada adherida a la roca y las confusas figuras de terracota, alcanza la primera expresión de arte. Parece que sin saberlo, el hombre quiere fusilar a Dios, construyendo semejantes de barro, a la espera del soplo vital.

Así, se puede ver el nacimiento de nuevas esculturas, el proceso es largo, y hay muchos precursores antes de que culmine en la casi perfección: Grecia. Pasando fugazmente por grandes culturas anteriores, como la persa, o por obras aisladas, como la Dama de Elche, llegamos a la cultura griega, donde la función de la piedra queda ligada, definitivamente, al sentido del espacio, al discurrir pacífico del tiempo.

Para ejemplificar, los templos griegos, su arquitectura, sus imágenes reales, están pensados para el placer y el deleite. Sus columnas plasman las líneas arrugadas de los troncos de los árboles, sus dinteles y frontispicios son volúmenes cubicados a partir de la geometría caprichosa de las copas de olivos y otros árboles.

Sus grecas enderezan las formas en que las hojas se retuercen alrededor de sus ramas. Los griegos crean los primeros paisajes de piedra, con la misma delicada belleza con que la propia naturaleza crea sus paisajes.

Igualmente, los romanos comienzan a adaptarse por asimilar parte de esas enseñanzas para a un nuevo fenómeno. La humanidad comienza a vivir agrupada en espacios muy pequeños. Ya no hay tiempo para delicadas imágenes salvo para algunos pocos escogidos y urge canalizar las necesidades de toda esa humanidad, que parece desgastarse igual que una piedra azotada por el viento; Sus desperdicios crean ríos negros que deben ser encauzados sobre piedras; su descendencia debe ser acogida por encima de sus ancestros; sobre los tejados de sus propias casas se construyen otras, y otras.

Sus oficios deben ser dirigidos por senderos hechos de pavés, y sus conquistas asentadas por rutas permanentes. Carreteras, calles, viviendas de varias plantas, desagües, canales y conducciones de agua. Ríos, cuevas y senderos recreados en piedra.

El hombre aprende a crear de la piedra, otras piedras más duras. Fundiendo, machacando, mezclando y extrayendo, se fabrica el vidrio, los metales, para perfeccionar las ruedas, y convertirlas en engranajes. Se extrae la fuerza del agua, aquella misma que rompe y transporta las piedras cambiando su forma y textura.

Actualmente, se habla de plásticos tan duros como una piedra “¿Acaso no fue su origen esa misma piedra?”, de microprocesadores veloces, capaces de millones de operaciones por segundo “aun estando fabricados con silicio” y de Bioenergía, sana y limpia “aunque podríamos decir también que esa nueva tecnología se alimenta de sales minerales, procedentes de las rocas”.

La transformación y procesamiento de estos materiales para construir, tendencias estéticas del arte; todo se cimenta en el suelo, dejando aseverando la importancia del material, se demuestra una vez más que el planeta está en constante renovación, lleno de rocas y madera, de principio y de formación, nos enseñan cada instante nuevas formas de adaptación que cubre nuestros pasos hacia el futuro.

## MÉTODO Y MATERIALES

### Perforabilidad y materiales

Como bien es de saber que la perforación es un proceso laborioso, de costos elevados que consiste en la preparación de huecos o taladros en el macizo rocoso para efectuar la voladura. La eficacia de la perforación de taladros está supeditada a los siguientes factores:

- ◆ Capacidad de penetración en las rocas por acción de la broca (factor principal), que está dado por: la presión axial, velocidad de rotación y la evacuación del detritus durante la perforación.
- ◆ Tipo y forma de la broca.
- ◆ Método de acción en el fondo del taladro (percusión, rotación y roto percusión, etc).
- ◆ Esfuerzo y velocidad de acción con los que se actúan sobre el taladro.
- ◆ Diámetro del taladro.
- ◆ Profundidad de perforación.
- ◆ Velocidad de expulsión de detritus.
- ◆ Organización y escala de producción de la voladura

El tiempo efectivo del ciclo de perforación ( $T_{ef}$ ) es el tiempo productivo de las operaciones de perforación.

$$T_{ef} = (T_{niv_{per}} + T_{ple_{ga}} + T_{tras} + T_{i_{barr}} + T_{barr})$$

Dónde:

$T_{niv_{per}}$  = Tiempo de nivelación de la perforadora.

$T_{ple_{ga}}$  = Tiempo de plegamiento de las gatas.

$T_{tras}$  = Tiempo de desplazamiento de taladro a taladro.

$T_{i_{barr}}$  = Tiempo de izaje de barras.

$T_{barr}$  = Tiempo de barrido y rectificación de taladro

La perforabilidad de las rocas puede ser determinada, mediante la siguiente fórmula empírica.

$$R_{perf} = 0.007 \times (\sigma_c + \sigma_t) + 0.7\gamma$$

Dónde:

$R_{perf}$ =Perforabilidad

$\sigma_c$ = Resistencia límite de la roca a la compresión

$\sigma_t$ = Resistencia límite de la roca al corte

$\gamma$ = Peso específico de la roca.

Las rocas por su perforabilidad se clasifican en 25 categorías y se sub dividen en cinco clases, como se evidencia en la tabla 15.

Tabla 15. Subdivisión de la perforabilidad de la roca

DESCRIPCIÓN DE LA PERFORABILIDAD	CLASE	PERFORABILIDAD	CATEGORÍA
Suave	I	$R_{perf} = 1.0 - 5.0$	1,2,3,4,5
Media	II	$R_{perf} = 5.1 - 10$	6,7,8,9,10
Difícil	III	$R_{perf} = 10.1 - 1$	11,12,13,14,15
Muy Difícil	IV	$R_{perf} = 1.1 - 20$	16,17,18,19,20

Factor de resistencia compresiva. El factor de resistencia compresiva

( $F_{cus}$ ) es la relación de la resistencia a compresión simple de la roca

$\sigma_c$  (Mpa) multiplicado por 10 y dividido entre la velocidad de perforación (m/min)

$$F_{cus} = \frac{10 \times \sigma_c}{V_p}, \text{ Mpa/(m/min)}$$

Dónde:

$\sigma_c$ = Resistencia a compresión simple, Mpa.

$V_p$ = Velocidad de perforación, m/min

### Resultados esperados

a) Productos resultados de actividades de generación de nuevo conocimiento.

- b) Productos resultados de actividades de apropiación social del conocimiento.
- c) Productos de actividades relacionadas con la formación de recurso humano para la CTEI.
- d) producto resultado de actividades de desarrollo tecnológico e innovación.

**Estos productos contribuirán a:**

- 1) Visualizar y posicionar (puntaje) el grupo de investigación relacionado (de los investigadores participantes del proyecto), así como el semillero de investigación en suelos de la Facultad de Ingeniería Civil;
- 2) Visualizar internacionalmente la Universidad Santo Tomás de Aquino –USTA.
- 3) Extender la proyección social, ya que muchos de los productos a generar tendrán una aplicación práctica real y de utilidad para instituciones públicas y privadas tales como la ANI y el INVÍAS, entre otras, las cuales, con la oportuna socialización de los resultados científicos podrán tomar decisiones de política pública; y finalmente;
- 4) Posicionar el indiscutido liderazgo nacional de la USTA en investigación científica y aplicada en el campo de la utilización de la mecánica de rocas aplicada y, en particular de la Construcción de Túneles y la producción de Agregados Pétreos.

De este modo, el desarrollo de esta tipología de ensayos los ensayos permitirá proponer rutinas de laboratorio, así como generar protocolos particulares de ensayo que fomentarán el fortalecimiento de la línea de investigación.

**DEFINICIÓN DE TERMINOS BÁSICOS**

**Absorción:** Proceso en el que un líquido penetra y llena los intersticios de un material sólido poroso.

**Abrasión:** Acción mecánica de rozamiento y desgaste que provoca la erosión de un material o tejido. En geología, la abrasión marina es el desgaste causado a una roca por la acción mecánica del agua cargada por partículas procedentes de los derrubios.

**Arenisca:** Roca sedimentaria formada por pequeños granos de arena compactados, cuya dureza depende del tamaño de los granos que la componen.

**Caracterización:** Determinación de los atributos peculiares de un material que para la presente investigación son rocas.

**Conminución:** Reducción de materiales sólidos de un tamaño de partícula promedio a un tamaño de partícula promedio más pequeño, mediante procesos de trituración, molienda, corte, vibración u otros procesos. En geología, ocurre naturalmente durante las fallas en la parte superior de la corteza terrestre.

**Cortadoras:** Equipo de trabajo portátil que se utiliza para cortar determinados materiales mediante el movimiento rotatorio de un disco abrasivo, que para el caso sería corte de material rocoso.

**Barrena:** Se usa para hacer agujeros de gran tamaño, generalmente en la roca.

**Derrubio:** Depósito de piedras al pie de una montaña originado por la erosión del relieve.

**DRI:** Ensayo que permite obtener el índice de la Tasa de Perforabilidad.

**Excavabilidad:** Que se define como la facilidad que presenta un terreno para ser excavado.

**Intrínseco:** Propio o característico de la cosa que se expresa por sí misma y no depende de las circunstancias.

**Espécimen:** Muestra, modelo o ejemplar que tiene las cualidades o características que se consideran representativas de la especie a la que pertenece.

**Fuerza:** Cuando se conocen resultados de ensayos de resistencia.

**Fábrica:** se refiere a la disposición de minerales y partículas en la roca.

**Friable:** que el elemento se desintegra fácilmente.

**Granularidad:** Grano el tamaño de las partículas que forman la roca.

**Litificación:** proceso por el cual un material se convierte en roca.

**Meteorización:** Es el proceso de alteración y ruptura de suelos y rocas sobre y cerca de la superficie terrestre debido a la descomposición química y desintegración física.

**Matriz:** Material de grano fino de una roca en el que se incluyen otros mayores, que constituyen el esqueleto o fábrica.

**Petrografía:** Parte de la geología que estudia, describe y clasifica las rocas.

**Roca:** Materia compuesta por minerales asociados de manera natural.

**Textura al tacto:** Es posible establecer la textura cuando se toca la superficie de una roca, nombrando si es lisa o rugosa.

**Tribología:** Ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación que tienen lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento.

**Tuneladora:** Máquina capaz de excavar túneles a sección completa, a la vez que colabora en la colocación de la entibación para la sustentación del túnel si ésta es necesaria, ya sea de forma provisional o definitiva.

**Sección de lámina delgada:** Preparaciones que se realizan en rocas para su estudio con microscopio petrográfico

**Porosidad:** El grado de facilidad con que los fluidos puedan moverse a través de una roca.

**Peso específico:** Peso de un cuerpo por unidad de volumen.

**Rozadoras:** Denominadas también minadores de ataque puntual en el sector extractivo, son máquinas de excavación que desarrollan el proceso de arranque mediante una cabeza giratoria provista de herramientas de corte de metal duro – picas que inciden sobre la roca, y que va montada sobre un brazo articulado o extensible.

## CAPITULO III

### RESULTADOS Y ANALISIS

Es importante dar a conocer que inicialmente la investigación estaba dirigida a la caracterización de material extraído de la perforación de túneles, teniendo en cuenta que la abrasividad ejerce un rol de resistencia fundamental en la ejecución de estos proyectos; intención que no se pudo desarrollar a su cabalidad, por la no autorización de ingreso al sitio de perforación ni a la zona destinada para la disposición final del material. De otra parte es importante resaltar que la investigación inicia con un plan de financiamiento por parte de Fodein, recursos que no se vieron reflejados; al no contar con los aportes financieros para la misma, se opta por implementar un segundo plan que incluye el diseño prototipo de la máquina para determinación del DRI (índice de la tasa de perforabilidad), ensayo que en la actualidad no se realiza en el país, generando un aporte y fortalecimiento al proyectos futuros; se determina la caracterización de cuatro (4) muestras del material, con el fin de que dos especímenes correspondieran a la arenisca Dura y dos a la arenisca Labor, los cuales son sometidas a pruebas adicionales como el ensayo de carga puntual, y otros que no requieren de mayores costos como son el caso de contenido de carbonatos y estabilidad de la roca, pretendiendo precisar de la mejor manera los modelos obtenidos.

#### **Procedimientos experimentales**

Para la presente investigación se obtienen las muestras del Grupo Guadalupe, el cual contiene areniscas Dura, Labor y Tierna, se realizaron los respectivos procesos y diferentes ensayos como son: Resistencia a la compresión simple, Resistencia a la tracción, Carga puntual, Velocidad sónica, Dureza Schmidt, índice de abrasividad cerchar "CAI" y el índice de schimazek, con el fin de caracterizar el material de roca desde el punto de vista de su abrasividad.

Según Karsten, (1858); proponen a esta formación de areniscas el nombre de Grupo Guadalupe, más tarde el mismo es redefinido por Renzoni (1962, 1968) y finalmente Pérez & Salazar (1978); estas formaciones tienen un rango de edad que comprende de Campanino superior – Maastrichtiano inferior. Pérez & Salazar, (1978), definen formalmente el grupo Guadalupe al oriente de Bogotá.

Este grupo es reconocido por encontrarse en la parte superior de la Formación Chipaque al oriente y la Formación Conejo al occidente. (Geología de la sabana de Bogotá Informe, 2005).

En la figura 50. Se presenta el esquema de las secciones estratigráficas y esquemáticas del cretácico superior de la sabana de Bogotá.

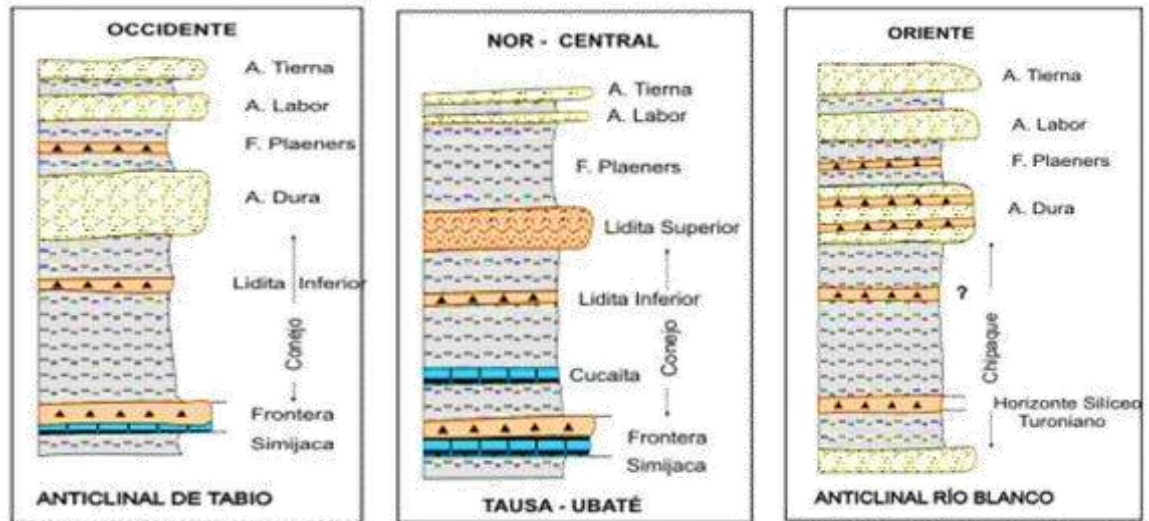


Figura 52. Secciones estratigráficas generalizadas y esquemáticas del Cretácico superior en la Sabana de Bogotá.

Fuente: Informe Geológico de la sabana de Bogotá Ministerio de Minas y Energía Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas Marzo de 2005.

### LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE TOMA DE MUESTRAS



Figura 53. Posición geográfica de la extracción del material de estudio Grupo Guadalupe.

Fuente: Google earth

La figura 52 presenta la posición geográfica donde se extrae el material para la realización de la investigación, la cual se enmarca en las coordenadas  $4^{\circ} 35' 216'' N$ ,  $74^{\circ} 03' 0,80'' W$ , para los materiales de muestra (1-2) y  $4^{\circ} 37' 13,5'' N$ ,  $74^{\circ} 01' 31,6'' W$  para las muestras (3-4), se traslada al laboratorio donde se procede a almacenar para posteriormente se selecciona y codifica para obtener la mayor y más clara información de la misma, a continuación se presenta el cuadro jerárquico de los procedimientos a los que será sometido el material rocoso con el fin de llegar al objetivo de la investigación.

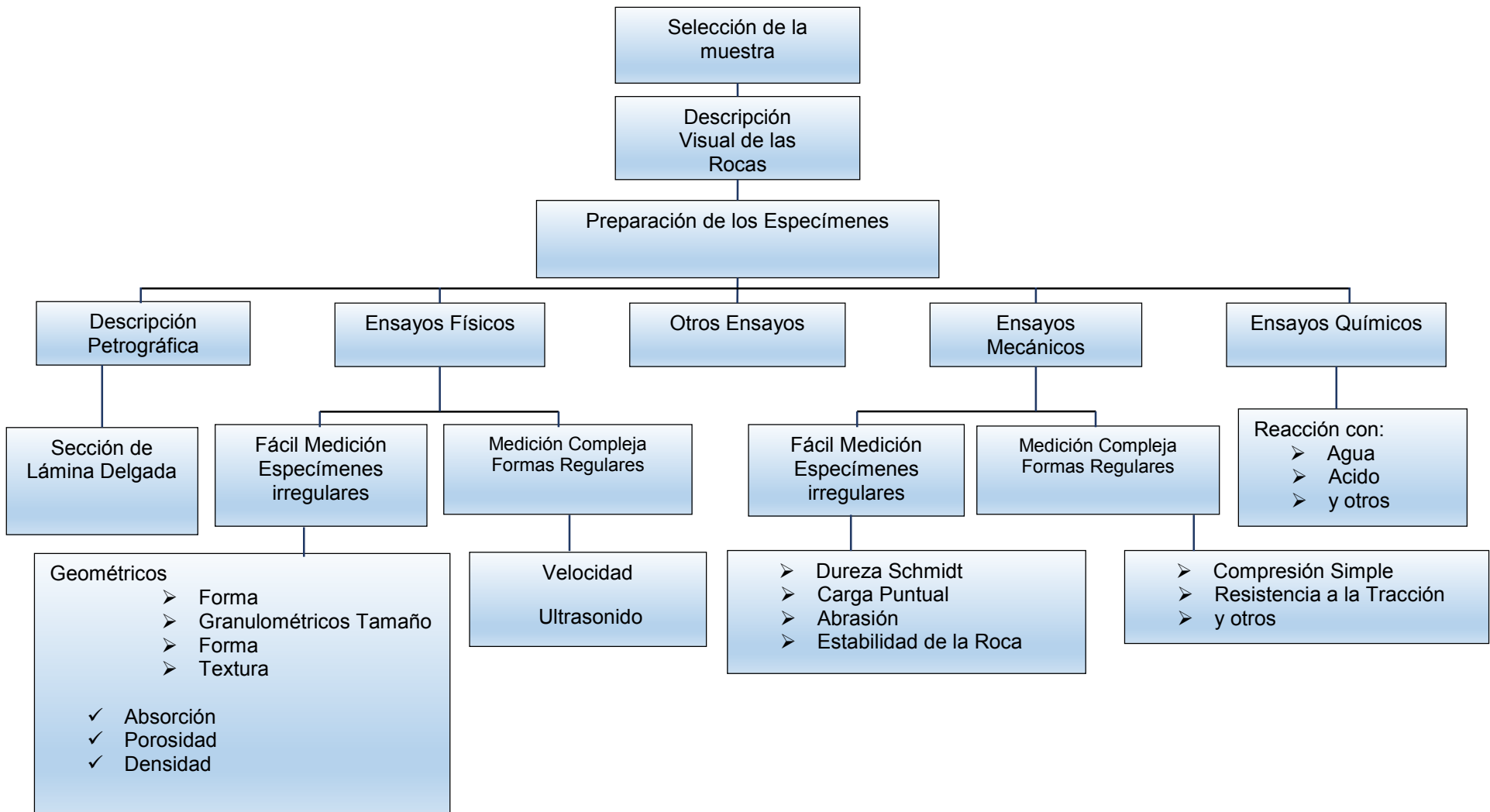



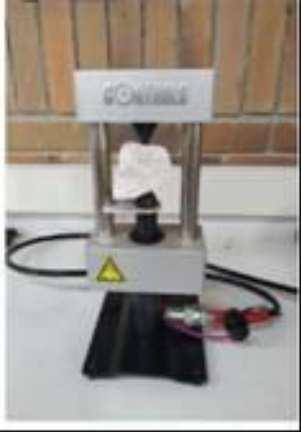




Figura 54. Orden jerárquico del proceso de investigación


Fuente: Autor

La tabla 16. Describe los procesos que permiten el desarrollo de la investigación tales como son: Método, Finalidad, Descripción del método.

Método de ensayo	Finalidad	Descripción del Método	Norma	Imagen
Análisis petrográfico	Este análisis permite describir y clasificar los constituyentes de la muestra, determinar sus cantidades relativas, identificar tipos y variedades de rocas, contenido de minerales inestables o reactivos química y volumétricamente, grado de meteorización, nivel de porosidad y posible presencia de contaminantes en los agregados.	Observaciones microscópicas de secciones delgadas mediante un microscopio petrográfico óptico de luz.	ASTM C-295	
tracción indirecta	El ensayo permite determinar la resistencia al a tracción indirecta de la roca	Consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de <b>tracción</b> creciente hasta que se produce la rotura de la misma.	ASTM D 3967-16	

<p>compresión simple</p>	<p>Con esta prueba se puede reconocer la capacidad de las rocas para soportar grandes cargas.</p>	<p>Aplicación de incremento de cargas hasta llegar al límite de rotura.</p>	<p>ASTM D-7012-14 MÉTODO C</p>	
<p>Carga Puntual</p>	<p>Este ensayo permite determinar la resistencia a la compresión simple de fragmentos irregulares de roca.</p>	<p>El fragmento se introduce en la máquina de ensayos y los punzones se cierran para establecer contacto a lo largo de un diámetro del testigo (D). La distancia L existente entre los puntos y el extremo libre más cercano debe ser al menos 0,5 D. La distancia D se medirá con precisión + 2%. La carga se incrementara de forma constante, de tal manera que se produzca la rotura entre 10 s y 60 s, quedando registrada la carga P. La resistencia a carga puntual no corregida, <math>I_s</math>, se</p>	<p>ASTM D 5731-95 T NLT-252/91</p>	

		obtiene de la expresión: $Is = P/D^2$ .		
Velocidad Sónica	Esta prueba está diseñada como un método para determinar la velocidad de propagación de ondas elásticas en las rocas con el impulso ultrasónico.	El procedimiento consiste en colocar los transductores a ambos lados de la probeta y generar un impulso sónico por un transductor (emisor) y recibir la señal que viaja a través de la probeta por el otro (receptor).	ASTM D 2845-08 (RETIRADO EN EL 2017), CÓDIGO INTERNO SYP-PT-507	
Dureza Schmidt	Mide la dureza de un material rocoso por el rebote de un cilindro metálico. Utilizado frecuentemente para determinar la dureza del material rocoso con resistencias entre 400 y 20Mpa.	Consiste en determinar la cantidad de rebotes necesarios para un análisis considerando que a mayor cantidad de ensayos será el grado de confiabilidad.	INV E 413-13 ASTM C 805-08	
Abrasividad en Roca Método Cerchar	Permite conocer directamente la dureza y abrasividad de las rocas.	El ensayo consiste en pasar una aguja de acero con extremo cónico por la superficie de una muestra concreta, con un recorrido total de 10mm, un ángulo de 90° y un peso total de 7kg. La	ASTMA D – 7625-10	

		<p>abrasividad de la roca se expresa en base al diámetro producido por el desgaste en la aguja, representando el índice de Cerchar ése diámetro expresado en décimas de milímetro, en una escala que suele oscilar entre 1 y 6.</p>		
--	--	---	--	---

Fuente: Autor

Tabla 17. Resumen de procesos para llegar a la finalidad de la investigación

<p><b>Los anteriores ensayos permitirán determinar los índices de abrasividad más importantes tales como el CAI, y el Índice Schimazek.</b></p>				
<p>Índice <math>F_{schim}</math></p>	<p>La importancia de este ensayo es poder valorar el desgaste de los cabezales de los equipos de perforación y excavación.</p>	<p>Con este laboratorio se puede determinar el contenido de Cuarzo equivalente a través de secciones delgadas.</p>	<p>IT 5450</p>	<p><math>Q*d_{50}R_T</math></p>

Fuente: Autor

Una vez extraído el material se transporta al laboratorio donde se codifica los especímenes de estudio con las iniciales del autor, tipo de material, formación y su numeración asignada (DF.A.G-001); de igual forma se desarrollan ensayos y caracterizaciones complementarias que permiten determinar las tipologías del material seleccionado que para el caso es material de grupo Guadalupe.

## DESCRIPCIÓN VISUAL DE MUESTRAS DE ROCAS

En las rocas se definen parámetros para su descripción teniendo en cuenta la (Guía para la clasificación de campo y descripción de suelos y rocas para fines de ingeniería), desarrollado por Sociedad de Geotecnia de Nueva Zelanda, 2005.

Se tomara como modelo el documento (fielddescription of soil and rock, guidelineforthefieldclassification and description of soil and rock forengineeringpurposes), (descripción en campo de suelos y rocas, directrices para la clasificación y descripción en campo de suelos y rocas para fines de ingeniería), desarrollado por NzGeotechnicalSocietyInc (sociedad de geotecnia de Nueva Zelanda), 2005.

### NOMBRE DE LA ROCA

Las muestras son rocas areniscas (sedimentaria – detrítica).

### TAMAÑO DE GRANO

Para las rocas sedimentarias es posible diferenciar el grano nombrándolo por el tamaño, al igual que en la arena, limo o arcilla, con el mismo rango o intervalo de tamaños, en el caso del elemento principal o de la matriz. En la siguiente tabla se observa el tamaño de grano para las rocas sedimentarias, la tabla 18. Describe el tamaño de grano en el material arenisca, la tabla 18. Presenta el tamaño de grano del material de investigación.

Tabla 18. Tamaño de grano para rocas sedimentarias.

ROCA	DESCRIPCIÓN	TAMAÑO DE GRANO
<b>Arenisca</b>	Roca con tamaño de grano entre 4,75mm y 0,075mm	<b>Grueso</b> , Entre 4,75mm y 2,00mm
		<b>Medio</b> , entre 2,00 mm y 0,425mm
		<b>Fino</b> , Entre 0,425mm y 0,075mm
<b>Limolita</b>	Roca con tamaño de grano entre 0,075mm y 0,005mm	<b>Muy fino</b> , Entre 0,075mm y 0,005mm
<b>Arcillolita, Lodolita y Lutita</b>	Roca con tamaño de grano menor a 0,05mm	<b>Muy Fino</b> , Menor a 0,005mm

Fuente: Autor.

Tabla 19. Tamaño de grano Muestras de arenisca tomadas para la investigación grupo Guadalupe.

Material Arenisca de la Formación Guadalupe			
DF.A.G-001	DF.A.G-002	DF.A.G-003	DF.A.G-004
Nombre: Arenisca	Nombre: Arenisca	Nombre: Arenisca	Nombre: Arenisca
Tamaño de la Partícula (mm) 0.2 mm - 0.125 mm	Tamaño de la Partícula (mm) 0.06 mm - 0.12 mm	Tamaño de la Partícula (mm) 0.14 mm - 0.2mm	Tamaño de la Partícula (mm) 0.5mm - 0.25mm
Fabrica: Fina	Fabrica: Fina	Fabrica: Fina	Fabrica: Fina
			

Fuente: Autor.

## FÁBRICA

La fábrica se refiere a la disposición de minerales y partículas en la roca. La disposición puede ser de tamaños similares minerales/partículas, composición o arreglo entre ellos mostrando una orientación preferida. Para rocas sedimentarias es preferible utilizar lo indicado en la tabla de estratificación en términos de espesor. En rocas metamórficas se refiere al desarrollo de foliación. La fábrica se puede definir con la siguiente tabla en general la tabla 20. Determina la fábrica de una adaptación de *Field description of soil and rock*

Tabla 20. Fábrica en una roca.

Fábrica	Criterio
Fina	< 25 mm
Gruesa	25 – 100 mm
Masiva	No es posible observarla

Fuente: Field description of soil and rock (2005).

## COLOR

Aplica lo mencionado en los suelos. La denominación del color se deberá efectuar en la condición natural del material, prefiriendo las muestras en condición húmeda. La denominación de los colores se deberá realizar de acuerdo a la

siguiente tabla, comenzando con la pureza del color, croma o color primario; luego el color secundario o matiz; por último si existe algún aspecto de la claridad del color para destacar en la tabla 21. Se puede observar la denominación del color de la roca.

Tabla 21. Denominación de colores.

PRIMARIO	SECUNDARIO	COMPLEMENTO
Rojizo	Rojizo	Muy oscuro
Amarillo	Amarillento	Oscuro
Anaranjado	Parduzco	Apagado
Marrón / Pardo	Amarillento	Pálido
Verde	Violáceo	Claro
Oliva	Grisáceo	
Púrpura	Oliva	
Azul	Verdoso	
Gris	Azuloso	
Negro		

Fuente: Field description of soil and rock (2005).

Las rocas serán evaluadas teniendo en cuenta la carta o escala de colores emitida por la USDA, adaptada de la metodología de Munsell, en ella se realiza el análisis del matiz de la roca en estado seco natura y posteriormente la tonalidad que presenta después de ser sometida a la saturación de la muestra. En la figura 53. Se observa la carta de clasificación y la tabla 21. Expone la determinación de matiz para las muestras obtenidas para la investigación.

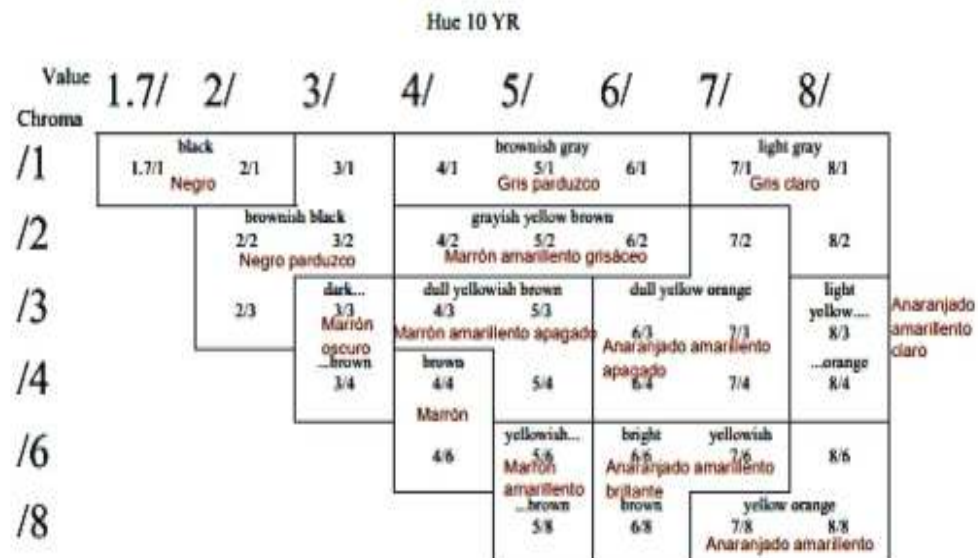


Figura 55.a. Carta de colores metodología de Munsell

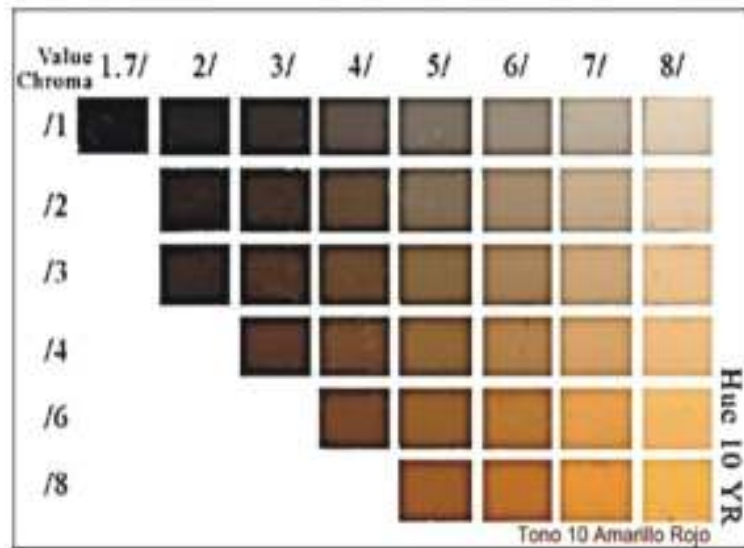


Figura 55.b. Carta de colores metodología de Munsell

Tabla 22. Determinación del color de las Muestras de arenisca tomadas para la investigación Grupo Guadalupe.

MATERIAL ARENISCA DEL GRUPO GUADALUPE							
DF.A.G-001		DF.A.G-002		DF.A.G-003		DF.A.G-004	
COLOR (TABLA DE MUNSELL)		COLOR (TABLA DE MUNSELL)		COLOR (TABLA DE MUNSELL)		COLOR (TABLA DE MUNSELL)	
SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO
7.5 Y 8/1	5 Y 8/1	7.5 Y 8/2	10 Y 8/1	25YR 8/3	25 YR 7/6	5 Y 8/4	5 Y 8/3
Gris Claro	Gris Claro	Gris Claro	Gris Claro	Amarillo Pálido	Marrón Amarillo Claro (Amarillento)	Amarillo Pálido	Amarillo Pálido
La roca refleja una franja muy mínima de óxido de hierro.		La muestra presenta patinas de óxido de hierro en las caras externas.		El material deja ver la presencia de óxido de hierro en los poros.		La muestra presenta presencia en menor cantidad de óxido de hierro.	
							

Fuente: Autor

### METEORIZACIÓN

La meteorización es el proceso de alteración y ruptura de suelos y rocas sobre y cerca de la superficie terrestre debido a la descomposición química y desintegración física. Si el nivel de meteorización no puede ser determinado, es mejor no incluirlo en la descripción de la roca. En la siguiente tabla se encuentra

una escala que describe el nivel de meteorización la siguiente tabla 23. Permiten establecer el nivel de meteorización de la roca, la tabla 24 refleja el nivel de meteorización de las rocas tomadas para el estudio.

Tabla 23. Nivel de meteorización en las muestras de roca.

Nivel de meteorización	Criterio
No meteorizado(a)	No se observa cambios de color, se tiene roca sana
Ligeramente meteorizado(a)	Pueden observarse cambios de color a lo largo de las diaclasas, las cuales pueden estar un poco abiertas. Comienza a observarse signos de debilidad
Moderadamente meteorizado(a)	Aumenta la cantidad de defectos debido a la acción del ambiente. Las superficies y diaclasas pueden estar decoloradas y algunos clastos y defectos también tendrán mayor decoloración. Se observa significativamente más débil
Altamente meteorizado(a)	Se observa decolorada totalmente, aumentando severamente la cantidad de defectos y fracturas. Se evidencia la descomposición profunda dentro de fracturas y adyacente a ellas.
Completamente meteorizado(a)	La resistencia original se ha perdido, la roca se encuentra cambiando a un suelo, ya sea por descomposición química o desintegración física, pero preserva algo de la fábrica original de la roca.

Fuente: Field description of soil and rock (2005).

Tabla 24. Nivel de meteorización en las muestras de roca seleccionadas para la investigación

MATERIAL ARENISCA DEL GRUPO GUADALUPE			
DF.A.G-001	DF.A.G-002	DF.A.G-003	DF.A.G-004
Arenisca: Sana	Arenisca: Sana	Arenisca: Sana	Arenisca: Sana
No se aprecia alteración alguna en el material de la muestra, no presenta cambios en el color lo que indica un material sano.	No se aprecia alteración alguna en el material de la muestra, no presenta cambios en el color lo que indica un material sano, que presenta patinas de óxido en sus caras externas.	No se aprecia alteración alguna en el material de la muestra, no presenta cambios en el color lo que indica un material sano, que contiene óxido de hierro en sus poros.	No se aprecia alteración alguna en el material de la muestra, no presenta cambios en el color lo que indica un material sano, que refleja presencia en una menor cantidad de óxido de hierro.
			

Fuente: Autor

## FUERZA

Cuando se conocen resultados de ensayos de resistencia, es posible describir la roca tomando en cuenta este factor, como se observa en la siguiente tabla25:

Tabla 25. Descripción en términos de fuerza. Adaptado de:

Descripción	Compresión simple $\sigma_c$ [MPa]	Índice de carga puntual $I_{50}$ [MPa]
Extremadamente fuerte	> 250	> 10
Muy fuerte	100 – 250	5 – 10
Fuerte	50 – 100	2 – 5
Moderadamente fuerte	20 – 50	1 – 2
Débil	5 – 20	< 1
Muy débil	1 – 5	
Extremadamente débil	< 1	

Fuente:Field description of soil and rock (2005).

## TEXTURA AL TACTO

Es posible establecer la textura cuando se toca la superficie de una roca, nombrando si es lisa o rugosa. La tabla 26. Evidencia las características de fuerza y textura.

Tabla 26.Caracterización Fuerza y textura del material seleccionado para la investigación.

MATERIAL ARENISCA DEL GRUPO GUADALUPE			
DF.A.G-001	DF.A.G-002	DF.A.G-003	DF.A.G-004
<b>FUERZA</b>	<b>FUERZA</b>	<b>FUERZA</b>	<b>FUERZA</b>
Fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte
<b>TEXTURA</b>	<b>TEXTURA</b>	<b>TEXTURA</b>	<b>TEXTURA</b>
Con Textura al Tacto Rugosa	Con Textura al Tacto Rugosa	Con Textura al Tacto Rugosa	Con Textura al Tacto Rugosa

Fuente: Autor

## ORDEN DE LOS ELEMENTOS PARA DESCRIPCIÓN VISUAL EN ROCAS

La secuencia de descripción de las rocas involucra los materiales del grupo Guadalupe, primero los elementos de la formación Arenisca Dura y posteriormente

se enuncian los de la formación Arenisca Labor, las tablas 27, 28, 29 y 30. Describen visualmente las cuatro rocas de estudio del Grupo Guadalupe.

Tabla 27. Orden de elementos para la descripción rocas.

<b>DF.A.G.001</b>		
Nombre de formación	Arenisca Grupo Guadalupe	Nombre de la roca sedimentaria – detrítica
Tamaño de grano	Fino 0,2mm - 0.125mm.	
Color seco - húmedo	Gris Claro - Gris Claro	Características visuales Se observa una roca densa y sana
Fábrica	Fina.	
Meteorización	Sana.	

<b>Elemento calificativo</b>		
Fuerza	Fuerte	Calificación de la roca Alta
Textura al tacto	Con textura al tacto Rugosa.	

Fuente: Autor

Tabla 28. Orden de elementos para la descripción rocas.

<b>DF.A.G.002</b>		
Nombre de formación	Arenisca Grupo Guadalupe	Nombre de la roca sedimentaria – detrítica
Tamaño de grano	Fino 0,2mm - 0.125mm.	
Color seco - húmedo	Gris Claro - Gris Claro	Características visuales Se observa una roca densa y sana
Fábrica	Fina.	
Meteorización	Sana.	

<b>Elemento calificativo</b>		
Fuerza	Fuerte	Calificación de la roca Alta
Textura al tacto	Con textura al tacto Rugosa.	

Fuente: Autor

Tabla 29. Orden de elementos para la descripción rocas.

<b>DF.A.G.003</b>		
Nombre de formación	Arenisca Grupo Guadalupe	Nombre de la roca sedimentaria – detrítica
Tamaño de grano	Fino 0.14 mm - 0.2mm	
Color seco - húmedo	Amarillo Pálido – Marrón - Amarillo Claro	Características visuales Se observa una roca densa y sana con presencia de óxido de hierro
Fábrica	Fina.	
Meteorización	Sana.	

<b>Elemento calificativo</b>		
Fuerza	Fuerte	Calificación de la roca Alta
Textura al tacto	Con textura al tacto Rugosa.	

Fuente: Autor

Tabla 30. Orden de elementos para la descripción rocas.

<b>DF.A.G.004</b>		
Nombre de formación	Arenisca Grupo Guadalupe	Nombre de la roca sedimentaria – detrítica
Tamaño de grano	Medio 0.5mm - 0.25mm	
Color seco - húmedo	Amarillo pálido – Amarillo Pálido	Características visuales con poca presencia de óxido de hierro
Fábrica	Fina.	
Meteorización	Sana.	

<b>Elemento calificativo</b>		
Fuerza	Fuerte	Calificación de la roca Alta
Textura al tacto	Con textura al tacto Rugosa.	

Fuente: Autor

## **CAPÍTULO PETROGRAFÍA**

### **ANÁLISIS PETROGRÁFICO DE CUATRO ARENISCAS DEL GRUPO GUADALUPE**

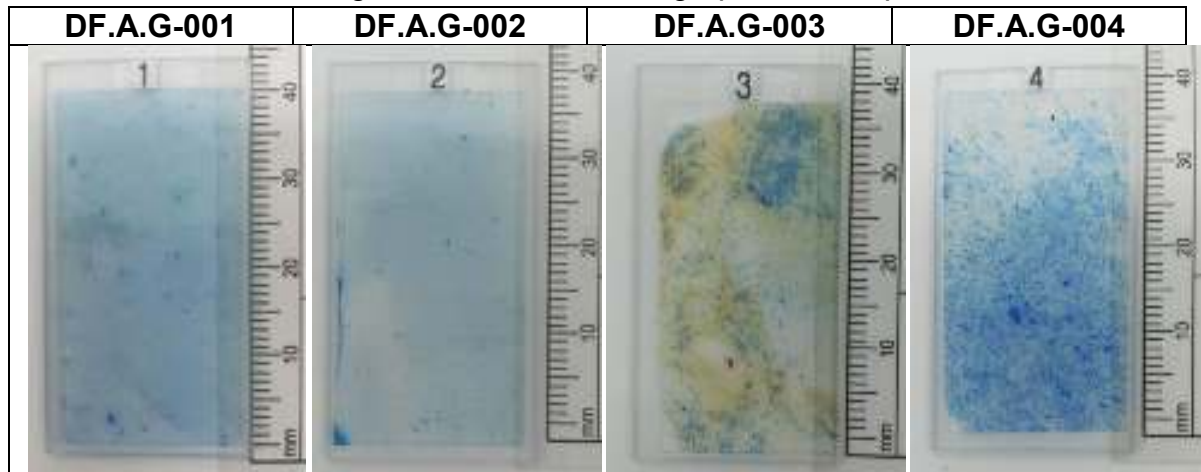
El presente capítulo contiene, los resultados del análisis de las principales características petrográficas de cuatro muestras de rocas tomadas en la vía que de Bogotá conduce al cerro o Santuario de Guadalupe y que hacen parte de las diferentes unidades geológicas del Grupo Guadalupe.

La petrografía se realiza sobre las secciones delgadas de roca, con impregnación de resina epóxica, elaboradas en los laboratorios de la empresa GMAS, y tomadas de cada una de las citadas cuatro muestras de mano, recolectadas para el presente estudio. Para el análisis, se utilizó el microscopio petrográfico, marca Carl Zeiss GmbH, AxionScope- A1, de la Universidad Santo Tomás, y mediante refracción de la luz directa y polarizada lo que permite caracterizar e identificar los minerales y demás constituyentes de las rocas objeto de estudio.

Para el desarrollo del presente estudio, en primera instancia se analiza la textura de cada una de las rocas, la cual está relacionada con el tamaño y forma de los fragmentos minerales que las constituyen, así como con el grado de selección o granularidad, redondez y esfericidad, de estos. También se analiza la relación estructural entre dichos fragmentos, es decir, el tipo de contactos entre estos granos y si los espacios entre ellos se encuentran vacíos o rellenos con algún tipo específico de mineral, lo cual indica el contenido de matriz o de cemento que presenta cada muestra. Otro aspecto fundamental en el análisis es la composición predominante de estos detritos, de manera general, se identifican los principales minerales constituyentes de las rocas.

Dicho análisis petrográfico se realiza con el objeto, de aportar parámetros estructurales, texturales y composicionales de cada una de las muestras seleccionadas, para complementar el análisis comparativo de las características físico mecánicas de las rocas, con la mineralogía y petrografía de estas, que permitan comprender mejor el comportamiento de cada una frente a la abrasión. En la tabla 31, se presenta una imagen de las secciones delgadas en estudio.

Tabla 31. Secciones delgadas de arenisca del grupo Guadalupe.



Fuente: Autor

### ANÁLISIS TEXTURAL Y ESTRUCTURAL DE LA SECCIÓN DELGADA DF.A.G-001

**Tipo de Roca:** Sedimentaria detrítica o clástica, es decir, constituida por fragmentos, o detritos de minerales, provenientes de la alteración físico mecánica y química de otras rocas preexistentes.

**Tamaño de los clastos o granos:** en la sección analizada predominan los tamaños de 0.2 mm - 0.125 mm. (Arena fina)

**Nombre de la roca:** Arenisca de grano fino.

**Forma de los granos:** la mayoría de los clastos son angulares a sub-angulares, sin embargo la angularidad se presenta debido a los sobre crecimientos de sílice, presente sobre los granos de arena, debido a procesos diagenéticos.

**Grado de esfericidad:** los granos más grandes tienen baja esfericidad, y una mayor tendencia a ser elongados. Los granos más pequeños son mayormente esféricos.

**Grado de selección del grano (Granularidad):** alta a muy alta. Buena a muy buena. Los granos varían entre 0.2mm y 0.125mm con predominio del grano fino sobre el muy fino.

**Contactos entre granos:** predominan los contactos de tipo tangencial sin embargo, en los sectores donde aumenta la porosidad primaria, se observan contactos de tipo puntual, entre los clastos.

**Matriz:** Parcialmente distribuida como minerales de arcilla y sin óxidos de hierro.

**Cemento:** Parcialmente presenta cemento síliceo debido al parcial sobrecrecimiento de sílice, en los sectores de mayor empaquetamiento y menor porosidad primaria.

**Porosidad primaria:** Media a baja con presencia de minerales de arcilla como matriz, producto de la alteración de los minerales inestables y cemento síliceo, que disminuye la porosidad primaria.

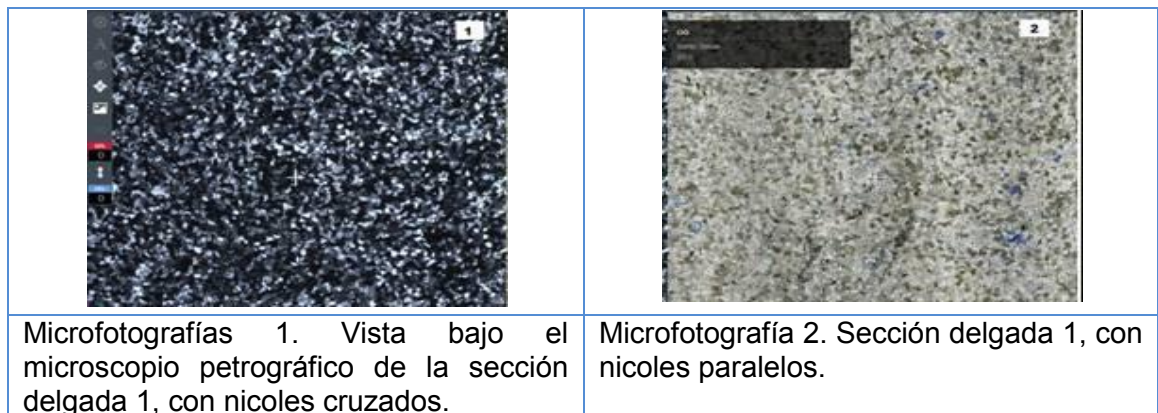


Figura 56. Micrografías

Fuente: Autor



Figura 57. Micrografías

Fuente: Autor

### Composición:

De manera general y de acuerdo con estimación preliminar visual, se considera que el mineral más abundante, en proporción cercana al 98%, es el cuarzo, seguido por los feldespatos de potasio.

El principal mineral accesorio es el circón, en porcentajes menores del 2% tales como: turmalina, minerales opacos y glauconita (Oolitos), del orden de 0.5% o menos, también algunos fragmentos de micas tipo moscovita en proporción menor del 0.1%.

Analizando los tipos de cuarzo identificados se estima que el mayor contenido silíceo lo aporta el cuarzo monocristalino con extinción ondulante. El contenido de cuarzo policristalino es casi nulo. El contenido silíceo sometido a presión, recristalización y/o metamorfismo, es decir, el cuarzo ondulante tiene gran importancia, dado que no puede estar indicando un origen o roca fuente de tipo metamórfico en estas areniscas.

También se presentan granos de cuarzo monocristalino con extinción recta y algunos de tipo cuarzitos con bahías de origen volcánico y eventuales cuarzitos con alta densidad de inclusiones muy posiblemente proveniente de venas. En general los feldespatos se presentan en proporciones muy bajas entre el 2% y el 1%, y levemente alterados. En la microfotografía 5 se muestra en detalle la composición descrita, los espacios porosos parcialmente ocupados por minerales de arcilla y la presencia de minerales accesorios en bajas proporciones. En la microfotografía 6 un detalle con nicols cruzados, donde se muestran las características texturales ya descritas.



Microfotografías 5. (Foto nicols paralelos) Recuadros: Azul: Turmalina, Naranja: Minerales opacos, Violeta: Glauconita (Oolitos).

Figura 58. Micrografías

Fuente: Autor



Microfotografías 6. (Foto nicoles cruzados). Nótese el tamaño de los granos, entre 0.2 mm y 0.125mm

Figura 59. Micrografías

### **ANÁLISIS TEXTURAL Y ESTRUCTURAL DE LA SECCIÓN DELGADA DF.A.G-002.**

**Tipo de Roca:** Sedimentaria detrítica o clástica constituida por fragmentos de minerales, provenientes de otras rocas preexistentes.

**Tamaño de grano:** predominan los tamaños de: 0.06 mm y 0.125 mm (arena muy fina a arena fina).

**Nombre de la roca:** Arenisca de grano muy fino.

**Forma de los granos:** angulares a subangulares. Los granos subangulares son más pequeños.

**Grado de esfericidad:** baja, tendencia a ser elongados.

**Granularidad o grado de selección del grano:** alta

Los granos varían entre 0.06 mm y 0.125 mm con predominio del grano muy fino sobre el tamaño fino.

**Contactos entre granos:** predominan los contactos puntuales y flotantes en una matriz de minerales de arcilla. En algunos sectores de bajo empaquetamiento y menor porosidad los contactos son tangenciales.

**Matriz:** Parcialmente distribuida como minerales de arcilla y sin óxidos de hierro.

**Cemento:** Parcialmente presenta cemento de sílice, generado diagenéticamente por sobrecrecimientos de sílice, sobre los granos que presentan un mayor empaquetamiento, por tanto, disminuyendo la porosidad primaria, en algunos sectores de la lámina más que en otros.

**Porosidad:** baja (primaria). Debido a la presencia de matriz de minerales de arcilla.



Figura 60. Micrografías

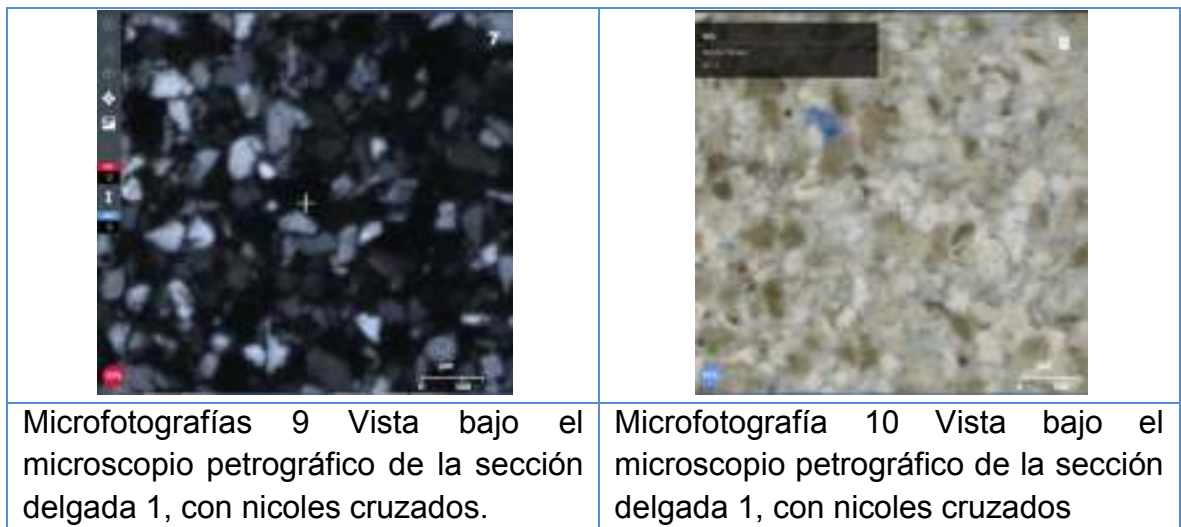


Figura 61. Micrografías

**Composición:**

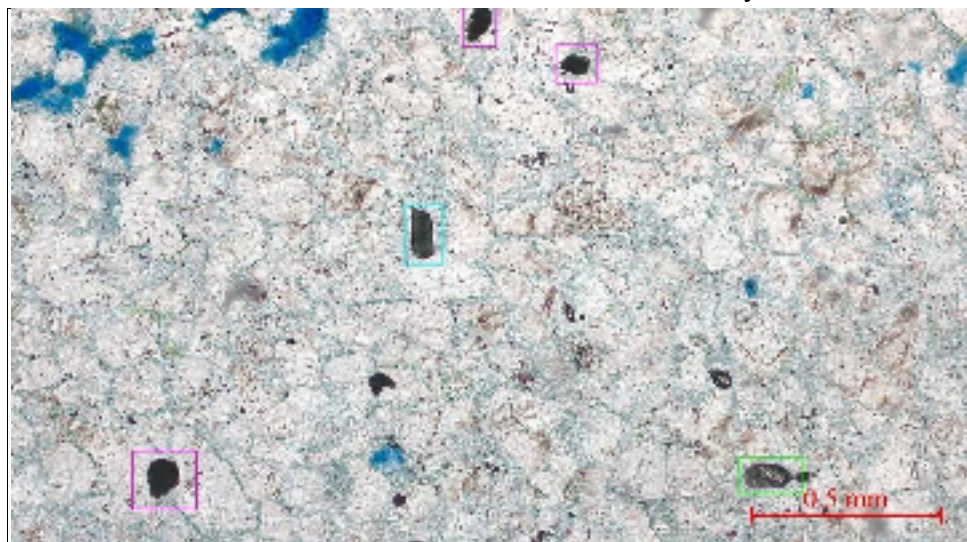
De manera general y de acuerdo con estimación visual, se considera que el mineral más abundante, del orden de 80% o más, es el cuarzo, seguido por los feldespatos, algunos sectores de la lámina presentan más concentración de

feldespatos alterados parcialmente por arcillas. Como mineral accesorio se encuentran granos de circón, en porcentajes menores del 2% y algunos fragmentos de micas, como la moscovita, biotita y en proporción menor del 1%, rutilo, turmalina, apatito

Analizando los tipos de cuarzo identificados se estima que el mayor contenido silíceo lo aporta el cuarzo monocristalino con extinción recta. El contenido de cuarzo policristalino es casi nulo. El contenido silíceo sometido a presión, recristalización y/o metamorfismo, es decir, el cuarzo ondulante tiene mayor importancia o presencia del orden del 30% a 40%.

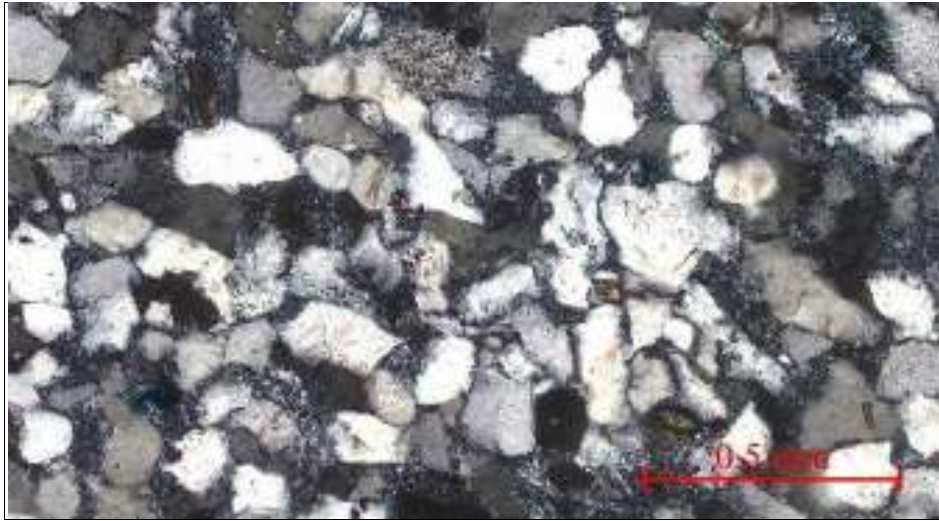
También se presentan granos de cuarzo monocristalino frecuentemente de tipo cuarzos con bahías de origen volcánico y eventuales cuarzos con alta densidad de inclusiones muy posiblemente proveniente de venas. En general los feldespatos se presentan como granos angulares al punto de conservarse la forma euhedral del mineral.

En la microfotografías 11 se muestra en detalle la composición descrita, los espacios porosos, ocupados por minerales de arcilla y la presencia de minerales accesorios en bajas proporciones. En la microfotografías 12 un detalle con nicoles cruzados, donde se muestran las características texturales ya descritas.



Microfotografía 11. (Nicoles paralelos) Nótese lo principales minerales accesorios de alta resistencia a la meteorización, dentro del recuadros: violeta: Rutilo, turquesa: Turmalina, y verde: Apatito. Fuente: Autor.

Figura 62. Micrografías



Microfotografía 12 (Foto nicoles cruzados). Nótese el tamaño de los granos, entre 0.06 mm - 0.12 mm.

Figura 63. Micrograffas

### **ANÁLISIS TEXTURAL Y ESTRUCTURAL DE LA SECCIÓN DELGADA DF.A.G-003.**

**Tipo de Roca:** Sedimentaria detrítica o clástica

**Tamaño de grano:** 0.14 mm - 0.2mm (arena fina)

**Nombre de la roca:** Arenisca de grano muy fino

**Forma de los granos:** subredondeados a subangulares. Los granos subredondeados son más pequeños que los subangulares.

**Grado de esfericidad:** media, tendencia a ser elongados.

**Grado de selección del grano (Granularidad):** alta. Los granos varían entre 0.14mm y 0.2 mm con predominio del grano medio sobre el fino.

**Contactos entre granos:** predominan los contactos puntuales y flotantes dentro de una matriz rica en óxidos de hierro. En algunos sectores de mayor empaquetamiento y menor porosidad.

**Matriz: alta** Matriz arcillosa que da soporte a las partículas terrígenas. Proporción de matriz arcillosa y óxidos de hierro.

**Cemento:** Presenta de manera importante, cemento ferruginoso, que disminuye la porosidad primaria.

**Porosidad:** Media a alta (primaria), con presencia de minerales de arcilla como matriz que disminuye la porosidad primaria. Porosidad atribuida a la disolución de fragmentos inestables.

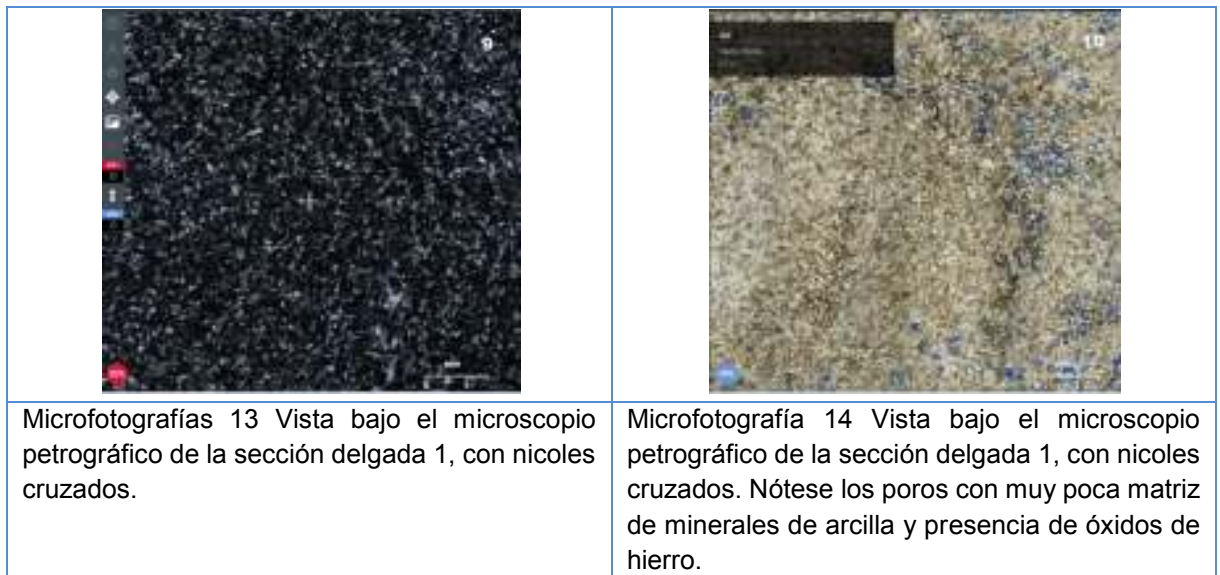


Figura 64. Micrografías



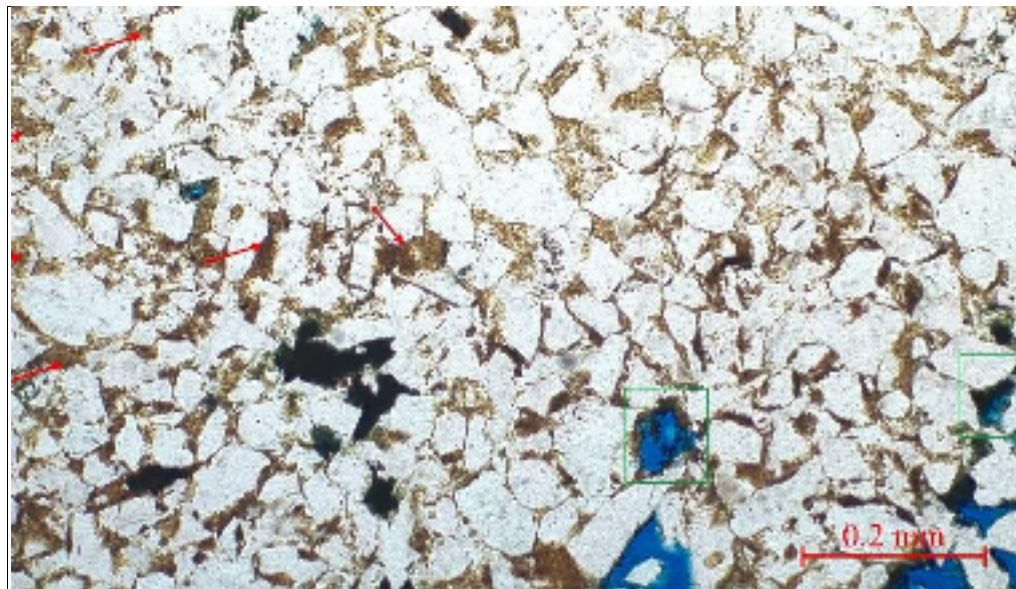
Figura 65. Micrografías

### Composición:

De manera general y de acuerdo con estimación preliminar visual, los minerales más abundantes son cuarzo (75% a 80%) y feldespatos (15% a 20%) (Probablemente de sodio o potasio). Como mineral accesorio se encuentran granos de circón y glauconita, en porcentajes menores del 3%.

Analizando los tipos de cuarzo identificados se estima que el mayor contenido silíceo lo aporta el cuarzo monocristalino con extinción recta. El contenido de cuarzo policristalino es casi nulo. El contenido silíceo sometido a presión, recristalización y/o metamorfismo, es decir, el cuarzo ondulante tiene mayor importancia o presencia del orden del 30%, sobre todo en los sectores donde los granos están más empaquetados y con contactos entre granos de tipo ondulantes.

También se presentan granos de cuarzo monocristalino frecuentemente de tipo cuarzitos con bahías de origen volcánico y eventuales cuarzitos con alta densidad de inclusiones muy posiblemente proveniente de venas. En general los feldespatos se presentan como granos angulares al punto de conservarse la forma euédrica del mineral.



Microfotografía 17. (Nicoles paralelos). Nótase lo principales minerales accesorios de alta resistencia a la meteorización, dentro del recuadros: azul: glauconita, verde: Porosidad atribuida a la disolución de fragmentos inestables. Flechas: rojas: Matriz arcillosa que da soporte a las partículas terrígenas:

Figura 66. Micrografías



Microfotografía 18. (Nicoles cruzados). Nótase el tamaño de los granos, entre 0.14 mm - 0.2mm.

Figura 67. Micrografías

#### **ANÁLISIS TEXTURAL Y ESTRUCTURAL DE LA SECCIÓN DELGADA DF.A.G-004.**

**Tipo de Roca:** Sedimentaria detrítica o clástica

**Tamaño de grano:** predomina de 0.5mm - 0.3mm (arena media)

**Nombre de la roca:** Arenisca de grano medio.

**Forma de los granos:** subredondeados a subangulares. Los granos subredondeados son más pequeños que los subangulares.

**Grado de esfericidad:** baja, tendencia a ser elongados.

**Grado de selección del grano (Granularidad):** pobre a media. Los granos varían entre 0.04mm y 0.5mm con predominio del grano medio sobre el fino.

**Contactos entre granos:** En algunos sectores de mayor empaquetamiento y menor porosidad son ondulados.

**Matriz:** Muy baja proporción de matriz arcillosa, sin óxidos de hierro.

**Cemento:** Presenta de manera importante, cemento de sílice, por sobrecrecimientos de sílice, en los sectores de mayor empaquetamiento y menor porosidad primaria.

**Porosidad:** Comparativamente es la otra roca analizada, esta es la roca con mayores espacios porosos. En algunos sectores la porosidad alcanza al 30 o 35%, la porosidad presenta un sistema interconectado de poros que aumentaría su efectividad. Es de aclarar que dicha porosidad se podría atribuir a procesos de disolución de fragmentos inestables, desprendimiento de granos o dilatación por pérdida de presión.

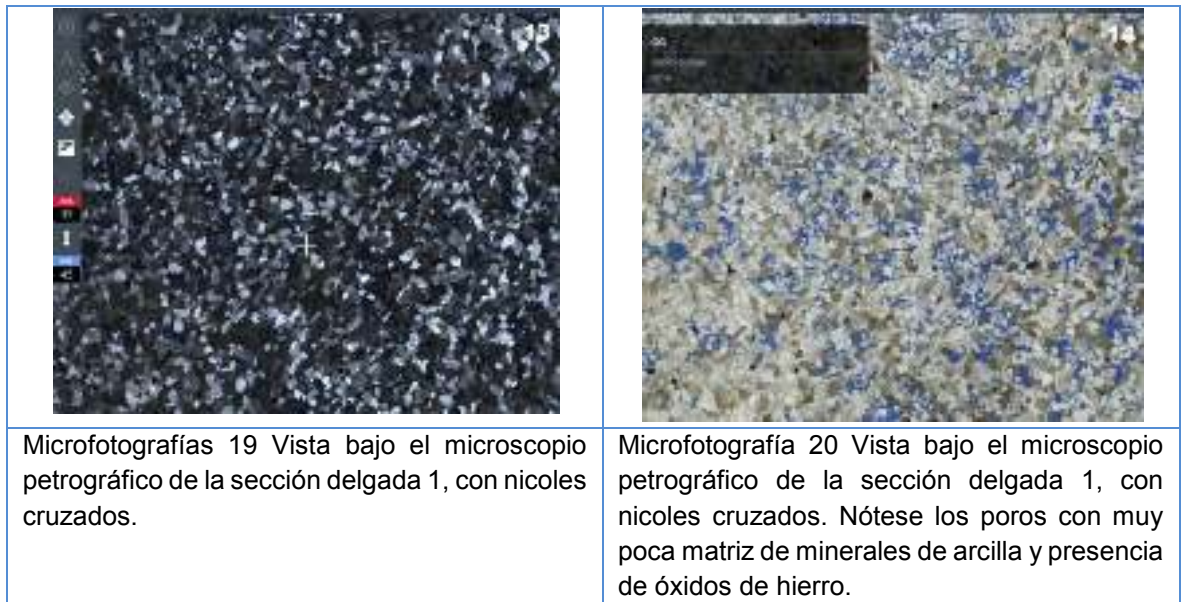


Figura 68. Micrografías



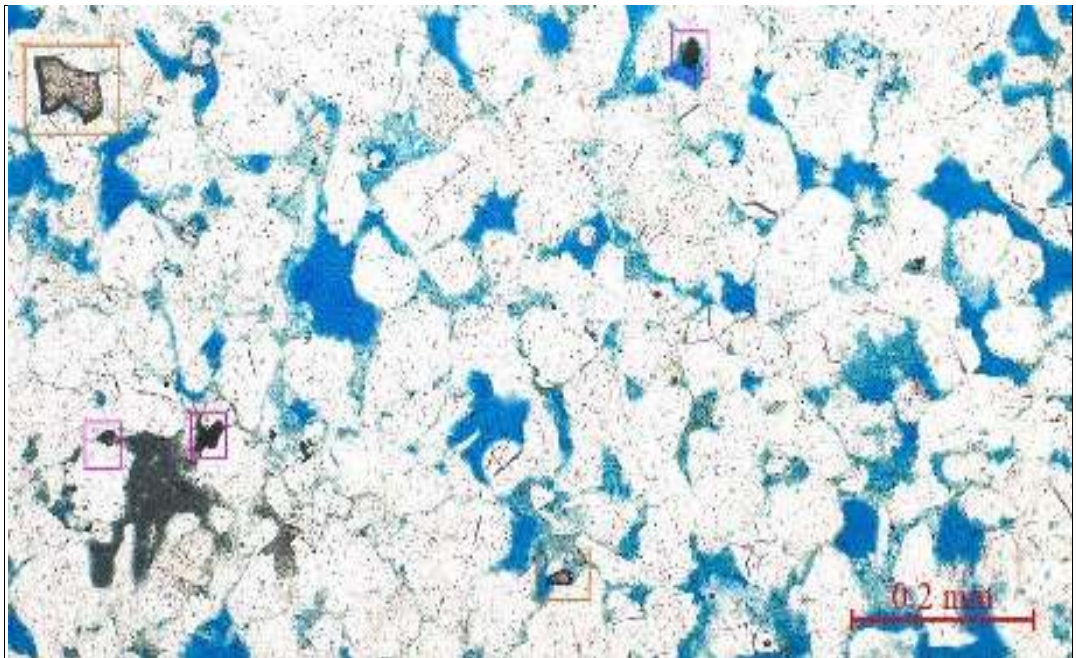
Figura 69. Micrografías

### Composición:

De manera general y de acuerdo con estimación visual, los minerales más abundantes son cuarzo (80% a 85%) y feldespatos (15% a 20%). Como mineral accesorio se encuentra granos de circón, en porcentajes menores del 3%.

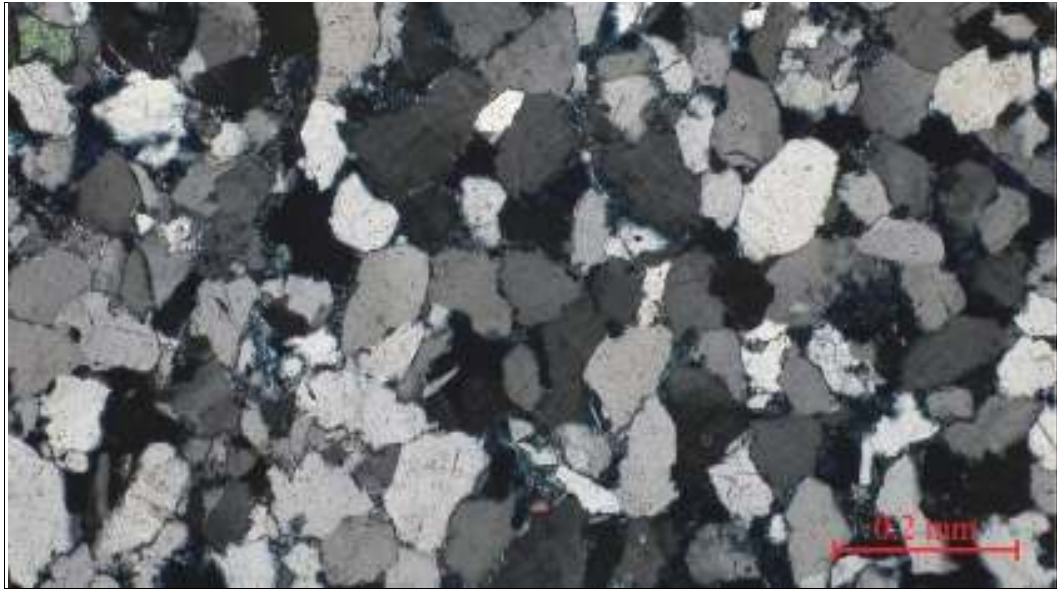
Analizando los tipos de cuarzo identificados se estima que el mayor contenido silíceo lo aporta el cuarzo monocristalino con extinción ondulante. El contenido de cuarzo policristalino es casi nulo. El contenido silíceo sometido a presión, recristalización y/o metamorfismo, es decir, el cuarzo ondulante tiene gran importancia y presencia del orden del 70%. También se presentan granos de cuarzo monocristalino frecuentemente de tipo cuarzitos con bahías de origen volcánico y eventuales cuarzitos con alta densidad de inclusiones muy posiblemente proveniente de venas.

En general los feldespatos se presentan como granos angulares al punto de conservarse la forma euédrica del mineral.



Microfotografía 23. (Nicoles paralelos). Nótense los principales minerales accesorios de alta resistencia a la meteorización, dentro de los recuadros: Naranja: Turmalina y Violeta: Rutilo:





Figura 70. Micrografías



Microfotografía 24. (Nicoles cruzados). Nótese el tamaño de los granos, entre 0.5mm - 0.3mm

Figura71. Micrografías

Tabla 32. Resumen del análisis petrográfico

ENSAYO			ANÁLISIS DE GRANULOMÉTRICO								
EQUIPO			MICROSCOPIO PETROGRÁFICO, MARCA CARL ZEISS GMBH, AXION SCOPE - A1								
PÁG. WEB			ONEGEO.GMASLAB.COM								
M - 1	Código	Tipo De Roca	Tamaño De Grano	Nombre	Grupo Geológico	Forma de Grano	Grado de Selección	Grado de Esfericidad	Contacto entre Granos	Porosidad	Líticos %
	DF.A.G-001	Sedimentaria Detrítica o Clástica	Fino 0.2mm - 0.125mm	Arenisca	Guadalupe	Angulares a Sub-Angulares	Alta a Muy Alta	Los granos más grandes tienen baja esfericidad, y una mayor tendencia a ser elongados.	predominan los contactos de tipo tangencial	Media a baja con presencia de minerales de arcilla como matriz y cemento silíceo, que disminuye la porosidad primaria.	< 2,3
M - 2	Código	Tipo De Roca	Tamaño De Grano	Nombre	Formación Grupo	Forma de Grano	Grado de Selección	Grado de Esfericidad	Contacto entre Granos	Porosidad	Líticos %
	DF.A.G-002	Sedimentaria Detrítica o Clástica	Muy Fino 0.06mm - 0.12mm	Arenisca	Guadalupe	Angulares a Sub-Angulares	Alta	Baja, tendencia a ser elongados.	Predominan los contactos puntuales y flotantes en una matriz de minerales de arcilla.	Baja (primaria). Debido a la presencia de matriz de minerales de arcilla.	< 3,0
M - 3	Código	Tipo De Roca	Tamaño De Grano	Nombre	Formación Grupo	Forma de Grano	Grado de Selección	Grado de Esfericidad	Contacto entre Granos	Porosidad	Líticos %
	DF.A.G-003	Sedimentaria Detrítica o Clástica	Muy Fino 0.14mm - 0.2mm	Arenisca	Guadalupe	Subredondeados a Subangulares.	Alta. Los granos varían entre grano medio a fino.	Media, tendencia a ser elongados.	Predominan los contactos puntuales y flotantes dentro de una matriz rica en óxidos de hierro.	Media a alta (primaria), con presencia de minerales de arcilla como matriz que disminuye la porosidad primaria.	< 3,0
M - 4	Código	Tipo De Roca	Tamaño De Grano	Nombre	Formación Grupo	Forma de Grano	Grado de Selección	Grado de Esfericidad	Contacto entre Granos	Porosidad	Líticos %
	DF.A.G-004	Sedimentaria Detrítica o Clástica	Media 0.3mm - 0.5mm	Arenisca	Guadalupe	subredondeados a subangulares	Pobre a media.	Baja, tendencia a ser elongados.	En algunos sectores de mayor empaquetamiento y menor porosidad son ondulados.	Esta es la roca con mayores espacios porosos.	< 3,0





La tabla 32 presenta la compilación de análisis petrográfico realizado a través de las secciones delgadas realizadas a los cuatro especímenes del grupo Guadalupe para la investigación.

### Contenido de Carbonatos

Mediante adición de gotas de disolución de ácido Clorhídrico al 10% se distinguen tres categorías.

- ◆ Sin CEMENTO CALCAREO O carbonatos (0) si no produce efervescencia.
- ◆ Calcáreo (+) si produce efervescencia clara y de corta duración.
- ◆ Altamente Calcáreo (++) si produce efervescencia fuerte y prolongada.

Tabla 33 verificación de contenido de carbonatos.

Material Arenisca del Grupo Guadalupe			
CONTENIDO DE CARBONATOS			
DF.A.G-001	DF.A.G-002	DF.A.G-003	DF.A.G-004
(0)	(0)	(0)	(0)
			

Fuente: Autor



### Estabilidad de la Roca

◆ Evalúa la degradación de la roca exponiéndola a nuevas condiciones ambientales y de agua. Aquí se sumerge la roca para conocer si poco a poco se desintegra. Figura 72 permite ver la estabilidad de una roca sometida a la saturación de agua. En la tabla 34 se puede tener claridad sobre la estabilidad de la roca de investigación.



Figura 72. Estabilidades de la muestra.

Tabla 34. Estabilidad de la roca en muestras seleccionadas del Grupo Guadalupe para la investigación

Material Arenisca del Grupo Guadalupe			
DF.A.G-001	DF.A.G-002	DF.A.G-003	DF.A.G-004
Arenisca: Estable	Arenisca: Estable	Arenisca: Estable	Arenisca: Estable
No se aprecia cambios en la muestra después de estar sumergida en el agua durante 72 horas, por tal razón se puede precisar que la muestra N° 1 es estable.	No se evidencian alteración en el material después de estar sumergida en el agua durante 72 horas, por lo cual se puede expresar que la roca N° 2 es estable.	No se observa ningún desprendimiento en la muestra luego de permanecer dentro del agua durante 72 horas, por tal motivo se puede indicar que el espécimen N° 3 es estable.	No se ven cambios aparentes en la roca después de estar sumergida en el agua durante 72 horas, por tal razón se puede precisar que la muestra N° 3 es estable.
			

Fuente: Autor

En todo proyecto importante conocer el grado de estabilidad de la roca para determinar qué tan frágil puede llegar a ser cuando se somete a niveles freáticos altos, de igual forma el riesgo que puede generarse en las actividades de excavación de túneles.

### Peso específico

➤ Cociente entre el peso de la muestra y su volumen.

➤ Aparente  $(\gamma = \frac{W_t}{V_t})$

➤ Seco  $(\gamma_d = \frac{W_s}{V_t})$

➤ Saturado  $(\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{V_t})$

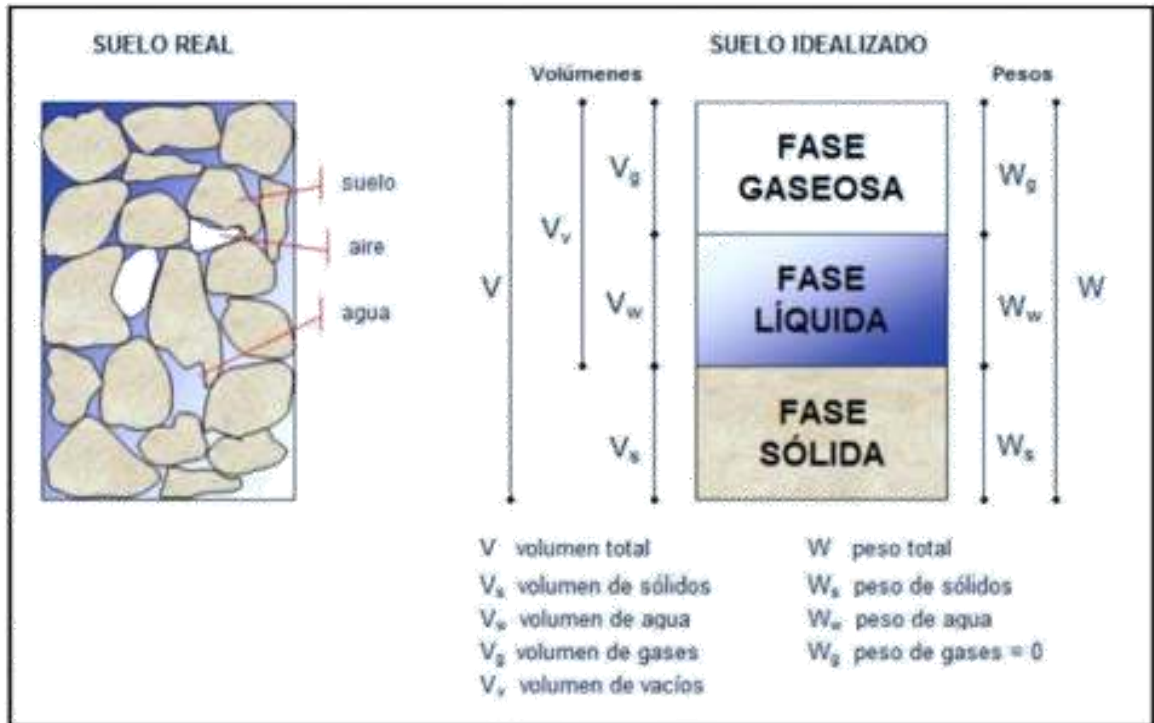


Figura 73. Esquema del suelo

Nota: En este orden ya que después se calienta el horno para sacar toda la humedad que tiene la Roca.

A Mayor Peso Especifico Mayor Comportamiento Mecánico.

### Procedimiento

- Peso: se pasa la muestra por una balanza con suficiente precisión en los tres puntos mencionados:
- Situación Natural (Aparente).
- Secado en estufa (Seco).
- Sumergido en agua (Saturado).

Después de sumergirla muestra y posteriormente secarla para conocer el volumen de agua desalojado del material. La tabla 30. Presenta los pesos del material y la tabla 31 deja conocer el peso específico del material en estudio

### Volumen

- Mediremos el volumen utilizando el método de la balanza hidrostática.

Tabla 35. Valores de pesos de la muestras del grupo Guadalupe en estudio.

Material Arenisca del Grupo Guadalupe											
PESO ESPECIFICO											
DF.A.G-001			DF.A.G-002			DF.A.G-003			DF.A.G-004		
P <sub>1</sub> (g)	P <sub>2</sub> (g)	P <sub>3</sub> (g)	P <sub>1</sub> (g)	P <sub>2</sub> (g)	P <sub>3</sub> (g)	P <sub>1</sub> (g)	P <sub>2</sub> (g)	P <sub>3</sub> (g)	P <sub>1</sub> (g)	P <sub>2</sub> (g)	P <sub>3</sub> (g)
435,7 0	434,6 3	43,84	1106, 99	1102, 34	35,64	346,0 8	344,9 7	44,97	915,8 6	914,9 3	44,26
Peso Seco		Peso SSS	Peso Seco		Peso SSS	Peso Seco		Peso SSS	Peso Seco		Peso SSS
390,6		404,1	1066,2		1097,9	300,5		304,2	871,0		916,5
											

Fuente: Autor

Tabla 36. Pesos específicos de rocas y piedras naturales

Tipo de Piedra	Peso Especifico (kg/m <sup>3</sup> )
Arenisca	2600
Arenisca porosa y caliza porosa	2400
Granito, siena, pórfido	2800
Basalto, diorita	3000
Mármol, pizarra	2800
Piedra caliza compacta	2700
Piedra caliza porosa	2400
Pizarra de tejados	2800
-	-

Fuente: Autor

Tabla 37. Peso específico de las muestras obtenidas de Grupo Guadalupe.

Material Arenisca del Grupo Guadalupe			
DF.A.G-001	DF.A.G-002	DF.A.G-003	DF.A.G-004
Peso Especifico yt (t/m <sup>3</sup> )	Peso Especifico yt (t/m <sup>3</sup> )	Peso Especifico yt (t/m <sup>3</sup> )	Peso Especifico yt (t/m <sup>3</sup> )
2,500	2,429	2,309	2,329

Fuente: Autor

## Porosidad

- Cociente entre el volumen de vacíos y el volumen total de la muestra.
- Porosidad Eficaz (  $ne = \frac{V_{vacios-accesibles}}{V_t}$  ).
- Porosidad Total (  $n = \frac{V_v}{V_t}$  ).

A Mayor Porosidad Peor Comportamiento Mecánico

## Procedimiento

- **Volumen Total:** mediremos el volumen total utilizando el método de la balanza hidrostática
- **Volumen de Vacíos:** obtenemos el volumen de vacíos restando al volumen total el volumen de las partículas solida que tiene la muestra.  $V_v = V_t - V_s$ .

Para obtener el volumen de partículas sólidas dividiremos el peso de la muestra completamente seca entre el peso específico de las partículas de la muestra.  $V_s = \frac{W_s}{G_s}$ . La siguiente tabla 32. Muestra el grado de porosidad de las muestras.

Tabla 38. Porosidad de la roca en muestras seleccionadas del Grupo Guadalupe para la investigación

Material Arenisca del Grupo Guadalupe			
DF.A.G-001	DF.A.G-002	DF.A.G-003	DF.A.G-004
Porosidad	Porosidad	Porosidad	Porosidad
Porosidad Media a Baja	Baja	Media a alta	Muy alta a Alta

Fuente: Autor

## Absorción

- Contenido de agua absorbida frente al peso de la muestra en seco
- Contenido de absorción  $CA = \frac{W_{agua-Absorbida}}{W_{muestra-seca}}$

## Procedimiento

- **Peso del Agua Absorbida:** lo obtenemos como diferencia entre el peso de la muestra completamente seca y el peso de la muestra completamente saturada. La tabla 33. Permite conocer el porcentaje de absorción de la roca.

A Mayor Absorción Mayor Susceptibilidad A La Alteración

Tabla 39. Contenido de Absorción para las muestras seleccionadas del Grupo Guadalupe para la investigación

<b>Material Arenisca del Grupo Guadalupe</b>			
<b>DF.A.G-001</b>	<b>DF.A.G-002</b>	<b>DF.A.G-003</b>	<b>DF.A.G-004</b>
Absorción (%)	Absorción (%)	Absorción (%)	Absorción (%)
3,46	2,97	1,23	5,22

Fuente: Autor

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados a las muestras tomadas del grupo Guadalupe codificadas con (DF.A.G.001,- DF.A.G.004), serán comparadas con resultados y graficas de estudios ejecutados tal como se reflejan en el libro “serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio” (Editores: R. ULUSAY & J. A. HUDSON Traducidos al español por Correa Arroyave Álvaro de la Cruz), Guía para la explotación mitigación y recuperación de canteras tomo I Primera edición Bogotá, D. C., febrero de 2009 y el libro Manual de Perforación en Túnele y de igual forma se correlacionan con base en la abrasividad de los materiales rocosos. Tabla 40. Exhibe tabla de resultados de las muestras seleccionadas del Grupo Guadalupe para la investigación.

TABLA 40. Resultados Y Correlaciones Con Otros Ensayos

Arenisca	Resistencia a la compresión de la roca Astm d 7012 – 14 metodo c		Esfuerzo a la tracción en núcleos de roca Astm d 3967-16		(Martillo Schmidt) Núcleos de roca Inv E 413- 13 ; Astm c 805-08		Velocidad de ultrasonido Sentido longitudinal astm d 2845-08 (retirado en el 2017), código interno syp-pt-507	Velocidad de ultrasonido Sentido diametral astm d 2845-08 (retirado en el 2017), código interno syp-pt-507	Indice de carga puntual Astm d 5731-95 t nlt-252/91		Índice F <sub>Schim</sub>	Absorción	Índice de abrasividad (cai) Astma d – 7625-10
	MUESTRA	(kgf/cm <sup>2</sup> )	Mpa	(kgf/cm <sup>2</sup> )	(Mpa)	Nº DE REBOTES	RESISTENCIA POR CORRELACIÓN (Mpa)	(m/seg)	(m/seg)	Is	Is(50)	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)
DF.A.G.001	1600,0	156,90	83,46	8,18	41	361	3429	3724	8,47	10,12	1,60328	3,46	2,7
DF.A.G.002	953,1	93,47	45,32	4,44	38	316	2334	2446	3,22	5,07	0,3552	2,97	2,6
DF.A.G.003	604,4	59,27	32,5	3,19	33	246	2006	1988	3,16	3,64	0,6061	1,23	1,1
DF.A.G.004	698,5	68,50	46,48	4,56	35	274	2507	2546	4,42	5,70	1,76928	5,22	1,8

Fuente: Autor

**RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN ROCA ASTM D 7012 – 14 METODO C (Mpa).**

Tabla 41. Grupo Guadalupe. Compresión Simple, Mpa.

Núcleo	Arenisca Dura	Arenisca Labor	Arenisca tierna
1	50,0	79,00	31,00
2	63,00	68,00	31,00
3		47,00	
<b>Promedio</b>	<b>56,50</b>	<b>64,70</b>	<b>31,00</b>

Fuente: Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013.

Tabla 42. Clasificación de la roca según su resistencia a la compresión simple (Sandvik).

UCS O $\sigma_c$ (Mpa)	RESISTENCIA DE LA ROCA
$120 \leq \sigma_c$	MUY ALTA
$80 \leq \sigma_c \leq 120$	ALTA
$50 \leq \sigma_c \leq 80$	MEDIA
$20 \leq \sigma_c \leq 50$	BAJA
$\sigma_c < 20$	MUY BAJA

Fuente: Restner (2008).

En las tablas 41 y 42 se puede ver la resistencia a la compresión simple expresada por dos referencias distintas y la figura 74 nos permite de igual manera distinguir las durezas del material según otros criterios.

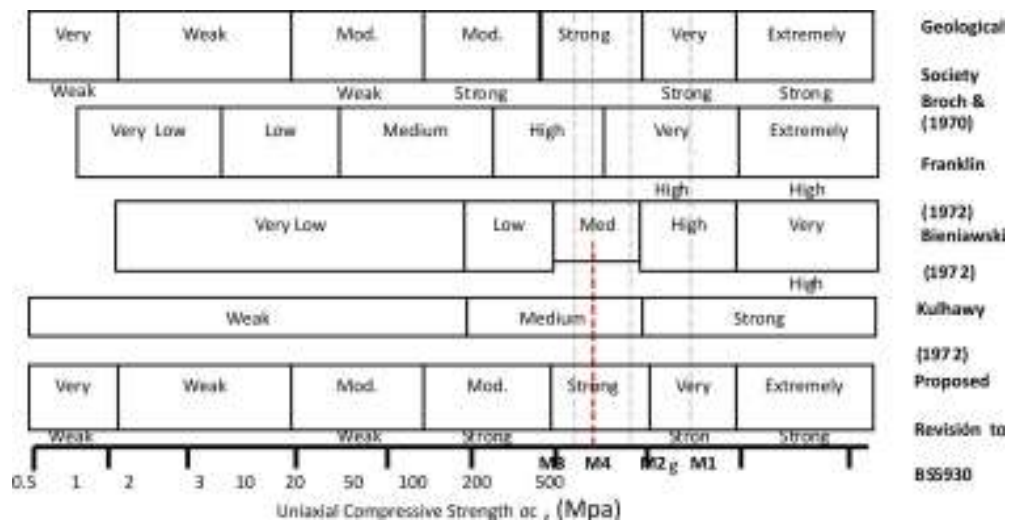


Figura 74. Clasificación de rocas según su resistencia por diferentes autores. (Gannon et al., 1999)

La siguiente figura 75. De igual forma clasifica la roca según su resistencia a la compresión.

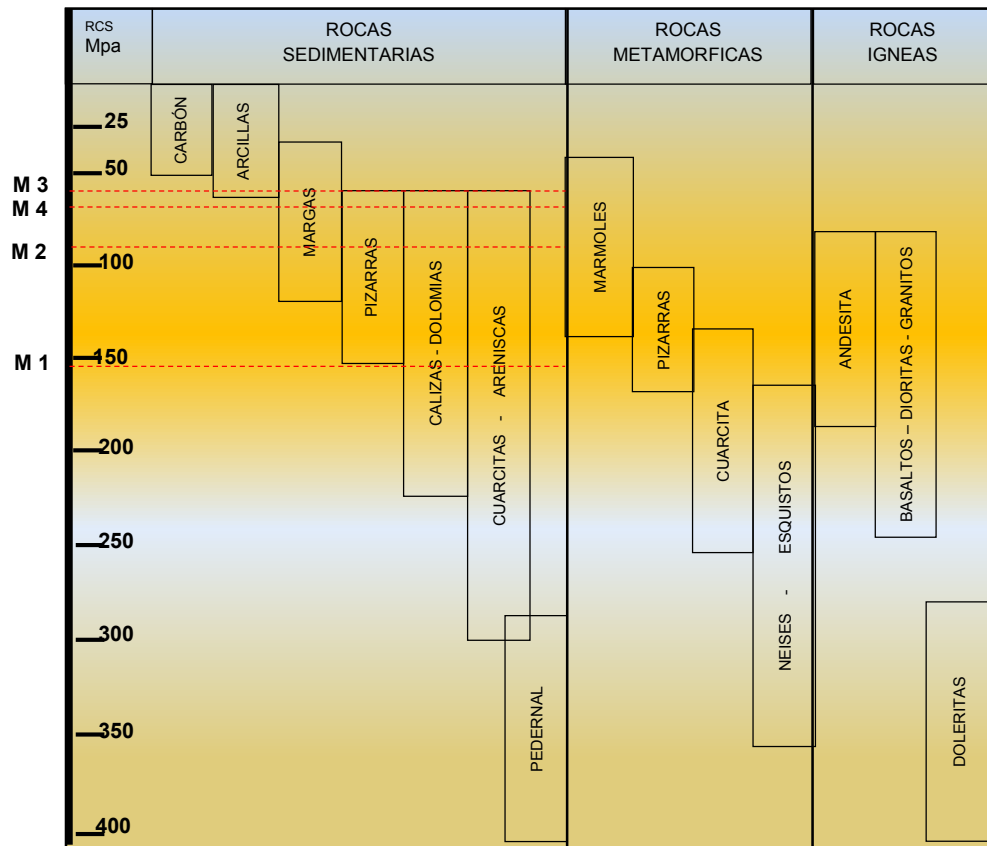


Figura 75. Clasificación del material de acuerdo con a la resistencia a la compresión.

Tabla 43. Muestras de arenisca tomadas para la investigación grupo Guadalupe Compresión simple, Mpa

Arenisca Muestra	Resistencia a la Compresión de la Roca ASTM D 7012 – 14 METODO C (Mpa)
DF.A.G.001	156,90
DF.A.G.002	93,47
DF.A.G.003	59,27
DF.A.G.004	68,50

Fuente:

Tabla 44. Resistencia a la Compresión Simple en Mpa Contra Carga puntual en Mpa.

Índice	Resistencia a la Compresión Simple $\sigma_c$ , (Mpa)	Rango de Carga Puntual $I_{s(50)}$ (Mpa)	Termino descriptivo
1	> 224	> 12	Resistencia extremadamente alta
2	112 – 224	8 -12	Resistencia muy alta
3	56 – 112	6 – 8	Resistencia alta
4	28 – 56	4 - 6	Resistencia media
5	14 - 28	2 – 4	Resistencia baja
6	< 14	< 2	Resistencia muy baja

Fuente: Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013.

En este ensayo se puede observar que los resultados de las muestras seleccionadas comparadas con la misma prueba expresada en Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013 son mayores en las areniscas Duras DF.A.G-001 y DF.A.G-002, mientras que para las areniscas Labor DF.A.G-003 y DF.A.G-004 se encuentran dentro de los rangos, además se puede evidenciar que en el rango que presenta la tabla de Restner permite ubicar las muestras 1y2 en la clasificación alta y la 3 y 4 en la media.

#### **CARGA PUNTUAL ASTM D 5731-95 T NLT-252/91**

La tabla 39 se refleja los resultados del ensayo de carga puntual a los materiales escogidos para la investigación.

Tabla 45. Resultados de carga puntual.

<b>Material Arenisca del Grupo Guadalupe</b>							
<b>ENSAYO CARGA PUNTUAL</b>							
<b>DF.A.G-001</b>		<b>DF.A.G-002</b>		<b>DF.A.G-003</b>		<b>DF.A.G-004</b>	
<b>KN</b>	<b>Mpa</b>	<b>KN</b>	<b>Mpa</b>	<b>KN</b>	<b>Mpa</b>	<b>KN</b>	<b>Mpa</b>
12.345	628.72	8.653	440.68	4.239	215.89	7.649	389.56

Fuente: Autor.

En la tabla 46se puede observar los resultados de Índice de carga puntual.

Tabla 46. Resultados de carga puntual  $I_s$  y  $I_{s(50)}$

<b>Arenisca Muestra</b>	<b>INDICE DE CARGA PUNTUAL ASTM D 5731-95 T NLT-252/91</b>	
	<b><math>I_s</math></b>	<b><math>I_{s(50)}</math></b>

DF.A.G.001	8,47	10,12
DF.A.G.002	3,22	5,07
DF.A.G.003	3,16	3,64
DF.A.G.004	4,42	5,70

Después de realizado el ensayo de carga puntual, se desarrolla el cálculo del índice de carga puntual y es el mismo que se puede ver en la siguiente tabla 41.

Tabla 47. Ejemplos de Is para algunos tipos de roca

Rocas	Is(50), (Mpa)
Calizas	1 – 2
Arenisca	3 – 5
Cuarcita	8 – 10
Gabro	10 – 15

Fuente: Caracterización esfuerzo deformación de tres tipos de roca de la Formación Guadalupe.

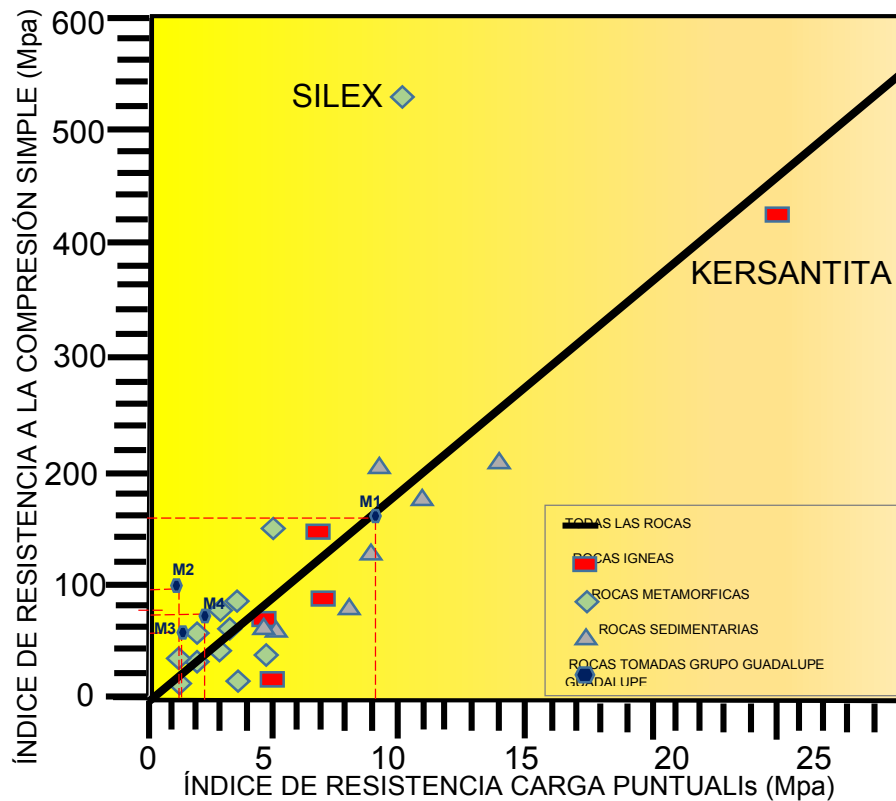


Figura 76. Cálculo del factor de conversión global entre Is y UCS para 35 tipos de rocas distintas (Thuro y Plinninger, 2001)

Cuando el valor de índice de carga puntual es 1 Mpa o está por debajo de este no es apreciable, para este espécimen de materiales, por tal razón se recomienda emplear algún método diferente para establecer su resistencia; el método de carga puntual es indirecta comprobar la resistencia a la tracción del material rocoso y por consecuencia la compresión, comoquiera que este ensayo generara un esfuerzo de tracción perpendicular al eje de carga (Caracterización esfuerzo deformación de tres tipos de roca de la Formación Guadalupe Bogotá, Colombia, 2013.)

$$\sigma_t = 0,96 \frac{p}{D^2}$$

$$\sigma_c = 21\sigma_t + 400 \text{ (lib/pulg}^2\text{)}$$

Teniendo la anterior formula de la tracción corroborará con ejemplo y esto se coteja con resultados del ensayo de tracción realizados a las muestras escogidas para la presente investigación.

$$\sigma_{t1} = 0,96 \frac{628,72}{74,27} = 8,126 \text{ Mpa} \quad \sigma_{t2} = 0,96 \frac{440,68}{136,72} = 3,094 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{t3} = 0,96 \frac{215,89}{68,27} = 3,035 \text{ Mpa} \quad \sigma_{t4} = 0,96 \frac{389,56}{88,13} = 4,243 \text{ Mpa}$$

El espécimen N° 1 se posiciona en el rango de resistencia muy alto, según lo que permite distinguirse en la tabla expuesta por la Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013, mientras que las muestras N° 2 y 4 se ubican en una clasificación media y el modelo N°3 está en la escala de baja; así mismo se sobreponen los resultados del proyecto en la correlación entre compresión simple e índice de carga puntual expresada por (Thuro y Plinninger, 2001), ya que esto refleja la relevancia que presenta estos ensayos frente a su mineralogía, que para el caso de las muestras tomadas se ubican en Sílex (piedra muy dura formada principalmente por Sílex, que es un término genérico para designar una roca sedimentaria constituida casi exclusivamente por Sílice Micro cristalina).

## ESFUERZO A LA TRACCIÓN EN NÚCLEOS DE ROCA ASTM D 3967-16

Las tablas 48, 49, y 50 permiten conocer los diferentes resultados de esfuerzo a la tracción en rocas.

Tabla 48. Resistencia a la tracción indirecta o brasilera  $\sigma_{tb}$ , en Mpa.

Núcleo	Arenisca Dura	Arenisca Labor	Arenisca tierna
1	3,25	2,95	3,21

2	4,59	3,29	3,11
3	3,26	4,07	3,22
4	5,18	3,96	3,22
5	3,06	3,23	2,65
<b>promedio</b>	<b>3,87</b>	<b>3,50</b>	<b>3,08</b>

Fuente: Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013.

Tabla 49. Grupo Guadalupe Tracción indirecta, Mpa.

Índice	Resistencia a la Tracción Indirecta $\sigma_{tb}$ , (Mpa)	Termino descriptivo
1	> 30	Resistencia extremadamente alta
2	20 – 30	Resistencia muy alta
3	15 – 20	Resistencia alta
4	10 – 15	Resistencia media
5	5 – 10	Resistencia baja
6	< 2	Resistencia muy baja

Fuente: Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013.

Tabla 50. Grupo Guadalupe Tracción indirecta, Mpa.

ARENISCAMUESTRA	ESFUERZIO A LA TRACCIÓN EN NÚCLEOS DE ROCA ASTM D 3967-16	
	(kgf/cm <sup>2</sup> )	Mpa
DF.A.G.001	83,46	8,18
DF.A.G.002	45,32	4,44
DF.A.G.003	32,5	3,19
DF.A.G.004	46,48	4,56

Fuente: Autor

En la resistencia a la tracción se puede aseverar que la muestra N° 1 de la seleccionada para la investigación la cual pertenece a las areniscas Duras comparada con la reflejada en la Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013 presenta una resistencia muy alta mientras que el espécimen N° 2 se encuentra dentro del rango expresado por la misma serie, se podría decir que para el caso de las areniscas Labor muestras N°3 y 4, si se establecen en los lineamientos de la expresada por la misma serie, de igual manera el autor del cual hacemos la comparación permite evidenciar una clasificación donde el material seleccionado para el proyecto se ubicaría en el rango de material de resistencia baja.

**MÉTODO PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE REBOTES  
(MARTILLO SCHMIDT) NÚCLEOS DE ROCA INV E 413- 13; ASTM C 805-08**

En la tabla 45 se presenta tabla que permite relacionar el tipo de material roca teniendo en cuenta el número de rebotes del Martillo Schmidt.

Tabla 51. Valores típicos de número de rebotes medidos con martillo tipo L para diferentes rocas.

<b>Tipo de roca</b>	<b>R<sub>L</sub></b>
Andesita	28 - 52
Arenisca	30 - 47
Basalto	35 - 58
Caliza	16 - 59
Creta	10 - 29
Cuarcita	39
Diabasa	36 - 59
Dolomía	40 - 60
Esquistos	29 - 41
Gabro	49
Gneis	48
Granito	45 - 56
Limolita	47
Lutita	15
Marga	18 - 39
Mármol	31 - 47
Peridotita	45
Prasinita	41
Sal	23
Serpentinita	45
Toba	13-40
Yeso	30-44

Fuente: Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013.

A continuación se puede observar en la figura 74. Como se encuentra la resistencia a compresión simple de la superficie de la roca a través de la dureza del Martillo Schmidt, según su orientación y la densidad de la roca, donde también deja ver la curva de dispersión media de resistencia para la mayoría de las rocas

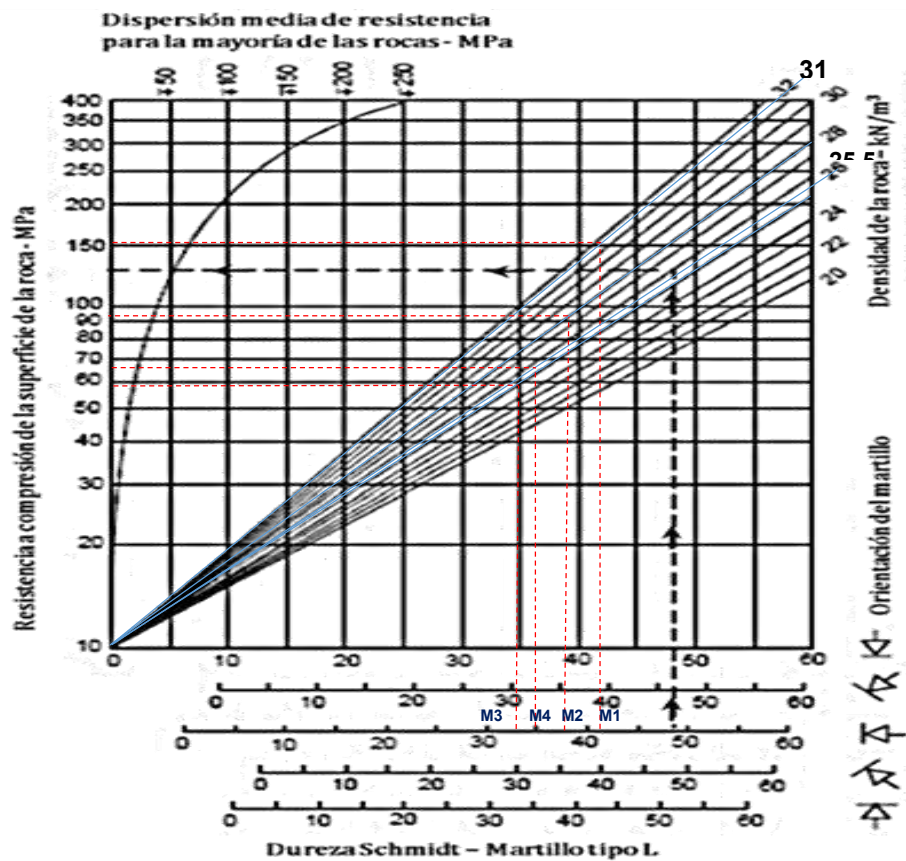


Figura 77. Gráfico de correlación para el Martillo Schmidt entre resistencia a compresión, densidad de la roca y rebote

Tabla 52. Número de rebotes del Martillo Schmidt para muestras seleccionadas del Grupo Guadalupe para la investigación

MUESTRA	(MARTILLO SCHMIDT) NÚCLEOS DE ROCA INV E 413- 13 ; ASTM C 805-08	
	Nº DE REBOTES	RESISTENCIA POR CORRELACIÓN (Mpa)
DF.A.G.001	41	35
DF.A.G.002	38	30,99
DF.A.G.003	33	24,12
DF.A.G.004	35	26,87

Fuente: Autor

Los resultados de las muestras de la investigación corroboran que el material es arenisca según la Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013, en la figura de Miller se puede hallar la densidad del material correlacionando los rebotes del Martillo Schmidt con la resistencia a la compresión simple.

**DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ULTRASONIDO Fuente: ASTM D 2845-08 (RETIRADO EN EL 2017), CÓDIGO INTERNO SYP-PT-507**

Tabla 53. Velocidad Sónica en diferentes Rocas

<b>Rocas Sanas</b>	<b>V<sub>p</sub> (m/sg.)</b>
Diabasa	5500 – 7000
Basalto	4500 – 6500
Cuarcita	5000 – 6500
Dolerita	5500 – 6500
Gabro	4500 – 6500
Caliza	2500 – 6000
Dolomita	5000 – 6000
Granito	4500 – 6000
Mármol	3500 – 6000
Roca salina	3500 – 6000
Gneis	3100 – 5500
Conglomerado	2500 – 5000
Pizarra	3500 – 5000
Arenisca	1400 - 4200
Roca yesífera	3000 - 4000
Marga	1800 - 3200
Lutita	1400 - 3000

Fuente: Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013.

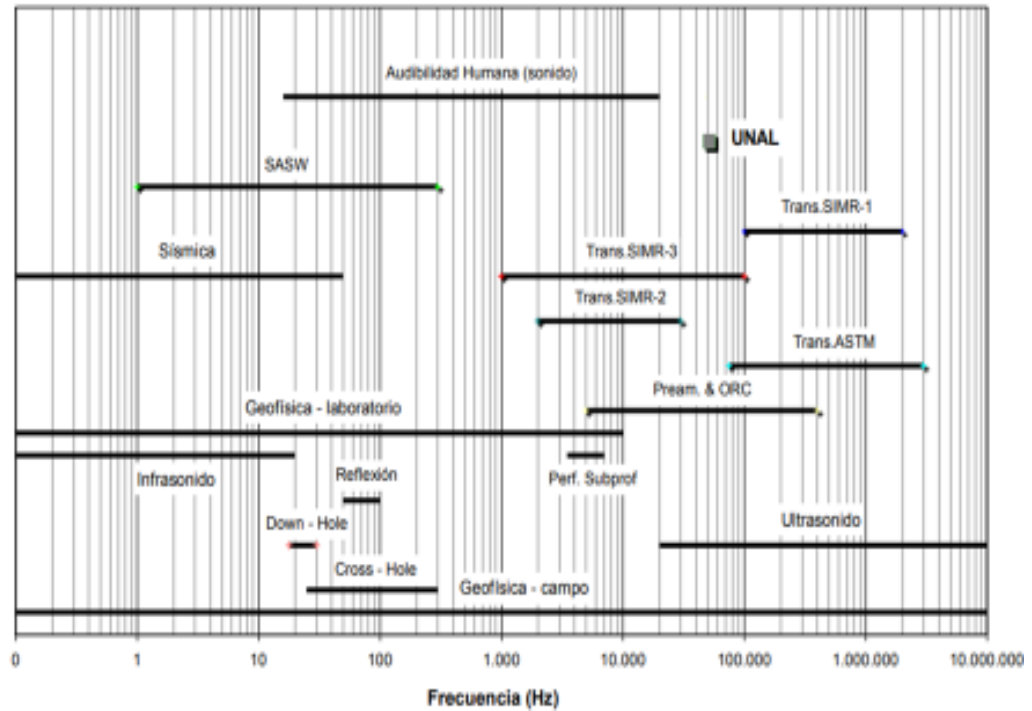


Figura 78. Rangos de frecuencia de los diversos métodos de investigación en ingeniería de rocas.

Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013.

Tabla 54. Grupo Guadalupe Velocidad Ultrasonido, m/s

Núcleo	Arenisca Dura	Arenisca Labor	Arenisca tierna
1	2713	2659	1971
2	2901	2637	1557
3	2534	3168	1599
4	2631	2276	1767
5	2663	2827	1634
6	2871	2222	1416
7	2790	2839	1690
8	2752	2981	1617
9	2793	2549	1110
10	2513	2760	1678
11	2877	2757	1674
12	-	3229	1953
13	-	2720	1530
14	-	2413	-
15	-	1822	-
<b>Promedio</b>	<b>2730</b>	<b>2657</b>	<b>1630</b>

Fuente: Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013.

Tabla 55 Velocidad Ultrasonido de las Muestras.

MUESTRA	VELOCIDAD DE ULTRASONIDO SENTIDO LONGITUDINAL ASTM D 2845-08 (RETIRADO EN EL 2017), CÓDIGO INTERNO SYP-PT-507	VELOCIDAD DE ULTRASONIDO SENTIDO DIMETRAL ASTM D 2845-08 (RETIRADO EN EL 2017), CÓDIGO INTERNO SYP-PT-507
	(m/s)	(m/s)
DF.A.G.001	3429	3724
DF.A.G.002	2334	2446
DF.A.G.003	2006	1988
DF.A.G.004	2507	2546

Fuente: Autor

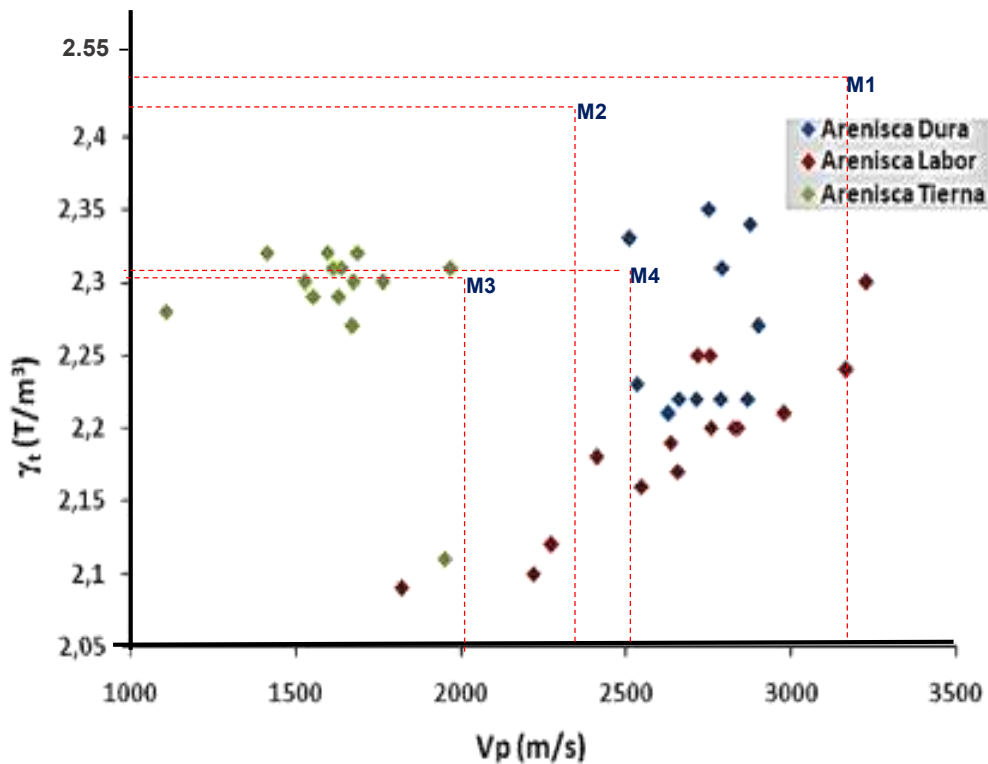


Figura 79. Relación entre Densidad y Velocidad de onda Compresional. Datos reportados en Ramírez et al. , (2000) (Análisis de datos realizados para la Presente Investigación).

Teniendo en cuenta la información reportada por Ramírez et al., (2000) se puede deducir que la velocidad de ( $V_p$ ) no guarda relación con la densidad, como se ve en la figura 62. Analizando los datos por material se logra evidenciar que la arenisca labor es la única que guarda es la única que guarda correlación entre las propiedades en mención, sin embargo para el material seleccionado en la investigación se tiene un  $(y = 0,0001x + 2,0813) R^2 = 0,682$

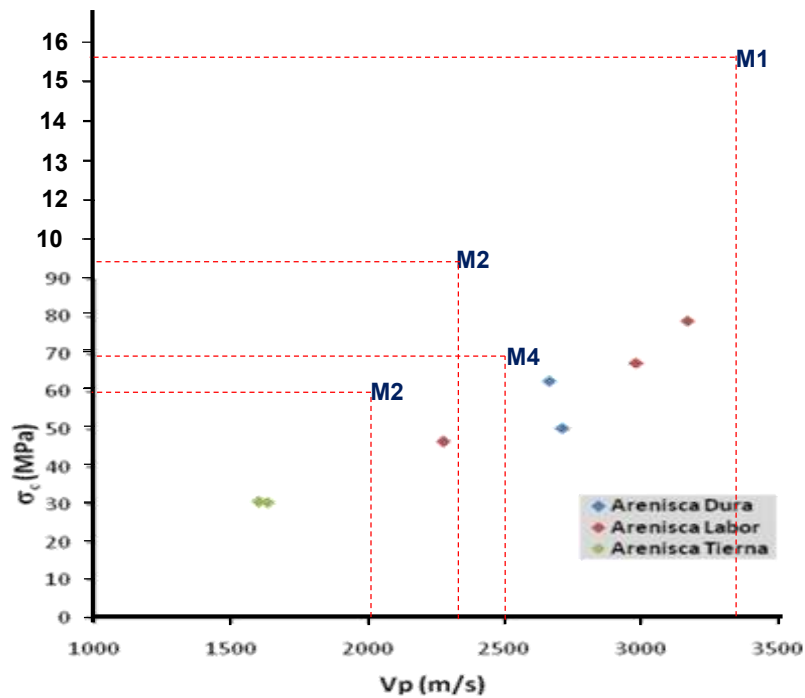


Figura 80. Relación entre resistencia a la compresión simple y Velocidad (Vp) en Datos reportados en Ramírez et al., (2000). (Análisis de datos realizados para la Presente Investigación).

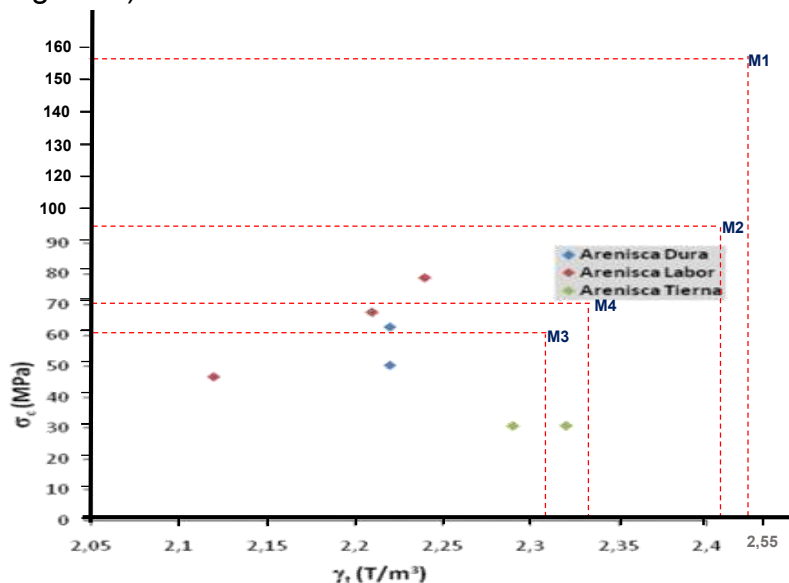


Figura 81. Relación entre resistencia a la compresión Simple y la Densidad. Datos reportados en Ramírez et al., (2000). (Análisis de datos realizados en la Presente Investigación).

Según Ramírez et al., (2000). De igual manera, la relación entre resistencia y densidad no es clara; como se ve en la figura 64. Analizando los puntos por

Formación, no presenta relación entre estos dos parámetros tanto para la formación Arenisca Dura y la Formación Arenisca Tierna. Es fundamental anotar que con tan pocos puntos es relativamente incierto llegar a conclusiones para deducir relaciones entre dos variables.

Es importante conocer la velocidad sónica de los materiales ya que a mayor velocidad el comportamiento del mismo es: más densa, más continua, más pesada, menos porosa, menos diaclasada (ruptura o grietas que presentan las rocas), por esto la velocidad ultrasonido permite evidenciar las propiedades del material seleccionado para la investigación, donde se puede observar que el resultado de la muestra N°1 es el mayor valor en areniscas Duras frente a los expresados por la Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013, mientras que los demás modelos se encuentran dentro de los parámetros correspondientes de acuerdo a su clasificación.

### INDICE DE ABRASIVIDAD EN ROCA, METODO CERCAHAR ASTM D – 7625 – 10

El índice de abrasividad obtenido por el método cerchar para la abrasividad, es también muy importante para su correlación con el consumo de picas como se presenta en la figura 65. Que a continuación aparece.

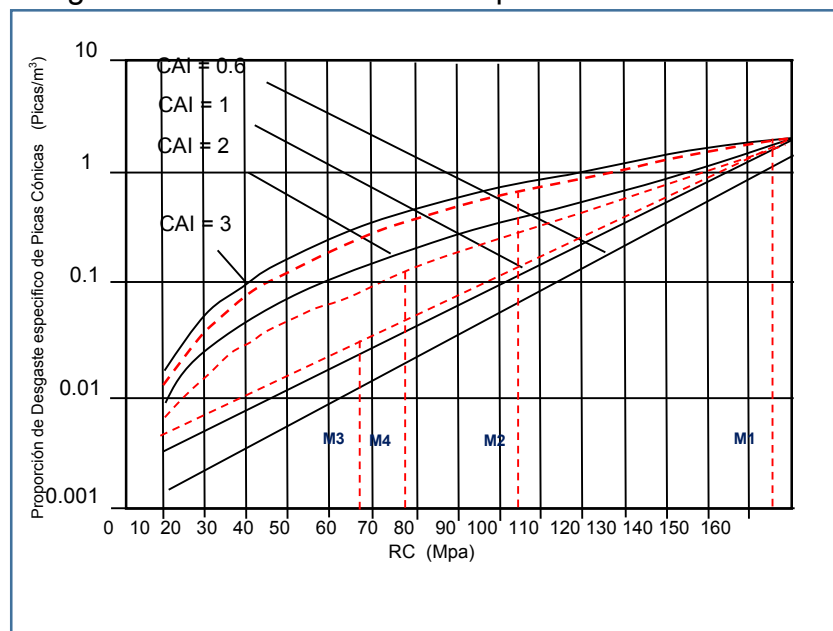


Figura 82. Consumo de picas en función de la resistencia a la compresión simple y la abrasividad Cerchar CAI.

Fuente: Rendimiento, desgaste y abrasividad en excavación..(González, p, 2014).

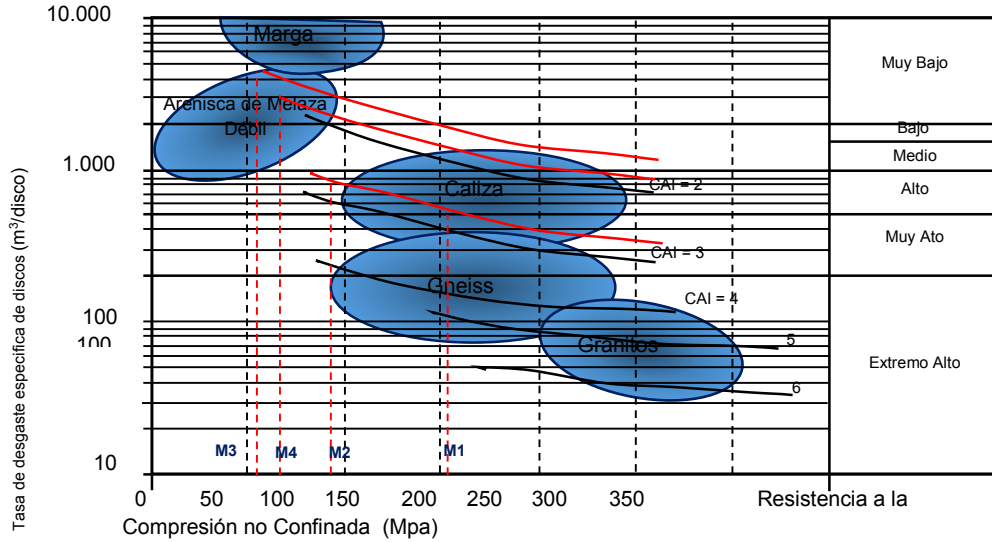


Figura 83. Correlación entre el consumo de discos de corte para TBM, resistencia a la compresión simple y el índice de durabilidad Cerchar (CAI) para distintos tipos de roca. (Maidl, Schmidt, Ritz & Herrenkecht, 2001).

Fuente: Rendimiento, desgaste y abrasividad en excavación..(González, p, 2014).

Tabla 56. Correlación entre LAC y CAI

Abr (g/t)	CAI (0,1mm)	Clasificación de Abrasividad	Clasificación
0 – 50	0,0 – 0,3	No abrasivo	Material Orgánico
50 – 100	0,3 – 0,5	No muy abrasivo	Arcillitas, Margas
100 – 250	0,5 – 1,0	Ligeramente abrasivo	Pizarras, Calizas
250 – 500	1,0 – 2,0	Abrasividad media	Esquistos, Areniscas
500 – 250	2,0 – 4,0	Muy abrasivo	Basalto, Areniscacuarcita
1250 – 2000	4,0 – 6,0	Extremadamente abrasivo	Cuarcita, Anfibolita

Fuente: Rendimiento, desgaste y abrasividad en excavación..(González, p, 2014).

Tablas 57. Índice de abrasividad de materiales seleccionados del Grupo Guadalupe para la investigación

<b>Arenisca Muestra</b>	<b>Índice de abrasividad (CAI) (mm) ASTM D – 7625-10</b>
DF.A.G.001	2,7
DF.A.G.002	2,6
DF.A.G.003	1.1
DF.A.G.004	1,8

Fuente: Autor

Con el soporte que presenta el ábaco, se puede indicar que el material escogido para la investigación se clasifica entre alto y muy alto al desgaste  $m^3/\text{disco}$  como se puede corroborar en la implantación creada por el autor, donde se evidencia que las muestras N°1 y 2 se ubican en el rango de desgaste muy alto, y también de tener en cuenta los modelos N° 3 y 4 se alinean en la posición de desgaste alto.

#### **Determinación del Índice $F_{schim}$ de Schimazek**

$$F_{schim} = Q^*d_{50}R_T$$

Dónde:

$F_{schim}$  = Índice de Desgaste ( $N/mm^2$ ),

$Q^*$  = Contenido en equivalente de cuarzo del contenido de minerales abrasivos (%),

$d_{50}$  = diámetro medio del grano de cuarzo (mm),

$R_T$  = Resistencia a la tracción ( $N/mm^2$ ).

La cantidad de cuarzo equivalente  $Q^*$ , que es la suma de los porcentajes volumétricos afectados por un factor de ponderación de acuerdo a su diferente dureza Rosiwal, es:

$$Q^* = 1,00Q + 0,33F + 0,4P + 0,03C$$

$$Q^*_{M1} = 0,98Q + 0F + 0P + 0C$$

$$Q^*_{M1} = 0,98$$

$$F_{schim} = Q^*d_{50}R_T$$

$$F_{schim (M1)} = 0,98 * 0,2mm * 8,18N/mm^2$$

$$F_{schim (M1)} = 1,60328 N/mm^2$$

$$Q^*_{M2} = 0,98Q + 0F + 0P + 0C$$

$$Q^*_{M2} = 0,80$$

$$F_{schim} = Q^*d_{50}R_T$$

$$F_{schim (M2)} = 0,80 * 0,125mm * 4,44N/mm^2$$

$$F_{schim (M2)} = 0,444\text{N/mm}^2$$

$$Q^*_{M3} = 0,75Q + 20F + 0P + 0C$$

$$Q^*_{M3} = 0,95$$

$$F_{schim} = Q^*d_{50}R_T$$

$$F_{schim (M3)} = 0,95 \cdot 0,2\text{mm} \cdot 3,19\text{N/mm}^2$$

$$F_{schim (M3)} = 0,6061\text{N/mm}^2$$

$$Q^*_{M4} = 0,80Q + 17F + 0P + 0C$$

$$Q^*_{M4} = 0,97$$

$$F_{schim} = Q^*d_{50}R_T$$

$$F_{schim (M4)} = 0,97 \cdot 0,4\text{mm} \cdot 4,56\text{N/mm}^2$$

$$F_{schim (M4)} = 1,76928\text{N/mm}^2$$

Tablas 58. Índice de Schimazek ( $F_{schim}$ ) de materiales seleccionados del Grupo Guadalupe para la investigación

Arenisca Muestra	Índice de Schimazek ( $F_{schim}$ ) (N/mm <sup>2</sup> )
DF.A.G.001	1,60328
DF.A.G.002	0,3552
DF.A.G.003	0,6061
DF.A.G.004	1,76928

Fuente: Autor

La dureza Rosiwal (Rosiwal, 1896) está directamente relacionada con la dureza dada por la escala de Mohs como se muestra en la figura 85, en la que se observa que el Cuarzo (Q) tiene un valor unitario de dureza Rosiwal.

Fuente: López Jimeno et al. (1997): «Manual de túneles y obra subterránea». Editorial Góthica. Madrid. 1003 pp.

COMPARATIVA ENTRE LOS ÍNDICES DE SCHIMAZEK Y C.E.R.C.H.A.R.			
CLASIFICACIÓN	C.A.I. (10 <sup>1</sup> mm)	TIPO DE ROCA	F de SCHIMAZEK (N/mm)
No abrasiva	<0,5	Caliza joven	<0,5
Muy ligeramente abrasiva	<1,2	Caliza joven	<0,5
Ligeramente abrasiva	1,2 a 2,5	Arenisca joven	0,5 a 2
Medianamente abrasiva	2,5 a 3,5	Granito meteorizado / dolerita	2 a 4
Moderadamente abrasiva	3,5 a 4,0	Arenisca	4 a 5
Abrasiva	4,0 a 4,2	Granito / Esquistó / Piroxenita	5 a 8
Áltamente abrasiva	4,2 a 4,5	Anfibolita	8 a 11
Extremadamente abrasiva	> 4,5	Cuarcita/Gneiss/Pegmatita	> 11

Friess, L.A. (1954): «The Cerchar Abrasivity Index's applicability to dredging rock». Proceedings of WLDN 100th Technical Conference & USACE 4th Dredging Seminar.

Figura 84. Comparativa entre los índices de Schimazek y Cerchar

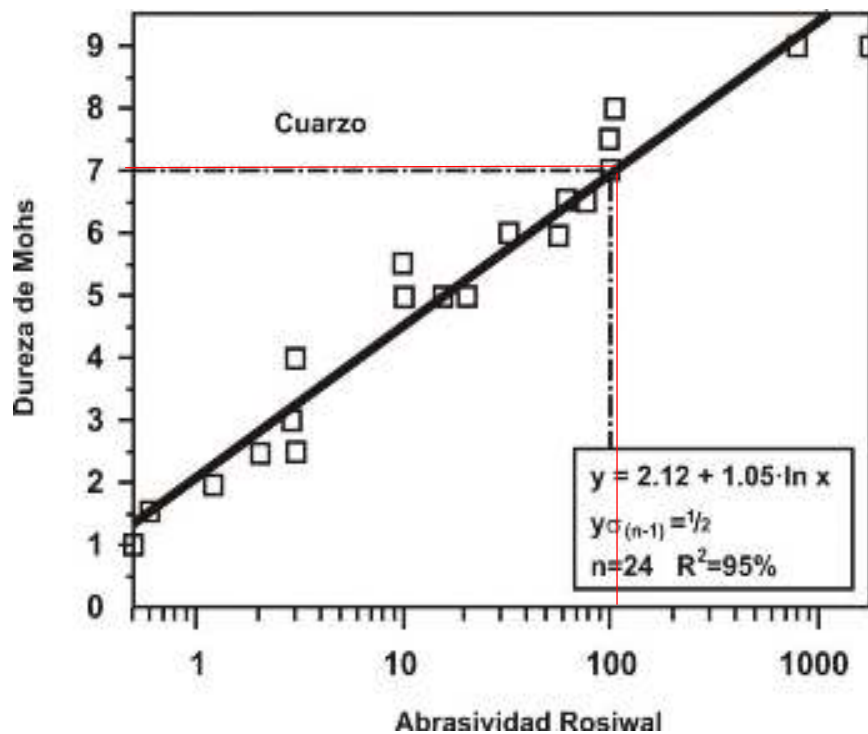


Figura 85. Dureza Mohs Vs Abrasividad Rosiwal.

Tabla 59. De valor dureza Mohs, Dureza Knoop valor Rosiwal.

Mineral	Escala de Mohs	Dureza Knoop	Dureza Rosiwal
Talco	1	1	0,03
Yeso	2	32	1,25
Oro	~2,5	69	-
Calcita	3	135	4,5
Fluorita	4	163	5
Apatita	5	430	5,5
Ortoclasa Feldespatos	6	560	37
Cuarzo	7	800~900	120
Topacio	8	1.300~1.400	175
Corindón	9	2.000	1.000
Carburo de silicio	~9	2.480	-
Diamante	10	8.000~8.500	140.000

La tabla 59 presenta valor dureza Mohs, Dureza Knoop valor Rosiwal para los diferentes minerales.

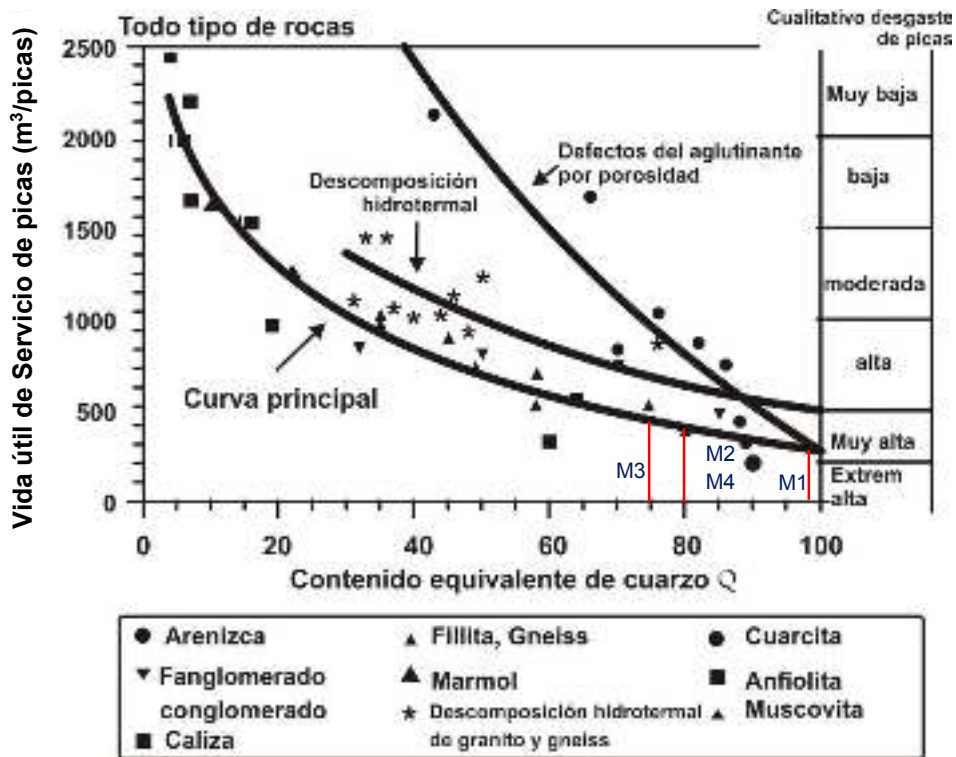


Figura 86. Vida de servicio de las picas Vs contenido de cuarzo

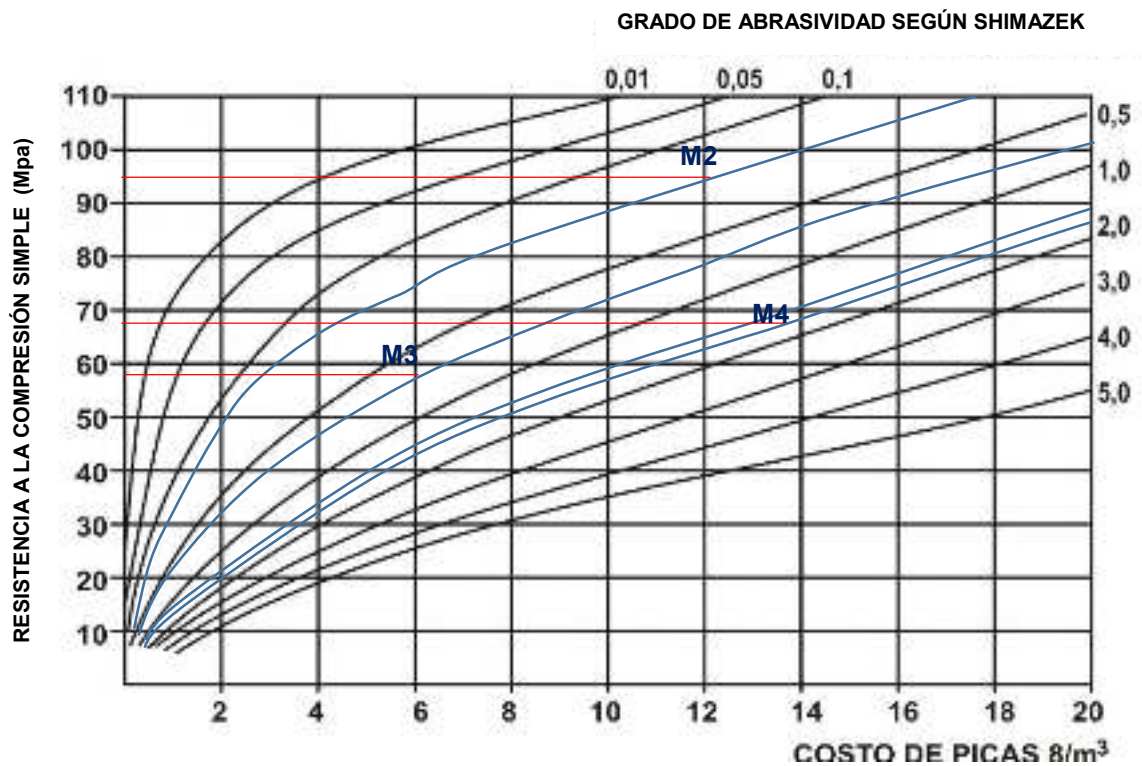


Figura 87. Costos de Picas Cónicas Vs RCS y  $F_{schim}$ (Cornejo A., 1988)

Nota: la muestra N° 1 supera los valores propuestos

Finalmente se corrobora el alto grado de abrasividad que posee el material extraído del grupo Guadalupe en los índices de abrasividad tanto Cerchar CAI, como el índice de Schimazek  $F_{schim}$ , teniendo presente las gráficas en las que el autor se sustenta para determinar que los especímenes seleccionados generan un gran desgates a las herramientas de perforación y corte como se puede corroborar en las figuras 6 y 7 donde se refleja que el desgaste de los elementos son muy altos y los costos de picas son elevados debido a su pronto deterioro.

Tabla 60. Cuadro comparativo de resultados de ensayos realizados a la Formación Arenisca Dura

Autores	Peso Especifico (t/m <sup>3</sup> )		Compresión Simple (Mpa)		Resistencia a Tracción (Mpa)		Martillo Schmidt (# de Rebotes )		Carga Puntual (I <sub>s50</sub> )		Velocidad Ultrasonido (m/s)		Cerchar C.A.I (mm)		F <sub>schim</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	
	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>
Corporación Autónoma de Cundinamarca, Bogotá, D. C., febrero de 2009	2,26		56,60		3,86		-		-		2730,82		-		-	
Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013.	2,26		56,50		3,87		30 - 47		-		2730		-		-	
Universidad Santo Tomás D. Ferro, R , 2019	2,50	2,43	156,90	93,47	8,18	4,44	41	38	10,12	5,07	3429	2334	2,7	2,6	1,60	0,44
															328	4

Fuente: Autor

Tabla 61 Cuadro comparativo de resultados de ensayos realizados a la Formación Arenisca labor

Autores	Peso Especifico (t/m <sup>3</sup> )		Compresión Simple (Mpa)		Resistencia a Tracción (Mpa)		Martillo Schmidt (# de Rebotes )		Carga Puntual (I <sub>s50</sub> )		Velocidad Ultrasonido (m/s)		Cerchar C.A.I (mm)		F <sub>schim</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	
	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>
Corporación Autónoma de Cundinamarca, Bogotá, D. C., febrero de 2009	2,19		64,36		3,50		-		-		2657,36		-		-	
Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Bogotá, Colombia, 2013.	2,20		64,70		3,50		30 - 47		-		2657		-		-	
Universidad Santo Tomás D. Ferro, R , 2019	2,309	2,329	59,27	68,50	3,19	4,56	33	35	3,64	5,70	2006	2507	1,1	1,8	0,60	1,76
															61	928

Fuente: Autor

## MARCO GEOLÓGICO

Desde el punto de vista de la geología regional, la unidad litológica en estudio, hace parte un conjunto de rocas que constituyen la Cordillera Oriental, en varios departamentos, sin embargo este trabajo se restringe a su ubicación dentro de la Sabana de Bogotá.

La Sabana de Bogotá, es una cuenca sedimentaria, o zona geográfica delimitada, en gran parte, por páramos y conformada por rocas sedimentarias, depositadas y plegadas en los periodos geológicos del Mesozoico y el Cenozoico, los mismos que dieron origen a la Cordillera Oriental, mediante importantes procesos orogénicos ocurridos a finales del período paleógeno, cuando las laderas occidental y oriental y la misma Sabana de Bogotá, comenzaron su proceso de formación y elevación, hasta adquirir las características estructurales y morfológicas contemporáneas, de un sinclinal ancho y profundo, relleno por una espesa secuencia de sedimentos cuaternarios. (Van der Hammen y Van Geel, 1982/4)

Teniendo en cuenta que para la presente investigación se toman varias muestras de rocas del Grupo Guadalupe, unidad litoestratigráfica constituida por la Formación Arenisca Dura, Formación Plaeners, Formación Arenisca Labor y Arenisca Tierna, se hace necesario presentar este marco geológico general, para poner en contexto el origen y fuente del material litológico de interés.

Grupo Guadalupe (Ksg), de edad: Campanino superior – Maastrichtiano tardío, cuyo nombre fue propuesto por Hettner (1892) como Guadalupe-Schichten, redefinido por Hubach (1957) y Renzoni (1968) y definido formalmente al oriente de Bogotá, por Pérez & Salazar (1978), como Grupo Guadalupe constituido por:

- Formación Arenisca Dura (Ksgd), (K2d).
- Formación Plaeners (Ksgp), (K2p).
- Formación Labor y Formación Tierna (Ksglt), (K2l), (K2t).

En la Guía para la explotación, mitigación y recuperación de canteras, de la Corporación Autónoma de Cundinamarca en Ingeniero Correa et al, 2009, define las principales características físico–mecánicas de las unidades geológicas que constituyen el Grupo Guadalupe.

### **Formación Arenisca Dura (K2d)**

Esta formación conforma el segmento inferior del Grupo Guadalupe. Se compone de areniscas cuarzosas de grao fino de igual forma es importante resaltar que en sus características prima un alto grado de litificación, cementación y una buena composición de minerales, elementos aquellos que determinan su dureza y resistencia a la abrasión, a pesar de estas condiciones cabe anotar que la misma es friable cuando se encuentra en un estado de meteorización, su color es beige claro a amarillento, con una buena selección y de granos subredondeados.

Emergen en los dos flancos del anticlinal de Soacha, en el sinclinal del chaquito flanco Oeste y en los Cerros de Guadalupe y Monserrate. Es de destacar que las características físicas y mecánicas de esta formación están dadas de la siguiente manera: resistencia a la tracción indirecta (3,86 Mpa), con cinco ensayos; resistencia a la compresión simple (56,60Mpa) con dos ensayos, peso unitario: 2,26 t/m<sup>3</sup> (11 ensayos), y una Velocidad Sónica de (2.730,82) m/s.

#### **Formación Pleaners (K2p)**

En el grupo esta formación es la fracción intermedia. La facies o conjunto de rocas sedimentarias está compuesta por el (41,6%) de arcillolitas, y se considera muy lodosa por continua gradación entre limolitas, arcillolitas y liditas, así mismo evidencian una escases de arenas que tan solo representan el (5%), las cuales se encuentran en capas irregulares, individuales lenticulares dentro de la misma, su lugar de aparición estas expuesto en oeste del sinclinal de Soacha, de la misma manera que se dejan apreciar en los dos flancos del sinclinal de Charquitos. Esta formación tiene unas características físicas y mecánicas como son: índice de carga puntual: 2,43 MPa (30 ensayos); peso unitario: 2,22 t/m<sup>3</sup>; humedad natural: 3,36 %.

#### **Formación Arenisca Labor (K2I)**

Esta formación conformada por bancos de 5m a 8m de espesor, la cual exhibe areniscas con granulometría y selección variable, su base es de granos muy finos a finos, parte superior grano grueso, principalmente, con proporciones de grano medio, muy grueso e inclusive ocurrencias de grava fina); en su aspecto de textura es de mediana mente a poco consolidada con una selección de buena a moderada, la mimas que presenta granos angulares y subangulares , debido a proceso diagenéticos, esta unidad está compuesta principalmente por ortocuarzitas de diferentes tipos de cuarzo y escasa presencia de feldespatos que se evidencia laminarmente de material fino y rara vez en los bancos de arenisca, son muy frecuentes los minerales pesados como es el caso de (Turmalina, Titanita, Rutilio y Circón), y dan lugar a la laminación en las areniscas.

La matriz (verticular y diagenética) y el cementante son carbonatos de óxido de hierro, es característica del material su bajo grado de litificación y cementación por su origen y composición litológica, lo cual determinan una porosidad y grado de absorción medios. Las Areniscas de Labor son moderadamente friables y con una resistencia a la abrasión media, por lo que su explotación puede llevarse a cabo de forma manual. Algunas de las características medias físicas y mecánicas de esta formación son: resistencia a la tracción indirecta: (3,50 Mpa) cinco ensayos; resistencia a la compresión simple: 64,36 Mpa (3 ensayos); velocidad sónica: (2.657,36) m/s quince ensayos; peso unitario: (2,19 t/m<sup>3</sup>) quince ensayos.

### Formación Arenisca Tierna (K2t)

El componente de esta formación es arenisca friable Clara hasta blanca de grano fino a medio, se halla bien expuesta en las arenas del norte de Usaque y en la roca de Suesca, la granulometría de las areniscas de esta formación es diferente de un banco a otro, siendo así se puede aseverarse que este conjunto comprende un amplio rango de tamaños de grano fino a medio y hasta gruesos, son estos últimos predominan en los bancos de estratificación inclinada y además corresponde a los de mayor espesor, a diferencia de los granos gruesos los más finos hacen presencia en los bancos delgados de estratificación ondulada, también hay que tener en cuenta que la selección en términos generales es baja, la litificación de estas areniscas es de poco a media, sus granos son sub-angulares, esto por digénesis intensa. Su composición mineralógica está resaltada en ortocuarzitas conformadas principalmente de diferentes tipos de cuarzo, sobresaliendo el policristalino, cuya presencia es más notable en esta unidad dada su granulometría más gruesa. En la formación se presentan en menor proporción los feldespatos, micas y minerales pesados que en la arenisca labor, se puede afirmar que la arenisca tierna tiene un bajo grado de litificación, esto debido a sus características físicas, a su composición y origen, este material es friable y de resistencia baja a la abrasión, esto porque su extracción es muy fácil con procedimientos manuales, y este material de arena puede ser utilizado como elemento del mortero, al igual que la fabricación de vidrio. Esta formación presenta una características físico mecánicas que son: Resistencia a la tracción indirecta: 3,08 Mpa (5 ensayos); la resistencia a la compresión simple: (30,75 Mpa) dos ensayos; la velocidad sónica: (1631,09 m/s) catorce ensayos; peso unitario: (2,29 t/m<sup>3</sup>) cuarenta y cinco ensayos.

Se presenta una síntesis de las unidades litoestratigráficas de interés en la presente investigación, y en el siguiente capítulo se presenta el análisis petrográfico de estas. Ver tabla 62.

Tabla 62. Síntesis de las unidades litoestratigráficas de interés en la presente investigación

<b>NOMBRE DE LA UNIDAD</b>	<b>FORMACIÓN ARENISCA DURA (K2d)</b>	<b>FORMACIÓN ARENISCA LABOR (K2l)</b>
<b>DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA:</b>  Fuente: Pérez & Salazar (1978)	Se encuentra conformada por areniscas cuarzosas, blancas a amarillentas por alteración, grano fino a muy fino, con estratificación muy delgada a gruesa, intercalada esporádicamente con limolitas silíceas y arcillolitas de color gris claro,	Se encuentra conformada por secuencias en capas muy gruesas de areniscas cuarzosas y feldespáticas blancas a grises claras de grano fino a grueso y en ocasiones conglomeráticas, intercaladas con capas

	al occidente de la Sabana las areniscas son más lodosas y se reporta un espesor de 320 m, mientras que al oriente tiene un espesor de 407 m.	delgadas de arcillolitas grises claras.
<b>DESCRIPCIÓN FÍSICO – MECÁNICA</b>  Fuente: CORREA A. et al. 2009	Predomina en la Arenisca Dura, un alto grado de litificación, cementación y una buena composición de minerales, elementos aquellos que determinan su dureza y resistencia a la abrasión, a pesar de estas condiciones cabe anotar que la misma es friable cuando se encuentra en un estado de meteorización. Algunas de las características físicas y mecánicas de esta formación son:	Las Areniscas de Labor son moderadamente friables y con una resistencia a la abrasión media, por lo que su explotación puede llevarse a cabo de forma manual. Algunas de las características medias físicas y mecánicas de esta formación son:
	Resistencia a la tracción indirecta 3,86 Mpa, (5 ensayos).	Resistencia a la tracción indirecta: 3,50 Mpa (5 ensayos).
	Resistencia a la compresión simple 56,60Mpa (2 ensayos)	Resistencia a la compresión simple: 64,36 Mpa (3 ensayos).
	Peso unitario: 2,26 t/m <sup>3</sup> (11 ensayos),	Peso unitario: 2,19 t/m <sup>3</sup> (15 ensayos).
	Velocidad Sónica de (2.730,82) m/s.	Velocidad sónica: 2.657,36 m/s (15 ensayos).

## **DISEÑO PROTOTIPO MÁQUINA PARA DETERMINACIÓN DEL DRI (ÍNDICE DE LA TASA DE PERFORABILIDAD)**

La investigación evidencia la inexistencia de ensayos en el país para la determinación del índices de abrasividad como lo expresa el Doctor Álvaro de la Cruz Correa Arroyave “ la caracterización de la roca desde el punto de vista de su abrasividad o aptitud al desgaste de las herramientas de corte y conminución (brocas, cortadoras, disco, martillos, trituradoras, etc), razón por la cual quienes se enfrenta a ese tipo de determinaciones o bien asumen datos, o lo deducen de otros parámetros con los cuales ella parece correlacionar, o en última instancia se envían las muestras para que se realicen la pruebas en laboratorios localizados en otros países como Panamá, Estados Unidos u otras naciones de Europa. En Colombia aún los laboratorios más reconocidos no cuentan con equipos necesarios para realizar estas caracterizaciones las cuales incluyen la determinación del DRI (índice de la Tasa de Perforabilidad), el AVS (Valor de Abrasividad del Acero), el CLI (Índice de Vida de las Cortadoras)...”.

El autor presenta el diseño prototipo de máquina que permite hallar la tasa de perforabilidad del material rocoso, una vez que esta es suprema mente importante para determinar o caracterizar mejor los materiales tanto para investigación como para la elaboración de proyección de obra y costos estimados en un plan donde se encuentra inmersa las actividades de perforación y corte como es el caso de la construcción de túneles.

Para la elaboración del equipo se tiene en cuenta los siguientes factores que llevan a optimizar el ensayo que se espera efectuar, comoquiera que en la actualidad en el país no se encuentran comercialmente motores de 180 a 200 RPM, (velocidades propuestas para la realización del ensayo), por tal razón se utilizará un motor de 1800 RPM y 1 Hp, que para el caso se propone uno de marca WEGSteel motor (Trifásico); para llegar a 180 RPM se empleará un reductor de velocidad de 10 a 1 de marca WEG MAGMA –M, la idea primordial es poder realizar pruebas entre 180 y 200 RPM (esto por variedad de ensayos), se implementa en el equipo un variador de frecuencia WEG CFW 100, con lo anterior estaremos llegando a las velocidades necesarias para el desarrollo del laboratorio.

El equipo cuenta con un sistema de tacómetro digital de velocidad, que permite corroborar las RPM, para garantizar que efectivamente sean las requeridas para dicho ensayo, de igual forma se incluye un temporizador que permite que el tiempo del ensayo sea exacto.

La estructura de la maquina está diseñada en acero inoxidable por su durabilidad y presentación.

A continuación se describe el detalle de la máquina y sus características como se puede observar en la figura 85.

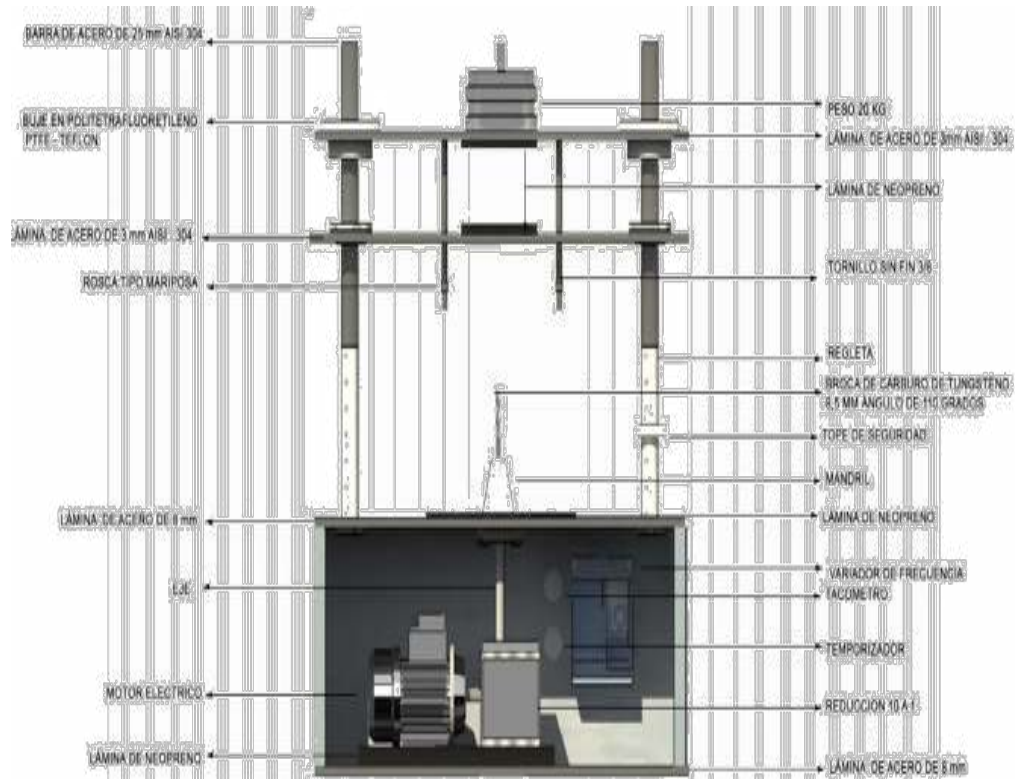


Figura 88. Base principal por una estructura

Fuente: Autor

La máquina de la figura 85 estará construida en su base principal por una estructura de 5/16" (8mm) en acero inoxidable AISI 304, que conforma la bóveda, en el interior se encuentra inicialmente una lámina de neopreno que cumple la función de disipador de energía que genera el motor 1800 RPM y 1 Hp, (esto para evitar cualquier tipo de movimiento o vibración en el equipo que pueda alterar el ensayo), caja reductora de velocidad, variador de frecuencia, tacómetro digital y temporizador, la misma que soporta en la parte superior dos barras de acero inoxidable AISI 304 con un diámetro de 25mm y marcadas con una regla que indican el desplazamiento o perforación que pueda sufrir el espécimen el cual es sometido al ensayo, por donde descienden las plataformas superiores y un mandril donde es instalada la broca de carburo de tungsteno de 8,5 mm con un ángulo de la punta o

centro muerto de 110° (existen ángulos entre 135° y 110° el ángulo menor es empleado para materiales duros), de igual forma sustenta un sistema de soporte que permite sostener la muestra durante el ensayo, el mismo, compuesto por una lámina de acero inoxidable AISI 304 de 3mm, la cual contiene de igual forma un neopreno con el fin de que la muestra del material quede totalmente adherida y no sufra deslizamiento alguno durante el ensayo, esto con el propósito de realizar las pruebas en especímenes regulares e irregulares, contiene una perforación con diámetro de 6cm, que permite que la roca o muestra quede expuesta para la perforación durante la prueba, el soporte se comprime mediante un sistema de tornillo sin fin que permanece con restricción por la lámina superior que es soporte del peso, y una tuerca tipo mariposa, la placa se desplaza por medio de bujes de teflón, (material que sufre menos desgaste), los mismos que sirven como guía de información para la profundidad de perforación, ya que estos se desplazan por las barras marcadas con la regleta; la placa superior es también de acero inoxidable AISI 304 de 3mm, la cual restringe los tornillos en sinfín y una banda de neopreno que ayuda a fijar la muestra, esto en la parte inferior de la placa y en la parte superior en su centro lleva una barra de acero de 25mm donde se insertaran cuatro discos de 5 Kg para llegar a un peso final de 20 Kg, y esto con el fin de que sea manipulada por cualquier persona, el sistema de descenso está fundamentado por bujes de teflón.

## **PREPARACIÓN DE LA MUESTRA**

El espécimen a ser sometido al Índice de perforabilidad, no necesariamente debe ser regular, pero sí sustentar las siguientes medidas:

$L = \pm 12\text{cm}$

$A = \pm 12\text{cm}$

$H = \pm 15\text{cm}$

## **TIEMPO DE DURACIÓN DEL ENSAYO**

La prueba está dada para una duración de 30s

## **ENSAYO DE PERFORABILIDAD**

El equipo está diseñado de manera tal que los especímenes pueden presentar formas irregulares o regulares, de  $\pm 12\text{cm} \times \pm 12\text{cm}$  una vez colocada la muestra del material rocosos se enciende el motor y se calibra las 180 o 200 RPM según sea la especificación o norma, se sobre carga la muestra con 20kg y durante 30 segundos se realiza el ensayo de la muestra, finalmente se mide en milímetros

la perforación que sufrió la muestra durante el periodo de duración de la prueba, esta se repite entre 4 y 8 veces

En la tabla 63 se describen los materiales con que se elabora la máquina para calcular su peso promedio.

Tabla 63. Peso de elementos estructurales del equipo según la densidad del acero.

MATERIAL	DIMENSIONES (cm)	CANTIDAD	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	PESO Kg	PESO K/m
Lámina de acero inoxidable AISI 304 e=8mm	L= 70 A= 30 e= 0,8	4	7,9	13,3	-
Lámina de acero inoxidable AISI 304 e=8mm	L= 30 A= 30 e= 0,8	2	7,9	5,7	-
Lámina de acero inoxidable AISI 304 e=3mm	L= 70 A= 15 e= 0,8	2	7,9	6,7	-
Barra de acero inoxidable AISI 304 con un diámetro de 25mm	60L= 60 Ø= 2,5	2	-	2,31	3,85
Barra de acero inoxidable AISI 304 con un diámetro de 25mm	12L= 12 Ø= 2,5	1	-	0,462	3,85
Pesas en forma de Discos	Ø= 2 - Ø <sub>o</sub> 2,54	4		5	
Motor WEG Steel motor (Trifasico ) 1800 RPM	±L= 40 A= 20H=15	1			± 10,8 Kg

Fuente: Autor

L= Largo

A= Ancho

H= Alto

e= Espesos

Ø= Diámetro del Disco

Ø<sub>o</sub>= Diámetro del Orificio

Teniendo los datos de la tabla N° 63 se puede indicar que el peso de la maquina es de ± 89,562 Kg. Se presenta en la tabla 64, el valor aproximado de precios del mercado.


Tabla 64. Los valores son aproximados del mercado.

<b>EQUIPO</b>	<b>PRECIO(±)</b>
Motor de 1800 RPM de 1 hp WEG Steel motor (monofásico) 1800 RPM	\$ 1.500,000
Reductor de Velocidad de 10/1	\$ 450,000
Variador de Frecuencia	\$ 750,000
Tacómetro de velocidad	\$ 450,000
Temporizador	\$ 600,000
Broca de carburo de tungsteno	\$ 200,000
Estructura en acero	\$ 4.200,000
Accesorios (mandril bujes en teflón Tornillos sinfín, tuercas tipo mariposa, neopreno y tope de seguridad)	\$ 800,000

Fuente: Autor

El costo aproximado del equipo está alrededor de Ocho Millones Novecientos Cincuenta Mil pesos (\$ 8'950.000.00). A continuación se relacionan imágenes correspondientes a los elementos que conforman Diseño Prototipo Máquina para determinación del "DRI" Índice de Perforabilidad como se puede ver en la tabla.

Tabla 65. Elementos hacen parte de la máquina.

<b>EQUIPO</b>	<b>IMAGEN</b>
Motor de 1800 RPM de 1 hp WEG Steel motor (monofásico) 1800 RPM Norma: NEMA MG-1 Frecuencia: 60Hz Tensión: 115/208-230 V Numero de polos: 4 Grado de protección: IP55 Refrigeración: IC411 – TEFC	
Reductor de Velocidad de 10/1wegMAGMA – M	

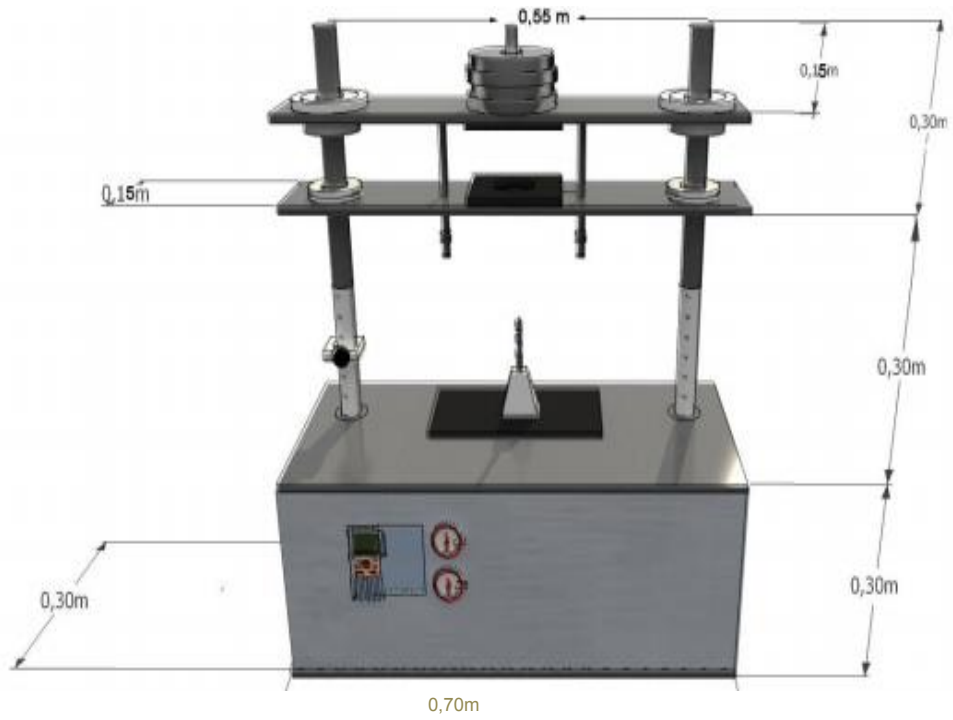
<p>Engranajes: Corona y sin fin  Disposición de los ejes: Ortogonales  Reducciones 1 etapa: 10 hasta 80  Reducciones dúplex: 100 hasta 4.000  Torque: 10 hasta 1.300 N/m  Motores eléctricos disponibles: 0,12 hasta 5,5 kW  Fijación: Carcasa, piés, brida o brazo de torsión  Eje de salida: Hueco (estándar), macizo simple o doble</p>	
<p>Variador de Frecuencia Marca wegcfw 100</p> <p>El más pequeño convertidor de frecuencia del mercado. La serie CFW100 abarca un rango de potencia desde 0,18 a 0,75 kW (0,25 a 1 HP).</p>	
<p>1.- Este es un tacómetro digital con rango de medición de 60-9999 RPM, la fuente de alimentación es DC 7 ~ 30V.  2.- Tiene una pantalla digital y una frecuencia de actualización alta de 4Hz, solo 3S para restablecer a cero.  3.- A Señal de pulso de voltaje, señal de choque activa, señal de interruptor de proximidad PNP / NPN, interruptor de proximidad de pasillo.</p>	

<p>4.- Caracterizado por su alta precisión y tamaño pequeño que facilita la instalación embebida.</p> <p>5.- Es aplicable a todo tipo de maquinaria y equipo Nota de detección de velocidad del motor: Sin sensor incluido.</p>	
<p>Temporizador</p> <p>Voltaje de funcionamiento: 110/220 vol.</p> <p>Programación: 16 ON/ 16 OFF.</p> <p>Tiempo mínimo de programación: 1 segundo.</p> <p>Tiempo máximo de programación: 59 segundos.</p> <p>Aplicación: sirenas y campanas en colegios, fábricas, etc.</p> <p>Se puede programar para: diario, semanal y por pulsos.</p> <p>Tiene exclusión para fin de semana.</p> <p>Se puede activar manualmente, si lo necesitaré.</p> <p>LED indicador del estado del relé.</p> <p>Formatos de 12 o 24 horas.</p> <p>Batería de respaldo.</p>	
<p>Broca de carburo de tungsteno</p>	

<p>Bujes en teflón</p>	
<p>barra de acero inoxidable AISI 304 con un diámetro de 25mm</p>	
<p>Lámina de acero inoxidable AISI 304</p>	

Fuente: Autor

A continuación se presentan diferentes ángulos del Equipo donde se puede apreciar de mejor manera, en la figura 89 y 90 se ve la parte frontal del mismo, en la figura 91 se presenta el equipo en un giro con muestra regular o preparada, en la figura 92 se observa la maquina con espécimen irregular y en la figura 93, se observa una perspectiva quede un Angulo superior donde se aprecia orificio que permite contacto entre la broca y la muestra.



Fuente: Autor

Figura 89. Vista frontal de la máquina.



Figura 90. Vista frontal vista superior

Fuente: Autor

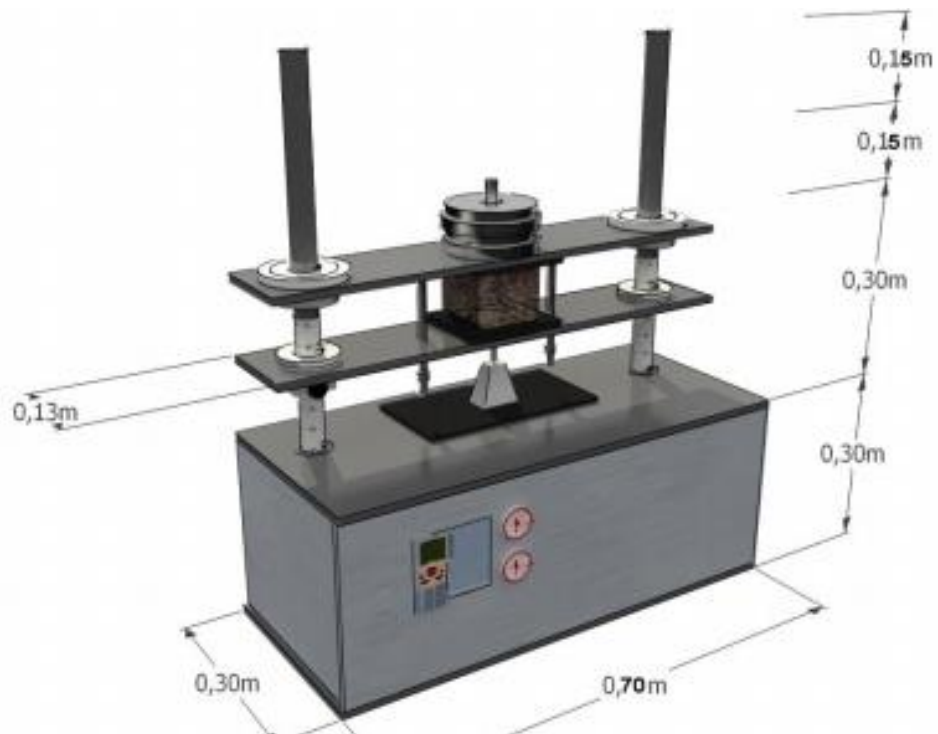


Figura 91. Vista ángulo de giro con muestra regular  
Fuente: Autor

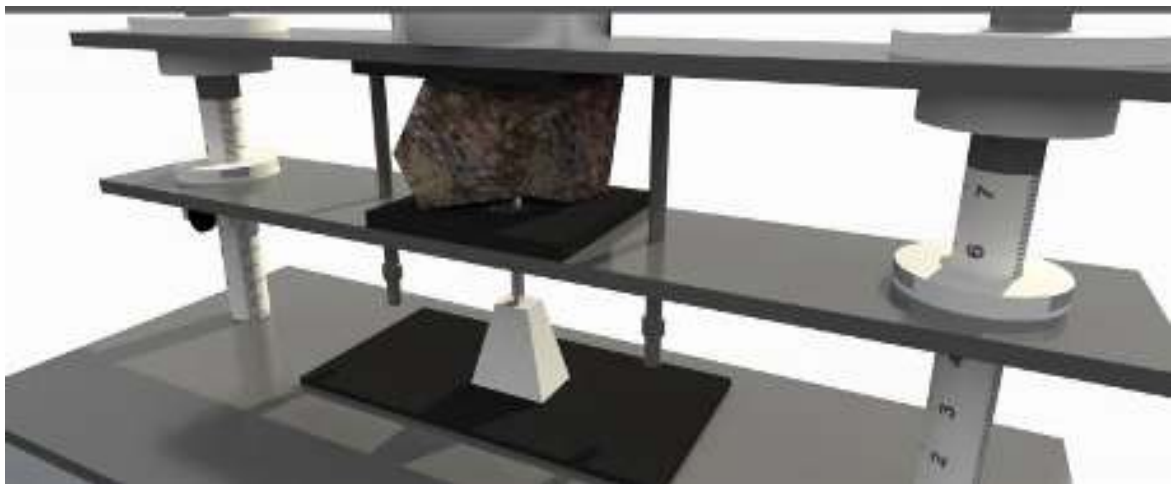


Figura 92. Vista ángulo de giro con espécimen irregular.  
Fuente: Autor

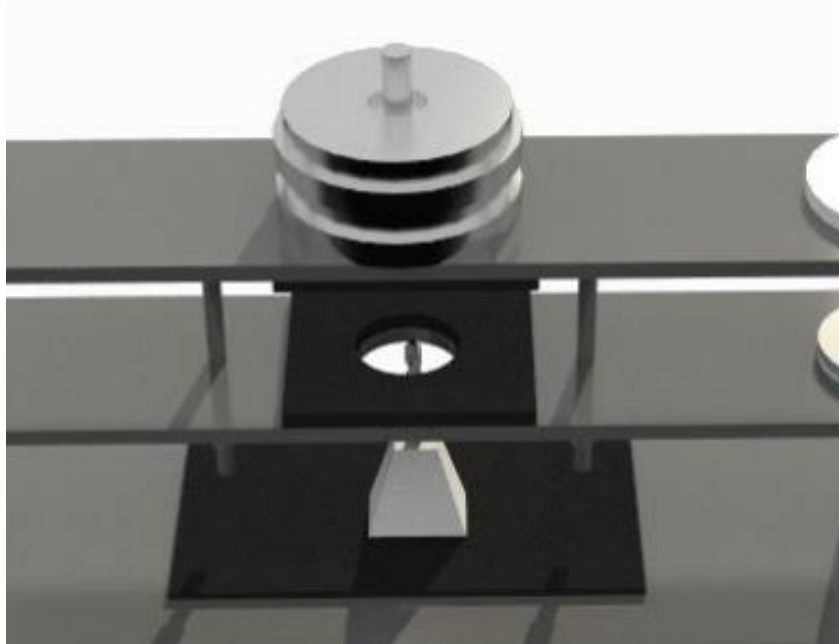


Figura 93. Vista perspectiva desde un ángulo superior donde se aprecia orificio que permite contacto entre la broca y la muestra.  
Fuente: Autor

## **CAPITULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **CONCLUSIONES**

Para el presente capítulo se expresan las conclusiones más relevantes de la investigación bibliográfica y los análisis petrográficos realizados a las muestras de roca extraídas del Grupo Guadalupe. Teniendo en cuenta los ensayos a los que el material fue sometido se logran obtener importantes observaciones para facilitar su caracterización y comportamiento abrasivo frente a las actividades de corte y perforación en túneles.

La investigación obtenida en fuentes secundarias permite concluir:

1. Los materiales del Grupo Guadalupe especialmente de la formación Arenisca Dura y Arenisca labor son de difícil perforabilidad y excavabilidad por su alto contenido de cuarzo y sus altas resistencias a la compresión y a la tracción.
2. Teniendo en cuenta los diferentes componentes que intervienen en el comportamiento de la roca es preciso determinar las propiedades intrínsecas del material a través de pruebas de laboratorio que permitan conocer claramente el comportamiento del macizo rocoso durante las actividades de perforación y corte, en cuanto a su estabilidad y desgaste agresivo de los elementos de excavación.
3. Para conseguir un juicio altamente confiable y específico de este tipo de roca se debe efectuar investigaciones de carácter multidisciplinario que conlleven a conocimientos de áreas como la ingeniería y la geología.
4. Dada la importancia que actualmente sustenta la infraestructura vial en la que se encuentra inmersa el país, en aras de mejora la franja vial en Colombia, creando obras subterráneas que permiten mayor y mejor movilidad es importante conocer cada vez mejor el tipo de material al cual se enfrentan los proyectos tanto por costos y rendimientos como por su estabilidad.

Las conclusiones que se obtienen como resultado de la investigación y de estudios realizados a las muestras de roca adquiridas en el Grupo Guadalupe son las siguientes:

1. Los materiales de las muestras seleccionadas para la investigación, después de su caracterización encajan en los parámetros de Arenisca Dura las muestras codificadas como DF.A.G-001 y DF.A.G-002, con alto contenido de cuarzo del 98% y el 80% respectivamente indicando su alto grado de abrasividad, y como Arenisca Labor los materiales con código de muestra DF.A.G-003 y DF.A.G-004, que de igual forma presenta contenidos muy considerables de cuarzo del 75% y el 80%, además hace presencia el circón con un 3%, elemento que con menor proporción pero que

Teniendo en cuenta su alta dureza de 9 según la escala de Mohs, es de resaltar que el circón es muy utilizado en la industria como materia prima del metal circonio para fabricar aceros especiales, abrasivos y reactores de aviones.

El análisis petrográfico permite clasificar y determinar la composición mineralógica para las muestras extraídas en la investigación, estableciendo que una vez estudiadas las cuatro secciones delgadas se puede decir que todos los especímenes están conformados por rocas de grano fino a medio ligeramente arcillosas en porcentajes del 2% al 3%,.

La muestra N° 3 presenta un sector cementado por óxido de hierro que reduce el grado de porosidad primaria, además presenta una porción de circón del 3%, es importante mencionar este mineral ya que el mismo posee una dureza 9, según la clasificación de Mohs.

Las cuatro muestras estudiadas presentan áreas bien definidas con cementación silíceas, y exhiben un alto contenido de cuarzo monocristalino (Grano de Cuarzo constituido por un único cristal).

El material se caracteriza por ser arenisca silícea y por tal razón es un material altamente abrasivo, el mismo que es utilizado para la elaboración de lijas, discos o bloques en sistemas de abrasión por medio de chorros de arena a presión.

2. Los especímenes fueron sometidos a los ensayos que se tenían como objetivos y fueron comparados con los de otros autores que habían realizado pruebas del mismo material, las muestras de la presente investigación arrojaron resultados

superiores frente a las comparadas como se puede evidenciar en los anexos resultados de laboratorios.

3. El material es correlacionado con el resultado del ensayo de "CAI" (Índice de abrasividad cerchar) frente a los ensayos de las características físico-mecánicas del mismo, tales como: la resistencia a la compresión simple, a la tracción, carga puntual ( $I_{s50}$ ); así como la velocidad Ultrasonido, la dureza Schmidt y el índice de Schimazek, permitiendo conocer que en la reciprocidad con la resistencia a la tracción presenta un  $R^2$  de 1, dejando ver un ajuste lineal perfecto, la reciprocidad que presenta frente al ensayo del martillo Schmidt refleja un  $R^2$  de 0,8937, la Densidad  $R^2$  de 0,849, la compresión simple  $R^2$  de 0,6509, la velocidad ultrasonido  $R^2$  de 0,59095 la carga puntual ( $I_{s50}$ )  $R^2$  de 0,5077, presentando una correlación que para la ingeniería es muy aceptable.

Esto se puede evidenciar en los anexos técnicos.

4. La construcción del prototipo de máquina para la determinación del DRI, es relevante en la medida que permite conocer mayores características del material frente al desgaste de las herramientas de perforación y cote, además permite tener un estimativo en cuanto a las proyecciones tanto económicas como de tiempos de ejecución en la construcción de túneles.

## RECOMENDACIONES

Los métodos actualmente utilizados para la perforación y corte del macizo rocoso en la construcción de túneles son los de excavación mecanizada y perforación y voladura, este último está recomendado para rocas de alta resistencia y velocidades de ultrasonido  $V_p$  mayores de 2000 m/s, teniendo en cuenta las condiciones del macizo o cuando las rocas son muy abrasivas.

1. Esta investigación sustentada en investigadores y autores como es el caso del Dr. Álvaro de la Cruz Correa Arroyave, recomienda que las actividades que se realicen en la construcción de túneles sea con el método de perforación y voladura de acuerdo con la caracterización del material estudiado en la presente investigación.

2. López de Jimeno en el manual de túneles y obras subterráneas también refuerza esta conclusión expresando que materiales rocosos con contenido abrasivos mayores de 30% presentan un alto consumo de picas y para el caso se tiene contenidos superiores al 75% de contenido de cuarzomonocristalino.

3. En aras de generar aporte a la ciencia y la caracterización específica de los materiales frente a la abrasividad, el autor de esta investigación propone la construcción del prototipo de máquina que permita determinar el índice de tasa de perforabilidad D.R.I, para lo cual expone un diseño con las características y especificaciones que se allegan en el presente trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Sánchez Delgado, N. (2015). Relación entre la abrasividad de rocas graníticas y sus características petrográficas y propiedades físicas.
- Agger, M. S., Hörsted-Binslev, P., & Hovgaard, O. (2003). Abrasividad in vitro en superficies radiculares de un sistema de pulido por chorreado. *Quintessence. Publicación Internacional de Odontología*, 16(3), 135-139.
- Stake, R. E. (1998). Investigación con estudio de casos. Segunda Edición. Madrid: Ediciones Morata.
- González Sánchez, H. A. (2012). Desarrollo de un modelo para determinación de abrasividad de suelos con características vérticas (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín).
- González, Claudia, Arroyo, Marcos, & Gens, Antonio. (2013). Abrasividad y su influencia en el rendimiento de una excavación mecanizada. *Obras y proyectos*, (13), 6-18. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132013000100001>
- Sánchez Iznaga, Á. L., Herrera Suárez, M., Recarey Morfa, C. A., & Iglesias Coronel, C. (2014). Bases teóricas para la simulación del desgaste de los órganos de trabajo de los aperos de labranza mediante el Método de los Elementos Distintos (MED). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(2), 81-88.
- Urviola, C., & Reynaldo, W. (2017). Evaluación de Características en Canteras de Roca por Prospección Geofísica y Laboratorio para el Empleo en Obras Viales de la Ciudad de Puno al 2036.
- Romero, R., Taboada, T. M., Garcia, C., & Macías Vázquez, F. (1987). Utilización del pH de abrasión como un índice de grado de evolución de la alteración y edafogénesis en suelos graníticos de la provincia de A Coruña.
- Figueroa García, O. (2007). Desarrollo de máquina tribológica para pruebas de abrasión severa "Gouging".
- González, V, Ferrer, Ortuño & Oteo (2002). Ingeniería geológica. Sociedad de geotecnia de Nueva Zelanda, (2005). Field description of soil and rock,

guidelineforthe fieldclassification and description of soil and rock forengineeringpurposes), (descripción en campo de suelos y rocas, directrices para la clasificación y descripción en campo de suelos y rocas para fines de ingeniería), desarrollado por NzGeotechnicalSocietyInc

R. ULUSAY & J. A. HUDSON (2007) Serie Completa de los Métodos Recomendados por la ISRM Para La Caracterización de Rocas en Laboratorio, Compilación realizada por el Grupo Nacional Turco de la ISRM, Ankara, Turquía, 2007, Comisión Técnica de Mecánica de Rocas Sociedad Colombiana de Geotecnia, miembro de la ISRM, Bogotá, Colombia, 2013. Traducido al Español por Correa, A, 2013

Correa, A, (2009). Guía para la Explotación, Mitigación y Recuperación de Canteras Bogotá, D. C., febrero de 2009.

López, J, Arnaiz, G, López, G, & García, B (2013).Manual de Perforación en Túneles.

Pérez, A, (2005). Diseño y ejecución de obras subterráneas, 4 tema Casificación de los Terrenos en Función de su Excavabilidad.

Gutiérrez, Q. Universidad Nacional, (2014). Resistencia al Desgaste Abrasivo de Recubrimientos Producidos por Proyección Térmica para Aplicaciones Navales.

Gómez, P (2014). UniversidadPolitécnica de Catalunya (UPC). Rendimiento, Desgaste y Abrasividad en Excavación Mecanizada de Túneles en Terrenos Heterogéneos.

Narvéez, C, Universidad Nacional, (2011). Efecto del Fracturamiento en Muestra de Rocas en la Propagación de la Onda.

Gómez, A, Universidad Austral de Chile, (2014). Caracterización de Rocas y Análisis de su Resistencia a Fatiga por Hendimiento.

Ordoñez, J (2015). Guía para la Descripción Visual de Muestras de Suelos y Rocas en Laboratorio y Campo, para Propósitos de Ingeniería.

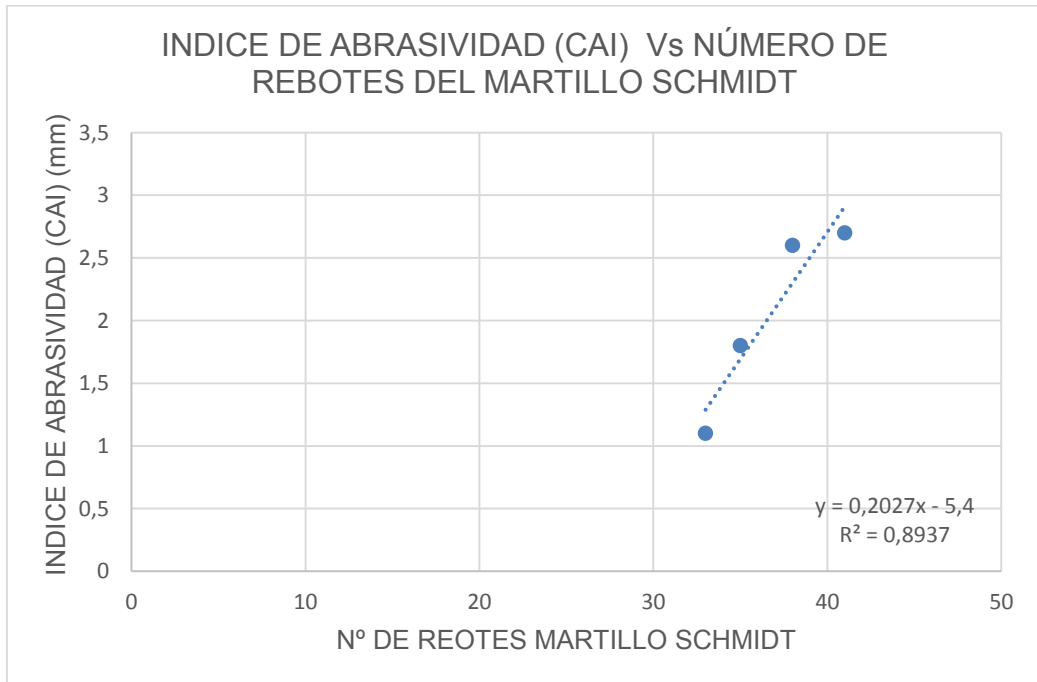
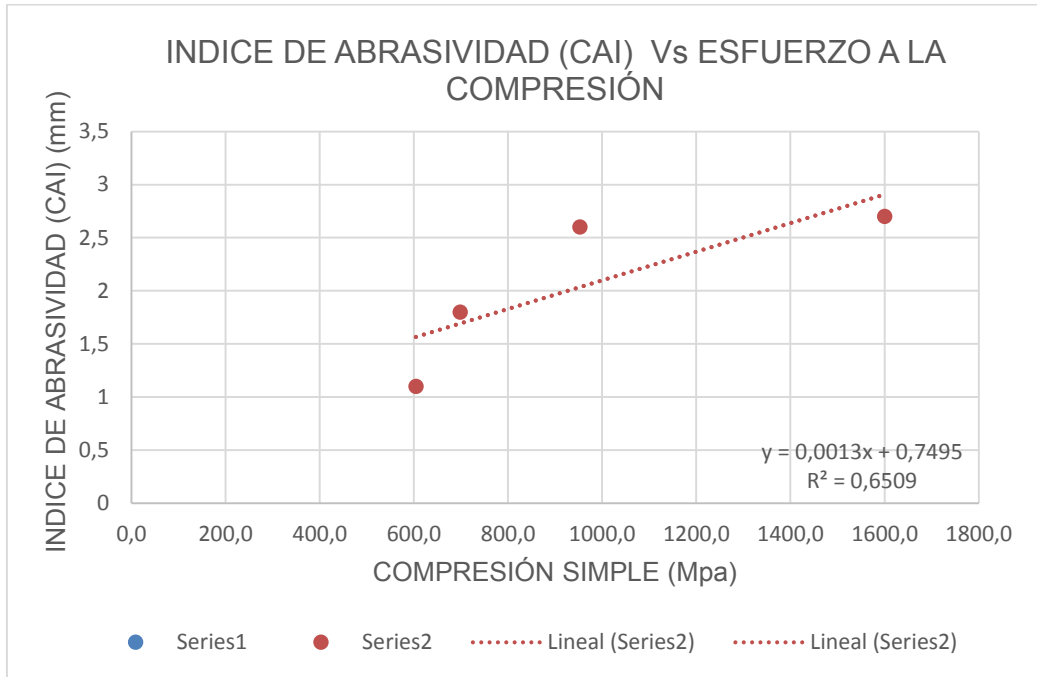
González, P (2014). BarcelonaRendimiento, desgaste y abrasividad en excavación mecanizada de túneles en terrenos heterogéneos.

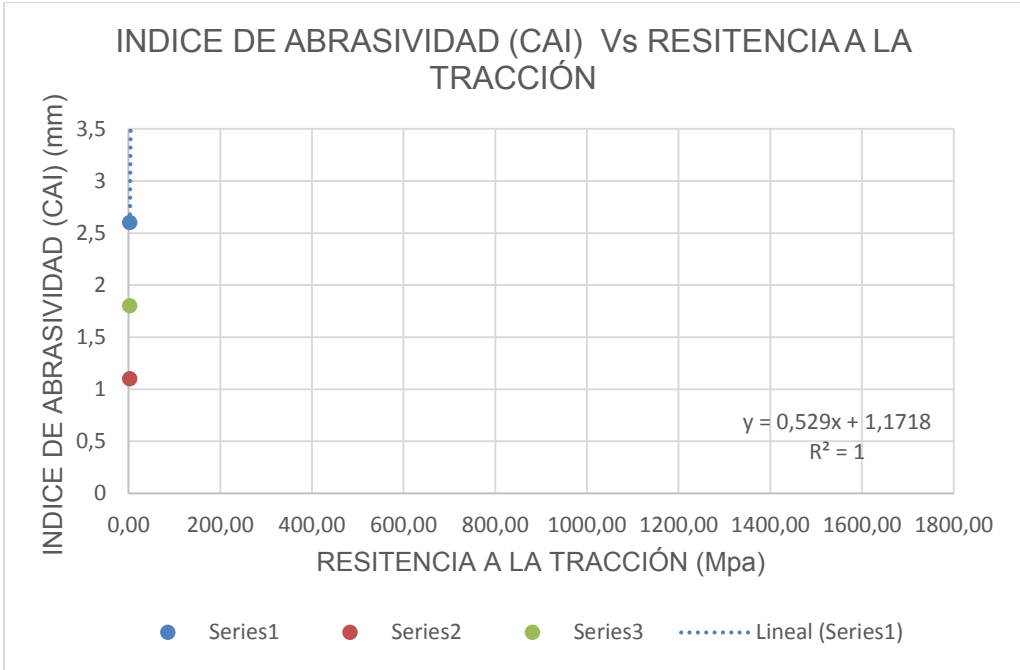
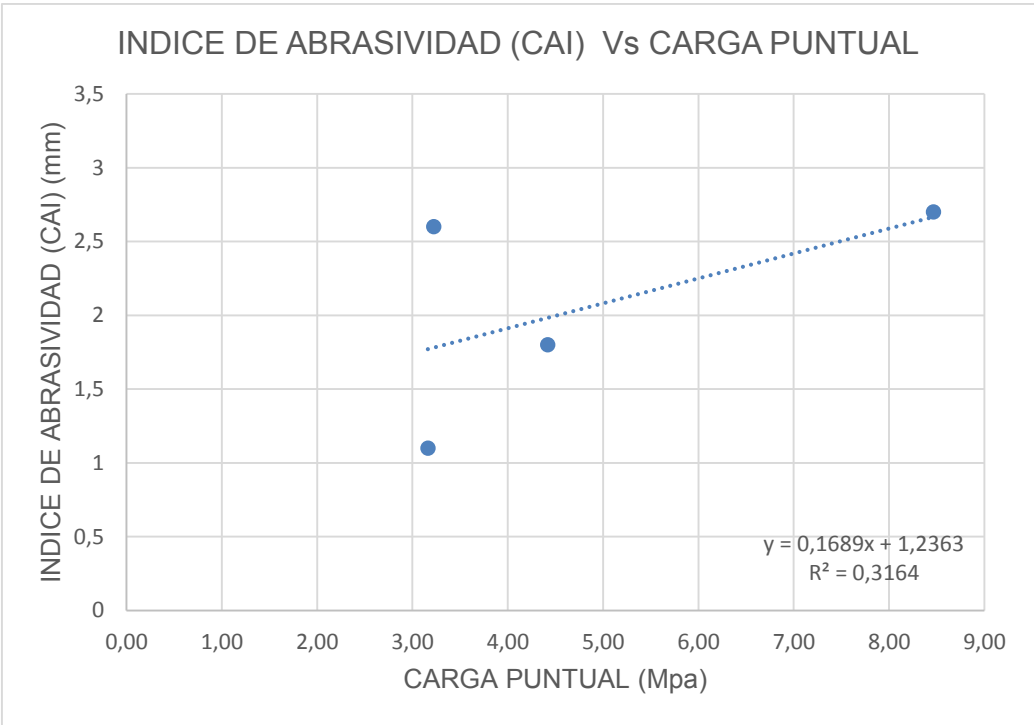
## ANEXOS

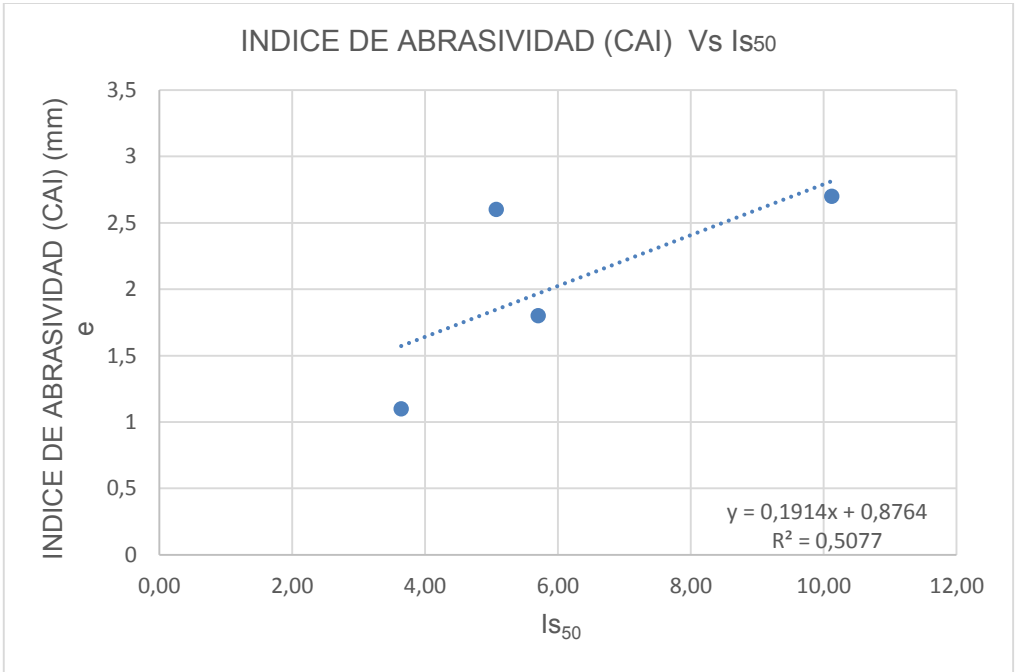
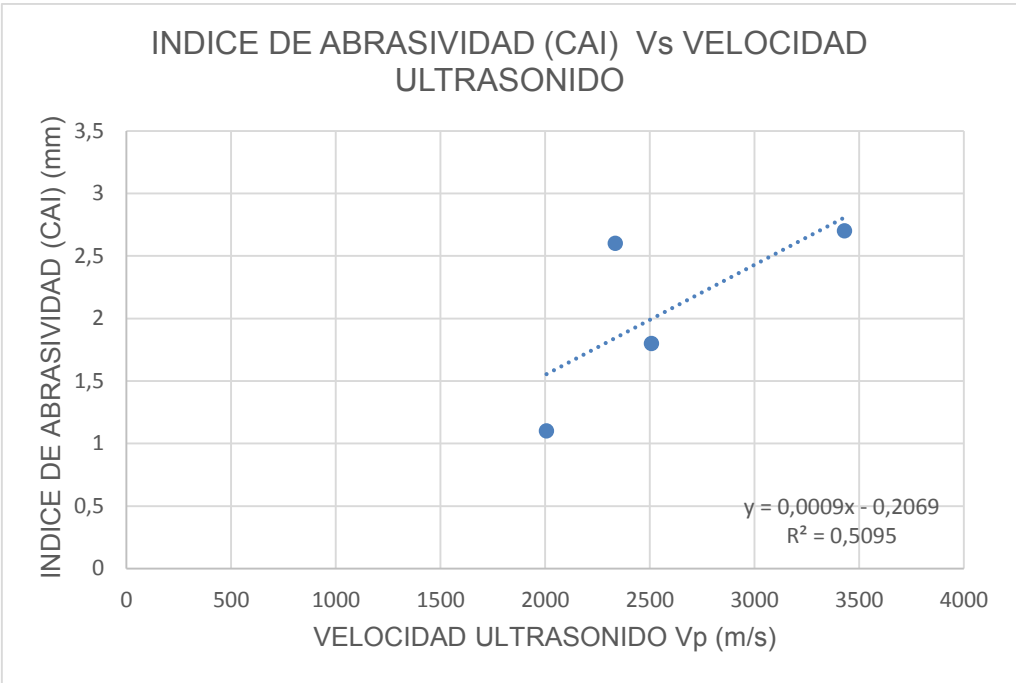
A continuación se presentan los anexos técnicos como los anexos de laboratorios realizados a las muestras que fueron obtenidas del grupo Guadalupe de las formaciones arenisca Dura y arenisca labor, para el desarrollo de la presente investigación.

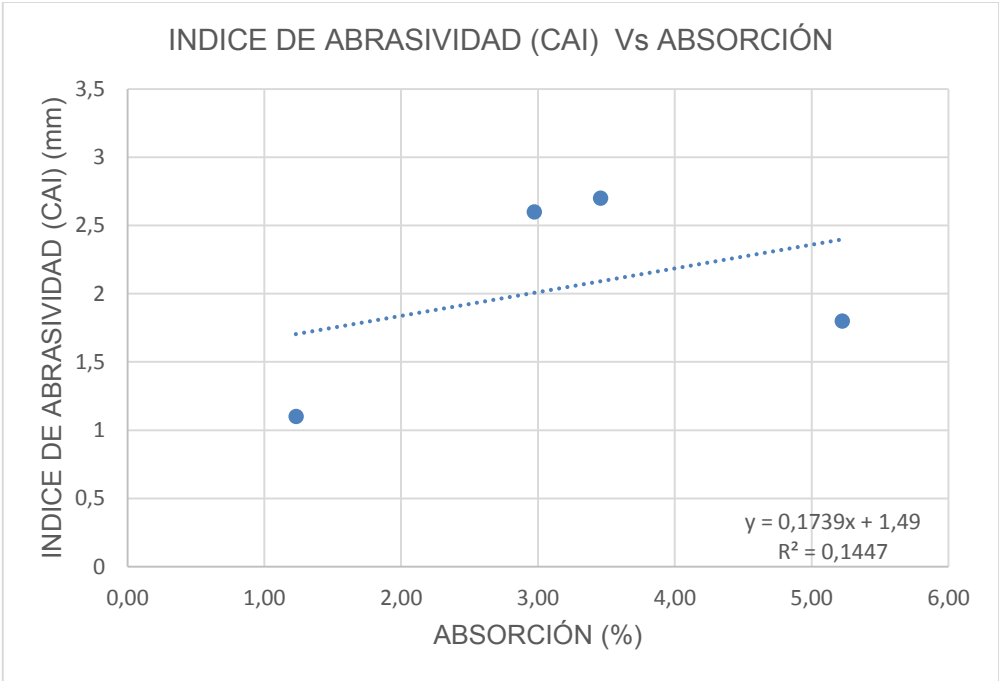
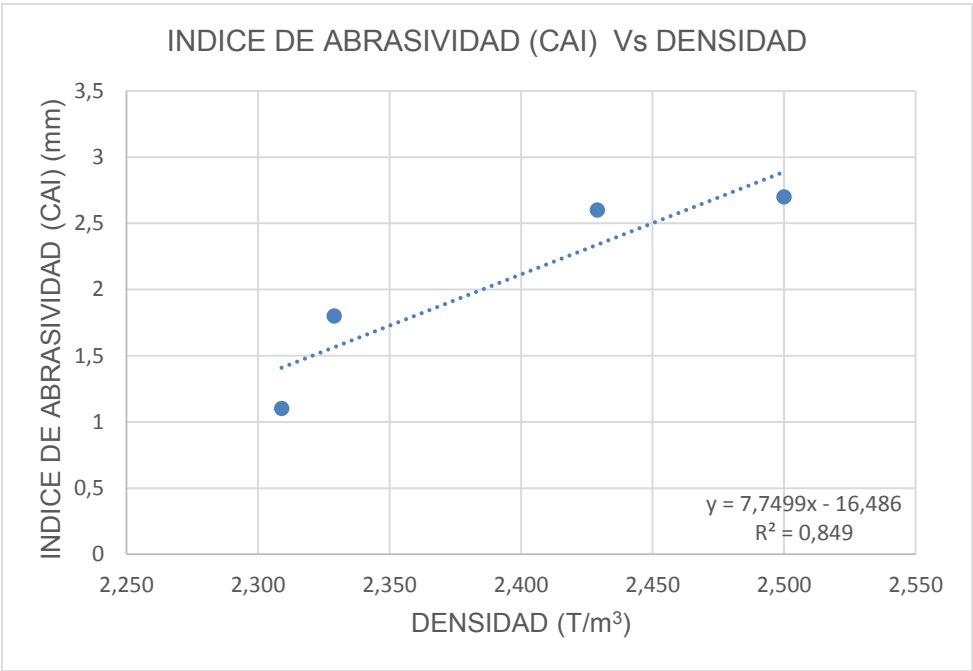
## **ANEXOS**

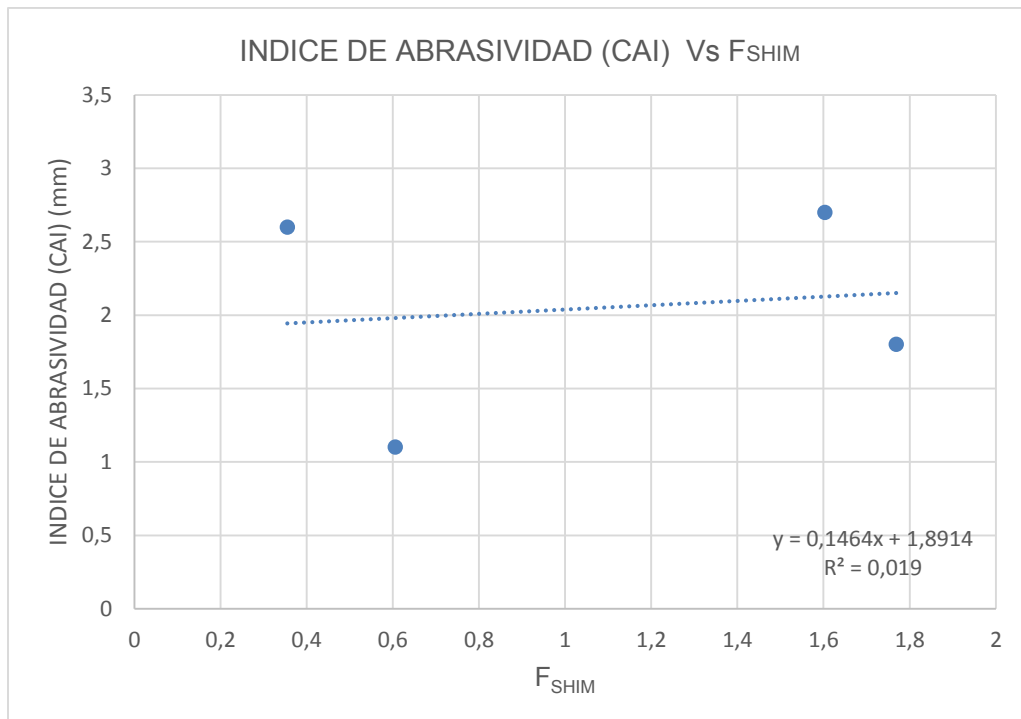
## CORRELACIONES LINEAL DEL ENSAYO DE ABRASIVIDAD (CERCHAR) FRENTE A LOS DEMAS ENSAYOS









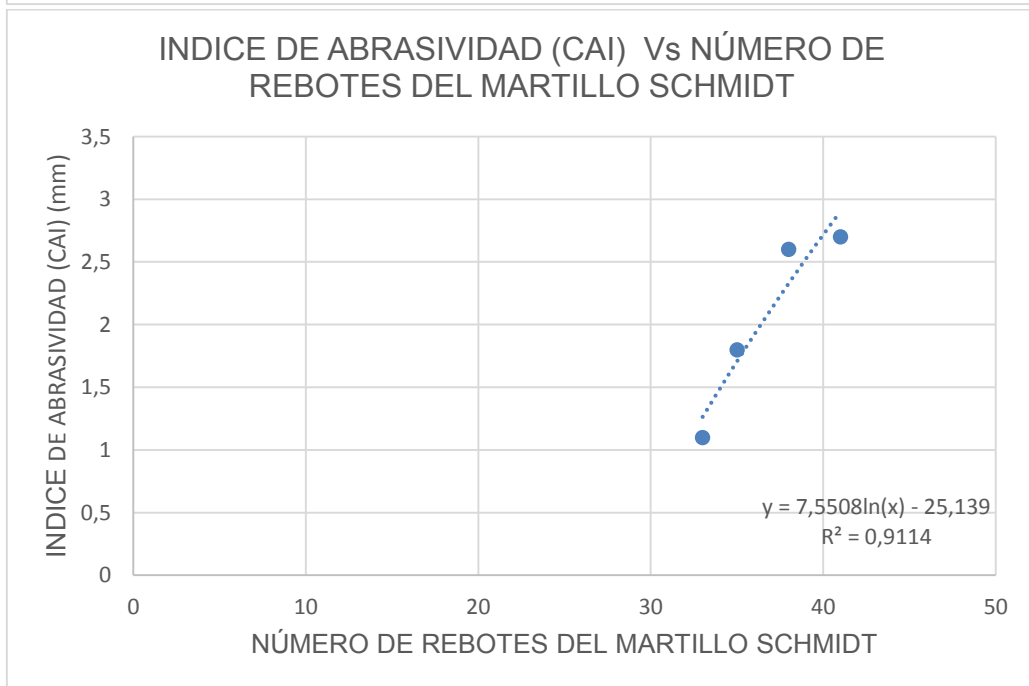
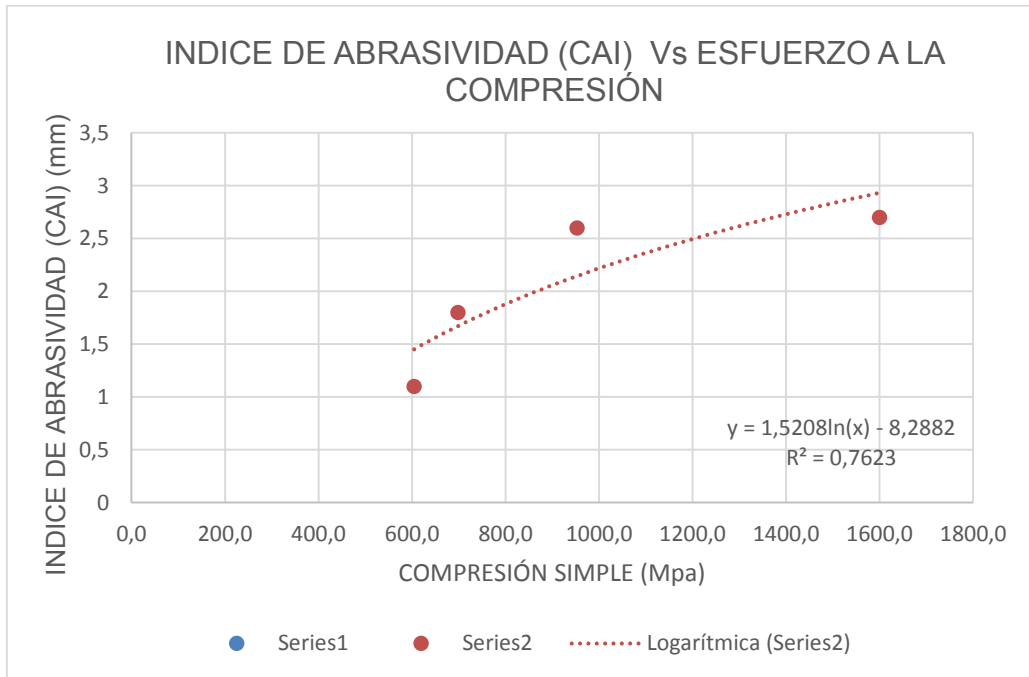


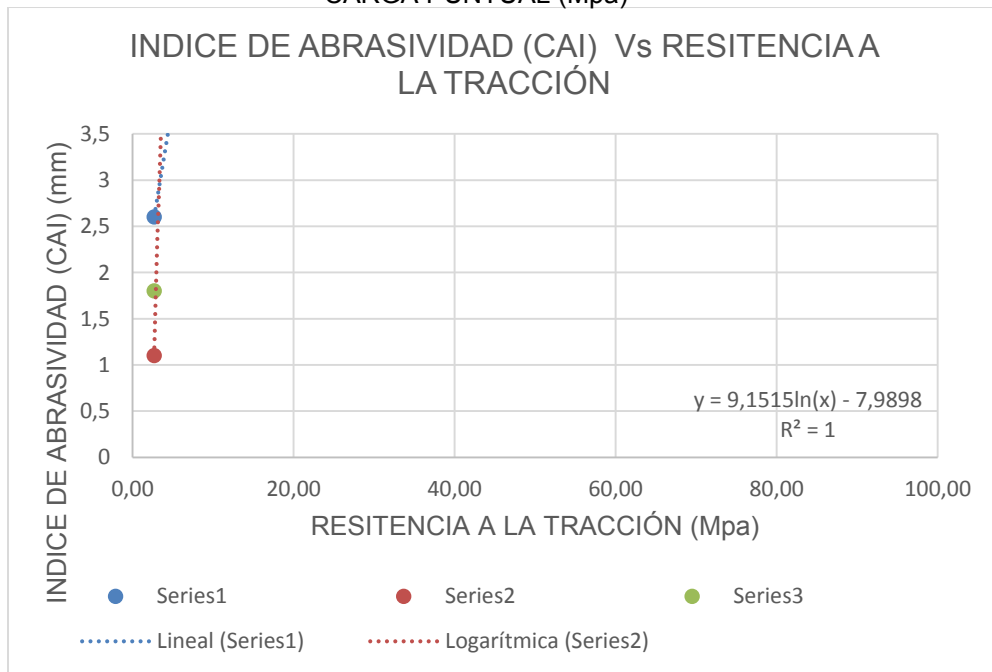
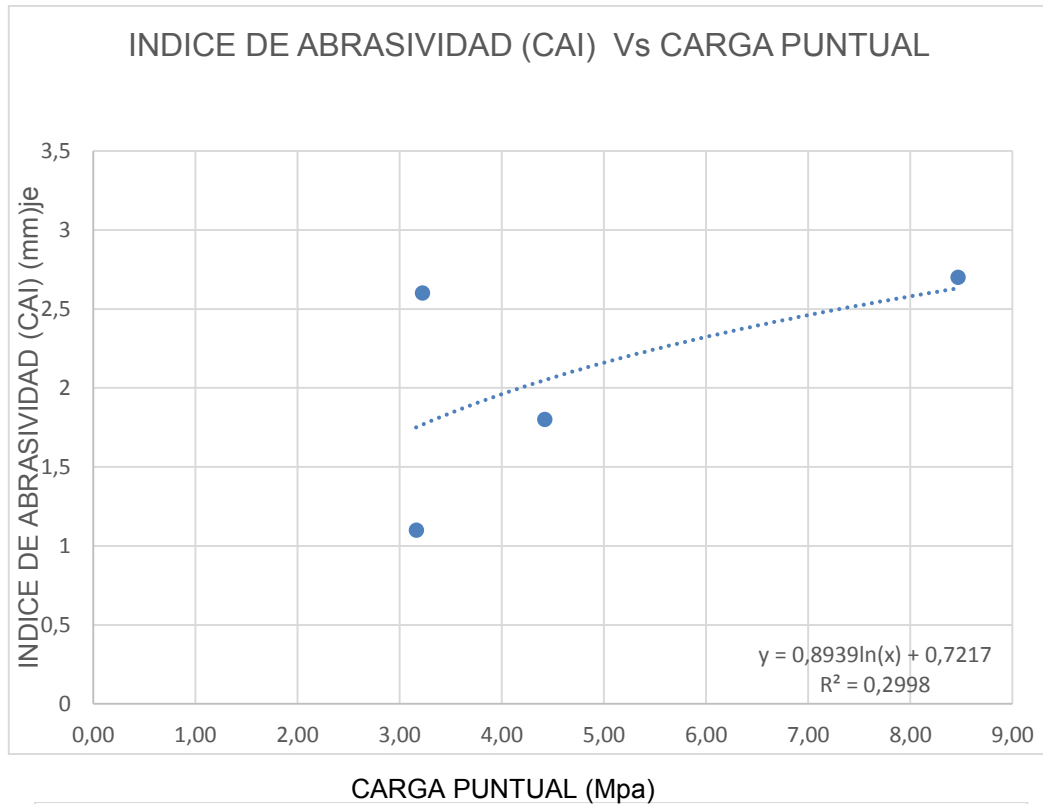
Después de correlacionar el índice de abrasividad con los diferentes ensayos se puede identificar que los ensayos que más se relacionan tiene con la abrasividad son:

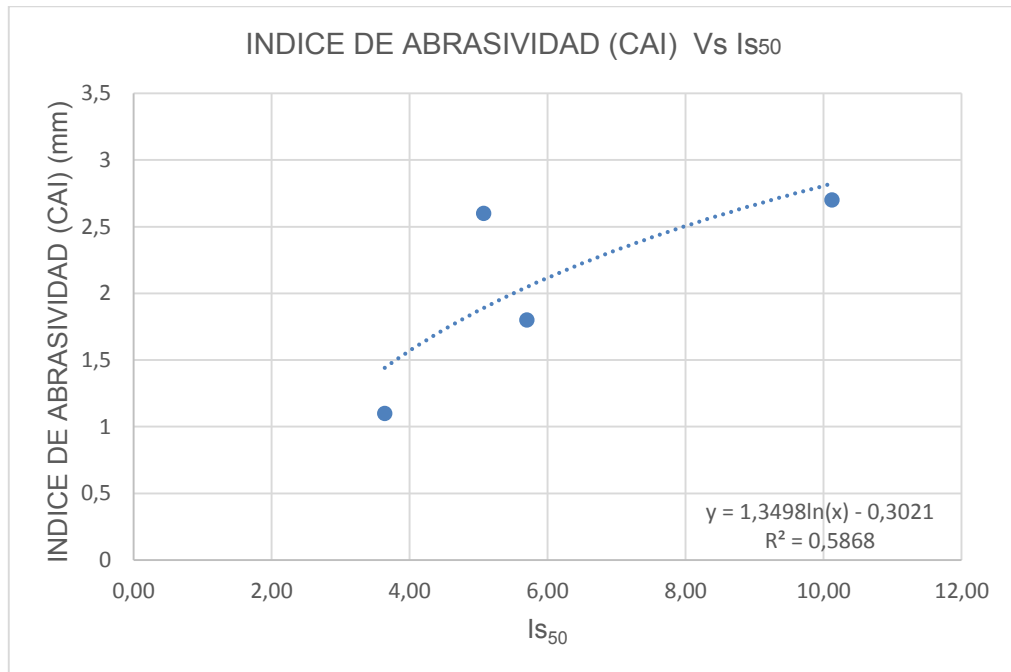
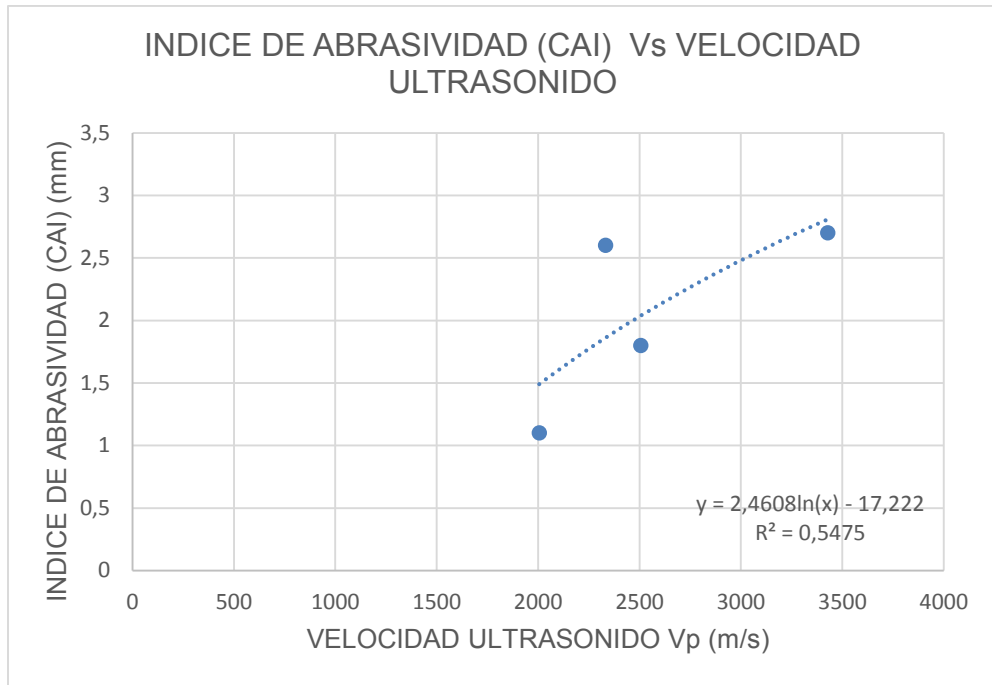
CORRELACIÓN LINEAL		
ENSAYO	ECUACIÓN	R <sup>2</sup>
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	Y= 0,0529x+1,1718	1
Nº DE REBOTES DEL MATILLO SCHMIDT	Y= 0,2027x-5,4	0,8937
DENSIDAD	Y= 7,7499x-16,486	0,849
COMPRESIÓN SIMPLE	Y= 0,0013x+0,7495	0,6509
VELOCIDAD ULTRASONIDO	Y= 0,0009x-0,2069	0,59095
IS <sub>50</sub>	Y= 0,1914x+0,8764	0,5077
CARGA PUNTUAL	Y= 0,1689x+1.2363	0,3164
ABSORCIÓN	Y= 0,1739x+1,49	0,1447
F <sub>SCHMI</sub>	Y= 0,1464x+1,8914	0,019

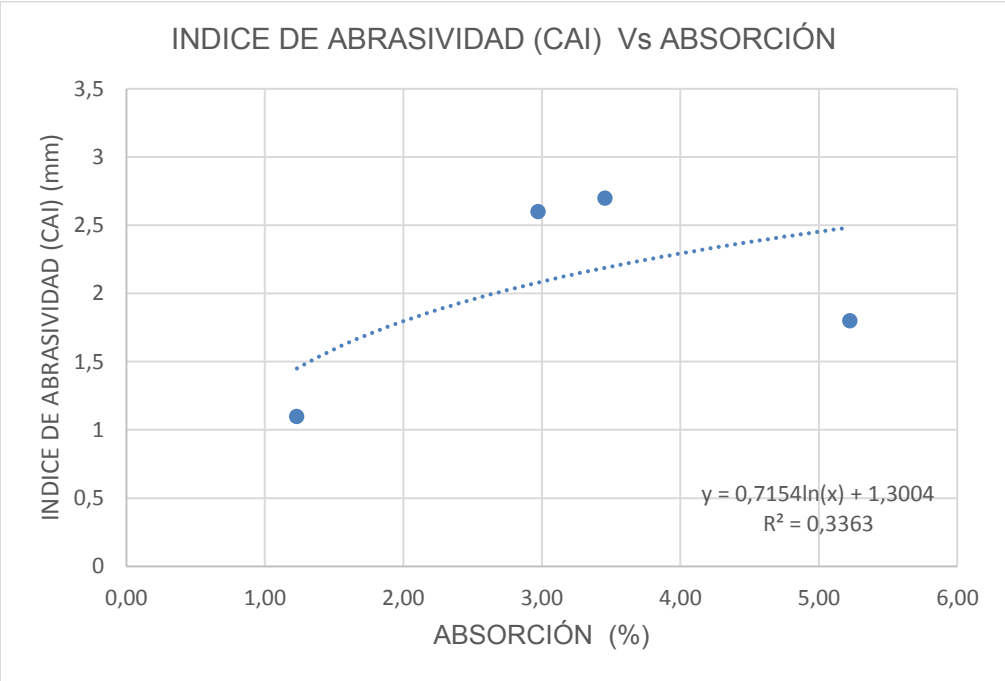
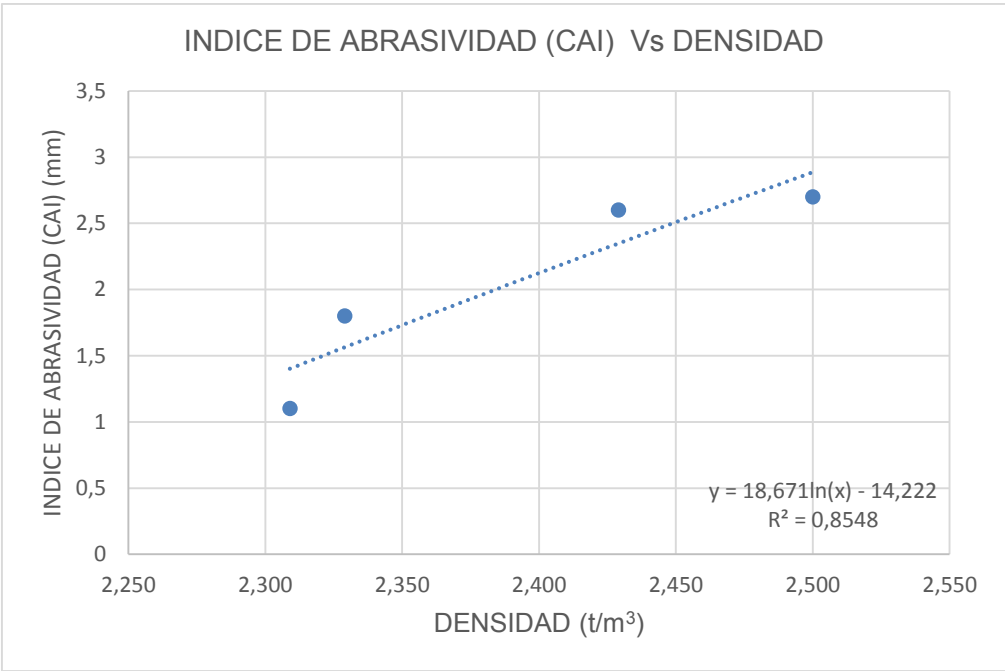
Como se observa en la tabla anterior las correlaciones presentan unos resultados favorables pues exceptuando Carga Puntual, Absorción y F<sub>SCHMI</sub>, todos los demás ensayos están por encima de la media, generando una buena relación con a abrasividad como es el caso de la Tracción, Martillo Schmidt y la densidad, presentando mayor cercanía con R1.

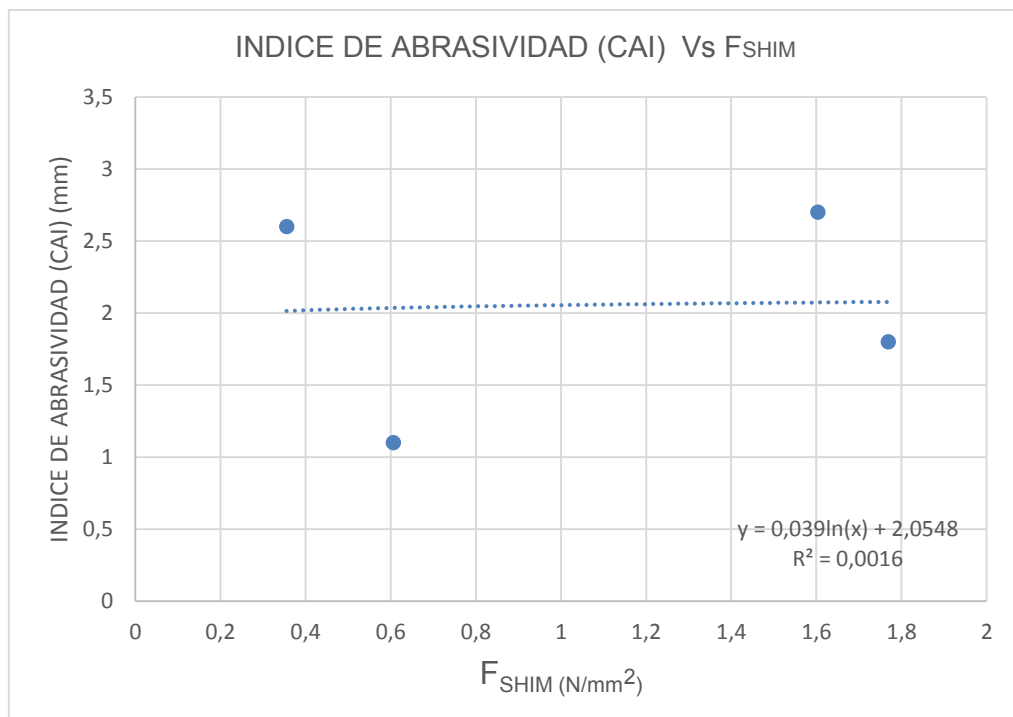
## CORRELACIONES LOGARÍTMICA DEL ENSAYO DE ABRASIVIDAD (CERCHAR) FRENTE A LOS DEMAS ENSAYOS











Posteriormente se correlaciona logarítmicamente el índice de abrasividad con los diferentes ensayos se puede identificar que los ensayos que más se relacionan tiene con la abrasividad son:

<b>CORRELACIÓN LÓGARITMICA</b>		
<b>ENSAYO</b>	<b>ECUACIÓN</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	$y = 9,1515\ln(x) - 7,9898$	1
Nº DE REBOTES DEL MATILLO SCHMIDT	$y = 7,5508\ln(x) - 25,139$	0,9114
DENSIDAD	$y = 18,671\ln(x) - 14,222$	0,8548
COMPRESIÓN SIMPLE	$y = 1,5208\ln(x) - 8,2882$	0,7623
Is <sub>50</sub>	$y = 1,3498\ln(x) - 0,3021$	0,5868
VELOCIDAD ULTRASONIDO	$y = 2,4608\ln(x) - 17,222$	0,5475
CARGA PUNTUAL	$y = 0,8939\ln(x) + 0,7217$	0,0,2998
ABSORCIÓN	$y = 0,7154\ln(x) + 1,3004$	0,3363
F <sub>SCHMI</sub>	$y = 0,039\ln(x) + 2,0548$	0,0016

Como se observa en la tabla anterior las correlaciones presentan unos resultados favorables pues exceptuando Carga Puntual, Absorción y F<sub>SCHMI</sub>, todos los demás ensayos están por encima de la media, generando una buena relación con a abrasividad como es el caso de la Tracción, Martillo Schmidt, la densidad y la compresión Simple siendo más cercanos a R1.