

UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES
ESCUELA DE CIENCIAS GEOLÓGICAS Y AMBIENTALES**

TEMA:

**“APLICACIÓN DE LAS CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS
DEL RMR (ROCK MASS RATING) Y EL INDICE Q, EN EL TÚNEL
DE CARGA PILATÓN SARAPULLO – AGUAS ABAJO, ENTRE
LAS ABSCISAS 5+100.00 – 4+600.00.
PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI PILATÓN”**

**TESINA PRESENTADA PREVIO A LA OBTENCION DEL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO**

AUTOR

CHRISTIAN GENARO FERNÁNDEZ SANTANA

TUTOR

ING. GEÓLOGO OSWALDO FUENTES, M.Sc.

GUAYAQUIL – ECUADOR

ENERO, 2016

© Derechos de Autor
Christian Genaro Fernández Santana
2016

**UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES
ESCUELA DE CIENCIAS GEOLÓGICAS Y AMBIENTALES**

CALIFICACION QUE ORTOGA EL TRIBUNAL QUE RECIBE LA SUSTENTACION Y DEFENSA DEL TRABAJO INDIVIDUAL DE TITULACION: TESINA DENOMINADA: **APLICACIÓN DE LAS CLASIFICACIONES GEOMECAÑICAS DEL RMR (ROCK MASS RATING) Y EL INDICE Q, EN EL TÚNEL DE CARGA PILATÓN SARAPULLO – AGUAS ABAJO, ENTRE LAS ABSCISAS 5+100.00 – 4+600.00. PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI PILATÓN.**

AUTOR: **CHRISTIAN GENARO FERNÁNDEZ SANTANA**
PREVIO A OBTENER EL TITULO DE INGENIERO GEOLOGO.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CALIFICACION (Numero y Letras)

Ing. Glgo. Víctor Hugo Narváez Baquerizo, M. Sc.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Glgo. Honorio Morán Coello.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Glgo. Alfredo Noboa Cárdenas.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

SUSTENTACIÓN Y DEFENSA DEL TRABAJO INDIVIDUAL DE TITULACION REALIZADA EN EL AUDITORIUM DE LA FACULTAD, EL DIALO CERTIFICO.

**Abg. Jorge Solórzano Cabezas
SECRETARIO FACULTAD**

AGRADECIMIENTOS

A los Ingenieros Latorre, Romero, Cherrez y Suing, que me enseñaron todo lo referente a excavaciones subterráneas en la fiscalización del Proyecto Hidroeléctrico Sopladora.

Esp. a los Ingenieros Diego Velasco y Tao Hua Dong, gracias a sus gestiones la empresa CWE – Ecuador, me auspicio para el desarrollo de este tema de investigación.

A las empresas Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP –Hidrotoapi) y China Internacional Water & Electric Corp. (CWE – Ecuador), por toda la información técnica y geológica suministrada.

A los Ingenieros Oswaldo Fuentes y Mario Falquez, por la guía y ayuda para el desarrollo de este trabajo;

A mi madre, mi fortaleza, gracias por tus palabras de aliento en momentos difíciles, ejemplo de vida; a mi padre por su confianza, honesto y trabajador, el mejor de todos; a mi hermana que con sus palabras me levanta el ánimo, la luz en mi vida.

DEDICATORIA

*A mi familia que es el pilar fundamental de mi vida, gracias
por el amor y cariño que me dan.*

RESUMEN

El Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón se desarrolla en las provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi. En la construcción de las obras subterráneas del proyecto se utilizó la clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR) para la valoración de calidad de los macizos rocosos que sirve para definir el tipo de soporte.

El objetivo de este trabajo de investigación fue determinar las características geológicas – geotécnicas del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo entre las abscisas 5+100.00 – 4+600.00 mediante la utilización de la clasificación geomecánica RMR, que con la cual se obtuvo un índice de calidad de macizo rocoso y se recomendó el tipo de sostenimiento que lleva el tramo investigado del túnel, adicional se utilizó la clasificación del Índice Q para tener un criterio cuantitativo del macizo rocoso. Sistemáticamente se realizó levantamientos de las estructuras geológicas principales a medida como iba avanzando la excavación del túnel.

La litología que se observó a lo largo del tramo 5+100.00 – 4+600.00 corresponde a 82.90% a roca andesita de la formación Macuchi y 17.10% a roca granodiorita. La resistencia a la compresión simple y el grado de fracturamiento del macizo rocoso es media, la presencia de agua subterránea es húmeda especialmente donde la roca presento condiciones geológicas regulares y goteo en roca mala.

La obtención del índice de calidad de las dos clasificaciones fue de 24 a 79 que represento una clase de macizo rocoso de malo a bueno para la clasificación RMR y 0.085 a 10.048 que represento una clase de macizo rocoso de muy mala a buena para la clasificación del Índice Q. La correlación entre las dos clasificaciones fue la siguiente: roca buena clase II en RMR y roca regular clase III en Índice Q, su correlación es una roca de buena calidad; roca regular clase IIIA en RMR y roca mala clase IV en Índice Q, su correlación es una roca de

calidad intermedia entre regular y mala, se eligió la de menor calidad, mala; roca regular clase IIIB en RMR y roca mala clase IV en Índice Q, su correlación es una roca de calidad intermedia entre regular y mala, se eligió la de menor calidad, mala; roca mala clase IV en RMR y roca muy mala clase V en Índice Q, su correlación es una roca de calidad intermedia entre regular y muy mala, se eligió la de menor calidad, muy mala

Mediante análisis estadístico de las estructuras geológicas levantadas durante la construcción del túnel y representándolas gráficamente con el software Dips v 5.1 se llegó a la conclusión que existen 3 familias de discontinuidades, 5 familias secundarias y 4 familias aleatorias.

ABSTRACT

The Hydroelectric Project Toachi Pilatón develops in the Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas and Cotopaxi Provinces. In the construction of the underground works of the project it was used the geomechanical classification of Bieniawski (RMR) for the quality assessment of the rock mass serving to define the type of support.

The objective of this investigation work was to determine the geological-geotechnical characteristics of the Load Tunnel Pilatón Sarapullo between the abscissa 5+100.00 – 4+600.00 through the using of the geomechanical classification RMR, with that it was obtained a quality index of rock mass and it was recommended the type of support that carries the section investigated in the tunnel, in addition it was used the classification of the Q Index to have a quantitative criterion of the rock mass. Systematically it has been made raisings of the main geological structures meanwhile the excavation of the tunnel was going forward.

The lithology that was observed along the 5+100.00-4+600.00 section corresponds to 82.90% to andesite rock of the Macuchi formation and 17.10% to granodiorite rock. The resistance to the simple compression and the fracturing degree of the rock mass is average, the presence of subterranean water is wet specially where the rock present regular geological conditions and drip in bad rock.

The obtaining of the quality index of the two classifications was from 24 to 29 that represented a rock mass class from bad to good to the RMR classification and 0.085 to 10.048 that represented a rock mass from very bad to good for the classification of the Q Index. The correlation between the two classifications was the following one: good rock class II in RMR and regular rock class III in the Q Index, its correlation is a good quality rock; regular rock class IIIA in RMR and bad rock class IV in the Q Index, its correlation is an intermediate quality rock

between regular and bad, it was chosen the lower quality, bad; regular class rock IIIB in RMR and bad rock class IV in the Q Index, its correlation is an intermediate quality rock between regular and bad, it was chosen de lower quality, bad; bad rock class IV in RMR and very bad rock class V in the Q Index, its correlation is an intermediate quality rock between regular and very bad, it was chosen the lower quality, very bad.

By a statistical analysis of the geological structures built during the construction of the tunnel and representing them graphically with the Dips v 5.1 software it is concluded that exist 3 discontinuities families, 5 secondary families and 4 random families.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	2
1.3. ANTECEDENTES GENERALES	2
1.3.1 Ubicación y acceso al área de estudio.....	3
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específico	4
1.5. PROCEDIMIENTO Y METODOLOGÍA	4
1.6. PLAN DE TRABAJO Y ACTIVIDADES	5
CAPÍTULO 2	7
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI PILATÓN	7
2.1. Aprovechamiento Pilatón – Sarapullo	7
2.2. Aprovechamiento Toachi – Alluriquín	7
CAPÍTULO 3	10
3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL DEL ÁREA DEL PROYECTO.....	10
3.1. Evolución Geodinámica del Ecuador	10
3.2. Marco Geológico Regional de los Andes Ecuatorianos	13
3.2.1. Cordillera Occidental	15
3.2.2. Valle Interandino	16
3.2.3. Cordillera Oriental o Real	16
3.3. Unidades Litológicas	17
3.3.1. Formación Macuchi.....	18
3.3.2. Miembro Chontal.....	19
3.3.3. Formación Silante	19
3.3.4. Formación Célica	20
3.4. Geología Estructural.....	20
3.5. Riesgo Vulcanológico	22

3.6.	Riesgo Sísmico	23
CAPÍTULO 4		24
4.	MARCO GEOLÓGICO LOCAL DEL ÁREA DE ESTUDIO	24
4.1.	Geología del Aprovechamiento Pilatón – Sarapullo	25
4.2.	Geología del Aprovechamiento Toachi - Alluriquín	25
CAPÍTULO 5		27
5.	TÚNEL DE CARGA PILATÓN – SARAPULLO	27
5.1.	Consideraciones Generales	27
5.2.	Aspectos constructivos	27
5.3.	Características Geométricas del Túnel	28
5.4.	Investigaciones Geotécnicas	28
5.4.1.	Sondeos Rotativos	28
5.4.2.	Galería de Investigación.....	30
5.5.	Modelo Geológico	30
5.5.1.	Tramo Litológico N°1	31
5.5.2.	Tramo Litológico N°2	31
5.5.3.	Tramo Litológico N°3	31
5.5.4.	Comportamiento Estructural	31
CAPÍTULO 6		33
6.	CARACTERIZACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS	33
6.1.	Descripción de discontinuidades	34
6.2.	Descripción de Macizos Rocosos	37
CAPÍTULO 7		39
7.	CLASIFICACIONES GEOMECAÑICAS UTILIZADAS EN EL TÚNEL DE CARGA PILATÓN SARAPULLO	39
7.1.	Introducción.....	39
7.2.	Clasificación de Bieniawski - RMR (Rock Mass Rating)	40
7.2.1.	Parámetros de Clasificación.....	41
7.2.2.	Definición del Sostenimiento	46
7.3.	Clasificación de Barton - Índice Q (Rock Mass Quality)	48

7.3.1.	Parámetros de Clasificación	51
7.3.2.	Definición del Sostenimiento - Diámetro Equivalente	58
CAPÍTULO 8		62
8.	VALORACIÓN GEOMECÁNICA DEL TÚNEL DE CARGA PILATÓN SARAPULLO - AGUAS ABAJO. ABSCISAS 5+100.00 – 4+600.00	62
	Abscisa 5+063.00 – 5+058.20	66
	Abscisa 5+041.00 – 5+038.75	68
	Abscisa 5+029.40 – 5+022.00	70
	Abscisa 5+014.50 – 5+011.00	72
	Abscisa 4+991.50 – 4+987.30	74
	Abscisa 4+969.10 – 4+966.60	76
	Abscisa 4+951.80 – 4+947.50	78
	Abscisa 4+945.00 – 4+941.00	80
	Abscisa 4+934.45 – 4+932.00	82
	Abscisa 4+916.70 – 4+913.20	84
	Abscisa 4+888.00 – 4+885.00	86
	Abscisa 4+864.00 – 4+862.00	88
	Abscisa 4+838.50 – 4+833.40	90
	Abscisa 4+805.00 – 4+799.00	92
	Abscisa 4+781.00 – 4+776.00	94
	Abscisa 4+725.80 – 4+719.50	96
	Abscisa 4+676.00 – 4+671.00	98
	Abscisa 4+630.00 – 4+623.00	100
	Abscisa 4+602.00 – 4+600.00	102
CAPÍTULO 9		104
9.	SOSTENIMIENTO	104
9.1.	Introducción.....	104
9.2.	Elementos de sostenimiento.....	105
9.2.1.	Pernos.....	105
9.2.2.	Hormigón Lanzado o bombeado	106
9.2.3.	Fibra de Acero.....	106

9.2.4.	Malla Electro-soldada.....	107
9.2.5.	Cerchas o marcos de acero	107
9.2.6.	Enfilados o tuberías de acero	107
9.3.	Tipos de sostenimientos del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo ..	108
CAPÍTULO 10		109
10.1.	RESULTADOS ESPERADOS.....	109
10.2.	CONCLUSIONES	112
10.3.	RECOMENDACIONES	115
	BIBLIOGRAFÍA.....	116

ANEXOS

ANEXO 1	DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA DE LAS MUESTRAS DE ROCA
ANEXO 2	ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE
ANEXO 3	TABLA DE LA CLASIFICACIÓN RMR Y DESCRIPCIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES
ANEXO 4	TABLA DE LA CLASIFICACIÓN ÍNDICE Q Y DESCRIPCIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES
ANEXO 5	CORRELACIÓN ENTRE LAS CLASIFICACIÓN RMR E ÍNDICE Q
ANEXO 6	REGISTRO FOTOGRÁFICO
ANEXO 7	PLANO GEOLÓGICO DEL TÚNEL DE CARGA PILATÓN SARAPULLO
ANEXO 8	PLANO DE SOSTENIMIENTO DEL TÚNEL DE CARGA PILATÓN SARAPULLO
ANEXO 9	PLANO GEOLÓGICO – GEOMECÁNICO DEL TÚNEL DE CARGA PILATÓN SARAPULLO. ABSCISAS 5+100.00 - 4+600.00

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Geográfica del Proyecto Toachi – Pilatón	3
Figura 2. Esquema Hidráulico en perfil del Proyecto Toachi – Pilatón (tomado del Informe ejecutivo – alternativa 300 MW, año 2009 realizado por Hidrotoapi)	8
Figura 3. Esquema Hidráulico en planta del Proyecto Toachi – Pilatón (tomado del Informe ejecutivo – alternativa 300 MW, año 2009 realizado por Hidrotoapi)	9
Figura 4. Modelo Geodinámico del Ecuador insular y continental. Cinemática de la placa de Nazca y su relación con el punto caliente Galápagos y el centro de divergencia (conocida también como dorsales Galápagos).....	11
Figura 5. División de la Cordillera de los Andes (Tomado de Transición de los Andes Centrales a los Andes Norte. Nueva Compensación Basada en el Reconocimiento de Campo y Nuevos Datos Geoquímicos – Geocronológicos. Palacios O, Pilatasig L, Sánchez J, Gordon D, y Shaw Y.).....	14
Figura 6. Corte Geológico E-W de Ecuador a una latitud aproximada de 1°30'S.....	15
Figura 7. Geología regional de la zona del proyecto. National Geological Map of the Republic of Ecuador, 1982. Scale 1:1,000,000. (K _M Macuchi, K _S Silante, K _{MCH} Chontal, P _{ST} Celica).....	17
Figura 8. Estereograma de las discontinuidades presentes en el proyecto, según los estudios MOBESSCO – INECEL 1975	21
Figura 9. Ubicación geográfica del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo	27
Figura 10. Estereograma de discontinuidades principales del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo (tomado del informe ejecutivo – alternativa 300 MW, año 2009 realizado por Hidrotoapi).....	32
Figura 11. Representación gráfica de las discontinuidades (Hudson, 1989)	33
Figura 12. Representación gráfica de números de familia en un metro cúbico de roca	37
Figura 13. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 5+100.00 – 5+098.00	65
Figura 14. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 5+063.00 – 5+058.20.....	67
Figura 15. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 5+041.00 – 5+038.75.....	69
Figura 16. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 5+029.40 – 5+022.00.....	71
Figura 17. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 5+014.50 – 5+011.00.....	73
Figura 18. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+991.50 – 4+987.30.....	75
Figura 19. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+969.10 – 4+966.60.....	77
Figura 20. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+951.80 – 4+947.50.....	79
Figura 21. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+945.00 – 4+941.00.....	81

Figura 22. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+934.45 – 4+932.00.....	83
Figura 23. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+916.70 – 4+913.20.....	85
Figura 24. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+888.00 – 4+885.00.....	87
Figura 25. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+864.00 – 4+862.00.....	89
Figura 26. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+838.50 – 4+833.40.....	91
Figura 27. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+805.00 – 4+799.00.....	93
Figura 28. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+781.00 – 4+776.00.....	95
Figura 29. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+725.80 – 4+719.50.....	97
Figura 30. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+676.00 – 4+671.00.....	99
Figura 31. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+630.00 – 4+623.00.....	101
Figura 32. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+602.00 – 4+600.00.....	103
Figura 33. Estereograma de las familias de discontinuidades existentes en el Túnel de Carga Pilatón Sarapullo, abscisa 5+100.00 – 4+600.00	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sondeos del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo realizado por MOBESSCO – INECCEL en 1975.....	29
Tabla 2. Sondeos del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo realizados por HIDROTOAPI en 2009.	29
Tabla 3. Descripción de calidad de roca tomando en cuenta el porcentaje de RQD ...	35
Tabla 4. Tipos de macizo rocoso por el número de familias de discontinuidades (ISRM, 1981)	37
Tabla 5. Clases de formas de bloque de un macizo rocoso	38
Tabla 6. Tamaño de bloques debido al número de discontinuidades (ISRM, 1981)....	38
Tabla 7. Modificaciones de la clasificación geomecánica, RMR.....	40
Tabla 8. Resistencia de la roca intacta – Clasificación RMR	42
Tabla 9. Porcentaje de RQD – Clasificación RMR	42
Tabla 10. Espaciado de discontinuidades – Clasificación RMR	43
Tabla 11. Condiciones de las discontinuidades – Clasificación RMR	44
Tabla 12. Condiciones de agua subterránea – Clasificación RMR.....	45
Tabla 13. Ajuste por orientación de las discontinuidades – Clasificación RMR	45
Tabla 14. Orientación del rumbo y buzamiento de las discontinuidades para túneles	46

Tabla 15. Elementos de sostenimiento que se deben de colocar en el túnel según el valor de RMR que se obtuvo en el macizo rocoso	47
Tabla 16. Investigaciones del Índice Q a través de los años	48
Tabla 17. Cálculo y descripción del porcentaje de RQD – Clasificación Índice Q	52
Tabla 18. Índice del número de discontinuidades – Clasificación Índice Q	52
Tabla 19. Índice de rugosidad de las discontinuidades – Clasificación Índice Q	53
Tabla 20. Índice de alteración de las discontinuidades – Clasificación Índice Q	54
Tabla 21. Factor de reducción debido a presencia de agua – Clasificación Índice Q..	55
Tabla 22. Factor de reducción debido a presencia de tensiones en el macizo rocoso	57
Tabla 23. Relación de sostenimiento de una excavación (ERS) – Clasificación Índice Q	58
Tabla 24. Diámetro Equivalente del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo – Clasificación Índice Q	59
Tabla 25. Ábaco de sostenimiento del Índice Q de Barton (Barton – Grimstad, 1993)	60
Tabla 26. Clases de macizo rocoso según los rangos de Índice Q y sus respectivos elementos de sostenimiento para el Túnel de Carga Pilatón Sarapullo.....	61
Tabla 27. Clases de macizo rocosos según la Clasificación Índice Q	61
Tabla 28. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 5+100.00 – 5+098.00	64
Tabla 29. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 5+100.00 – 5+098.00	64
Tabla 30. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 5+100.00 – 5+098.00.....	65
Tabla 31. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 5+063.00 – 5+058.20	66
Tabla 32. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 5+063.00 – 5+058.20	66
Tabla 33. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 5+063.00 – 5+058.20.....	67
Tabla 34. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 5+041.00 – 5+038.75	68
Tabla 35. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 5+041.00 – 5+038.75	68
Tabla 36. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 5+041.00 – 5+038.75.....	69
Tabla 37. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 5+029.40 – 5+022.00	70
Tabla 38. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 5+029.40 – 5+022.00	70
Tabla 39. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 5+029.40 – 5+022.00.....	71
Tabla 40. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 5+014.50 – 5+011.00	72
Tabla 41. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 5+014.50 – 5+011.00	72
Tabla 42. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 5+014.50 – 5+011.00.....	73

Tabla 43. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+991.50 – 4+987.30	74
Tabla 44. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+991.50 – 4+987.30	74
Tabla 45. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+991.50 – 4+987.30.....	75
Tabla 46. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+969.10 – 4+966.60	76
Tabla 47. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+969.10 – 4+966.60	76
Tabla 48. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+969.10 – 4+966.60.....	77
Tabla 49. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+951.80 – 4+947.50	78
Tabla 50. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+951.80 – 4+947.50	78
Tabla 51. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+951.80 – 4+947.50.....	79
Tabla 52. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+945.00 – 4+941.00	80
Tabla 53. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+945.00 – 4+941.00	80
Tabla 54. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+945.00 – 4+941.00.....	81
Tabla 55. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+934.45 – 4+932.00	82
Tabla 56. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+934.45 – 4+932.00	82
Tabla 57. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+934.45 – 4+932.00.....	83
Tabla 58. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+916.70 – 4+913.20	84
Tabla 59. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+916.70 – 4+913.20	84
Tabla 60. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+916.70 – 4+913.20.....	85
Tabla 61. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+888.00 – 4+885.00	86
Tabla 62. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+888.00 – 4+885.00	86
Tabla 63. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+888.00 – 4+885.00.....	87
Tabla 64. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+864.00 – 4+862.00	88
Tabla 65. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+864.00 – 4+862.00	88
Tabla 66. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+864.00 – 4+862.00.....	89
Tabla 67. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+838.50 – 4+833.40	90
Tabla 68. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+838.50 – 4+833.40	90
Tabla 69. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+838.50 – 4+833.40.....	91
Tabla 70. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+805.00 – 4+799.00	92
Tabla 71. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+805.00 – 4+799.00	92
Tabla 72. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+805.00 – 4+799.00.....	93
Tabla 73. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+781.00 – 4+776.00	94

Tabla 74. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+781.00 – 4+776.00	94
Tabla 75. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+781.00 – 4+776.00.....	95
Tabla 76. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+725.80 – 4+719.50	96
Tabla 77. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+725.80 – 4+719.50	96
Tabla 78. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+725.80 – 4+719.50.....	97
Tabla 79. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+676.00 – 4+671.00	98
Tabla 80. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+676.00 – 4+671.00	98
Tabla 81. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+676.00 – 4+671.00.....	99
Tabla 82. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+630.00 – 4+623.00	100
Tabla 83. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+630.00 – 4+623.00	100
Tabla 84. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+630.00 – 4+623.00.....	101
Tabla 85. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+602.00 – 4+600.00	102
Tabla 86. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+602.00 - 4+600.00.....	102
Tabla 87. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+602.00 – 4+600.00.....	103
Tabla 88. Clases de macizos rocosos y tipos de sostenimiento del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo.....	108
Tabla 89. Metros Excavados por Clase de Macizo Rocoso, Clasificación RMR.....	109
Tabla 90. Metros Excavados por Clase de Macizo Rocoso, Clasificación Índice Q ..	110
Tabla 91. Promedios del Índice de Calidad del Macizo Rocoso y Correlación	111
Tabla 92. Sectorización Geológica	111

1.1. INTRODUCCIÓN

Debido a la diversidad natural y ubicación geográfica nuestro país cuenta con cuencas hídricas que son aprovechadas para la construcción de Centrales Hidroeléctricas, las mismas que ahorrarían al país millones de dólares en la compra de combustible fósil.

En el país existen algunos proyectos hidroeléctricos ya construidos como Paute, Mazar, Agoyán, Daule-Peripa, Pisayambo, Ocaña y Baba. En la actualidad se encuentran en construcción varios proyectos entre los más importantes por su potencia están Coca Codo Sinclair (1500MW), Sopladora (487MW) y Toachi-Pilatón (254.4MW).

El Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón se considerado parte de la llamada Matriz Energética que impulsa el gobierno nacional para fomentar el crecimiento industrial y económico, a través del desarrollo energético del país. El propietario del Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón es el Estado Ecuatoriano, cuya administración estará a cargo de la Unidad de Negocios Hidrotoapi perteneciente a la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP.

Las clasificaciones geomecánicas más utilizadas para la construcción de obras subterráneas a nivel mundial son las de RMR de Bieniawski y el índice Q de Barton. En el Proyecto Toachi Pilatón se utilizó la clasificación de RMR versión 1989, por considerarse más completa de acuerdo a la información que se obtuvo. El propósito de esta clasificación es de conseguir un índice de calidad (valor numérico) del macizo rocoso a través de seis parámetros geológicos-geotécnicos, este valor numérico varía de 0 a 100 que significan una clase de macizo rocoso que varía de malo a bueno, según el índice y la clasificación de macizo rocoso se recomienda la cantidad y tipo de elementos de sostenimiento que se colocara en cada tramo de excavación del túnel. Adicional al RMR se

utilizó la clasificación del Índice Q, para realizar una correlación entre ambas clasificaciones.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad evaluar las condiciones geomecánicas del macizo rocoso del túnel entre las abscisas 5+100.00 – 4+600.00 en base de los datos obtenidos de los levantamientos geológicos realizados durante la excavación del mismo para recomendar las medidas de sostenimiento, para garantizar la estabilidad y el correcto funcionamiento del sistema hidroeléctrico en conjunto.

1.3. ANTECEDENTES GENERALES

El ex INECEL, dentro del Plan Nacional de Electrificación, colocó al proyecto Toachi Pilatón como obra primordial para el desarrollo energético del país por ser estratégico dentro de las cuencas que drenan sus aguas al Océano Pacífico.

Los estudios a nivel de factibilidad fueron terminados en mayo de 1975, por el consorcio suizo MOBESSCO, y el personal de ingenieros de INECEL. El 5 de julio de 1976 el ex INECEL contrató los estudios definitivos para licitación, con la asociación de las siguientes empresas suizas MOTOR-COLUMBUS, ELECTROWATT, y las empresas ecuatorianas INTEGRAL, IDECO, ADEC e INGECONSULT, los estudios terminaron en 1978.

En el año de 1992 el país enfrentaba una grave crisis eléctrica por una prolongada sequía en la cuenca del río Paute, razón por la cual el ex INECEL en el año de 1993 actualizó los estudios que terminaron en 1995, de lo que se desprende que la alternativa más económica corresponde a una presa de 60 m que debe de construirse en el río Toachi, más la derivación del río Toachi.

A esta alternativa, la compañía INTEGRAL la modificó introduciendo una central subterránea en Sarapullo, la que fue potenciada a 228 MW.

En mayo del 2009, la Unidad de Negocios Hidrotoapi perteneciente a CELEC EP mediante proceso de competitivo contrató a la firma consultora LOMBARDI S.A para que efectúe los estudios de licitación y diseño definitivo para la construcción del proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón.

Los resultados de los estudios y diseños definitivos determinaron que el proyecto consta de dos aprovechamientos en cascada Pilatón – Sarapullo (49 MW) y Toachi – Alluriquín (204 MW); adicionalmente se aprovechará el caudal ecológico vertido por la Presa Toachi mediante una mini central ubicada al pie de la misma (1.4 MW). El Gobierno Nacional adjudica la construcción del proyecto a la empresa China International Wáter & Electric Corp. – CWE en diciembre de 2010.

1.3.1 Ubicación y acceso al área de estudio

El Proyecto Hidroeléctrico Toachi - Pilatón se ubica al sur-oeste de Quito, entre las provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi, (Figura 1) en las cuencas de los ríos Toachi y Pilatón que se encuentra en la cordillera occidental de los Andes y forma parte de la hoya del río Esmeraldas.

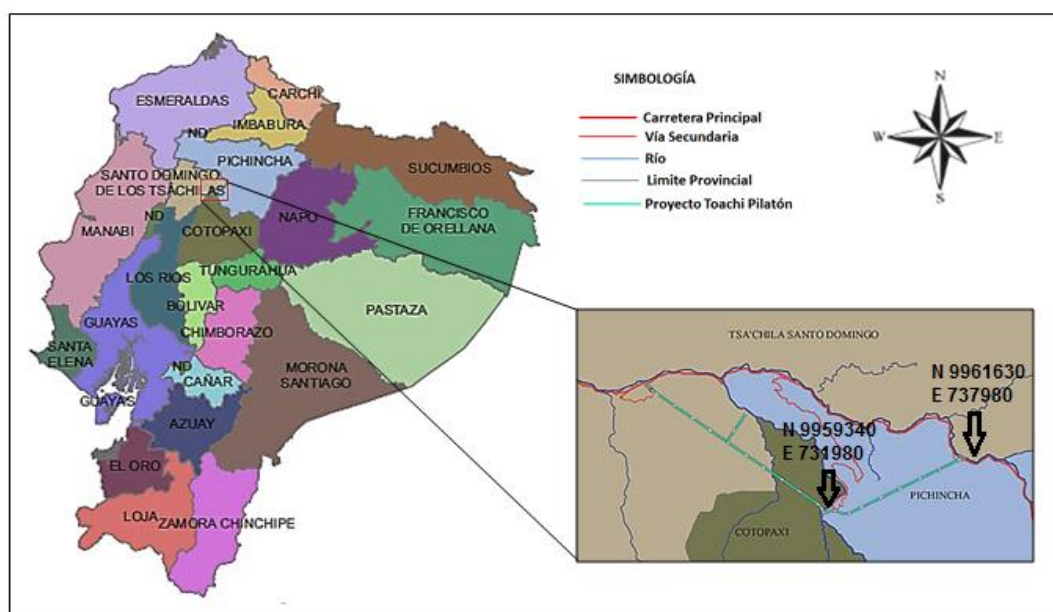


Figura 1. Ubicación Geográfica del Proyecto Toachi – Pilatón

Las coordenadas UTM donde se encuentra el proyecto son las siguientes:

- Captación del Río Pilatón, N 9'961.630 - E 737.980
- Presa del Río Toachi, N 9'959.340 - E 731.980

El acceso se lo hace por la vía Quito – Aloag - Santo Domingo de los Colorados – Guayaquil, entre los Km 60 y 74 donde se construyó las diferentes obras civiles del proyecto Toachi - Pilatón.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

- Determinar las características geológicas-geotécnicas del macizo rocoso mediante las clasificaciones geomecánicas del RMR (Rock Mass Rating) e Índice Q.

1.4.2 Objetivos Específico

- Cartografiar e identificar estructuras geológicas en cada avance del túnel.
- Hacer una valoración geotécnica del macizo rocoso del Túnel de Carga Pilatón - Sarapullo Aguas Abajo, según los parámetros del RMR (Rock Mass Rating) y compararlos con el Índice Q mediante la correlación de Barton, 1995.

1.5. PROCEDIMIENTO Y METODOLOGÍA

La metodología que se utilizó fue la siguiente:

- I. *Revisión y análisis de información bibliográfica preexistente:* recopilación de los estudios de factibilidad y de diseño final realizados por INECEL y MOBESSCO (1975), informes geológicos – geotécnico de HIDROTOAPI (2010) e información bibliográfica de las clasificaciones geomecánicas.

- II. *Investigación de Campo*: levantamiento geológico de estructuras, descripción a detalle de los parámetros geotécnicos y aplicación de las clasificaciones geomecánicas RMR y el Índice Q.
- III. *Procesamiento de la información*: elaboración de los planos geológico – geotécnicos, y análisis estadísticos de discontinuidades.
- IV. *Interpretación de los resultados*; sectorización geológica – geotécnica y comportamiento estructural del tramo de túnel estudiado.

1.6. PLAN DE TRABAJO Y ACTIVIDADES

La realización de este trabajo de investigación, estuvo dividido en dos partes: trabajo de campo y de oficina.

En el trabajo de campo se realizó visitas diarias al sitio de obra del túnel, donde después de las actividades de perforación, voladura, rezague y perfilado de cada avance, se realizaba el levantamiento durante un corto tiempo, se dibujó las estructuras principales, acompañado de su dato estructural (dip - dip direction).

En el trabajo de oficina se realizó la elaboración de los planos geológicos – geotécnico donde se ubican las diferentes litologías y estructuras que se han encontrado a lo largo del tramo del túnel estudiado y la redacción de la memoria técnica de este trabajo de investigación.

Las actividades que se realizaron en la investigación fueron las siguientes:

- Visitas al sitio de obra donde se construye el túnel.
- Llevar un control diario de excavación.
- Realizar levantamientos geológicos-geotécnicos en cada avance.
- Verificación de la colocación del sostenimiento.

- Elaboración de planos donde se ubican las estructuras geológicas de acuerdo a la disposición y su relación espacial según la dirección del túnel para entender el comportamiento de las estructuras principales y secundarias y cuáles influyeron en la inestabilidad de la excavación.
- Preparación de muestras para estudios en laboratorio de láminas delgadas, una cada 100 metros que sirvieron para despejar de cualquier duda referente a la litología encontrada en cada avance de excavación.
- Preparación de muestras para ensayo de laboratorio de compresión simple.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI PILATÓN

2.1. Aprovechamiento Pilatón – Sarapullo

El aprovechamiento Pilatón – Sarapullo inicia con la obra de **Captación Pilatón**, y su inclusión en las obras definitivas, y aprovechamiento como el comienzo para la generación de la Central Hidroeléctrica Sarapullo, con la captación tipo móvil, con tres compuertas radiales, control de crecidas y un vertedero para 480 m³/s;

Para la conducción de agua proveniente de la obra de captación, se construyó un **Túnel de Carga** llamado Pilatón-Sarapullo con una longitud de 5.9 km, diámetro de 4.10 m para un caudal de diseño de 40 m³/s; para controlar el golpe de agua del túnel de carga se diseñó una **Chimenea de Equilibrio Superior** de 177 m de altura, compuesta de un pozo vertical inferior con un diámetro de 3.50 m y un pozo vertical superior de 12 m de diámetro.

La **Casa de Máquinas** de 39 m de largo por 14 m de ancho y 30.92 m de altura acogerá a tres turbinas tipo Francis de eje vertical de potencia máxima de 16.30 MW cada una y a través de un **Túnel de Descarga** de 500 m se llegará al cuerpo de la presa Toachi y el resultado de la generación se entregará a la subestación en el Patio de Maniobras Sarapullo (Figura 2 y 3).

2.2. Aprovechamiento Toachi – Alluriquín

Se inicia con la presa Toachi y su inclusión en las obras definitivas y aprovechamiento como complemento de la generación de la Central Hidroeléctrica Alluriquín, con una **Presa de Tipo Gravedad** con una altura de 60 m sobre el lecho del río, su corona de 170.50 m de longitud y 10 m de ancho; está constituida por 10 bloques, 8 de ellos de 18 m de ancho y los bloques extremos de 15.50 m y seis bloques de 11 m que contienen estructuras hidráulicas importantes, su volumen total es de 8.5 millones de m³.

Para conducción se construyó un **Túnel de Carga** llamado Toachi - Alluriquín con una longitud de 8.7 km, diámetro de 6 m para un caudal de diseño de 100 m³/s, para controlar el golpe de agua del túnel de carga se diseñó una **Chimenea de Equilibrio Superior** de 235 m de altura, compuesta por un pozo vertical inferior (garganta) con un diámetro inferior de 3.50 m y un pozo vertical superior de 15 m de diámetro.

La **Casa de Máquinas** de 52.3 m de largo por 23.30 m de ancho y 43 m de altura acogerá a tres turbinas Francis de eje vertical de potencia de 68 MW cada una y a través de un **Túnel de Descarga** de 500 m permitirá la restitución de los caudales turbinados al río Toachi. (Figura 2 y 3).

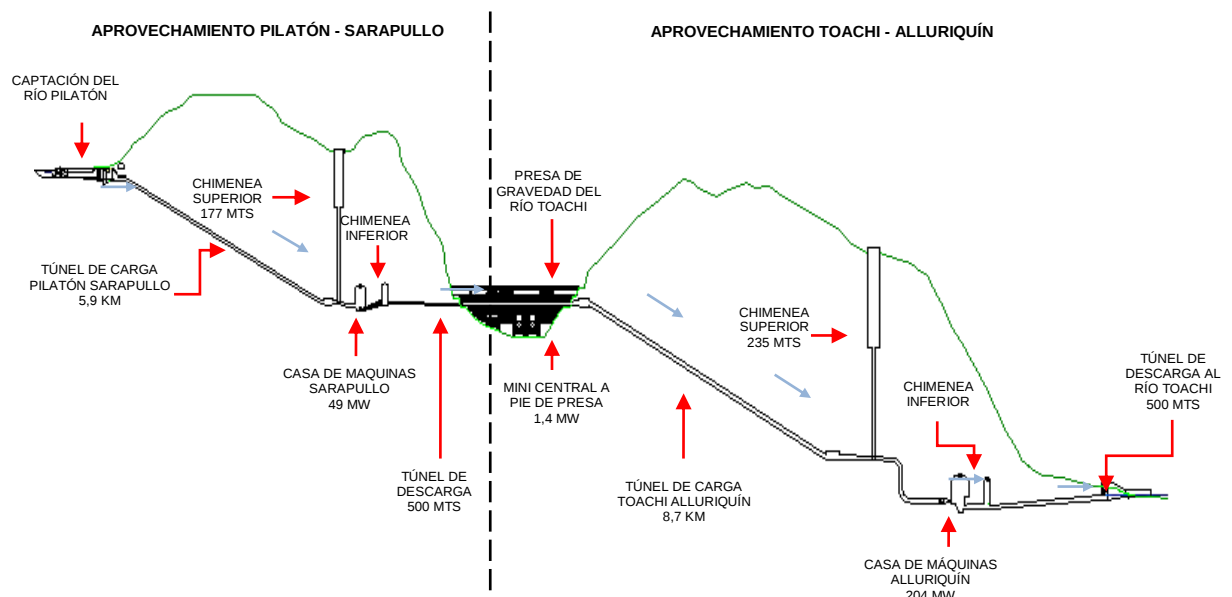


Figura 2. Esquema Hidráulico en perfil del Proyecto Toachi – Pilatón (tomado del Informe ejecutivo – alternativa 300 MW, año 2009 realizado por Hidrotoapi)



Figura 3. Esquema Hidráulico en planta del Proyecto Toachi – Pilatón (tomado del Informe ejecutivo – alternativa 300 MW, año 2009 realizado por Hidrotoapi)

3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL DEL ÁREA DEL PROYECTO

Cuando se va a realizar una obra civil de cualquier aspecto, es importante conocer la disposición final de las rocas, estructuras y morfología de la zona para comprender de cómo ha sido su desarrollo geológico a través de millones de años.

En este capítulo se habla de la información bibliográfica referente de como los fenómenos dinámicos del planeta originaron la formación de la cordillera de los Andes y su influencia en el modelado geológico-morfológico de nuestro país, así como también información de los estudios de factibilidad realizados por el consorcio MOBESSCO en 1975 y de diseño final realizado por la empresa consultora LOMBARDI en el 2009 que describen la geología regional, local y de detalle donde se desarrolla el Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón.

3.1. Evolución Geodinámica del Ecuador

Nuestro país ocupa una posición particular desde el punto de vista de la tectónica de placas, por cuanto comprende: (1) el punto caliente de las Galápagos, (2) la adyacente dorsal oceánica o “centro de divergencia” que separa las placas de Cocos y Nazca, (3) una zona de subducción de corteza oceánica a través de la cual, la placa de Nazca se subduce debajo del margen continental constituido por la placa Sudamericana y del Bloque Nor - Andino y (4) una franja de deformación continental conocida como Sistema Mayor Dextral, SMD. (Figura 4)

La dorsal Galápagos o centro de divergencia determina actualmente los movimientos relativos de la placas de Cocos y Nazca, donde la corteza oceánica de edad inferior a 23 Ma se alterna con la corteza oceánica de edad superior a 35 Ma (Hey 1977; Spiking et al., 2001). Esta dorsal genera corteza oceánica de espesor medio (aprox. 7 km), mientras que el punto caliente de las

Galápagos genera corteza oceánica de mayor espesor entre los 18 a 22 km (Hey, 1977; Gustcher et al., 1999; Toboada et al., 2000).

El punto caliente de las Galápagos ha formado una serie de altos relieves morfo-batimétricos sobre el fondo oceánico con trayectoria hacia los márgenes costeros del Pacífico Oriental (Dorsales de Carnegie, Cocos, Colón y Malpelo), gran parte de estos relieves están siendo subductados a lo largo del plano de Benioff - Wadati. Desde el punto de vista de la dirección del transporte tectónico, el alto relieve batimétrico a sísmico de Carnegie (llamado también dorsal Carnegie) empezó a modificar la geometría de la zona de subducción a partir del Plioceno Superior – Pleistoceno Inferior (ie. Lonsdale, 1978; Ego, 1996b; Harpp et al., 2005), acompañada de una reducción del ángulo de inclinación de la placa subyacente como consecuencia de un fuerte acoplamiento entre las dos litósfera convergentes, Placa de Nazca y el Bloque Nor - Andino (Barberi et al. 1988; Lebrat et al., 1985).

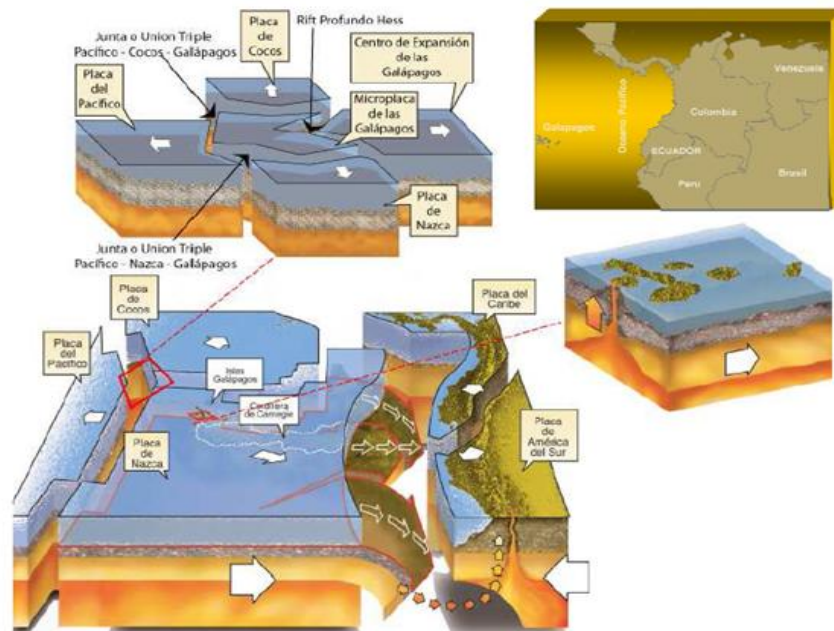


Figura 4. Modelo Geodinámico del Ecuador insular y continental. Cinemática de la placa de Nazca y su relación con el punto caliente Galápagos y el centro de divergencia (conocida también como dorsales Galápagos).

El Sistema Mayor Dextral (SDM) es la franja de colisión continental que separa el Bloque Nor-Andino (indicándola en la figura como parte de la placa del Caribe) y la placa Sudamericana (modificado de Toulkeridis et al., 2009).

La colisión de la dorsal Carnegie a lo largo de la zona de subducción está levantando el margen continental central del Ecuador y es la principal causa de las formaciones de las cadenas montañosas en la costa, que alcanza una altitud máxima cercana a los 850 msnm. En profundidad, el plano subyacente debajo de la región costanera es de 4° a 10°, incrementando su inclinación (zona de pendiente Benioff) entre 40° a 45° debajo de los Andes y regiones Subandinas, en estas últimas regiones los terremotos más profundos ocurren alrededor de los 280 km (ie. Chunga et al., 2009).

Desde el punto de vista de la tectónica local, la activa zona de subducción afecta los dos bloques continentales móviles, la placa Sudamericana y el Bloque Nor - Andino, ambas sujeta a la convergencia oblicua de la placa de Nazca, con tendencia estructurales N50E-N80E y movimiento lateral de ± 2 mm/año (ie. Freymueller et al., 1993; Kellogg & Bonini, 1982; Kellogg & Vega, 1995; Nocquet et al., 2009; Pennington, 1981; Trenkamp et al., 2002).

Según Chunga, (2010); Mendoza y Dewey, (1984); Segovia & Alvarado, (2006); Witt et al., (2006), en el interior del continente, una importante franja de deformación denominada "Sistema Mayor Dextral, SDM" indica el límite de una colisión convergente continental entre el Bloque Nor-Andino y la placa sudamericana. Esta estructura sismogénica (SDM) es caracterizada por un régimen transtensivo en el Golfo de Guayaquil, bien diferenciado dentro de la cuenca Esperanza, siendo limitada al N por el sistemas de falla Posorja y al S por el sistema de fallas Amistad, al E por el sistema de fallas transcurrentes Puna Santa Clara y al W por estructuras de domos salinos (LRG, 1986; Witt et al., 2006; Cobos & Montenegro, 2010).

Posteriormente, la trayectoria del SDM atraviesa la Isla Puna y el estuario interno del Golfo de Guayaquil como sistemas de fallas de cizallas con desplazamiento dextral, en el interior del continente esta estructura ahora combinada con componentes inversos, corta las aisladas colinas de la llanura

costera de la zona de Taura (estructura Klippe – isla tectónica, máxima altitud: 646 msnm).

En los sectores andinos Alausí – Guamote – Riobamba, el SDM es evidenciado morfológicamente en el terreno y está caracterizado por discontinuas tendencias estructurales en sus cadenas montañosas con dominios laterales de fallas transcurrentes con desplazamientos dextrales y sistemas de fallas de corrimiento de bajo ángulo.

3.2. Marco Geológico Regional de los Andes Ecuatorianos

Debido a la subducción provocada entre la placa de Nazca y la placa sudamericana origino proceso de levantamiento de las rocas en el continente, que dio como resultado la Cordillera de los Andes.

Es una cadena montañosa de 7500 km que atraviesa de norte a sur el borde occidental de Sudamérica, comprendida entre los 11° de latitud norte y los 55° de latitud sur, la altura media alcanza los 4000 m, el punto más alto es el Cerro Aconcagua de 6960.80 m. En la morfología actual se encuentra elevadas cordilleras, juntos con extensos altiplanos y profundos valles longitudinales paralelos a los grandes ejes montañosos.

Gansser (1973) propuso una división de la cordillera en tres segmentos (Figura 5) basada en características morfológicas:

- Andes Septentrionales o Norte: Al norte del Golfo de Guayaquil, Ecuador (4°S), abarcando los andes venezolanos, colombianos y ecuatorianos; estan formados por las cordilleras occidental, central y oriental, destacan las cumbres del Chimborazo y del Cotopaxi.
- Andes Centrales: Entre el Golfo de Guayaquil y el Golfo de Penas, Chile (46°30´S) abarcando los Andes peruanos, bolivianos, y argentino-chilenos; son de gran anchura y altitud, más de 4000 m de

altura media, engloba vastas mesetas como los altiplanos; entre las cumbres más altas figuran el Huascarán y el Illimani.

- Andes Meridionales o Patagónicos: Al sur del golfo de Penas, abarcando los Andes australes y Andes fueguinos estos últimos en la isla Grande, Tierra del Fuego, forman el sector más estrechos y compactos de la cordillera, entre los picos más elevados figuran el Aconcagua de 6959.80 m y el Ojos del Salado.



Figura 5. División de la Cordillera de los Andes (Tomado de Transición de los Andes Centrales a los Andes Norte. Nueva Compensación Basada en el Reconocimiento de Campo y Nuevos Datos Geoquímicos – Geocronológicos. Palacios O, Pilatasig L, Sánchez J, Gordon D, y Shaw Y.)

Los Andes septentrionales como los australes son llamados también *Andes de Tipo Colisional*, por haberse formado por la abducción de la corteza oceánica; mientras que los Andes centrales corresponden a los llamados *Andes de Tipo Andino*, desarrollados por la subducción de la corteza oceánica.

Los Andes ecuatorianos están formado por tres estructuras la Cordillera Occidental, Cordillera Oriental y entre ellas una depresión llamada Valle interandino. (Figura 6)

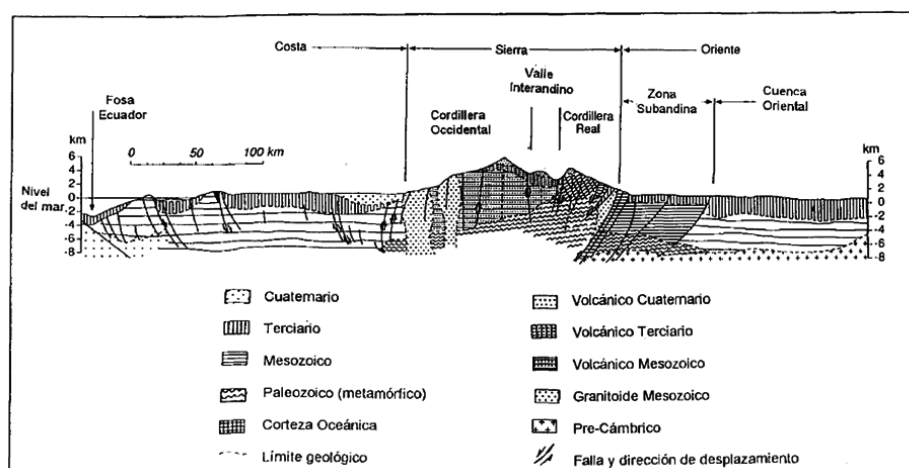


Figura 6. Corte Geológico E-W de Ecuador a una latitud aproximada de 1°30'S.
(Tomado de Baldock, 1982b; simplificado por Hakuno y otros, 1988).

3.2.1. Cordillera Occidental

La Cordillera Occidental consta de dos terrenos mayores: Pallatanga y Macuchi (Hughes & Pilatasig, 2002), separados por la Zona de Cizalla Chimbo – Toachi; que constituyen el basamento, los cuales están cubiertos de depósitos volcánicos y volcanoclasticos de edad Oligoceno-Holoceno.

El terreno Pallatanga de edad Cretácico Temprano se compone de turbidíticas y bloques fallados de roca ultramáficas y sedimentos marinos profundos, que originalmente fueron considerados como MORB, basalto originado en dorsales centro-oceánicas (Lebrat et al, 1987) y actualmente como rocas de afinidad de la meseta oceánica (Reynaud et al, 1999; Lapierre et al, 2000; Hughes & Pilatasig, 2002).

El terreno Macuchi comprende una secuencia volcanoclastica: pillow lavas, hialoclastitas, turbiditas, areniscas y brechas volcánicas de composición basálticas a andesíticas, de edad Paleoceno Tardío – Eoceno Temprano (Hughes & Pilatasig, 2002, Kerr et al., 2002).

3.2.2. Valle Interandino

El Valle Interandino en el Ecuador es una depresión tectónica – geomorfológica situada entre las Cordilleras Occidental y Real de 25 km de ancho, 300 km de largo, de dirección N-S a NNE-SSW, que va entre 2°10'S (zona de Alausí) hasta 0°30'N (zona del Chota). y que empezó a formarse desde el Mioceno Tardío- Plioceno, presumiblemente desde el norte (Winkler et al, 2002).

Según Nieto (1987), estos valles altos (2500 a 3000 m) están rellenos con sedimentos y depósitos piroclásticos del Cuaternario. El más importante de estos depósitos volcánicos está constituido de ceniza y es conocido como “Cangahua”. Esta ceniza, fino granular de origen eólico, es fundamentalmente no estratificada y débilmente cementada. A veces toma la apariencia de loess o de una arenisca muy porosa y levemente cementada. La Cangahua es un material propenso a derrumbes superficiales.

3.2.3. Cordillera Oriental o Real

La Cordillera Real está limitada al oeste por el Valle Interandino y al este por la zona Sub-Andina. Rocas metamórficas del Paleozoico, o a veces más antiguas, son dominantes en esta región. Estas rocas metamórficas fueron probablemente formadas durante un evento de la orogenia Caledoniana (Baldock, 1982a).

Eventos orogénicos posteriores, incluyendo las orogenias Laramida y Andina seguramente afectaron también a las rocas de la cordillera Real. Las litologías presentes en la región contienen una gruesa secuencias de esquistos micáceos y esquistos cloríticos (Grupo Llanganates).

Según Sauer (1965), para enlazar con los esquistos metamórficos de las cordilleras costaneras, se comprueba que la Cordillera Real en el S del país vira, geológicamente entendido, hacia la costa y está representada allá por la secuencia de las cordilleras Taguin - Larga - Amotape.

Litherland et al., (1994), durante el Proyecto Cordillera Real de la British Geological Survey (BSG), divide la Cordillera Real en divisiones o terrenos separados por mega-fallas y grandes zonas de cizalla.

Estos terreno son de Este a Oeste: Zamora, Salado, Loja, Alao y Guamote y los limites tectónicos son Falla Cosanga - Méndez, Falla Llanganates, Frente Baños y Falla Peltetec (Vaca, 2005).

3.3. Unidades Litológicas

La zona del proyecto Toachi Pilatón se halla en las estribaciones occidentales de la Cordillera Occidental de los Andes, las formaciones del complejo ígneo básico en sus partes profundas están representadas por las formaciones Macuchi, Silante, y Célica forman el macizo rocoso donde se construye el Proyecto Toachi Pilatón. (Figura 7)

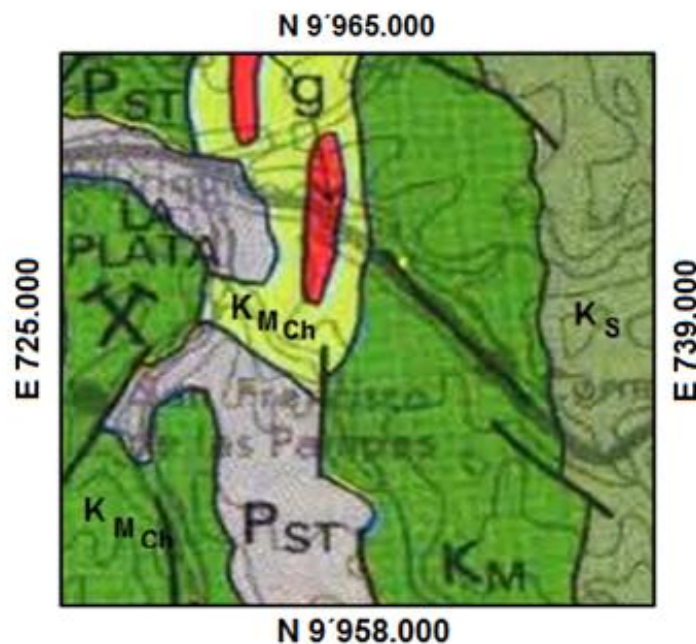


Figura 7. Geología regional de la zona del proyecto. National Geological Map of the Republic of Ecuador, 1982. Scale 1:1,000,000. (KM Macuchi, KS Silante, KMCH Chontal, PST Celica)

3.3.1. Formación Macuchi

Gran parte de la cordillera Occidental del Ecuador está compuesta de una enorme y potente secuencia de volcánicos (lavas y volcanoclastos). Estas rocas en un principio estuvieron agrupadas con la formación Piñón de la región litoral. Recientes estudios han diferenciado la formación Macuchi y ha sido estudiada a detalle.

Está compuesta por tobas turbidíticas redepositadas y lavas andesíticas, andesitas basálticas, volcanoclásticos gruesos (brechas) y sedimentos clásticos de grano fino (lutitas). Las lavas varían de porfíricas de grano fino, masivas a vesiculares o almohadilladas (pillow lavas); son rocas típicamente de color gris verdoso a gris, duras y compactas, interestratificadas, con estratos volcanoclásticos duros y de gran volumen; casi todas estas litologías son principalmente de origen marino.

En la hoja geológica Macuchi se han dividido en dos grupos: Al primero le corresponden los del oeste y el río Toachi donde afloran argilitas silicificadas oscuras, intercaladas con grauvacas delgadas, con buzamiento fuerte al oeste (Miembro Chontal). Al segundo grupo corresponde areniscas verde y lutitas delgadas que se ven en la carretera Quito – Santo Domingo. Los volcánicos de Macuchi están fuertemente alterados. Una edad (K/Ar) calculada en 51.5 ± 2.5 Ma, corresponde al Eoceno (Inferior), para la Macuchi de la parte central del Ecuador.

Las lavas de la Macuchi varían de toleritas olivínicas a cuarzo-andesitas, pero es evidente que la variación no es muy consistente, aunque las lavas basálticas pueden ser más comunes, en el flanco occidental, en la parte inferior de la secuencia y en el sur. Representan el material típico de un arco de islas.

En general, el rumbo del arco volcánico de la Macuchi es NNE, a lo largo de la cordillera Occidental, pero ha sido deslizado tectónicamente en diferentes bloques por una serie compleja de fallas, con rumbo NE, las que posiblemente fueron activadas en una gran parte del Cretáceo Superior y en el Cenozoico. El

movimiento a lo largo de las fallas, fue parte vertical y en la parte horizontal (desplazamiento de rumbo dextral).

3.3.2. Miembro Chontal

Al norte del país, sedimentos no volcánicos aumentan en potencia y se dispersan ampliamente. Estos sedimentos que representan la sección basal de la formación Macuchi, actualmente han sido denominados miembro Chontal, que reemplaza al término confuso de “Cayo de la Sierra” e incluyen los sedimentos “Toachi”. Sedimentos argilíticos duros silicificados y generalmente verdosos, cherts y lutitas, ocurren en una amplia área, al oeste del Batolito Apuela (cerro de Chontal).

Existen sedimentos silíceos interpretados como radiolaritas asociados con un complejos ofiolíticos que han sido incluidos dentro del miembro Chontal en el oeste de Quito; dentro del afloramiento norte de la formación Macuchi, sugiere una sedimentación típica pelágica en un ambiente eugeosinclinal.

3.3.3. Formación Silante

No es conocida en otro lugar, aunque previamente se le agrupó con los conglomerados de Cayo - Rumi, posiblemente de edad Paleoceno. Pero al norte de Quito (Nono-Mindo), la formación Silante ha sido interpretada como subyacente de la formación Yunguilla del Mastrichitiano.

La formación Silante se extiende desde la zona del Illiniza en el sur hasta la zona nor-este de Nono; en el norte se observan buenos afloramientos en la carretera Aloag-Santo Domingo y Nono Nanegalito

Litológicamente consiste de aglomerados, grauvacas, areniscas tobáceas y lutitas rojas. Los conglomerados están compuestos por pedazos angulares hasta redondeados de cuarzo, chert y andesitas en una matriz ferruginosa. Las grauvacas contienen fragmentos de cuarzo, hornblenda verde y rocas

volcánicas; los conglomerados indican que los sedimentos son provenientes de la erosión y redeposición subreal de la Macuchi, posiblemente en una cuenca marina superficial o en un ambiente litoral.

3.3.4. Formación Célica

Aflora al sur del país, el macizo rocoso fue desarrollado en cuencas marinas poco profundas, de naturaleza calco alcalino.

La formación es considerada como un arco volcánico desarrollado en un margen continental activo, es equivalente a las rocas de la formación Macuchi, contiene rocas volcánicas de color gris verdoso, preferentemente masivas intercaladas con rocas sedimentarias en menor porcentaje, flujos de brecha y tobas líticas de similar composición química y mineralógica, afectadas por un metamorfismo de bajo grado.

3.4. Geología Estructural

Los estudios realizados por el consorcio MOBESSCO concluyeron lo siguiente:

En la zona del proyecto, las medidas de estratificación indican una dirección preferente de rumbo Norte – Sur con buzamiento fuertes hacia el este y oeste, la orientación general coincide con los lineamientos andinos norte - sur y noreste - suroeste, que corresponde a los sistemas de fallamiento, fracturación principal y a la intrusión de cuerpos plutónicos.

Este análisis se basa en el siguiente modelo de deformación tectónica: el basamento Macuchi se encuentra deformado (plegado, fallado y fracturado) debido a los esfuerzos de tipo compresivo generados durante el proceso de subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa continental Sudamericana, con dirección preferencial norte - sur y noroeste - suroeste.

La mega estructura Dolores – Guayaquil – Caracas, de dirección noreste - suroeste, establece el límite entre las dos placas.

Los estudios realizados por MOBESSCO – INECCEL, 1975 definen tres sistemas de discontinuidades presentes en el área del proyecto:

- Sistema A: 290/60, planos de estratificaciones en rocas sedimentarias, fallas, facturas, y ejes de plegamiento de las estructuras principales.
- Sistema B: 60/70, representan planos de diaclasas, fisuras, y fallas de los sistemas principales.
- Sistema C: 204/55, se relacionan con los planos de diaclasas secundarias y juegan un papel importante pero el control de la estabilidad de los taludes tanto naturales como artificiales.

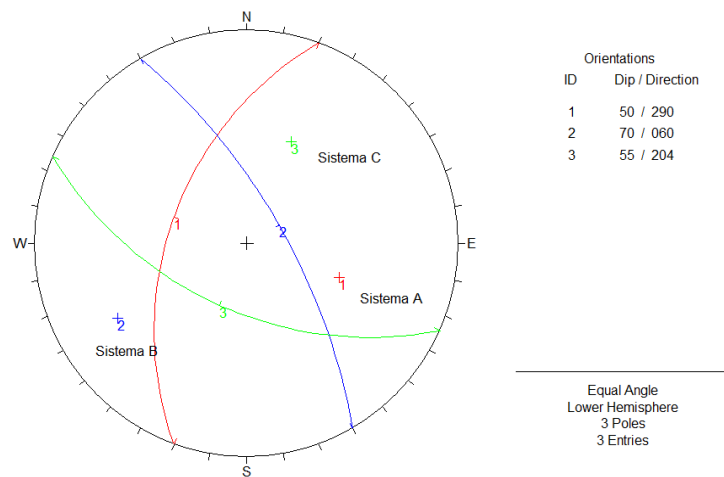


Figura 8. Estereograma de las discontinuidades presentes en el proyecto, según los estudios MOBESSCO – INECCEL 1975

3.5. Riesgo Vulcanológico

En el estudio “Evolución de los Peligros Volcánicos en el Proyecto Hidroeléctrico Toachi” realizado por INECEL en julio de 1995, se determinó lo siguiente:

El estudio identifica los volcanes morfológicamente asociados a la cuenca hidrográfica del río Toachi (Atacazo, Corazón, Illinizas, Ninahuilca y Quilotoa), analiza el riego que podría generarse por eventos eruptivos y su posterior impacto sobre las obras de generación hidroeléctrica proyectada.

El Volcán Illiniza es poco probable que se reactive en las próximas décadas.

El Volcán Ninahuilca, se encuentra oculto en la morfología del complejo volcánico del Atacazo. Se registraron seis períodos eruptivos prehistóricos, la última ocurrió hace 2400 años, fueron erupciones fuertemente explosivas, los materiales transitaron por los valles de los ríos Pilatón y Toachi (sitios previstos para las obras de captación en el Pilatón y descarga en Alluriquín, serán afectados por flujos piroclásticos, caída de ceniza y por flujos de lodo (lahares).

Mientras que el Quilotoa es un volcán más explosivo que el Ninahuilca. La última erupción ocurrió hace 800 años aproximadamente. Existe una alta probabilidad de que durante la vida útil del proyecto se produzca una erupción del Ninahuilca y una baja probabilidad del Quilotoa.

Si ocurriera una erupción de cualquiera de los dos volcanes, similar a las anteriores, existe una alta probabilidad de que las áreas previstas para las obras, sean afectadas por caída de piroclásticos, flujos de lodo (lahares) y por la destrucción de la laguna del Quilotoa.

Los estudios realizados por el INECEL, recomiendan que los diseños de las obras civiles prevean la ocurrencia de una erupción durante la vida útil del proyecto, a fin de que la vulnerabilidad de las obras sea minizada y la central

pueda recuperar su capacidad de generación hidroeléctrica en el menor tiempo posible, una vez que concluya la crisis eruptiva.

3.6. Riesgo Sísmico

El área del proyecto no presenta una actividad sísmica considerable, encontrándose ubicada a 40 km al Oeste de la zona de alta sismicidad (depresión interandina entre Quito y Machachi) y de 150 a 200 km hacia al oeste del límite de convergencia (zona de subducción).

4. MARCO GEOLÓGICO LOCAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los estudios iniciales de MOBESSCO, 1975 se complementaron con los estudios realizados por USGS (U.S.Geological Survey), 2003 y señalan lo siguiente:

Los aprovechamientos hidroeléctricos previsto para el proyecto Toachi Pilatón, se desarrollan dentro de una secuencia Vulcano-Sedimentaria, de edad Cretácica, que corresponde a estratos de lavas (Pillow lavas), y depositación de sedimentos marinos como lutitas y arenisca que debido a efectos tectónicos se agregaron al contiene por subducción de la placa oceánica, además estos depósitos marinos por la acción hidrotermal se silicificaron y por fallamiento en una etapa secundaria se cubrieron con velillas de carbonatos que circularon por los planos estructurales de la roca, diaclasas y grietas primarias.

Las formaciones Macuchi y Silante de edad Cretácica están constituidas por un grupo de rocas Volcano-sedimentarias (tobas, lavas, lutitas y grauvacas), también existe tramos esquistosos por metamorfismo de contacto por la presencia de cuerpos intrusivos (grano-dioríticos) de edad terciaria distribuidos en el área del proyecto.

También existen depósitos Plio - Cuaternarios y recientes, consolidados unos y sueltos otros, que forman el material de cobertura:

- La brecha tobacéa (depósitos de flujo de lodo – lahares).
- Depósitos piroclásticos de caída (varios horizontes de ceniza volcánica y lapilli).
- Depósitos cuaternarios y recientes (terrazas antiguas y aluviales recientes).
- Depósitos gravitacionales y escombros de deslizamiento

- Cuerpos plutónicos indiferenciados (dique porfiríticos, dioritas, granodioritas, gabros y diabasas).

4.1. Geología del Aprovechamiento Pilatón – Sarapullo

La *Captación del río Pilatón* se construye sobre roca intrusiva granodiorítica esta aflora directamente en la margen izquierda y existen segmentos de rocas volcánico – sedimentarias de la formación Macuchi; en la margen derecha e izquierda del río la roca aflora en condiciones similares; la roca del substrato se encuentra en general bastante fracturada y tectonizada.

El Túnel del Carga Pilatón Sarapullo tiene un rumbo aproximado sur - oeste (azimut 250°) y atraviesa una parte de la secuencia estratigráfica de la formación Macuchi, con tramos estratificado en presencia de rocas sedimentarias (lutitas, grauvacas y tobas líticas), flujos de lava con estructuras de almohadillas, tobas, brechas y micro brechas.

La Chimenea Superior se construye de rocas del zócalo de la formación Macuchi representado por rocas volcánicas – sedimentarias (lavas porfiríticas y brechas); la *chimenea inferior* se ubica en el macizo rocoso cuya calidad mejora cuando se incrementa con la profundidad, se ha encontrado zonas cizallas y cambios de litología a medida que se llega a la cota final de construcción.

4.2. Geología del Aprovechamiento Toachi - Alluriquín

La Presa Toachi se construye sobre roca volcánico – sedimentarias y brechas de la formación Macuchi, esta aflora en el margen izquierda. La roca de buena calidad geomecánica se pierde en el cauce del río Toachi, aflorando en la margen derecha un grupo de cherts y continúa roca volcánico – sedimentaria con grado de alteración considerable.

El Túnel de Carga Toachi Alluriquín atraviesa varios tramos de secuencias sedimentarias estratificadas, volcánicas masivas con estructuras de flujo tipo

almohadilla, zonas estratificadas, tectonizadas, cuerpos y diques intrusivos. El modelo tectónico de la zona que cruza el túnel es el mismo que se presenta en toda la faja andina occidental.

La Chimenea Superior se localiza en un sector donde los depósitos piroclásticos son pocos consolidados en superficie porque han experimentados una serie de movimientos masivos. El macizo rocoso contiene areniscas, grauvacas, tobas, lavas y cuerpos plutónicos dioríticos alterados estas litologías se pudieron registrar en los sondeos realizados durante los estudios de factibilidad y de diseño básicos de MOBESSCO en 1975.

La Chimenea Inferior y el Túnel de Descarga serán excavados en rocas volcánico sedimentarias (areniscas, grauvacas, brechas, tobas y pillow lavas, de buena calidad con eventuales tramos fracturados y fallados.

5. TÚNEL DE CARGA PILATÓN – SARAPULLO

5.1. Consideraciones Generales

La dirección y posición del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo se debe a la ubicación de la captación del río Pilatón y a la localización de la casa de máquinas Sarapullo (ver figura 9).

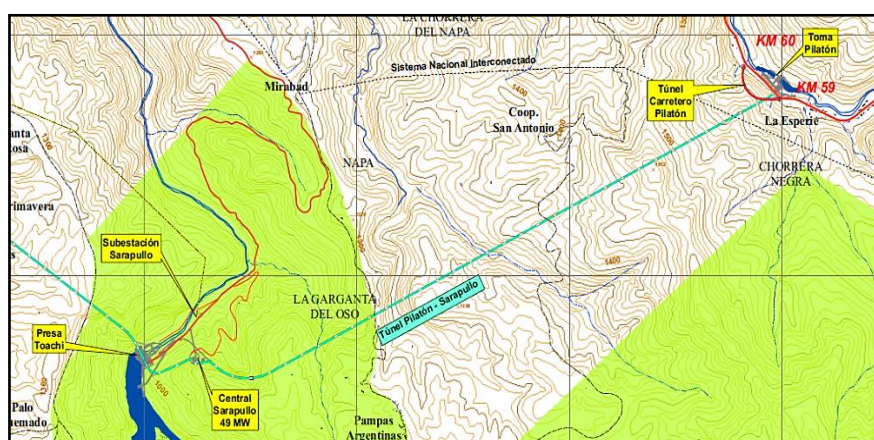


Figura 9. Ubicación geográfica del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo

El túnel se construyó en el margen izquierdo del río Pilatón, al final de la embocadura de la captación, continúa hasta llegar al inicio del blindaje de la tubería de presión cerca de la casa de máquinas Sarapullo. La longitud del túnel es de 5912.95 m. El flujo de agua del túnel será a gravedad.

5.2. Aspectos constructivos

El túnel de carga tiene dos frentes de excavación, aguas arriba (captación) y aguas abajo (sector Sarapullo). La construcción del túnel de Carga Pilatón Sarapullo se la hace por el método clásico de “perforación – voladura”.

El método perforación-voladura consiste en hacer perforaciones en el frente de excavación mediante pie de avance, se carga con explosivos y se los hace detonar. Se debe poner la cantidad adecuada de explosivos dependiendo de

las condiciones geológicas de la roca, para no dar lugar a sobre-excavaciones y caída de bloques que puede provocar inestabilidad en el macizo rocoso.

El túnel de carga tendrá un caudal de diseño de 40 m³/s, con una velocidad de 7.04 m/s.

5.3. Características Geométricas del Túnel

- Longitud: 5912.95 m
- Sección: Tipo baúl
- Diámetro: 4.40 m
- Altura total: 4.55 m
- Radio bóveda: 1.90 m
- Pendiente: 2.4%
- Inicio del túnel: abscisa 0+000.00; cota de solera 1095.00 msnm
- Final del túnel: abscisa 5+912.95; cota de solera 955.132 msnm

5.4. Investigaciones Geotécnicas

5.4.1. Sondeos Rotativos

Los sondeos fueron realizados a lo largo del eje del túnel de carga, el estudio estuvo a cargo de MOBESSCO – INECCEL en 1975, los datos están resumidos en el siguiente cuadro:

Tabla 1. Sondeos del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo realizado por MOBESSCO – INECEL en 1975

Sondeo	Coordenadas UTM	Longitud (m)	Inclinación	Litología
SP - 1B	N 9 959 537 62 E 735 324 22	260.00	Vertical	00.00 – 14.50m Suelo tobáceo 14.50 – 32.40m Brecha volcánica 32.40 – 65.00m Andesita 65.00 – 87.00m Roca esquistosa 87.00 – 260.00m Brecha andesítica
SP – 2	N 9 959 070 05 E 733 549 72	315.00	Vertical	00.00 – 302.40m Brecha tobácea con intercalaciones de andesita 302.40 – 315.00m Granodiorita
SP – 3	N 9 958 192 98 E 734 924 25	212.00	Vertical	00.00 – 181.00m Brecha tobácea 181.00 – 212.00m Brecha volcánica
Total		787.00		

Los sondeos realizados por Hidrotoapi (2009), en la casa de máquinas Sarapullo cerca al túnel de carga:

Tabla 2. Sondeos del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo realizados por HIDROTOAPI en 2009.

Sondeo	Longitud (m)	Inclinación	Litología
SCCS - 1	200.00	Vertical	00.00 – 29.50m Flujo de lodo o lahares 29.50 – 47.80m Brechas intercaladas con lutitas silificadas 47.80 – 160.36m andesita piroxénica de color gris verdoso 160.36 – 168.00m Toba brechosa 168.36 – 179.85m Andesita piroxénica 179.85 – 200.00m Brecha
SCCS - 2	131.00	Vertical	00.00 – 33.00m Flujos de lodo o lahares 33.00 – 98.50m Lavas andesíticas piroxénicas 98.50 – 128.00m Brechas con alto contenido de clastos de lutitas de color negro y rojo 128.00 – 131.00m Lavas andesíticas piroxénicas
Total	331.00		

5.4.2. Galería de Investigación

En la galería de investigación que se hizo cerca de la casa de máquinas Sarapullo (GCMS-1), existen secuencias volcano-sedimentaria, lutitas silíceas de color gris oscuro, tobas de color violeta, brechas y grauvacas gris oscuras, con diferente espesor, lavas andesíticas - basálticas de color gris oscuros.

Las cizallas observadas, junto a las estructuras a lo largo de la galería, la roca se presenta muy alterada y milonitizada, luego la intensidad del fracturamiento y alteración depende de la presencia de cizallas y efectos de trituración de la roca.

Existe goteo y filtraciones de agua muy persistentes > 2 l/s en dos sitios y goteos en toda la longitud, en el tramo siguiente el goteo y filtraciones están ausentes pero se evidencia el humedecimiento en sus paredes.

5.5. Modelo Geológico

La cobertura de material laháritico a lo largo del eje del túnel no permite hacer una descripción física de rocas del basamento debido a que se encuentran relleno cauces y depresiones antiguas sin permitir la exposición a la superficie. En diferentes puntos se observaron afloramientos de esquistos sericíticos - grafitosos con intercalaciones de areniscas.

Con frecuencia se encuentran rocas intrusivas o rocas alteradas por metamorfismo de contacto, lo que se ha podido observar en los diferentes avances de excavación del túnel, de lo que hace pensar que en profundidad puede existir un cuerpo intrusivo extenso.

En función de las observaciones realizadas en superficies, galerías de investigaciones, perfiles de estudios geofísicos, y perforaciones realizadas por MOBESCCO (1975), LOMBARDI e Hidrotoapi (2009), se divide el macizo rocoso del túnel de carga en tramos litológicos de la siguiente manera (ver en anexo Plano Geológico del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo):

5.5.1. Tramo Litológico N° 1

Son los primeros 150 m donde se encuentra una secuencia de rocas intrusivas granodioritas y dioritas tectonizadas (descomprimidas), con intercalaciones de lutitas de secuencia vulcano-sedimentarias.

5.5.2. Tramo Litológico N°2

Corresponde el tramo entre 150 m a 3000 m, compuesta una secuencia vulcano-sedimentaria, que han sufrido fracturación debido a un sistema de fallamiento regional. Presencia de paquetes de rocas metamórficas debido a la intrusión de cuerpos plutónicos.

5.5.3. Tramo Litológico N°3

Este tramo comprende entre los 3000 m hasta el sito de la presa del río Toachi, donde predominan rocas vulcano-sedimentarias que están fracturadas y silicificadas.

5.5.4. Comportamiento Estructural

Frecuencia dominante de fallas, fracturas y estratificación:

Sistema A: E W / 43°N; 0/43

Sistema B: N 80°E / 80°E; 100/80

Sistema C: N 16°E / 58°W; 286/58

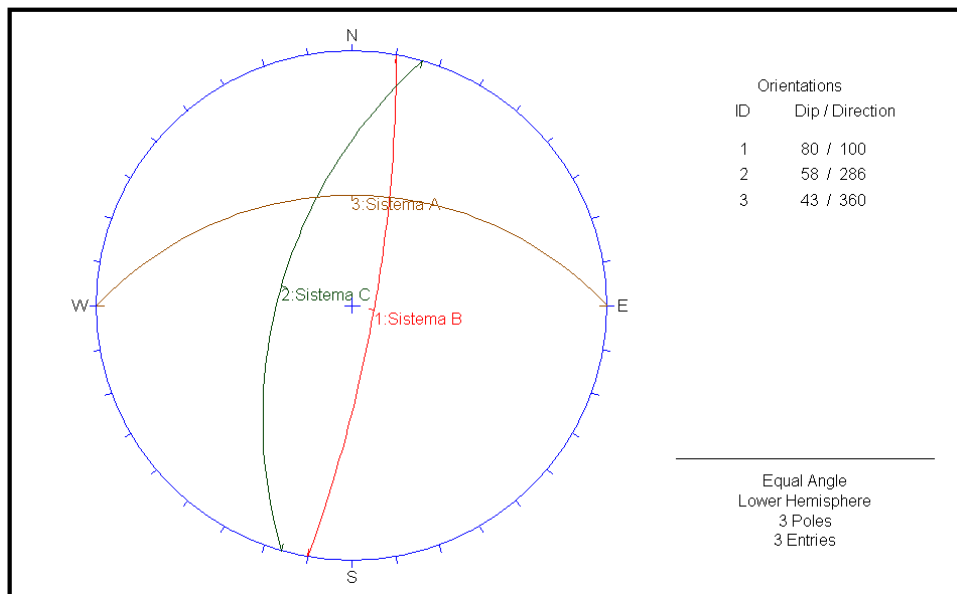


Figura 10. Estereograma de discontinuidades principales del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo (tomado del informe ejecutivo – alternativa 300 MW, año 2009 realizado por Hidrotoapi)

6. CARACTERIZACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS

Al momento de realizar una obra subterránea, es importante analizar las características físicas y mecánicas de la roca, se lo realiza mediante descripción de discontinuidades y del macizo rocoso.

Una discontinuidad es cualquier fisura o grieta que se presentan en un macizo rocoso que no le permite que esté íntegro en su aspecto. Estas grietas se producen debido a los procesos que se dan en su origen y después de este, como los eventos tectónicos. Las discontinuidades pueden ser diaclasas, foliaciones, estratificación y fallas.

El macizo rocoso es un conjunto de roca y de discontinuidades, de aspecto sólido y heterogéneo, se diferencian entre sí por su composición química y mineralógica. Las diferentes orientaciones de las discontinuidades, condicionan su comportamiento geomecánico.

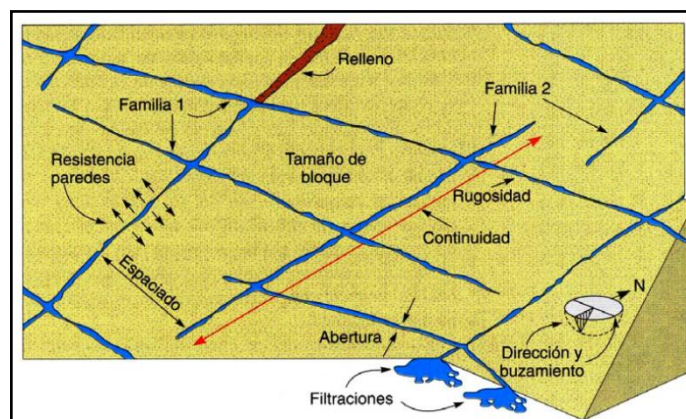


Figura 11. Representación gráfica de las discontinuidades (Hudson, 1989)

La geomecánica estudia las propiedades mecánicas de la roca o de un macizo rocoso mediante el estudio detallado de las discontinuidades que lo componen.

Para la descripción de discontinuidades se debe de tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Resistencia de la roca
- RQD (Rock Quality Designation)
- Orientación de las discontinuidades (dip - dip direction)
- Espaciamiento y persistencia de las discontinuidades
- Abertura o separación de las discontinuidades
- Rugosidad de las discontinuidades
- Relleno de las discontinuidades
- Alteración de la superficie de las discontinuidades
- Presencia de agua

Los parámetros para la descripción de macizos rocosos son:

- Número de familias de discontinuidades
- Tamaño de bloques

6.1. Descripción de discontinuidades

Resistencia de la Roca

Se determina por ensayos de compresión simple, el valor esta dado en mega pascales (MPa).

RQD (Índice de calidad de la roca)

El índice del RQD desarrollado por Deere en 1967 mediante la fórmula:

$$RQD (\%) = \frac{\text{sumatoria de los sondeos mayores a } 10\text{cm}}{\text{longitud total de la perforacion}} \times 100$$

Pero Palmstrom (1974), encontró que el índice RQD puede ser utilizado para determinar sostenimientos de túneles, con la fórmula:

$$RQD (\%) = 115 - 3.3 J_v$$

Dónde:

J_v = Número de fisuras por metro cúbico

El valor de J_v se lo calcula sumando el número de discontinuidades que se encuentran en un metro cúbico de macizo rocoso.

Tabla 3. Descripción de calidad de roca tomando en cuenta el porcentaje de RQD

RQD (%)	Calidad de Roca
0 – 25	Muy pobre
26 – 50	Pobre
51 – 75	Regular
76 – 90	Buena
91 – 100	Excelente

En la actualidad el índice RQD, es usado como un importante parámetro para registros de núcleos de perforación (sondeos) y en los dos sistemas de clasificación de macizos rocosos más utilizados: el RMR y el Índice Q.

Orientación

Se utiliza la brújula para saber los valores de buzamiento - dirección de buzamiento de las estructuras con relación al norte geográfico.

Buzamiento es el ángulo que forma la línea de pendiente de un estrato. Se mide con el clinómetro de la brújula de 0 a 90°. **Dirección de Buzamiento** es la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad respecto al norte. Se mide con la brújula en sentido de las agujas del reloj de 0° a 360°

Espaciamiento y persistencia

Espaciamiento es la distancia perpendicular que existe entre discontinuidades de una misma familia y la *persistencia* es la longitud que tiene la discontinuidad en el macizo rocoso.

Abertura o separación

Es la distancia perpendicular que existe, entre las paredes de una discontinuidad. Se dividen en dos discontinuidades abiertas (por ejemplo agua) y abiertas (cizallas).

Rugosidad

Se refiere a la planaridad de la superficie de la discontinuidad. Si es rugosa, da mayor fuerza de rozamiento al macizo rocoso para impedir caída de bloques.

Relleno

Es el material entre las paredes de la discontinuidad, este material puede ser duro o blando por ejemplo cuarzo, calcita o material arcilloso (cizalla). El tipo de relleno de las discontinuidades influye en la estabilidad del macizo rocoso.

Alteración

Es cuando la superficie de la discontinuidad está descolorida por la meteorización.

Presencia de agua

Es la circulación de agua por las discontinuidades en el macizo rocoso, esta puede ser húmedo, goteo y flujo. Es importante tomar en cuenta el caudal cuando hay presencia de flujo.

6.2. Descripción de Macizos Rocosos

Número de familias de discontinuidades

Se refiere al grado de fracturamiento que ha sufrido el macizo rocoso, está influenciada por los tipos de esfuerzos, orientación y el grado de estabilidad del mismo.

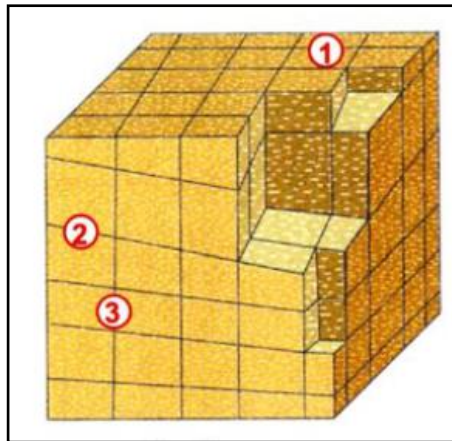


Figura 12. Representación gráfica de números de familia en un metro cúbico de roca

El macizo rocoso se lo puede clasificar por número de familias de discontinuidades presentes

Tabla 4. Tipos de macizo rocoso por el número de familias de discontinuidades (ISRM, 1981)

Tipo de Macizo Rocos	Número de familias de discontinuidades
I	Masivo, discontinuidades ocasionales
II	Una familia de discontinuidades
III	Una familia de discontinuidades más otras ocasionales
IV	Dos familias de discontinuidades
V	Dos familias de discontinuidades más otras ocasionales
VI	Tres familias de discontinuidades
VII	Tres familias de discontinuidades más otras ocasionales
VIII	Cuatro o más familias de discontinuidades
IX	Brechificación

Hay que saber diferenciar discontinuidades naturales de mecánicas: *Naturales* originadas por esfuerzos del macizo rocoso y las *mecánicas* que se originan por efectos del uso de explosivos generalmente la fractura tiene forma radial y superficie es muy lisa.

Tamaño y forma de Bloques

Indica el comportamiento deformación y resistencia del macizo rocoso, el tamaño está determinado por la persistencia, espaciado y orientación; estos tres parámetros son medibles y determinan la forma de los bloques.

El tamaño determina el comportamiento mecánico del macizo rocoso, si una excavación subterránea posee bloques grandes forma un comportamiento favorable para el macizo, en cambio si tiene bloques pequeños puede provocar rotura como un suelo. Los macizos rocosos pueden ser descritos con los siguientes adjetivos, a fin de dar una idea y forma de los bloques:

Tabla 5. Clases de formas de bloque de un macizo rocoso.

Forma de Bloques	Descripción
I – Masivo	Pocas discontinuidades o amplio espaciamento
II – Cúbico	Aproximidad equidimensional
III – Tabular	Una dimensión considerable menor que las otras dos
IV – Columnar	Una dimensión considerable mayor que las otras dos
V – Irregular	Amplia variación de tamaño y forma de los bloques
VI – Triturado	Muy fracturado – cubos de azúcar

Denominaciones relacionadas con el número de discontinuidades presentes en un metro cúbico del macizo rocoso:

Tabla 6. Tamaño de bloques debido al número de discontinuidades (ISRM, 1981).

Tamaño de Bloque	J_v (discontinuidad por metro cúbico)
Masivo	0
Bloques muy grandes	<1
Bloques grandes	1 – 3
Bloques medianos	3 – 10
Bloques pequeños	10 – 30
Bloques muy pequeños	>30

7. CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS UTILIZADAS EN EL TÚNEL DE CARGA PILATÓN SARAPULLO

7.1. Introducción

El objetivo principal de las clasificaciones geomecánicas es de valorar al macizo rocoso, mediante parámetros geológicos para poder designar un índice numérico de calidad, con el propósito de definir el tipo de soporte para asegurar la estabilidad de la excavación. Las clasificaciones geomecánicas son utilizadas en las etapas de estudio, diseño y construcción de túneles, labores mineras y taludes.

Durante la etapa de estudio y diseño, se puede estimar el sostenimiento necesario que va a necesitar la obra a través de investigaciones geológicas superficiales (quebradas, en cortes de carreteras) y subterráneas (galerías de exploración, sondeos etc.), según los parámetros de la clasificación geomecánica a utilizarse. Si la condición geológica de la roca es mala, su índice de calidad será bajo y a su vez necesitara mayor sostenimiento, mientras una roca buena tendrá una índice de calidad alto y menor sostenimiento.

Las clasificaciones geomecánicas más utilizadas para macizos rocosos, para excavaciones subterráneas son de Bieniawski (CSIR), 1976 y su actualización de 1989, con su índice RMR (Rock Mass Rating) y de N. Barton, 1974 y su actualización de 1993, con su índice Q (Rock Mass Quality).

7.2. Clasificación de Bieniawski - RMR (Rock Mass Rating)

La clasificación geomecánica o de macizo rocoso (RMR) fue inicialmente desarrollado en el Consejo Sudafricano de Investigación Científica e Industrial (CSIR) por Bieniawski (1973), sobre sus experiencias en túneles poco profundos en rocas sedimentarias. Desde entonces la clasificación ha tenido importantes modificaciones en siguientes años:

- 1974 - reducción de 8 a 6 parámetros.
- 1975 - ajuste de las calificaciones y la reducción de los requerimientos de soporte.
- 1976 - modificación de límites de clase de macizo rocoso en múltiplos pares de 20.
- 1979 - adopción de ISRM (1978) para descripción de macizo rocoso.
- 1989 – modificación en las condiciones de discontinuidades y de agua.

Tabla 7. Modificaciones de la clasificación geomecánica, RMR

Modificaciones Del RMR	1973	1974	1975	1976	1989
Resistencia de la roca	10	10	15	15	15
RQD	16	20	20	20	20
Espaciado de la discontinuidades	30	30	30	30	20
Separación de las discontinuidades	5				
Continuidad de las discontinuidades	5				
Condición de agua subterránea	10	10	10	10	15
Meteorización	9				
Condición de la discontinuidades		15	30	25	30
Rumbo y orientación		15			
Rumbo y orientación (túneles)	3 -15		0 – 12	0 - 12	0 – 12

Los objetivos de esta clasificación son:

- Dividir el macizo rocoso según el comportamiento geomecánico
- Entender las características del macizo rocoso
- Facilita la planificación y el diseño de estructuras en roca, proporcionando datos necesarios para la solución de los problemas de ingeniería.
- Proporciona una comunicación efectiva entre las personas que trabajan en un determinado problema de geomecánica.

En el proyecto Toachi Pilatón y en este trabajo de investigación se utilizó la última actualización del RMR del año 1989.

7.2.1. Parámetros de Clasificación

El sistema de clasificación valora la calidad de roca de 0 a 100. Se basa en seis parámetros:

- a) Resistencia de la roca intacta (compresión uniaxial)
- b) RQD
- c) Espaciado de las discontinuidades
- d) Condiciones de las discontinuidades
- e) Condición de agua subterránea
- f) Orientación de las discontinuidades

La suma de los cinco parámetros dará un valor de RMR básico, a este valor se le restará el valor del sexto parámetro que será un valor RMR ajustado y final.

Resistencia de la roca

Para este parámetro se debe de obtener muestras de roca a partir de núcleos de conformidad a las condiciones del macizo rocoso. Las muestras son llevadas a laboratorio para determinar el valor de resistencia a la compresión uniaxial (Mpa) y la fuerza de carga puntual (kN).

La **resistencia** es el esfuerzo que soporta una roca para determinadas deformaciones. Cuando la resistencia se mide en probetas de roca sin confinar se denomina **resistencia a compresión simple** este ensayo permite determinar en el laboratorio la resistencia uniaxial no confinada de la roca; el ensayo trata de la aplicación gradual de una fuerza axial a un cilindro de roca, hasta que se produce su rotura.

El **ensayo de carga puntual** se utiliza para determinar la resistencia a la compresión simple de fragmentos irregulares de roca, testigos cilíndricos de sondajes o bloques, a partir del índice de resistencia a la carga puntual (I_s). El procedimiento consiste en romper una muestra entre dos puntas cónicas metálicas accionadas por una prensa.

Tabla 8. Resistencia de la roca intacta – Clasificación RMR

	Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy Baja		
Resistencia de la roca	> 10 Mpa	4 - 10 Mpa	2 - 4 Mpa	1 - 2 Mpa	Para estos rangos		
Resistencia de la roca a la compresión simple	> 250 Mpa	100 - 250 Mpa	50 - 100 Mpa	25 - 50 Mpa	5 - 25 Mpa	1 - 5 Mpa	< 1 Mpa
Puntaje	15	12	7	4	2	1	0

RQD

El RQD se lo explica en capítulo anterior. En la clasificación RMR, el puntaje de RQD varía de 20 para una roca excelente hasta 3 para una roca muy pobre.

Tabla 9. Porcentaje de RQD – Clasificación RMR

RQD (%)	Excelente	Buena	Regular	Pobre	Muy pobre
	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25
Puntaje	20	17	13	8	3

Espaciado de las discontinuidades

Es la distancia perpendicular que existe entre discontinuidades de una misma familia. La resistencia del macizo rocoso disminuye cuando la distancia entre cada familia es menor. Bieniawski utiliza el propuesta de Deere en su clasificación de 1967 referente al espaciado de juntas. El puntaje del espaciado de discontinuidades es de 20 para discontinuidades muy amplias y 5 muy cerradas.

Tabla 10. Espaciado de discontinuidades – Clasificación RMR

Espaciado discontinuidad	Muy amplia	Amplia	Moderadamente	Cerrada	Muy cerrada
	> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm
Puntaje	20	15	10	8	5

Condición de las discontinuidades

En este parámetro se considera las condiciones geológicas de las discontinuidades: longitud, separación, rugosidad, relleno y meteorización.

Longitud: se clasifica desde muy bajas menor a 1 m con puntaje de 6, hasta muy alta mayor a 20 m puntaje de 0.

Separación: es la abertura que existe entre discontinuidades se las considera desde muy junta < 0.1 mm puntaje de 6 hasta muy abiertas > 10 mm con puntaje de 0.

Rugosidad: es la superficie de la discontinuidad tiene 2 descripciones, rugosa y lisa; muy rugosa con puntaje de 6 hasta muy lisa puntaje de 0.

Relleno: es el tipo de material y su espesor; su descripciones es duro, blando o ninguno. Se considera desde ninguno con puntaje de 6 a blando > 5 mm con puntaje de 0.

Meteorización: es la condición de alteración del macizo rocoso, se considera desde inalterada con puntaje de 6 a descompuesta con puntaje de 0.

Tabla 11. Condiciones de las discontinuidades – Clasificación RMR

Longitud (persistencia) Puntaje	Muy Baja < 1 m	Baja 1 - 3 m	Media 3 - 10 m	Alta 10 - 20 m	Muy alta > 20 m
	6	4	2	1	0
Separación Puntaje	Muy juntas < 0.1 mm	Juntas 0.1 – 0.5 mm	Lig. Abier 0.5 – 2.5 mm	Abierta 2.5 - 10 mm	Muy Abier. > 10 mm
	6	5	4	1	0
Rugosidad Puntaje	Muy rugosa	Rugosa	Lig. Rugosa	Lisa	Muy lisa
	6	5	3	1	0
Relleno Puntaje	Ninguno	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Blando < 5 mm	Blando > 5 mm
	6	4	2	2	0
Meteorización Puntaje	Inalterada	Lig. Meteo.	Mode. Meteo.	Altam. Meteo.	Descompuesta
	6	5	3	1	0
Condición de las discontinuidades	Superficies muy rugosas, sin continuidad sin separación.	Superficies rugosas, con separación < 1 mm.	Superficies ligeramente rugosas, con separación < 1mm.	Superficies pulidas o rellenos < 5 mm, de espesor o separación 1 - 5 mm. Continuas.	Rellenos blando > 5 mm de espesor. Continuas
Puntaje	30	25	20	10	0

Condición de agua subterránea

La tasa de flujo de agua subterránea se la estima en galones por minuto por cada 1000 pies de túnel. Por condición general se describe como completamente seco, húmedo, mojado, goteo y flujo.

Tabla 12. Condiciones de agua subterránea – Clasificación RMR

Agua Subterránea	Flujo por cada 10 m de longitud del túnel l /seg	Ninguno	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125
	(Presión de agua en la diaclasa) / (tensión principal mayor σ_1)	0 Kpa	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5
	Condiciones generales	Comple. seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo
	Puntaje	15	10	7	4	0

Ajuste por la orientación de las discontinuidades

La ventaja de la clasificación RMR, es que no es sólo aplicable para túneles, sino también para fundiciones en rocas y taludes. Esta es una característica muy útil que puede ayudar con el diseño de taludes cerca de portales de túneles, así como permitir hacer estimaciones para la capacidad de deformación de roca para bases estructurales tales como puentes.

Tabla 13. Ajuste por orientación de las discontinuidades – Clasificación RMR

Orientación rumbo – buzamiento		Muy favorable roca sana	Favorable diaclasas perpendiculares	Regulares diaclasas inclinadas	Desfavorable diaclasas, horizontales cuñas decimétricas	Muy desfavorables cuñas métricas
Puntaje	Túneles y minas	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Orientación del rumbo y buzamiento de las discontinuidades en los túneles

Este parámetro permite analizar las direcciones de la discontinuidad ya sean perpendiculares o paralelas, según el sentido del avance de construcción del túnel. La orientación de las discontinuidades es un factor importante para determinar la necesidad de sostenimiento. El valor inicial de RMR básico, se le

resta el puntaje que se obtuvo del análisis de la orientación de las discontinuidades el resultado de este valor será el RMR real del macizo rocoso. Se clasifican desde muy favorables a desfavorables en las discontinuidades perpendiculares al eje del túnel y muy desfavorables a desfavorables en las discontinuidades paralelas al eje del túnel.

**Tabla 14. Orientación del rumbo y buzamiento de las discontinuidades para túneles
– Clasificación RMR**

Rumbo perpendicular al eje del túnel		Buzamiento paralelo al eje del túnel	
F1 - Avance en el sentido del buzamiento Buz. 45 - 90°	F2 - Avance en el sentido del buzamiento Buz. 20 - 45°	F3 - Buzamiento 45 - 90°	F4 - Buzamiento 20 - 45°
Muy favorable (0)	Favorable (-2)	Muy desfavorable (-12)	Regular (-5)
F5 - Avance contra el sentido del buzamiento Buz 45 - 90°	F6 - Avance contra el sentido del buzamiento Buz. 20 - 45°	F7 - Buzamiento 0 - 20°	
Regular (-5)	Desfavorable (-10)	Desfavorable (-10 clave; 0 para hastial)	

7.2.2. Definición del Sostenimiento

La clasificación de Bieniawski divide el valor de RMR en cinco clases desde Muy Buena a Muy Mala, cada clase cubre un intervalo de 20 puntos:

- Clase I: Muy buena 81– 100
- Clase II: Buena 61 – 80
- Clase III: Regular 41 – 60
- Clase IV: Mala 21 – 40
- Clase V: Muy mala < 21

En la última actualización de la clasificación en 1989 se incluye los siguientes puntos y elementos de sostenimiento según el valor de RMR: longitud de excavación, longitud y espaciado de pernos, hormigón proyectado, cerchas metálica y pernos paraguas.

Tabla 15. Elementos de sostenimiento que se deben de colocar en el túnel según el valor de RMR que se obtuvo en el macizo rocoso

Clase de macizo rocoso (RMR)	Excavación (pase)	Sostenimiento		
		Pernos (longitud en m)	Hormigón proyectado	Cerchas metálicas
I Muy buena (81 - 100)	Sección completa (3 m)	Ocasionales	No necesario	No necesario
II Buena (61 - 80)	1 – 1.5 m de excavación. Distancia para colocación del sostenimiento 20 m de avance.	Localmente en bóveda L = 3 m espaciados 2.5 m. Malla metálica ocasional	50 mm en la bóveda donde sea necesario	No necesario
III Media (41 - 60)	1.5 - 3 m de excavación. Distancia para colocación del sostenimiento 10 m de avance.	Sistemáticos en bóveda y hastial L = 4 m, espaciados 1.5 a 2.0 m. Malla metálica en bóveda	50 - 100 mm en bóveda 30 mm en hastiales	No necesario
IV Mala (21 - 40)	1.0 – 1.5 m de avance. Colocación simultanea del sostenimiento en cada avance y hasta 10 m del frente.	Sistemáticos en bóveda y hastiales L = 4 a 5 m espaciados a 1.0 a 1.5 m con malla metálica	100 - 150 mm en bóveda 100 mm en hastiales	Ligeras a medias, espaciadas a 1.5 m donde sea necesario
V Muy mala (<21)	Galerías múltiples (0.5 – 1.5 m de avance) Sostenimiento simultaneo con la excavación hormigón proyectado inmediatamente después de la voladura	Sistemáticos en bóveda y hastiales L = 5 - 6 m espaciados 1.0 - 1,5 m con malla metálica pernos paraguas en la bóveda	150 - 200 mm en bóveda 150 mm en hastiales 50 mm en el frontón	Medias a pesadas, espaciadas a 0.75 m

7.3. Clasificación de Barton - Índice Q (Rock Mass Quality)

Fue creado por Barton, Lien y Lunde del Instituto Geotécnico de Noruega (NGI) en 1974, para definir el soporte en la construcción de túneles y cavernas subterráneas, más después el Índice Q fue aplicado en macizo rocosos para estimar su calidad. Este sistema de clasificación geomecánica, fue propuesto después de ser aplicado en 200 casos históricos en Escandinavia. El Índice Q es un factor importante en el Método Noruego de Túneles (NMT).

Desde su aparición el Índice Q, ha tenido varias investigaciones importantes:

Tabla 16. Investigaciones del Índice Q a través de los años

Año	Desarrollo	Autor y título de trabajo
1974	Se introduce el Índice Q	Barton, Lien, and Lunde: Clasificación de ingeniería de las masas de roca para el diseño del soporte de túneles
1977	Estimación de soporte de roca en las paredes del túnel - Estimación del apoyo temporal	Barton, Lien, and Lunde: Estimación de las necesidades de apoyo para la excavación subterránea.
1980	Sistema Q para estimación de parámetros de entrada para el criterio de rotura de Hoek-Brown para macizos rocosos	Hoek y Brown: excavaciones subterráneas en roca.
1988	tabla para soporte simplificado para roca	Grimstad y Barton: Diseño y métodos de soporte en roca.
1992	La aplicación del sistema-Q en el NMT (método noruego de túneles)	Barton * et al .: efecto del método noruego de túneles
1993	Actualización del sistema Q con: - Ajuste de los valores de SRF - Aplicación de nuevos métodos de apoyo en roca - Estimación Q de velocidades sísmicas de refracción - Ajuste para las zonas de debilidad	Grimstad y Barton: Actualización del sistema-Q para el TNM.
1999	Introducción Q_{TBM}	Barton: estimación de rendimiento de la maquina tuneladora en roca utilizando Q_{TBM} .
2002	Un mayor desarrollo del sistema-Q	Barton: Algunas nuevas correlaciones Q-valor para ayudar en la caracterización del sitio y diseño del túnel.

El valor para obtener del índice Q, se define en la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SFR}$$

Dónde:

- RQD - Índice de calidad de la roca (Deere, 1963) – Jv: número de discontinuidades en un metro cubico (Palmstron, 1974). $RQD = 115 - 3.3 (J_v)$.
- Jn - Índice del número de discontinuidades.
- Jr - Índice de rugosidad de las discontinuidades.
- Ja - Índice de alteración y relleno de las discontinuidades.
- Jw - Coeficiente reductor por presencia de agua en las discontinuidades.
- SFR - Coeficiente reductor por tensiones en el macizo rocoso.

La fórmula matemática para obtener en valor de Índice Q, se resume en 3 parámetros importantes (Barton et al, 1974):

$$\frac{RQD}{J_n} = \text{Tamaño relativo de bloques}$$

$$\frac{J_r}{J_a} = \text{Resistencia a la tensión cizallante entre bloque}$$

$$\frac{J_w}{SFR} = \text{Estado de esfuerzos activos en el macizo rocoso}$$

Tamaño relativo de bloques (RQD/Jn)

Representa la estructura del macizo rocoso y es una medida fundamental del tamaño o de las partículas con dos valores extremos (100/0.5 y 10/20), con una diferencia de 400. Se compone de dos parámetros RQD para la caracterización del grado de unión de la masa rocosa y Jn, es el número de sistemas o familias de discontinuidades.

Cuantas menos familias de discontinuidades existan y mayor sea el RQD, mayores serán los bloques del macizo rocoso.

Resistencia a la tensión cizallante entre bloque (Jr/Ja)

Son las características de rugosidad (Jr) y fricción de las paredes discontinuidad con o sin materiales de relleno (Ja).

Cuando las discontinuidades tienen superficie lisa con recubrimientos y relleno delgados de arcilla, la fuerza de fricción se reduce significativamente lo que produce deslizamientos son muy desfavorable a la estabilidad de la excavación, mientras que las discontinuidad que están en contacto con superficie rugosa, producen una fuerza tensional optima al macizo rocoso son favorables a la estabilidad.

Estado de esfuerzos activos en el macizo rocoso (Jw/SRF)

Este tercer cociente es el más complicado por ser un factor empírico y ha sido objeto de debate en varios trabajos de investigación, se le debe dar una atención especial.

El parámetro Jw describe las condiciones hidrogeológicas presentes en el macizo rocoso de modo cualitativo o cuantitativo (midiendo la presión o el caudal de agua); SRF (stress reduction factor) es un valor empírico mide la

influencia de los esfuerzos tectónicos en el macizo rocoso a través de sus manifestaciones es: pliegues, fracturas, zonas de debilidad, etc.

7.3.1. Parámetros de Clasificación

RQD – Índice de Calidad de la Roca

RQD se introdujo como una medida para el grado de unión o tamaño de bloque. Es la longitud de trozos de núcleos de perforación mayores a 10cm (Deere, 1963). La aplicación del RQD es fácil y sencilla, se aplica con frecuencia a registros de núcleos y a menudo, el único método utilizado para la caracterización de tamaño de bloques.

Los análisis han demostrado que es muy difícil relacionar RQD a otras mediciones (Palmström, 2005), porque RQD es unidimensional, se basa únicamente en piezas de núcleo de más de 0.1 m. Usando bloques del mismo tamaño y perforándolos por una línea en diferentes ángulos se utilizó para tales estimaciones.

Palmstron (1982), sugiere que en caso de que las discontinuidades sean visibles ya sea en planos expuestos, se puede realizar el cálculo de RQD, con el número de discontinuidades por unidad de volumen (J_v) de acuerdo a la relación:

$$RQD (\%) = 115 - 3.3 J_v$$

Esta expresión se incluyó en el sistema Q de Barton et al. (1974).

Tabla 17. Cálculo y descripción del porcentaje de RQD – Clasificación Índice Q

Parámetro	Descripción	Valor
$RQD (\%) = 115 - 3.3 * J_v$ J_v (número de discontinuidades por metro cubico)	Muy pobre	0 - 25
	Pobre	26 - 50
	Regular	51 - 75
	Buena	76 - 90
	Excelente	91 - 100

Jn – Índice del número de discontinuidades

Se define como número de sistemas (orientación - posición) de discontinuidades; varia de 0.5 para una roca masiva sin ninguna o poca a 20 para roca muy fracturada con diferentes sistemas. Loset (1997), recomienda que las grietas formadas por voladura en túnel se incluyan en Jn como discontinuidades aleatorias. En rocas metamórficas el parámetro Jn a menudo se ve afectado por la foliación, esquistosidad, clivaje, se deberá tomar en cuenta al sistema de discontinuidad más desarrollada.

Tabla 18. Índice del número de discontinuidades – Clasificación Índice Q

Parámetro	Descripción	Valor
Jv	Roca Masiva, ninguna o pocas juntas	0.5 – 1.0
	Un sistema de juntas	2
	Un sistema de juntas más juntas esporádicas	3
	Dos sistemas de juntas	4
	Dos sistemas de juntas más juntas esporádicas	6
	Tres sistemas de juntas	9
	Tres sistemas de juntas más juntas esporádicas	12
	Cuatro o más sistemas de juntas, juntas aleatorias roca muy fracturada	15
	Roca triturada como suelo	20

Nota: para intersecciones de túneles usar 3 x Jn; para portales, usar 2 x Jn.

Jr – Índice de rugosidad de la discontinuidad

Representa la rugosidad característica de la discontinuidad, que va desde discontinuas con valor de 4, hasta 0.5 cuando se presenta estrías de fricción debido a la presencia de planos de falla.

Tabla 19. Índice de rugosidad de las discontinuidades – Clasificación Índice Q

Parámetro		Descripción	Valor
Jr	a) Paredes de las juntas en contacto.	Discontinuas	4
		Onduladas y lisas	2
	b) Paredes de juntas en contacto antes de un cizallamiento inferior a 10 cm.	Onduladas con estrías de fricción	1.5
		Planas, irregulares y rugosas	1.5
		Planas lisas	1.0
		Planas con estrías de fricción	0.5
	c) Paredes de juntas sin contacto después de un cizallamiento (ver nota)	Zonas con minerales arcillosos de espesor suficiente para impedir el contacto entre paredes	1.0
		Zonas arenosas y fragmentos con espesor suficiente para impedir el contacto entre paredes	1.0

Nota: adicione 1 si el espaciamiento entre el sistema principal de juntas fuese mayor a 3 metros.

Ja – Índice de alteración de las discontinuidades

Es el valor a la condición o el grado de alteración de las discontinuidades en el macizo rocoso; estas condiciones pueden ser: recubrimiento o patinas y relleno impermeable y el relleno mineral con espesor menor y mayor a 10 cm (cizallas).

Tabla 20. Índice de alteración de las discontinuidades – Clasificación Índice Q

Parámetro		Descripción	Valor
Ja	Paredes de juntas en contacto (solo patinas)	Sellada, dura, relleno impermeable. Ejem. cuarzo, epidota	0.75
		Superficie sana, apenas descoloridas	1.0
		Superficie ligeramente alteradas, sin minerales blandos arcilla ni roca desintegrada	2.0
		Superficie con recubrimientos limosos o arenosos	3.0
		Superficie con recubrimiento de arcilla o minerales de baja fricción, caolinita o micas; también clorita, talco, gipsita y poca cantidad de minerales expansivos	4.0
	Paredes de juntas en contacto inferior a 10 cm (relleno mineral delgado)	Relleno de partículas arenosas, sin minerales arcillosos o roca triturada	4.0
		Relleno de arcilla dura, menos de 5 mm de espesor	6.0
		Relleno de arcilla blanda medianamente consolidada, menos de 5 mm de espesor	8.0
		Relleno de arcilla expansiva, menor de 5 mm de espesor; valor de Ja dependerá del % de arcilla expansiva y acceso de agua.	8.0 – 12.0
	Paredes de juntas sin contacto (relleno mineral grueso)	Relleno de arcilla, más de 5 mm de espesor, zonas desintegradas y roca fragmentada	6 , 8 o 8 - 12
		Relleno de arcilla dura y pequeña fracción de minerales arcillosos, más de 5 mm de espesor	5.0
		Relleno de arcilla espesa, más de 5 mm de espesor	10 , 13 o 13 - 20

Jw – Factor de reducción debido a la presencia de agua

Representa la cantidad de agua subterránea que se presenta en el macizo rocoso; el valor de Jw varía de 0.05 para flujos excepcionales sin disminución significativa a 1.0 para condiciones secas o entradas menores.

La presencia de agua en el macizo rocoso, tiene un efecto adverso en la resistencia y provoca meteorización que puede alterar la permeabilidad del mismo.

Tabla 21. Factor de reducción debido a presencia de agua – Clasificación Índice Q

Parámetro	Descripción	Presión kg/cm²	Valor
Jw	Excavación seca o goteo, menor a 5 l/min	<1.0	1
	Caudal o presión media, puede lavar el relleno de las juntas	1.0 – 2.5	0.66
	Caudal o presión alta en roca competente en juntas no rellenadas	2.5 – 10.0	0.5
	Caudal o presión alto, considerable lavado de las juntas	2.5 – 10.0	0.33
	Caudales excepcionales después de la detonación, decreciendo con el tiempo	> 10	0.2 – 0.1
	Caudales excepcionales después de la detonación, sin disminución significativa	> 10	0.1 – 0.05

Nota: las tres últimas categorías son estimaciones groseras. Auméntese **Jw** si se instalara dispositivos de drenaje.

SRF – Factor de reducción debido a las tensiones en el macizo rocoso

Es un coeficiente que representa el efecto de las tensiones que actúan sobre la masa rocosa (cobertura de roca sobre el túnel), varía de 0.5 para tensiones altas en roca competente a 400 en deformaciones por estallidos violentos en roca masiva.

El factor SRF, está dividido en 4 parámetros:

- Zonas de debilidad que interceptan la excavación (cizallas).
- Roca competente, problemas de tensión en el macizo rocoso (cobertura)
- Flujo plástico de rocas incompetentes bajo la influencia de altas presiones litoestáticas.
- Terrenos expansivos.

Zonas de debilidad que interceptan en la excavación: es una parte o zona del macizo rocoso en la que las propiedades mecánicas son bajas que en los que se encuentra en la masa de roca circundante. Estas zonas de debilidad pueden ser cizallas, falla de tipo tijera, capas de minerales débiles etc. (NGI, 2000).

Básicamente, existen dos grandes grupos de zonas de debilidad: 1) aquellos, que se forma a partir de eventos tectónicos, y 2) aquellos que consiste en materiales débiles formados por otros procesos, tales como la intemperie, actividad hidrotermal y alteración.

Roca competente, problemas de tensión en el macizo rocoso: este parámetro hace referencia a la tensión de la roca y la resistencia del macizo rocoso en una excavación subterránea. Las características básicas cuando hay problemas de tensión son: 1) Caída de bloques y 2) Sobrecarga de rocas frágiles y masivas (derrumbes, desprendimientos etc.)

Terreno Fluyente. Flujo plástico de rocas incompetentes bajo la influencia de altas presiones litoestáticas: es cuando capas de arcillas se inyecta en la roca, debido a la presión litoestática (cobertura) lo que provoca desplazamiento lateral y fracturación, separándola en grandes bloques entre las cuales se penetra la arcilla. Este fenómeno es llamado “squeezing rock” (exprimir roca) lo que provoca que la roca sea incompetente.

Terrenos expansivos. Expansión en función de la presencia de agua: esta propiedad depende de las condiciones geológicas locales. La hinchazón de roca ocurre en zonas de debilidad y en rocas alteradas que contengan arcilla expansiva (montmorillorita) que reacciona con el agua.

**Tabla 22. Factor de reducción debido a presencia de tensiones en el macizo rocoso
– Clasificación Índice Q**

Parámetro		Descripción	Valor
SRF	Zona de débiles que interceptan la excavación (Ver nota).	Abundantes zonas de debilidad que contiene milonitas con arcilla o roca químicamente desintegrada, mucho material suelto en la superficie de la roca (cualquier profundidad)	10
		Zonas de debilidad aisladas, con arcilla o roca desintegrada (profundidad menor a 50 m)	5
		Zonas de debilidad aisladas, con arcilla o roca desintegrada (profundidad mayor a 50 m)	2.5
		Abundantes zonas de cizallas en roca competente, arcilla; material suelto alrededor de la roca (cualquier profundidad)	7.5
		Zonas cizalladas aisladas, en roca competente, sin arcilla (profundidad menor 50 m)	5.0
		Zonas de cizallas aisladas, en roca competente, sin arcilla (profundidad mayor 50 m)	2.5
		Roca muy fragmentada, juntas abiertas, roca triturada (cualquier profundidad)	5.0
	Roca competente; problemas de esfuerzo en el macizo	Tensión baja, pequeña cobertura (cerca de la superficie) $\sigma_c / \sigma_1 = > 200$ - $\sigma_e / \sigma_c = < 0.01$	2.5
		Tensión media, condiciones tensionales favorables $\sigma_c / \sigma_1 = 200 - 10$ $\sigma_e / \sigma_c = 0.01 - 0.3$	1
		Tensiones elevadas, estructuras compactas, favorables para la estabilidad para los hastiales $\sigma_c / \sigma_1 = 10 - 5$ $\sigma_e / \sigma_c = 0.3 - 0.4$	0.5 – 2
		Lajamiento moderado después de una hora en rocas masivas $\sigma_c / \sigma_1 = 5 - 3$ $\sigma_e / \sigma_c = 0.5 - 0.65$	5 – 50
		Lajamiento y estallido después de unos minutos en rocas masiva $\sigma_c / \sigma_1 = 3 - 2$ $\sigma_e / \sigma_c = 0.65 - 1$	50 – 200
		Estallidos violentos (deformación explosiva) y deformación dinámica inmediata en rocas masivas $\sigma_c / \sigma_1 = < 2$ - $\sigma_e / \sigma_c = > 1.0$	200 – 400
	Terreno fluyente (squeezing rock); flujo plástico de roca incompetentes bajo la influencia de altas presiones litoestática	Moderado "squeezing" con bajas presiones litoestática $\sigma_e / \sigma_3 = 1 - 5$	5 – 10
		Intenso "squeezing" con altas presiones litoestática $\sigma_e / \sigma_3 = > 5$	10 - 20
	Terrenos expansivo: expansión en función de la presencia de agua	Moderada presión de expansión de roca	5 – 10
		Intensa presión de expansión de roca	10 – 15

Nota: redúzcase estos valores de SRF en 25 – 50% si las zonas de corte relevantes influyen solamente y no interceptan la excavación.

7.3.2. Definición del Sostenimiento - Diámetro Equivalente

Para definir el sostenimiento adecuado para la construcción de una estructura subterránea Barton et al (1974), creó un parámetro al que llamo Diámetro Equivalente en función de las dimensiones de la sección de excavación.

$$De = \frac{H. \max}{ERS}$$

Dónde:

De = Diámetro Equivalente

H. máx.= Ancho, diámetro o altura máxima de excavación

ERS = Relación de Sostenimiento de una excavación

ERS: es un factor que está relacionado con la utilidad prevista que va a tener la obra subterránea a construirse. Barton y Grimstad, designaron los siguientes valores:

Tabla 23. Relación de sostenimiento de una excavación (ERS) – Clasificación Índice Q

Tipo de Excavación	ERS
A. Excavaciones mineras provisionales	2 - 5
B. Excavaciones mineras permanentes, túneles de conducción de agua para obras hidroeléctricas (con excepción de las cámaras de alta presión para compuertas), túneles piloto (exploración), excavaciones parciales para cámaras subterráneas grandes.	1.6 – 2.0
C. Cavernas de almacenamiento, plantas de tratamiento de aguas, túneles de carreteros y ferrocarriles pequeños, cámaras de alta presión, túneles auxiliares.	1.2 – 1.3
D. Casas de máquinas, túneles carreteros y ferrocarriles mayores, refugios de defensa civil, portales y cruces de túnel	0.9 – 1.1
E. Estaciones nucleares eléctricas subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones para deportes y reuniones, fabricas.	0.5 – 0.8

El ERS representa un factor de seguridad que debe de adoptarse, a menor ERS, mayor es la importancia y riesgo de una excavación.

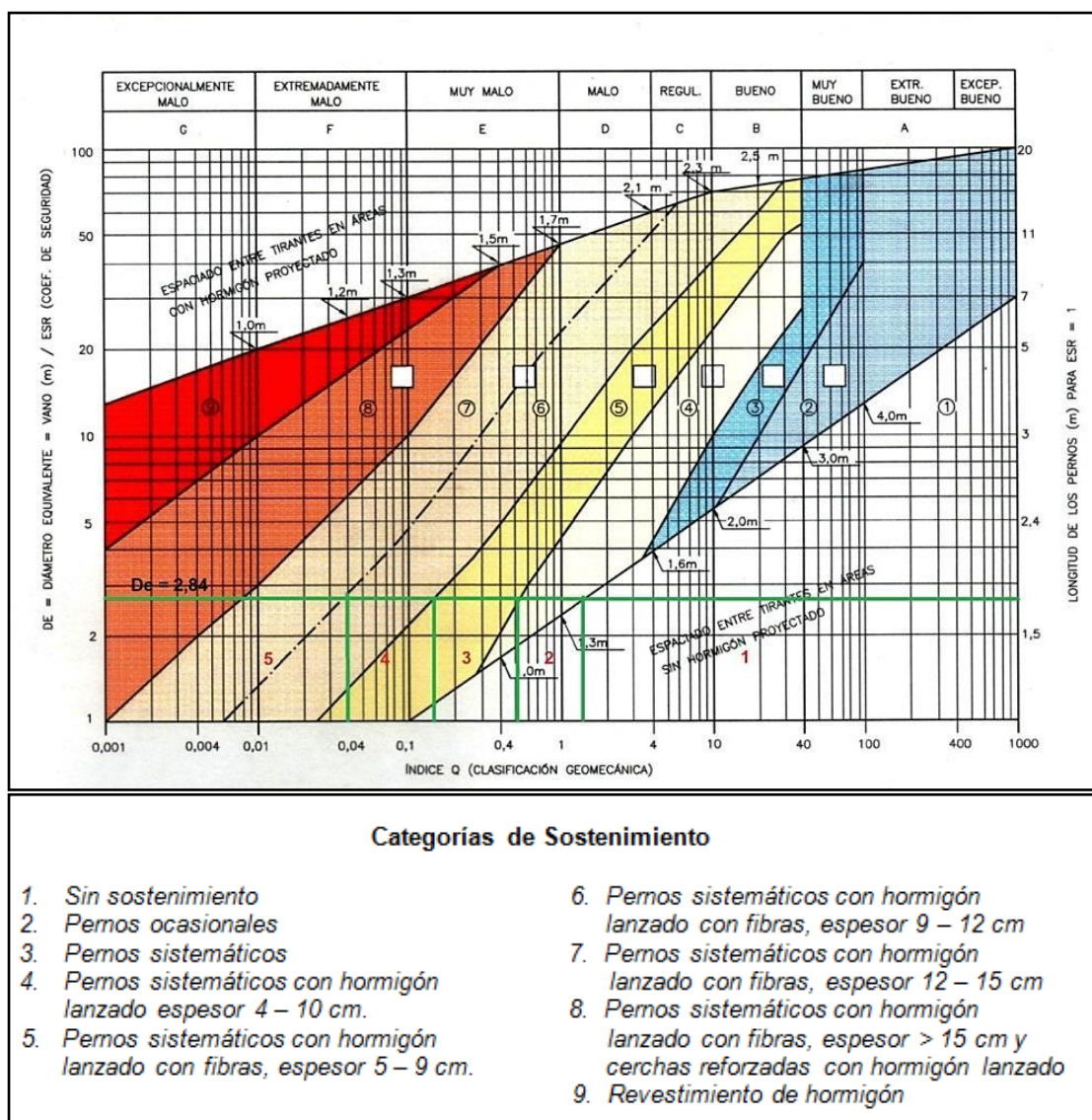
La sección teórica de excavación del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo, por el método clásico perforación – voladura es la siguiente:

Tabla 24. Diámetro Equivalente del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo – Clasificación Índice Q

Obra	Dimensiones		ERS	Diámetro Equivalente (De)	
	Ancho (m)	Alto (m)		Ancho (m)	Alto (m)
Túnel de Carga Pilatón Sarapullo	4.40	4.55	1.6	2.75	2.84

Se toma en cuenta la dimensión mayor del túnel (Alto 4.55 m) y un ERS = 1.6 estos nos da un Diámetro Equivalente de 2.84 m. Una vez obtenido el valor del Diámetro Equivalente, se utiliza el Abaco de Barton-Grimstad (1993), para definir los rangos del Índice Q.

Tabla 25. Ábaco de sostenimiento del Índice Q de Barton (Barton – Grimstad, 1993)



Analizando los rangos de Índice Q, se ha definidos las Clases de Sostenimiento, que pueden ser utilizado para el macizo rocoso que se encuentra a lo largo del eje del Túnel de Carga Pilatón – Sarapullo.

Tabla 26. Clases de macizo rocoso según los rangos de Índice Q y sus respectivos elementos de sostenimiento para el Túnel de Carga Pilatón Sarapullo

Túnel	Índice Q	Clase de macizo rocoso	Elementos de sostenimiento	
			Pernos	Hormigón
Pilatón Sarapullo	>1.7	I	-----	-----
	0.6 – 1.7	II	SL = 1.80 - D = 130	HL = 4 - 10 cm
	0.17 – 0.6	III	SL = 1.80 - D = 2.50	HLF = 5 - 9 cm
	0.04 – 0.17	IV	SL = 1.80 - D = 2.30	HLF = 9 - 12 cm
	<0.04	V	SL = 1.80 - D = 2.10	HLF = 12 - 15 cm

Para la valoración del macizo rocoso y la definición de la clase de sostenimiento del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo se utilizó la clasificación geomecánica del RMR de Bieniawski. Para la utilización del Índice Q de Barton, se tomó en cuenta las nueve clases de macizo rocoso desde roca excepcionalmente buena a roca excepcionalmente mala:

Tabla 27. Clases de macizo rocosos según la Clasificación Índice Q

Valor de Q	Clase de Roca
0.001 – 0.01	Roca excepcionalmente mala
0.01 – 0.1	Roca extremadamente mala
0.1 – 1	Roca muy mala
1 – 4	Roca mala
4 – 10	Roca regular
10 – 40	Roca buena
40 – 100	Roca muy buena
100 – 400	Roca extremadamente buena
400 – 1000	Roca excepcionalmente buena

8. VALORACIÓN GEOMECÁNICA DEL TÚNEL DE CARGA PILATÓN SARAPULLO - AGUAS ABAJO. ABSCISAS 5+100.00 – 4+600.00

Para determinar el índice de calidad de roca, se realizó la valoración geomecánica en cada tramo de excavación del túnel utilizando las clasificaciones geomecánicas de RMR (Bieniawski, 1989) y del índice Q (Barton, 1993). Se tomaron en cuenta 20 de los 131 levantamientos, correspondientes a los 500 metros de túnel propuestos en este trabajo de investigación, donde se describió de manera detallada las condiciones geológicas, parámetros geotécnicos, clase de macizo rocoso, tipo de sostenimiento y la correlación entre ambas clasificaciones geomecánicas. Se tomó en consideración la clasificación del RMR para la aplicación del tipo de sostenimiento.

Junto con esta descripción se realizó de manera sistemática levantamientos de las estructuras geológicas principales a medida que avanzaba la excavación del túnel (ver en Anexos). Los parámetros que se utilizaron para la realización del levantamiento geológico – geotécnico fueron los siguientes:

- Litología
- Resistencia de la roca intacta (valor supuesto mediante golpe con el martillo geológico).
- Grado de alteración o meteorización.
- RQD.
- Clasificación, orientación y persistencia de las discontinuidades.
- Abertura de las discontinuidades y características del material relleno.
- Tipo de rugosidad de las discontinuidades.
- Presencia de agua subterránea.

Existen diversas correlaciones entre las clasificaciones de RMR y el índice Q, la más utilizada es la propuesta por Bieniawski en 1989. Con esta correlación de Bieniawski, 1989 existe una mayor dispersión de valores de 18.2 y 106.2.

$$\text{RMR} = 9 \ln Q + 44$$

$$Q = e^{(\text{RMR} - 44) / 9}$$

En la correlación propuesta por Barton, 1995 la dispersión de valores es menor de 5 y 95. En los estudios previos de diseño y de factibilidad se busca macizos de buena calidad, y ya en la etapa de construcción la mayor parte de los macizos rocosos son rocas que tienen clasificación regular. Para estos casos es mejor contar con una correlación de números enteros que para efectos prácticos en el campo es más manejable. Correlación propuesta por Barton, 1995:

$$\text{RMR} = 15 \log Q + 50$$

$$Q = 10^{(\text{RMR} - 50) / 15}$$

Nota: 1) se toma en consideración la litología descrita en el túnel en el momento del levantamiento y 2) se utiliza la correlación de Barton, 1995.

Abscisa 5+100.00 – 5+098.00

La litología presente en este tramo de excavación fue una granodiorita con presencia de vetillas de cuarzo y epidota con un espesor de < 5 mm, textura plana-rugosas, ligeramente alterada con una resistencia entre 100 – 250 Mpa y RQD de 75.4 %. Se observaron dos familias de discontinuidades más aleatorias y flujo de agua en el hastial derecho aproximadamente 25 l/seg, la bóveda se encuentre húmeda 0.1 l/seg. El estado tensional del macizo rocoso fue bajo (pequeña cobertura de roca sobre el túnel).

Tabla 28. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 5+100.00 – 5+098.00

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	100 – 250 Mpa	12
RQD - Índice de calidad de roca	75 – 90 %	17
Espaciado de las discontinuidades	Amplia = 0.6 – 2 m	15
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Liger. abiertas = 0.5 – 2.5 mm	4
- Rugosidad	Rugosa	5
- Relleno	Duro < 5 mm	4
- Meteorización	Ligeramente Alterada	5
Condición de agua subterránea	Goteo = 25 – 125 l/seg	4
RMR básico		68
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-5
RMR ajustado		63
Clase de Macizo Rocosos: Roca Buena Clase II		
Tipo de Sostenimiento II		

Tabla 29. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 5+100.00 – 5+098.00

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	12	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 – 3.3 * Jv	75.4	
Jn - Número de familias de juntas	6	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 6.631
Ja - alteración y relleno de juntas	0.75	
Jw - factor redu. presencia de agua	0.5	Clase de Macizo Rocosos
SRF - factor red. tensión en el macizo	2.5	
		Roca Regular III

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 30. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 5+100.00 – 5+098.00

RMR en función de Q	62	Roca Buena Clase II
Q en función de RMR	7.35	Roca Regular Clase III

Las discontinuidades observadas en este tramo fueron:

- Discontinuidades principal: **F5** (-5) 230/60 - N50°W/60°SW.
- Discontinuidades secundarias: **F5** (-5) 190/50 – N10°W/50°SW y 250/80 – N70°W/80SW.

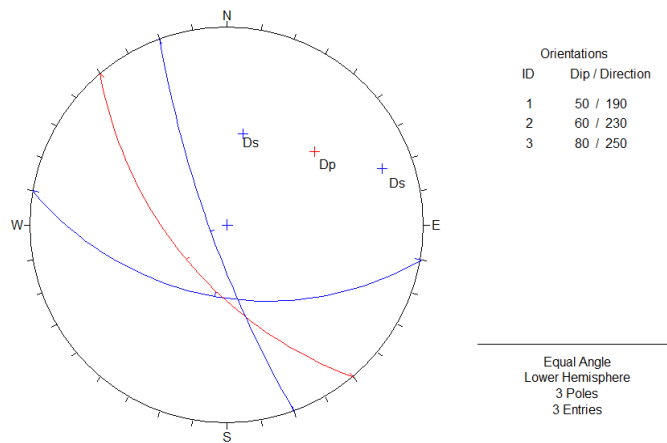


Figura 13. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 5+100.00 – 5+098.00

Abscisa 5+063.00 – 5+058.20

La litología presente en este tramo de excavación fue una granodiorita con presencia de vetillas de cuarzo y epidota con espesor de < 5 mm, textura plana-rugosa, ligeramente alterada con una resistencia a la compresión simple de 100 – 250 Mpa y RQD de 75.4%. Se observaron dos familias de discontinuidades más aleatorias y presencia de húmeda en el hastial derecho 0.1 l/seg. El estado tensional del macizo rocoso fue bajo (pequeña cobertura de roca sobre el túnel).

Tabla 31. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 5+063.00 – 5+058.20

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	100 – 250 Mpa	12
RQD - Índice de calidad de roca	75 – 90 %	17
Espaciado de las discontinuidades	Amplia = 0.6 – 2 m	15
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Juntas = 0.1 – 0.5 mm	5
- Rugosidad	Rugosa	5
- Relleno	Duro < 5 mm	4
- Meteorización	Ligeramente Alterada	5
Condición de agua subterránea	Húmedo = < 10 l/seg	10
RMR básico		75
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-5
RMR ajustado		70
Clase de Macizo Rocosos: Roca Buena Clase II		
Tipo de Sostenimiento II		

Tabla 32. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 5+063.00 – 5+058.20

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	12	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 – 3.3 * Jv	75.4	
Jn - Número de familias de juntas	6	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 10,048
Ja - Alteración y relleno de juntas	0.75	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocosos
SRF - Factor red. tensión en el macizo	2.5	
		Roca Buena II

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 33. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 5+063.00 – 5+058.20

RMR en función de Q	65	Roca Buena Clase II
Q en función de RMR	21.54	Roca Buena Clase II

Las discontinuidades observas en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F1** (0) 40/80 – N50°W/80°NE. **F5** (-5) 290/65 – N20°E/65°NW.
- Discontinuidades secundarias: **F2** (-2) 20/40 – N70°W/40°NE. **F4** (-5) 140/40 – N50°E/40°SE.

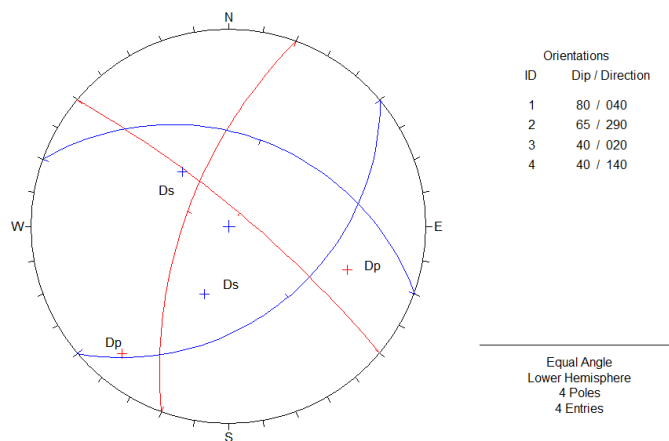


Figura 14. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 5+063.00 – 5+058.20

Abscisa 5+041.00 – 5+038.75

La litología presente este tramo de excavación fue una granodiorita con textura plana-rugosa, moderadamente alterada debido a la presencia de recubrimiento arcilloso de espesor de 0.2 cm en el hastial derecho y bóveda. La roca tiene una resistencia de 50 – 100 Mpa y RQD de 72.1 %. Se observaron dos familias de discontinuidades más aleatorias. Localmente se encuentra humedad en la bóveda < 0.1 l/seg. El estado tensional del macizo rocoso fue bajo.

Tabla 34. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 5+041.00 – 5+038.75

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	50 – 100 Mpa	7
RQD - Índice de calidad de roca	50 - 75 %	13
Espaciado de las discontinuidades	Amplia = 0.6 – 2 m	15
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Liger. abiertas = 0.1 – 0.5 mm	4
- Rugosidad	Rugosa	5
- Relleno	Blando < 5 mm	2
- Meteorización	Moderadamente Alterada	3
Condición de agua subterránea	Húmedo = < 10 l/seg	10
RMR básico		61
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-2
RMR ajustado		59
Clase de Macizo Rocos: Roca Regular Clase III		
Tipo de Sostenimiento III – IIIa		

Tabla 35. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 5+041.00 – 5+038.75

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	13	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 – 3.3 * Jv	72.1	
Jn - Número de familias de juntas	6	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 2.402
Ja - Alteración y relleno de juntas	3	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocos Roca Mala IV
SRF - Factor red. tensión en el macizo	2.5	

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 36. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 5+041.00 – 5+038.75

RMR en función de Q	55	Roca Mala Clase III
Q en función de RMR	3.98	Roca Mala Clase IV

Las discontinuidades observas en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F2** (-2) 120/30 – N30°E/30°SE y 10/60 – N80°W/60°NE. **F3** (-12) 180/60 – EW/60°S y 360/60 – EW/60°N
- Discontinuidades secundarias: **F1** (0) 130/40 – N40°E/40°SE. **F5** (-5) 05/40 – N85°W/40°NE.

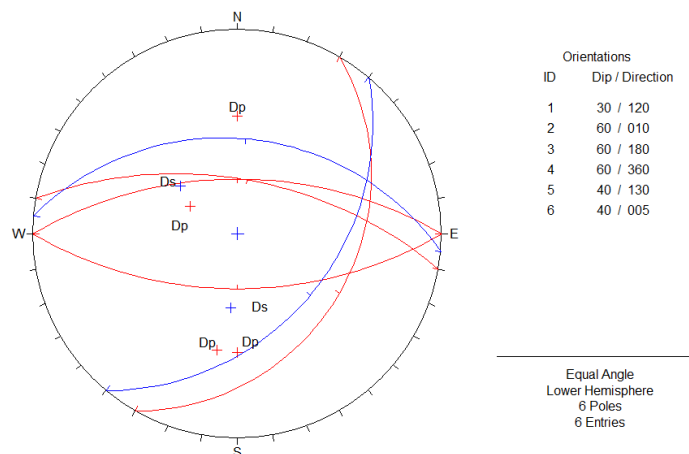


Figura 15. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 5+041.00 – 5+038.75

Abscisa 5+029.40 – 5+022.00

La litología presente en este tramo de excavación fue una granodiorita con vetillas de cuarzo y epidota con una textura plana-rugosa, ligeramente alterada. Se observó un dique andesítico que cruzaba toda la sección de excavación con espesor de 0.80 cm, el dique se encuentra en buen estado y masivo. La resistencia de la roca granodiorita y del dique andesítico fue 100 – 250 Mpa y RQD de 75.6 % con dos familias de discontinuidades más aleatorias. Localmente se encuentra humedad en la bóveda < 0.1 l/seg. El estado tensional del macizo rocoso fue bajo.

Tabla 37. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 5+029.40 – 5+022.00

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	100 - 250 Mpa	12
RQD - Índice de calidad de roca	75 - 90 %	17
Espaciado de las discontinuidades	Amplia = 0,6 – 2 m	15
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Juntas = 0.1 – 0.5 mm	5
- Rugosidad	Rugosa	5
- Relleno	Blando < 5 mm	4
- Meteorización	Ligeramente Alterada	5
Condición de agua subterránea	Húmedo = < 10 l/seg	10
RMR básico		75
Correlación por orientación de juntas (túneles)		0
RMR ajustado		75
Clase de Macizo Rocosos: Roca Buena Clase II		
Tipo de Sostenimiento II		

Tabla 38. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 5+029.40 – 5+022.00

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	12	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 - 3.3 * Jv	75.4	
Jn - Número de familias de juntas	6	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 10.048
Ja - Alteración y relleno de juntas	0.75	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocosos
SRF - Factor red. tensión en el macizo	2.5	
		Roca Buena II

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 39. Correlación entre RMR e Índice Q, Abcisa 5+029.40 – 5+022.00

RMR en función de Q	65	Roca Buena Clase II
Q en función de RMR	10	Roca Buena Clase II

Las discontinuidades observas en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F1** (0) dique andesítico 55/50 – N35°W/50°NE. **F3** (-12) 360/70 – N90°E/70°N, 355/45 – N85°E/45°NW y 180/60 – E90°W/60°S.
- Discontinuidades secundarias: **F1** (0) 85/50 – N05°W/50°NE y 100/60 – N10°E/60°SE. **F2** (-2) 70/40 – N20°W/40°NE. **F4** (-5) 160/40 – N70°E/40°SE.

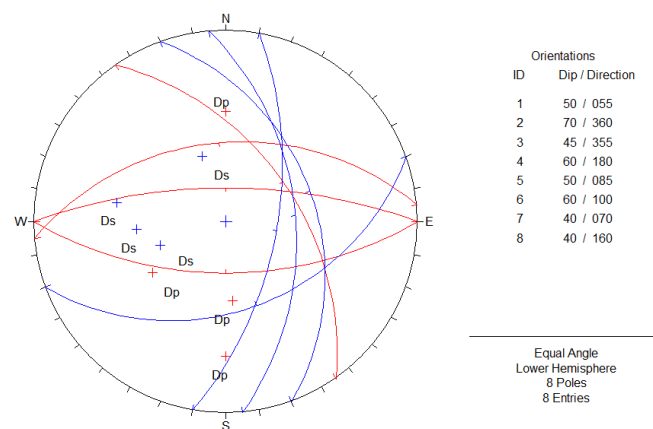


Figura 16. Estereograma de discontinuidades, Abcisa 5+029.40 – 5+022.00

Abscisa 5+014.50 – 5+011.00

En este tramo se encuentro un contacto entre granodiorita y andesita con una textura plana-rugosa, moderadamente alterada debido a la presencia de cizallas perpendiculares y paralelas al eje del túnel, con relleno arcilloso espesor de 0.4 cm, se observó patinas de óxidos en el frontón. La roca presento una resistencia de 50 – 100 Mpa y un RQD de 72.1 %. Se observaron dos familias de discontinuidades más aleatorias. Localmente se encuentro flujo de agua a presión media 10 l/seg en el hastial izquierdo.

Tabla 40. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 5+014.50 – 5+011.00

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	50 - 100 Mpa	7
RQD - Índice de calidad de roca	50 - 75 %	13
Espaciado de las discontinuidades	Amplia = 200 – 600 mm	10
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Abiertas = 2.5 - 10 mm	1
- Rugosidad	Rugosa	5
- Relleno	Blando < 5 mm	2
- Meteorización	Moderadamente Alterada	3
Condición de agua subterránea	Mojado = 10 - 25 l/seg	7
RMR básico		50
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-12
RMR ajustado		38
Clase de Macizo Rocoso: Roca Mala Clase IV		
Tipo de Sostenimiento IV		

Tabla 41. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 5+014.50 – 5+011.00

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	13	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 – 3.3 * Jv	72.1	
Jn - Número de familias de juntas	6	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 0.264
Ja - Alteración y relleno de juntas	6	
Jw - Factor red. presencia de agua	0.66	Clase de Macizo Rocoso
SRF - Factor red. tensión en el macizo	7.5	
		Roca Muy Mala V

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 42. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 5+014.50 – 5+011.00

RMR en función de Q	41	Roca Regular Clase III
Q en función de RMR	0.158	Roca Muy Mala Clase V

Las discontinuidades observas en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F1** (0) cizalla 55/80 – N35°W/80°NE. **F3** (-12) cizalla 170/60 – N80°E/60°SE. **F4** (-5) cizalla 335/40 – N65°E/40°NW.
- Discontinuidades secundarias: **F1** (0) 130/80 – N40°E/80°SE y 50/90 – N40°W/90°NE.

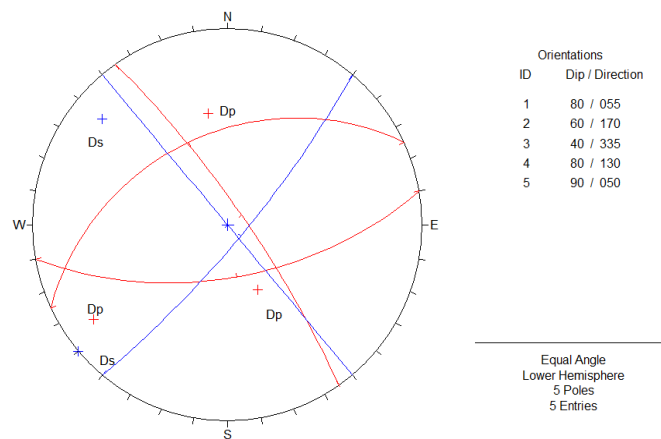


Figura 17. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 5+014.50 – 5+011.00

Abscisa 4+991.50 – 4+987.30

La litología presente en este tramo de excavación fue una andesita descomprimida (muy fracturada) con textura irregular-rugosa, altamente alterada debido a la presencia de cizallas paralelas y perpendiculares al eje del túnel con relleno arcilloso espesor de 0.4 cm, con una resistencia de 50 – 100 Mpa y un RQD de 52.3%. Se observó patinas oxidadas en la sección de excavación, vetillas de cuarzo – epidota y tres familias de discontinuidades. Localmente se encuentra humedad en hastiales, bóveda y frontón.

Tabla 43. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+991.50 – 4+987.30

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	50 - 100 Mpa	7
RQD - Índice de calidad de roca	25 - 50 %	8
Espaciado de las discontinuidades	Cerrada = 200 – 600 mm	8
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Abiertas = 2.5 - 10 mm	1
- Rugosidad	Liger. Rugosa	3
- Relleno	Blando < 5 mm	2
- Meteorización	Altamente Alterada	1
Condición de agua subterránea	Húmedo = <10 l/seg	10
RMR básico		42
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-5
RMR ajustado		37
Clase de Macizo Roco: Roca Mala Clase IV		
Tipo de Sostenimiento IV		

Tabla 44. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+991.50 – 4+987.30

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	21	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 - 3.3 * Jv	45.7	
Jn - Número de familias de juntas	9	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 0.253
Ja - Alteración y relleno de juntas	6	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Roco
SRF - Factor red. tensión en el macizo	5	
		Roca Muy Mala V

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 45. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+991.50 – 4+987.30

RMR en función de Q	41	Roca Regular Clase III
Q en función de RMR	0.135	Roca Muy Mala Clase V

Las discontinuidades observas en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F1** (0) cizalla 140/65 – N50°E/65°SE. **F4** (-5) 160/40 – N70°E/40°SE. **F5** (-5) cizalla 255/65 – N15°W/65°SW y 180/65 – N90°W/65°S.
- Discontinuidades secundarias: **F1** (0) 20/70 – E70°W/70°NW

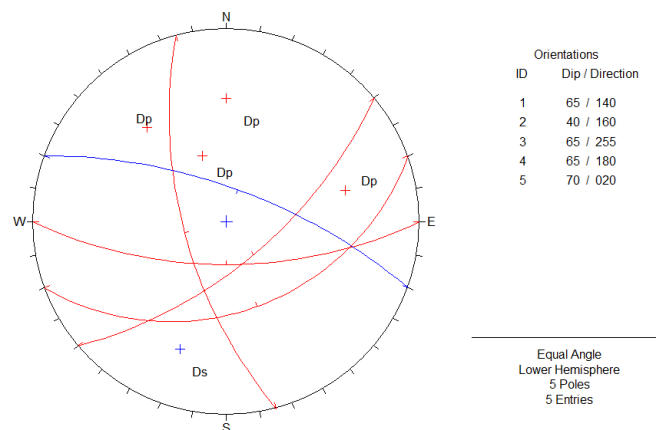


Figura 18. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+991.50 – 4+987.30

Abscisa 4+969.10 – 4+966.60

La litología presente en este tramo de excavación fue una andesita descomprimida (muy fracturada), con textura rugosa irregular y presencia de cizallas de 0.4 cm de espesor, vetillas de cuarzo y epidota. La resistencia de la roca comprobada por ensayo de compresión simple fue 65.53 Mpa y RQD de 62.2 %. Se observó recubrimiento arcilloso en toda la sección de excavación, tres familias de discontinuidades y humedad en la bóveda 0.1 l/seg.

Tabla 46. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+969.10 – 4+966.60

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	50 - 100 Mpa	7
RQD - Índice de calidad de roca	50 - 75 %	13
Espaciado de las discontinuidades	Cerrada = 200 – 600 mm	8
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Abiertas = 2.5 - 10 mm	1
- Rugosidad	Liger. Rugosa	3
- Relleno	Blando < 5 mm	2
- Meteorización	Moderadamente Alterada	1
Condición de agua subterránea	Húmedo = <10 l/seg	10
RMR básico		49
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-12
RMR ajustado		37
Clase de Macizo Rocoso: Roca Mala Clase IV		
Tipo de Sostenimiento IV		

Tabla 47. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+969.10 – 4+966.60

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	16	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 - 3.3 * Jv	62.2	
Jn - Número de familias de juntas	9	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 0.691
Ja - Alteración y relleno de juntas	6	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocoso Roca Muy Mala V
SRF - Factor red. tensión en el macizo	2.5	

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 48. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+969.10 – 4+966.60

RMR en función de Q	47	Roca Regular Clase III
Q en función de RMR	0.135	Roca Muy Mala Clase V

Las discontinuidades observas en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F1** (0) 20/70 – N70°W/70°NE. **F3** (-12) 180/60 – EW/60°S, 325/80 – N35°E/80°NW y cizalla 140/60 – N50°E/60°SE.
- Discontinuidades secundarias: **F4** (-5) 160/40 – N70°E/40°SE. **F5** (-5) 310/70 – N40°E/70°NW.

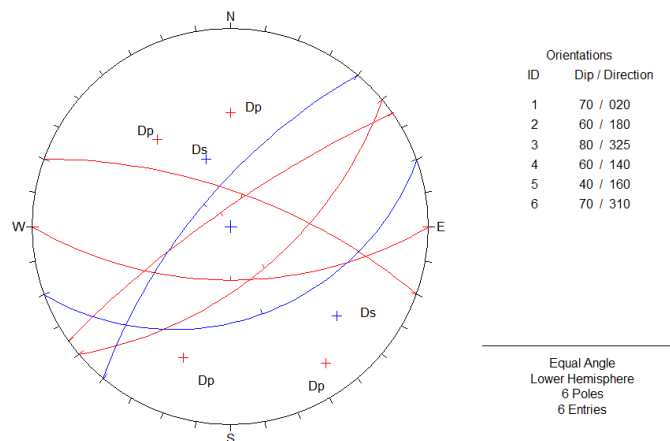


Figura 19. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+969.10 – 4+966.60

Abscisa 4+951.80 – 4+947.50

La litología presente en este tramo de excavación fue una andesita descomprimida (muy fracturada), en la bóveda se observó estrías de fricción (movimientos tectónicos), altamente alterada, la superficie de la roca tiene una textura irregular rugosa y recubrimiento arcilloso. La resistencia de la roca fue 50 – 100 Mpa y RQD de 55.6 %. Se observó 3 familias de discontinuidades. Localmente se presentó humedad en la bóveda 0.1 l/seg. El estado tensional del macizo rocoso fue bajo.

Tabla 49. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+951.80 – 4+947.50

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	50 - 100 Mpa	7
RQD - Índice de calidad de roca	50 - 75 %	13
Espaciado de las discontinuidades	Cerrada = 200 – 600 mm	8
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Liger. abierta = 0,5 – 2,5 mm	4
- Rugosidad	Liger. Rugosa	3
- Relleno	Blando < 5 mm	2
- Meteorización	Altamente Alterada	1
Condición de agua subterránea	Húmedo = <10 l/seg	10
RMR básico		50
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-10
RMR ajustado		40
Clase de Macizo Rocosos: Roca Mala Clase IV		
Tipo de Sostenimiento IV		

Tabla 50. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+951.80 – 4+947.50

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	18	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 - 3.3 * Jv	55.6	
Jn - Número de familias de juntas	12	
Jr - Rugosidad de juntas	0.5	Q = 0.307
Ja - Alteración y relleno de juntas	3	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocosos
SRF - Factor red. tensión en el macizo	2.5	
		Roca Muy Mala V

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 51. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+951.80 – 4+947.50

RMR en función de Q	42	Roca Regular Clase III
Q en función de RMR	0.215	Roca Muy Mala Clase V

Las discontinuidades observas en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F1** (0) 115/60 – N25°E/60°SE. **F3** (-12) 336/70 – N66°E/70°NW. **F5** (-5) 185/65 – S05°E/65°SW. **F6** (-10) 250/40 – N70°W/40°SW.
- Discontinuidades secundarias: **F1** (0) 110/80 – N20°E/80°SE. **F4** (-5) 160/40 – N70°E/40°SE. **F5** (-5) 310/50 – N40°E/50°NW.

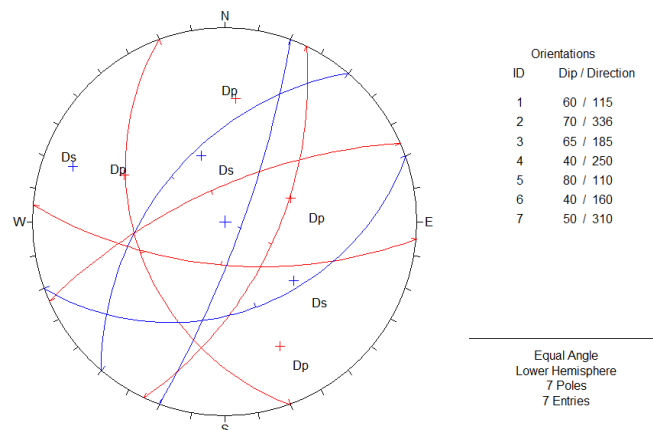


Figura 20. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+951.80 – 4+947.50

Abscisa 4+945.00 – 4+941.00

La litología presente en este tramo de excavación fue una andesita (descomprimida) de textura plana lisa con recubrimiento de óxidos y velillas de cuarzo, moderadamente alterada debido a la presencia de cizallas con relleno arcilloso espesor de 0.4 cm perpendiculares al eje del túnel. La resistencia de la roca fue 50 – 100 Mpa y RQD de 49 %. Se observó tres familias de discontinuidades. Localmente se encuentra húmeda la bóveda 0.1 l/seg. (Ver fotos en anexos).

Tabla 52. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+945.00 – 4+941.00

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	50 - 100 Mpa	7
RQD - Índice de calidad de roca	25 - 50 %	8
Espaciado de las discontinuidades	Cerrada = 200 – 600 mm	8
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Liger. abierta = 0.5 – 2.5 mm	4
- Rugosidad	Lisa	1
- Relleno	Blando < 5 mm	2
- Meteorización	Moderadamente Alterada	3
Condición de agua subterránea	Húmedo = <10 l/seg	10
RMR básico		45
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-10
RMR ajustado		35
Clase de Macizo Rocoso: Roca Mala Clase IV		
Tipo de Sostenimiento IV		

Tabla 53. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+945.00 – 4+941.00

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	20	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 - 3.3 * Jv	49	
Jn - Número de familias de juntas	9	
Jr - Rugosidad de juntas	1	Q = 0,272
Ja - Alteración y relleno de juntas	6	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocoso
SRF - Factor red. tensión en el macizo	5	
		Roca Muy Mala V

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 54. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+945.00 – 4+941.00

RMR en función de Q	41	Roca Regular Clase III
Q en función de RMR	0.1	Roca Muy Mala Clase V

Las discontinuidades observas en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F1** (0)135/60 – N45°E/60°SE y 360/20 – EW/20°N. **F3** (-12) cizalla 335/63 – N65°E/63°NW. **F5** (-5) 180/65 – EW/65°S. **F6** (-10) 310/60 – N40°E/60°NW y cizalla 245/30 – N65°W/30°SW.

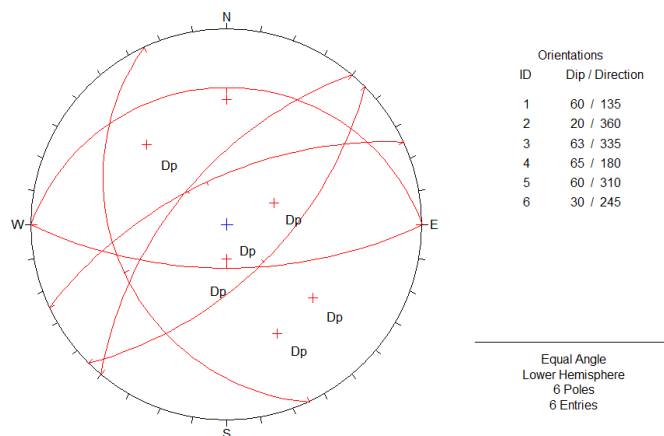


Figura 21. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+945.00 – 4+941.00

Abscisa 4+934.45 – 4+932.00

La litología presente en este tramo de excavación corresponde a una andesita (descomprimida) de textura rugosa-irregular con recubrimiento de óxidos y velillas de cuarzo, moderadamente alterada debido a cizallas que interceptaron la excavación con relleno arcilloso espesor de 0.4 cm perpendiculares al eje del túnel. La resistencia de la roca fue 25 – 50 Mpa y RQD de 49 %. Se observaron tres familias de discontinuidades. El macizo rocoso se encuentra seco.

Tabla 55. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+934.45 – 4+932.00

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	25 - 50 Mpa	4
RQD - Índice de calidad de roca	25 - 50 %	8
Espaciado de las discontinuidades	Moder. = 200 – 600 mm	8
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Liger. abierta = 0.5 – 2.5 mm	4
- Rugosidad	Liger. rugosa	3
- Relleno	Blando < 5 mm	2
- Meteorización	Moderadamente Alterada	3
Condición de agua subterránea	Completamente seco	15
RMR básico		49
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-10
RMR ajustado		39
Clase de Macizo Rocos: Roca Mala Clase IV		
Tipo de Sostenimiento IV		

Tabla 56. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+934.45 – 4+932.00

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	20	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 - 3.3 * Jv	49	
Jn - Número de familias de juntas	9	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 0.176
Ja - Alteración y relleno de juntas	6	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocos
SRF - Factor red. tensión en el macizo	7.5	
		Roca Muy Mala V

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 57. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+934.45 – 4+932.00

RMR en función de Q	38	Roca Mala Clase IV
Q en función de RMR	0.184	Roca Muy Mala Clase V

Las discontinuidades observas en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F2** (-2) cizalla 30/30 – N60°W/30°NE. **F5** (-5) 300/65 – N30°E/65°NW, 190/80 – N10°W/80°SW y cizalla 280/60 – N10°E/60°NW. **F6** (-10) cizalla 256/45 – N76°W/45°SW.

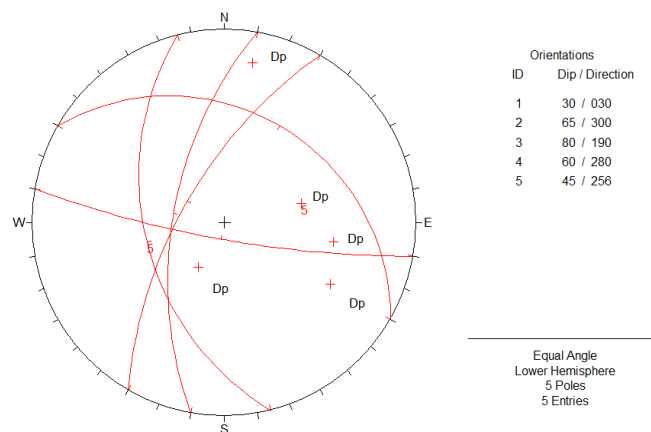


Figura 22. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+934.45 – 4+932.00

Abscisa 4+916.70 – 4+913.20

La litología presente en este tramo de excavación fue una andesita con una textura plana-rugosa, moderadamente alterada y con recubrimiento arcilloso espesor de 0.4 cm. La resistencia de la roca fue 50 – 100 Mpa y RQD de 65.5 %. Se observaron tres familias de discontinuidades. Localmente se encuentra flujo de agua a presión media 10 l/seg en la bóveda. El estado tensional del macizo rocoso fue bajo.

Tabla 58. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+916.70 – 4+913.20

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	50 - 100 Mpa	7
RQD - Índice de calidad de roca	50 - 75 %	13
Espaciado de las discontinuidades	Cerrada = 60 – 200 mm	8
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Abierta = 0.5 – 2.5 mm	1
- Rugosidad	Liger. rugosa	3
- Relleno	Blando < 5 mm	2
- Meteorización	Moderadamente Alterada	3
Condición de agua subterránea	Mojado = 10 – 25 l/seg	7
RMR básico		46
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-10
RMR ajustado		36

Tabla 59. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+916.70 – 4+913.20

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	15	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 - 3.3 * Jv	65.5	
Jn - Número de familias de juntas	9	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 0.959
Ja - Alteración y relleno de juntas	3	
Jw - Factor red. presencia de agua	0.66	Clase de Macizo Rocosos Roca Muy Mala V
SRF - Factor red. tensión en el macizo	2.5	

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 60. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+916.70 – 4+913.20

RMR en función de Q	49	Roca Regular Clase III
Q en función de RMR	0.116	Roca Muy Mala Clase V

Las discontinuidades observadas en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F3** (-12) 335/75 – N65°E/75°NW. **F5** (-5) 175/60 –N85°E/60°SE. **F6** (-10) 265/40 – N85°W/40°SW y 200/30 – S20°E/30°SW.
- Discontinuidades secundarias: **F1** (0) 50/80 – N40°W/80°NW. **F5** (-5) 295/60 – N25°E/60°NE.

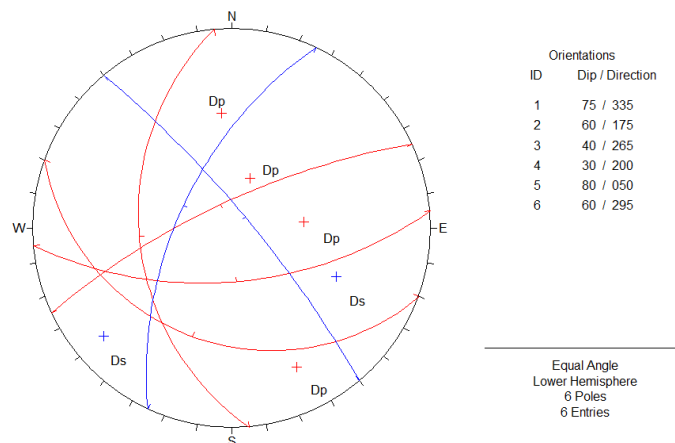


Figura 23. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+916.70 – 4+913.20

Abscisa 4+888.00 – 4+885.00

La litología presente en este tramo de excavación fue una andesita muy fracturada con superficie plana-rugosa, altamente alterada debido a cizallas rellenas de material arcilloso rígido, espesor de 0.80 cm que interceptaron la excavación. La resistencia de la roca fue 25 – 50 Mpa y un RQD de 39.1 %. Se observaron tres familias de discontinuidades. Se presentó localmente humedad en la bóveda 0.1 l/seg.

Tabla 61. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+888.00 – 4+885.00

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	25 - 50 Mpa	4
RQD - Índice de calidad de roca	25 - 50 %	8
Espaciado de las discontinuidades	Cerrada = 60 – 200 mm	8
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Abierta = 0.5 – 2.5 mm	1
- Rugosidad	Liger. rugosa	3
- Relleno	Blando > 5 mm	0
- Meteorización	Altamente Alterada	1
Condición de agua subterránea	Húmedo = < 10 l/seg	10
RMR básico		37
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-10
RMR ajustado		27

Tabla 62. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+888.00 – 4+885.00

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	23	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 – 3.3 * Jv	39.1	
Jn - Número de familias de juntas	9	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 0.130
Ja - Alteración y relleno de juntas	5	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocoso Roca Muy Mala V
SRF - Factor red. tensión en el macizo	10	

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 63. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+888.00 – 4+885.00

RMR en función de Q	36	Roca Mala Clase IV
Q en función de RMR	0.029	Roca Extremadamente Mala Clase V

Las discontinuidades observadas en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F2** (-2) cizalla 15/30 – S75°E/30°NE. **F3** (-12) 175/80 – N85°E/80°NW. **F6** (-10) 248/40 – S68°E/40°SW y cizalla 280/40 – N10°E/40°NW.
- Discontinuidades secundarias: **F3** (-12) 335/60 – N65°E/60°NW. **F4** (-5) 320/30 – N50°E/30°NW.

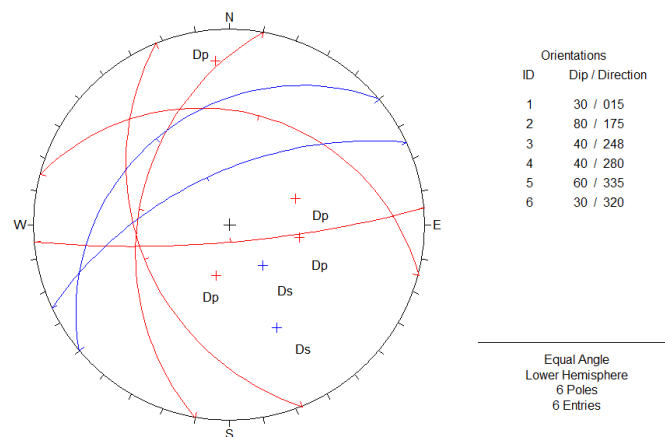


Figura 24. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+888.00 – 4+885.00

Abscisa 4+864.00 – 4+862.00

La litología presente en este tramo de excavación fue una andesita con vetillas de epidota de textura plana-rugosa, moderadamente alterada debido a recubrimiento arcilloso espesor de 0.4 cm y patinas oxidadas en la toda la sección de excavación. La resistencia de la roca mediante ensayo de compresión simple fue 56.00 Mpa y RQD de 49 %. Se observaron tres familias de discontinuidades. Localmente se presentó humedad en la bóveda 0.1 l/seg. El estado tensional del macizo rocoso fue bajo.

Tabla 64. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+864.00 – 4+862.00

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	50 - 100 Mpa	7
RQD - Índice de calidad de roca	25 - 50 %	8
Espaciado de las discontinuidades	Cerrada = 60 – 200 mm	8
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Abierta = 0.5 – 2.5 mm	1
- Rugosidad	Liger. rugosa	3
- Relleno	Blando < 5 mm	2
- Meteorización	Moderadamente Alterada	3
Condición de agua subterránea	Húmedo = < 10 l/seg	10
RMR básico		44
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-10
RMR ajustado		34

Tabla 65. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+864.00 – 4+862.00

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	20	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 – 3.3 * Jv	49	
Jn - Número de familias de juntas	9	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 1.088
Ja - Alteración y relleno de juntas	3	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocosos Roca Mala IV
SRF - Factor red. tensión en el macizo	2.5	

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 66. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+864.00 – 4+862.00

RMR en función de Q	50	Roca Regular Clase III
Q en función de RMR	0.085	Roca Extremadamente Mala Clase V

Las discontinuidades observadas en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F4** (-5) 335/40 – N65°E/40°NW. **F5** (-5) 270/70 – NS/70°W. **F6** (-10) 250/27 – N70°W/27°SW.
- Discontinuidades secundarias: **F5** (-5) 20/60 – N70°W/60°NE.

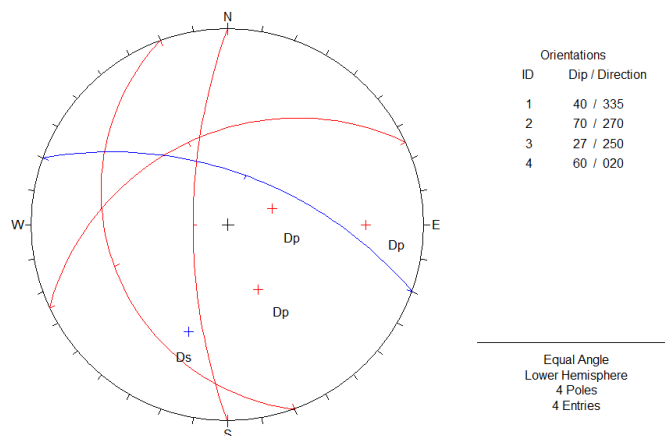


Figura 25. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+864.00 – 4+862.00

Abscisa 4+838.50 – 4+833.40

La litología presente en este tramo de excavación fue una andesita con textura plana-rugosa, moderadamente alterada debido a la presencia de recubrimiento de arcilla y patinas oxidadas. La resistencia de la roca fue 50 – 100 Mpa y RQD de 72.1 %. Se observaron tres familias de discontinuidades. Se presentó humedad en la bóveda 0.1 l/seg. El comportamiento tensional del macizo rocoso fue bajo.

Tabla 67. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+838.50 – 4+833.40

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	50 - 100 Mpa	7
RQD - Índice de calidad de roca	50 - 75 %	13
Espaciado de las discontinuidades	Moder. = 200 – 600 mm	10
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Liger. Abierta = 0.5 – 2.5 mm	4
- Rugosidad	Liger. rugosa	3
- Relleno	Blando < 5 mm	2
- Meteorización	Moderadamente Alterada	3
Condición de agua subterránea	Húmedo = < 10 l/seg	10
RMR básico		54
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-5
RMR ajustado		49

Tabla 68. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+838.50 – 4+833.40

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	13	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 – 3.3 * Jv	72.1	
Jn - Número de familias de juntas	9	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 1.602
Ja - Alteración y relleno de juntas	3	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocosos Roca Mala IV
SRF - Factor red. tensión en el macizo	2.5	

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 69. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+838.50 – 4+833.40

RMR en función de Q	53	Roca Regular Clase III
Q en función de RMR	0.857	Roca Muy Mala Clase IV

Las discontinuidades presentes en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F1** (0) 70/70 – S73°E/70°NE. **F5** (-5) 253/80 – N73°W/80°SW y 200/70 – S20°E/70°SW.
- Discontinuidades secundarias: **F1** (0) 25/50 – N65°W/50°NE. **F2** (-2) 65/20 – N25°W/20°NE. **F5** (-5) 305/40 – N35°E/40°SE.

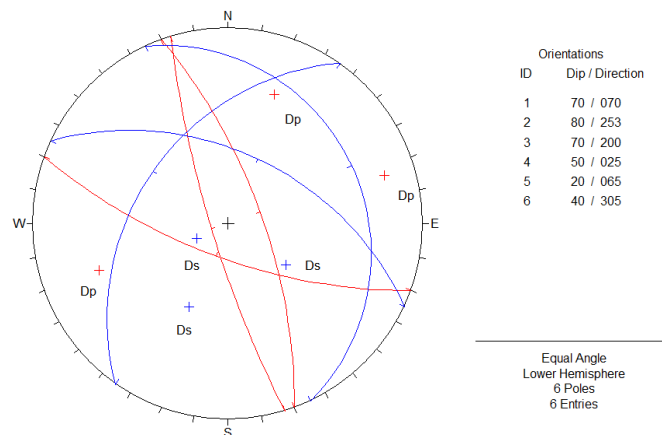


Figura 26. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+838.50 – 4+833.40

Abscisa 4+805.00 – 4+799.00

La litología presente en este tramo de excavación fue una andesita con textura plana-rugosa, moderadamente alterada debido a recubrimiento de óxidos y a la presencia de una cizalla con relleno duro de arcilloso espesor 0.40 cm. La resistencia de la roca fue 50 – 100 Mpa y un RQD de 65.5 %. El macizo rocoso se encuentra seco.

Tabla 70. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+805.00 – 4+799.00

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	50 - 100 Mpa	7
RQD - Índice de calidad de roca	50 - 75 %	13
Espaciado de las discontinuidades	Moder. = 200 – 600 mm	10
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Liger. Abierta = 0.5 – 2.5 mm	4
- Rugosidad	Liger. rugosa	3
- Relleno	Blando > 5 mm	0
- Meteorización	Moderadamente Alterada	3
Condición de agua subterránea	Seco	15
RMR básico		57
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-10
RMR ajustado		47

Tabla 71. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+805.00 – 4+799.00

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	15	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 – 3.3 * Jv	65.5	
Jn - Número de familias de juntas	9	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 0.290
Ja - Alteración y relleno de juntas	5	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocosos Roca Mala IV
SRF - Factor red. tensión en el macizo	7.5	

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 72. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+805.00 – 4+799.00

RMR en función de Q	41	Roca Regular Clase III
Q en función de RMR	0.630	Roca Muy Mala Clase IV

Las discontinuidades presentes este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F1** (0) 100/50 – N10°E/50°SE. **F4** (-5) 336/40 – N66°E/40°NW. **F5** (-5) 305/50 – N35°E/50°NW. **F6** (-10) 250/40 – N70°W/40SW. y cizalla 300/30 – N30°E/30°NW.
- Discontinuidades secundarias: **F4** (-5) 138/30 – N48°E/30°SE. **F5** (-5) 215/60 – N35°W/60°SW.

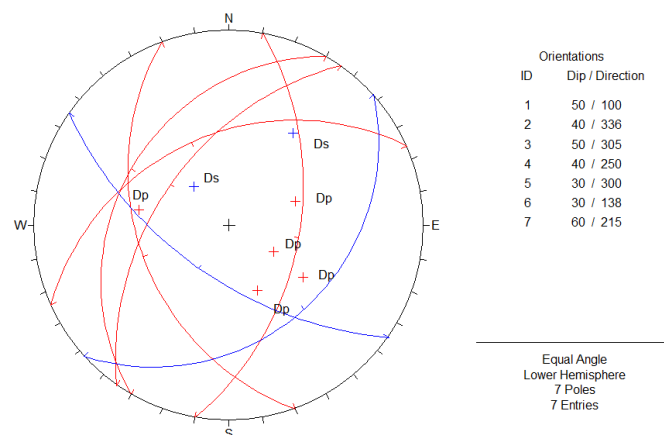


Figura 27. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+805.00 – 4+799.00

Abscisa 4+781.00 – 4+776.00

La litología presente en este tramo de excavación fue una andesita con textura plana-rugosa, moderadamente alterada debido a patinas oxidadas en hastiales, bóveda y frontón. La resistencia de la roca fue 50 – 100 Mpa y RQD de 68.8 %. Se observaron tres familias de discontinuidades. El macizo rocoso se encuentra seco y el estado tensional del mismo fue bajo.

Tabla 73. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+781.00 – 4+776.00

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	50 - 100 Mpa	7
RQD - Índice de calidad de roca	50 - 75 %	13
Espaciado de las discontinuidades	Moder. = 200 – 600 mm	10
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Liger. Abierta = 0.5 – 2.5 mm	4
- Rugosidad	Liger. rugosa	3
- Relleno	Duro < 5 mm	4
- Meteorización	Moderadamente Alterada	3
Condición de agua subterránea	Seco	15
RMR básico		61
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-5
RMR ajustado		56

Tabla 74. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+781.00 – 4+776.00

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	14	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 – 3.3 * Jv	68.8	
Jn - Número de familias de juntas	9	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 2.292
Ja - Alteración y relleno de juntas	2	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocosos Roca Mala IV
SRF - Factor red. tensión en el macizo	2.5	

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 75. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+781.00 – 4+776.00

RMR en función de Q	55	Roca Regular Clase III
Q en función de RMR	2.511	Roca Mala Clase IV

Las discontinuidades presente en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F4** (-5) 332/30 – N62°E/30°NW y 320/40 – N50°E/40°NW. **F5** (-5) 300/65 – N30°E/65°NW.
- Discontinuidades secundarias: **F1** (0) 25/70 – S65°E/70°NE. **F2** (-2) 10/30 – S80°E/30°NE y 25/40 – N65°W/40°NE. **F4** (-5) 310/30 – S40°W/30°NW. **F5** (-5) 260/80 – N80°W/80°SW y 280/60 – N10°E/60°NW.

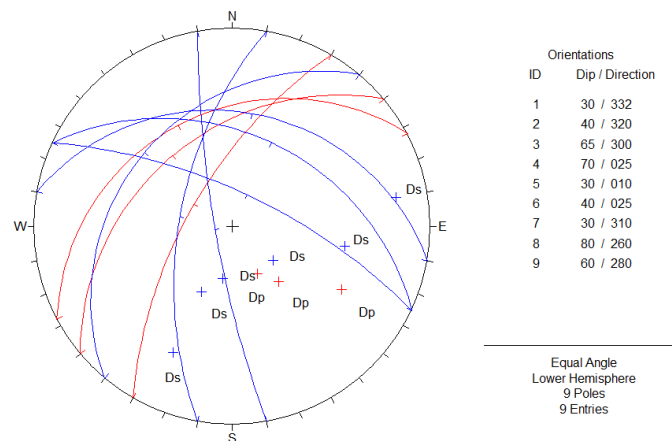


Figura 28. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+781.00 – 4+776.00

Abscisa 4+725.80 – 4+719.50

La litología presente en este tramo de excavación fue una andesita con vetillas de epidota con una textura plana-rugosa y ligeramente alterada; se observó una veta de cuarzo con espesor de 8 cm que cruzaba toda la sección de excavación. La resistencia de la roca fue 100 – 250 Mpa y RQD de 72.1 %. Se observaron tres familias de discontinuidades. Localmente se encuentra humedad en el hastial derecho y en bóveda 0.1 l/seg. El estado tensional del macizo rocoso fue bajo.

Tabla 76. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+725.80 – 4+719.50

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	100 - 250 Mpa	12
RQD - Índice de calidad de roca	50 - 75 %	13
Espaciado de las discontinuidades	Amplia = 0.6 – 2 m	15
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Liger. Abierta = 0.5 – 2.5 mm	4
- Rugosidad	Rugosa	5
- Relleno	Duro > 5 mm	2
- Meteorización	Ligeramente Alterada	5
Condición de agua subterránea	Húmedo = < 10 l/seg	10
RMR básico		68
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-5
RMR ajustado		63

Tabla 77. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+725.80 – 4+719.50

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	13	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 – 3.3 * Jv	72.1	
Jn - Número de familias de juntas	9	
Jr - Rugosidad de juntas	15	Q = 6.408
Ja - Alteración y relleno de juntas	0.75	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocosó Roca Regular III
SRF - Factor red. tensión en el macizo	2.5	

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 78. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+725.80 – 4+719.50

RMR en función de Q	62	Roca Buena Clase II
Q en función de RMR	7.356	Roca Regular Clase III

Las discontinuidades presente en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F1** (0) 105/85 – N15°E/85°SE y 105/60 – N15°E/60°SE. **F5** (-5) veta de cuarzo 250/60 – N70°W/60°SW. **F6** (-10) 200/40 – N20°W/40°SW.
- Discontinuidades secundarias: **F1** (0) 50/80 – N40°W/80°NE. **F3** (-12) 355/70 – S85°W/70°SE y 163/50 – N73°E/50°SE.

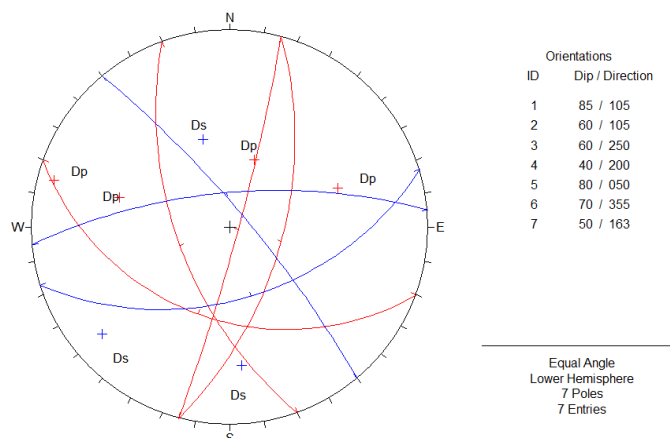


Figura 29. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+725.80 – 4+719.50

Abscisa 4+676.00 – 4+671.00

La litología presente en este tramo de excavación fue una andesita silificada de color beige (alterada), con textura plana-rugosa, moderadamente alterada debido una cizalla con relleno arcilloso espesor de 0.4 cm. La resistencia de la roca fue 50 – 100 Mpa y RQD de 65.5 %. Se observó tres familias de discontinuidades. Localmente se encuentro humedad en bóveda 0.1 l/seg.

Tabla 79. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+676.00 – 4+671.00

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	50 - 100 Mpa	7
RQD - Índice de calidad de roca	50 - 75 %	13
Espaciado de las discontinuidades	Cerrada = 200 – 600 mm	10
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Liger. Abierta = 0.5 – 2.5 mm	4
- Rugosidad	Rugosa	5
- Relleno	Blando < 5 mm	2
- Meteorización	Moderadamente Alterada	3
Condición de agua subterránea	Húmedo = < 10 l/seg	10
RMR básico		56
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-5
RMR ajustado		51

Tabla 80. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+676.00 – 4+671.00

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	15	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 – 3.3 * Jv	65.5	
Jn - Número de familias de juntas	9	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	$Q = 0.727$
Ja - Alteración y relleno de juntas	6	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocoso Roca Muy Mala V
SRF - Factor red. tensión en el macizo	2.5	

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 81. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+676.00 – 4+671.00

RMR en función de Q	47	Roca Regular Clase III
Q en función de RMR	1.165	Roca Mala Clase IV

Las discontinuidades presente en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F1** (0) 110/60 – N20°E/60°SE. **F5** (-5) cizalla 220/60 – N40°W/60°SW.
- Discontinuidades secundarias: **F4** (-5) 320/40 – N50°E/40°NW. **F5** (-5) 180/70 – WE/70°S y 205/50 – N25°W/50°SW.

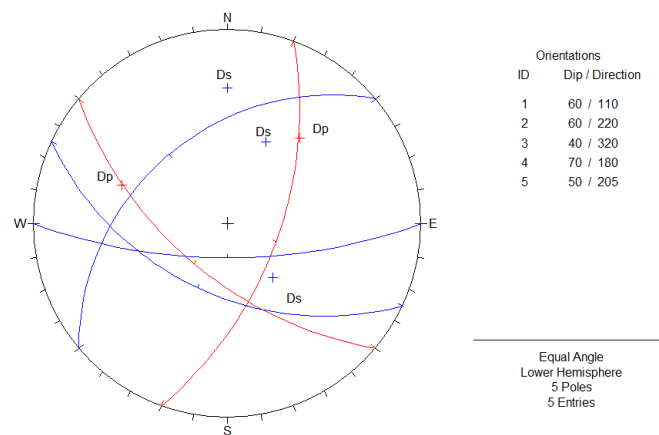


Figura 30. Esteriograma de discontinuidades, Abscisa 4+676.00 – 4+671.00

Abscisa 4+630.00 – 4+623.00

La litología presente en este tramo de excavación fue una andesita basáltica (fracturada) con vetillas de cuarzo espesor de 0.2 cm, ligeramente alterada. La resistencia de la roca fue 100 – 250 Mpa y RQD de 52.3%. Se observaron tres familias de discontinuidades. El macizo rocoso se encuentra seco y el estado tensional fue bajo.

Tabla 82. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+630.00 – 4+623.00

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	100 - 250 Mpa	12
RQD - Índice de calidad de roca	50 - 75 %	13
Espaciado de las discontinuidades	Moder. = 200 – 600 mm	10
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Liger. Abierta = 0.5 – 2.5 mm	4
- Rugosidad	Ligeramente rugosa	3
- Relleno	Duro < 5 mm	4
- Meteorización	Ligeramente Alterada	5
Condición de agua subterránea	Seco	15
RMR básico		68
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-5
RMR ajustado		63

Tabla 83. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+630.00 – 4+623.00

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	19	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 – 3.3 * Jv	52.3	
Jn - Número de familias de juntas	9	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 4.646
Ja - Alteración y relleno de juntas	0.75	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocosos Roca Regular III
SRF - Factor red. tensión en el macizo	2.5	

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 84. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+630.00 – 4+623.00

RMR en función de Q	60	Roca Buena Clase II
Q en función de RMR	7.356	Roca Regular Clase III

Las discontinuidades presentes en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F1** (0) 70/60 – N20°W/60°NE. **F4** (-5) 160/32 –N70°E/32°SE, 160/40 – S70°W/40°SE y 158/44 – N68°E/44°SE. **F6** (-10) 315/30 – N45°E/30°NW.
- Discontinuidades secundarias: **F1** (0) 140/60 – N50°E/60°SE y 130/80 – N40°E/80°SE. **F6** (-10) 290/40 – N20°E/40°NW.

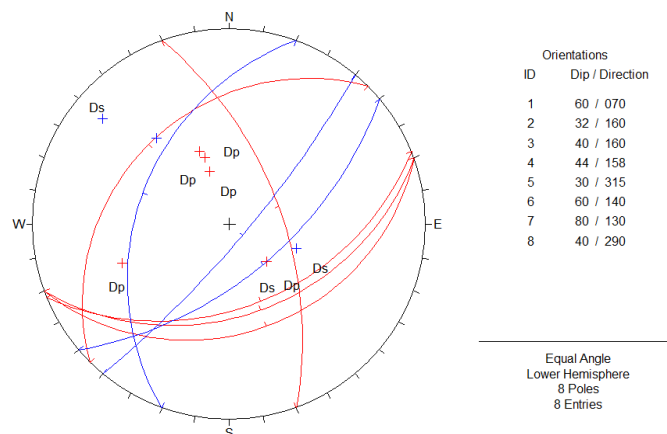


Figura 31. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+630.00 – 4+623.00

Abscisa 4+602.00 – 4+600.00

La litología presente en este tramo de excavación fue una andesita de color beige (alterada), con textura plana-rugosa moderadamente alterada. La resistencia de la roca fue 50 – 100 Mpa y RQD de 58.9 %. Se observaron tres familias de discontinuidades. Localmente se encuentra húmeda la bóveda. El estado tensional del macizo rocoso fue bajo.

Tabla 85. Clasificación Geomecánica RMR, Abscisa 4+602.00 – 4+600.00

Parámetros	Unidad	Puntaje
Resistencia a la compresión simple	50 - 100 Mpa	7
RQD - Índice de calidad de roca	50 - 75 %	13
Espaciado de las discontinuidades	Moder. = 200 – 600 mm	10
Condición de las discontinuidades		
- Longitud (Persistencia)	Media = 3 - 10 m	2
- Separación	Abierta = 2.5 – 10 mm	1
- Rugosidad	Ligeramente rugosa	3
- Relleno	Blando < 5 mm	2
- Meteorización	Moderadamente Alterada	3
Condición de agua subterránea	Húmedo = < 10 l/seg	10
RMR básico		51
Correlación por orientación de juntas (túneles)		-5
RMR ajustado		46

Tabla 86. Clasificación Geomecánica Índice Q, Abscisa 4+602.00 - 4+600.00

Parámetros	Valor	Formula
Jv – Índice de blocosidad	17	$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$
RQD [%] = 115 – 3.3 * Jv	58.9	
Jn - Número de familias de juntas	9	
Jr - Rugosidad de juntas	1.5	Q = 1.962
Ja - Alteración y relleno de juntas	2	
Jw - Factor red. presencia de agua	1	Clase de Macizo Rocosos Roca Mala IV
SRF - Factor red. tensión en el macizo	2.5	

Correlación (Barton, 1995):

Tabla 87. Correlación entre RMR e Índice Q, Abscisa 4+602.00 – 4+600.00

RMR en función de Q	54	Roca Regular Clase III
Q en función de RMR	0.541	Roca Muy Mala Clase V

Las discontinuidades presentes en este tramo fueron:

- Discontinuidades principales: **F1** (0) 65/60 – N25°W/60°NE. **F4** (-5) 345/30 – N75°E/30°NW y 350/45 – N80°E/45°NW.
- Discontinuidades secundarias: **F1** (0) 90/50 – NS/50°W y 120/70 – N30°E/70°SE.

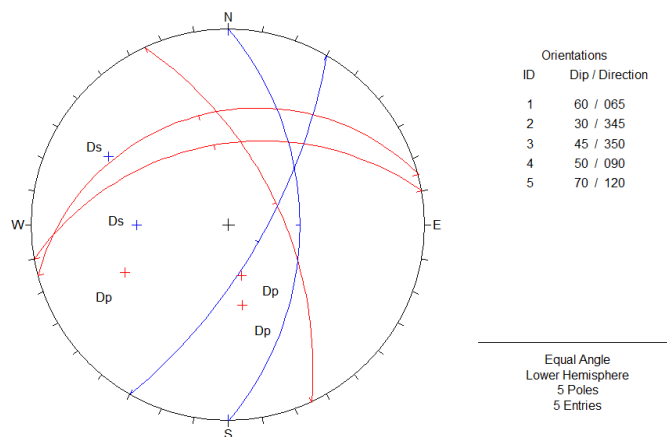


Figura 32. Estereograma de discontinuidades, Abscisa 4+602.00 – 4+600.00

9. SOSTENIMIENTO

9.1. Introducción

Al realizarse una excavación de una obra subterránea, se produce un cambio en las condiciones de equilibrio existentes en superficie, esta variación del estado de equilibrio del macizo rocoso se refleja en un ajuste o redistribución de la tensiones. La redistribución de tensiones puede generar desequilibrio en la superficie de la excavación, la cual tiene que ser compensada por las medidas de sostenimiento necesarias para alcanzar el equilibrio.

En los años 60, el profesor Rabcewicz supo explicar con mayor claridad y sintetizar la influencia de la estabilidad y del sostenimiento, en trabajos subterráneos a través del Nuevo Método Austriaco (NMA), ya que el NMA no es un método constructivo sino una filosofía que permite contribuir a la estabilidad de las excavaciones subterráneas.

Las ideas fundamentales enunciadas por el profesor Rabcewicz son las siguientes:

- La zona de roca que circunda al túnel interviene en la estabilidad de la excavación. Es decir es la propia roca la que se autosostiene, ya que se forma un arco de descarga en torno al túnel que transmite las tensiones a ambos lados de este.
- Como consecuencia del punto anterior, conviene mantener inalteradas, en la medida de lo posible, las características de la roca que rodea al túnel, se debe de emplear técnicas de excavación mecánica o técnicas que suavicen el efecto de voladura en la roca.

- Para la distribución de las tensiones en el anillo de roca que rodea al túnel, se debe diseñar los túneles con formas redondeadas, evitando los puntos angulosos.
- El sostenimiento se colocara de forma que deje deformarse al terreno, siempre dentro de la estabilidad del túnel, con objeto de que la roca desarrolle su capacidad autoportante. La roca que va a soportar el sostenimiento dependerá pues del momento en que se coloque tras la excavación.

9.2. Elementos de sostenimiento

El principal objetivo del sostenimiento es de garantizar la estabilidad de una obra subterránea y que el terreno no pierda sus propiedades por efectos constructivos. Los elementos estructurales que se aplica en el sostenimiento son los siguientes:

- Pernos
- Hormigón Lanzado o bombeado
- Fibra de acero
- Malla Electro-soldada
- Cerchas o marcos de acero
- Enfilados o tuberías de acero

9.2.1. Pernos

Son elementos lineales, los pernos cosen las juntas de roca. Sirven para sostener la superficie la de roca excavada en secciones subterráneas, impidiendo que cuñas y bloques puedan deslizarse a favor de las fracturas y produce una fuerza de confinamiento sobre el macizo rocoso ya que consiguen absorber las tracciones que aparecen en el terreno, e impedir la formación de

zonas descomprimidas. Todo perno debe de tener proporcionado una placa de apoyo y una o dos tuercas como se requiera.

9.2.2. Hormigón Lanzado o bombeado

La diferencia entre el hormigón lanzado y el hormigón convencional es que el tamaño de los áridos es menor y lleva siempre un aditivo, un acelerante para facilitar su adherencia a la superficie de la roca y para conseguir altas resistencias iniciales.

El hormigón lanzado tiene un efecto principal en túneles:

El anillo de hormigón proyectado cierra las juntas evitando la descompresión, desarrolla una resistencia y puede trabajar como lámina, resistiendo las cargas que les transmite la roca al deformarse. También resiste la carga puntual ejercida por pequeñas cuñas o bloques de roca que descansan sobre la capa de hormigón.

9.2.3. Fibra de Acero

Son alambres de acero conformados en frío formando unas patillas que mejoran su adherencia al hormigón. La fibra de acero se utiliza para reforzar el hormigón lanzado con el propósito de reducir tiempo y costo asociado al tradicional reforzamiento con malla de acero. Mejora las cualidades mecánicas de la mezcla incrementando la ductilidad y absorción de energía como también la resistencia al impacto y al desprendimiento, sin afectar los tiempos de fraguado.

Se denominara hormigón lanzado con fibras de acero a aquella mezcla que registre en su contenido un valor referencial (Kg) de fibra de acero por cada metro cúbico de hormigón.

9.2.4. Malla Electro-soldada

Está formada por una parrilla de barras corrugadas unidas mediante electrosoldadura, y se utiliza como refuerzo del hormigón lanzado por su facilidad de adaptación a la forma del túnel. También se la puede utilizar en secciones excavadas que contengan rocas fracturadas, con juntas muy próximas. La sujeción de la malla a la roca puede hacerse por varios métodos, aunque lo más recomendable es utilizar las placas de los pernos, de este modo se consigue que la malla y pernos trabajen conjuntamente.

9.2.5. Cerchas o marcos de acero

La cercha tiene una función resistente trabajando como un arco y colaborando con el hormigón lanzado, se han de colocar en contacto con la roca a lo largo de toda su longitud y firmemente apoyadas en el suelo. Tiene la ventaja sobre este que su resistencia inicial ya es definitiva, mientras que el hormigón las resistencias se desarrollan con el tiempo. Otra función de la cercha es definir claramente la geometría del túnel, lo que ayuda a conseguir los espesores adecuados de hormigón lanzado y a evitar sobre excavaciones.

Generalmente en secciones grandes cada cercha se divide en tres arcos para facilitar su colocación. Existen tres tipos de cerchas: cerchas TH, cerchas HEB y cerchas reticulares. Las cerchas HEB, estas se utilizan cuando se requieren mayores inercias, los tamaños de las cerchas HEB están comprendidos entre HEB 100 y HEB 180. En el túnel de carga Pilatón Sarapullo se utilizan cerchas HEB 140,

9.2.6. Enfilados o tuberías de acero

Los paraguas o enfilados son elementos lineales de refuerzo previo colocados paralelamente al túnel por delante del frente y situados por encima de la línea de excavación. Mediante la acción de los paraguas, se puede conseguir

atravesar una zona de mala calidad de roca sin que se produzca desprendimientos en bóveda. Su diámetro puede ser de 25 a 32 mm.

9.3. Tipos de sostenimientos del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo

Los tipos de sostenimiento que se aplicaron en el túnel de carga dependieron de la valoración final de la clasificación RMR que se obtuvo del macizo rocoso. Existen tres tipos de sostenimiento, con excepción del Tipo III que se divide en IIIa (RMR > 50) y IIIb (RMR < 50), esta reclasificación ayudo para facilitar la colocación de sostenimiento.

Tabla 88. Clases de macizos rocosos y tipos de sostenimiento del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo.

Clase de Macizo Rocosos	Sostenimiento					Tipo de sostenimiento
	Pernos	Hormigón Lanzado	Cerchas Metálicas	Enfilados o tubería de acero	Drenajes	
II Buena (80 - 61)	Ocasionales $\varnothing$ 25 mm, longitud 3,5 m, embebidos en resina (2 cartuchos por metro)	Simple espesor de 5 cm a 120° en la bóveda			$\varnothing$ 50 mm, longitud 1,00 m localizados	Tipo II
IIIa Regular (61 - 50)	Sistemáticos en dos filas de 2 - 3 pernos, $\varnothing$ 25 mm, longitud 3,5 m, distanciados 2 m, embebidos en resina (2 cartuchos por metro)	Con fibra metálica o sobre malla electrosoldada 100x100x100x100 espesor 10 cm a 120° en la bóveda				Tipo IIIa
IIIb Regular (50 - 41)	Sistemáticos en dos filas de 5 - 6 pernos, $\varnothing$ 25 mm, longitud 3,5 m, distanciados 2 m, embebidos en resina (2 cartuchos por metro)	Con fibra metálica o sobre malla electrosoldada 100x100x100x100 espesor 10 cm a 180° en la bóveda				Tipo IIIb
IV Mala (40 - 21)		Primera capa: hormigón imple espesor de 5 cm a 180° en la bóveda. Segunda capa: hormigón con fibra o malla electrosoldada a sección completa (cerchas embebidas en hormigón)	Cerchas tipo HEB 140, distanciadas 1,20 m	Enfilados de $\varnothing$ 25 mm o tubería de acero $\varnothing$ 30 mm, longitud 6,00 m con inclinación de 10° en bóveda		Tipo IV

10.1. RESULTADOS ESPERADOS

- ✓ Los parámetros obtenidos de las clasificaciones geomecánicas dan un índice de calidad de roca que varía de 24 a 79 que representa una clase de macizo rocoso de mala a buena para la clasificación RMR de Bieniawski y 0.085 a 10.048 que representan una clase de macizo rocoso de muy mala a buena para la clasificación del Índice Q de Barton.
- ✓ En la clasificación del RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski (1989), predomina la clase de macizo rocoso II roca buena. Los resultados se encuentran detallados en la Tabla 89.

Tabla 89. Metros Excavados por Clase de Macizo Rcoso, Clasificación RMR

RMR (Rock Mass Rating)				
Clase de Macizo Rcoso	Clase de Sostenimiento	Abcisas	Metros Excavados	Porcentaje
Roca Buena II	II	5+100.00 - 5+041.00 5+034.80 - 5+014.50 4+761.00 - 4+676.00 4+664.00 - 4+602.00	226.30 m	45.26%
Roca Regular IIIA	IIIA	5+041.00 - 5+034.80 4+781.00 - 4+761.00 4+676.00 - 4+664.00	38.20 m	7.64%
Roca Regular IIIB	IIIB	4+855.00 - 4+781.00 4+602.00 - 4+600.00	76.00 m	15.20%
Roca Mala IV	IV	5+014.50 - 4+855.00	159.50 m	31.90%
Total			500.00 m	100.00%

- ✓ En la clasificación del Índice Q (Rock Mass Quality) de Barton (1992), predomina la clase de macizo rocoso III roca regular. Los resultados se encuentran detallados en la Tabla 90.

Tabla 90. Metros Excavados por Clase de Macizo Rocoso, Clasificación Índice Q

Índice Q (Rock Mass Quality)			
Clase de Macizo Rocoso	Abscisas	Metros Excavados	Porcentaje
Roca Buena II	5+063.00 - 5+058.20 5+034.80 - 5+017.00	22.60 m	4.52%
Roca Regular III	5+100.00 - 5+063.20 5+058.00 - 5+041.00 5+017.00 - 5+014.50 4+765.00 - 4+732.00 4+729.17 - 4+676.00 4+664.00 - 4+602.00	204.87 m	40.97%
Roca Mala IV	5+041.00 - 5+034.80 4+996.10 - 4+993.50 4+969.10 - 4+966.60 4+947.50 - 4+945.00 4+922.80 - 4+916.70 4+871.00 - 4+805.00 4+795.00 - 4+765.00 4+732.00 - 4+729.17 4+602.00 - 4+600.00	120.23 m	24.04%
Roca Muy Mala V	5+014.50 - 4+996.10 4+993.50 - 4+969.10 4+966.60 - 4+947.50 4+945.00 - 4+922.80 4+916.70 - 4+871.00 4+805.00 - 4+795.00 4+671.00 - 4+664.00	152.30 m	30.46%
Total		500.00 m	100.00%

- ✓ En base de los promedio de los índice de calidad se realizó la correlación (Barton, 1995) entre ambas clasificaciones. Los resultados se encuentran detallados en la Tabla 91.

Tabla 91. Promedios de los Índices de Calidad del Macizo Rocoso y Correlación

RMR		Q		Correlación (Barton, 1995) RMR = 15 log Q + 50 - Q = 10 (RMR - 50) / 15			
Clase de Macizo Rocoso	Índice de Calidad	Clase de Macizo Rocoso	Índice de Calidad	Clase de Macizo Rocoso	RMR en función de Q	Clase de Macizo Rocoso	Q en función de RMR
II Buena	68	III Regular	7.11	II Buena	62	II Buena	21.22
IIIA Regular	55	IV Mala	2.18	IIIA Regular	55	IV Mala	2.13
IIIB Regular	47	IV Mala	1.47	IIIA Regular	52	IV Mala	1.58
IV Mala	34	V Muy mala	0.70	IIIB Regular	45	V Muy mala	0.11

- ✓ Según las condiciones geológicas observadas en el túnel se puede definir una sectorización del tramo investigado. Los resultados se encuentran detallados en la Tabla 92.

Tabla 92. Sectorización Geológica

Sectorización Geológica		Metros Excavados
1º	Granodiorita con vetillas de cuarzo y epidota	79.30
2º	Granodiorita con recubrimiento arcilloso	8.20
3º	Andesita con cizallas paralelas y perpendiculares	39.90
4º	Andesita descomprimida con cizallas paralelas y perpendiculares	73.20
5º	Andesita descomprimida con estrías de fricción	7.80
6º	Andesita con recubrimiento arcilloso	101.60
7º	Andesita con vetillas de cuarzo y epidota	138.17
8º	Andesita con manchas oxidadas	27.83
9º	Andesita silificada	24.00
Total		500.00

10.2. CONCLUSIONES

- ✓ La litología presente a lo largo del tramo del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo, en el tramo 5+100.00 – 4+600.00 corresponde un 82.90% a roca andesita de la formación Macuchi y 17.10% a roca granodiorita. Se evidencio dos fases hidrotermales, la primera con presencia de epidota y serecita; y la segunda que relleno las diaclasas de las rocas circundantes con cuarzo y carbonatos. La resistencia a la compresión simple y el grado de fracturamiento del macizo rocoso es medio, la presencia de condición de agua subterránea es húmeda especialmente donde la roca presento condiciones geológicas regulares y goteo en roca mala.
- ✓ Utilizando de la clasificación RMR, se determinó 4 clases de macizos rocoso II, IIIA, IIIB y IV mientras con la clasificación del Índice Q se obtuvo 4 clases de macizos rocoso II, III, IV y V.
- ✓ La correlación entre las ambas clasificaciones fue la siguiente:

Roca buena clase II en RMR y roca regular clase III en Índice Q, su correlación es una roca de buena calidad.

Roca regular clase IIIA en RMR y roca mala clase IV en Índice Q, su correlación es una roca de calidad intermedia entre regular y mala, se eligió la de menor calidad, mala.

Roca regular clase IIIB en RMR y roca mala clase IV en Índice Q, su correlación es una roca de calidad intermedia entre regular y mala, se eligió la de menor calidad, mala.

Roca mala clase IV en RMR y roca muy mala clase V en Índice Q, su correlación es una roca de calidad intermedia entre regular y muy mala, se eligió la de menor calidad, muy mala.

- ✓ En el parámetro SRF de la clasificación Índice Q para roca II - III, se eligió la opción 2.5 pequeña cobertura, debido a la cobertura de roca que hay sobre el túnel (400 m aproximadamente) y para roca IV – V, se eligió la opción 10 milonita o arcilla y 5 zonas de debilidad asiladas, ya que se observó esta condiciones geológicas en la excavación del túnel.
- ✓ Mediante análisis estadístico de las estructuras geológicas levantadas durante la construcción del túnel y representándolas gráficamente con el software Dips v 5.1 de la compañía ROCKSCIENCE, se llegó a la conclusión que existen 3 familias de discontinuidades principales (Dp), 5 familias secundarias (Ds) y 4 familias aleatorias (Da). Los números de familia se observan en la Figura 33.

Sistemas Principales:

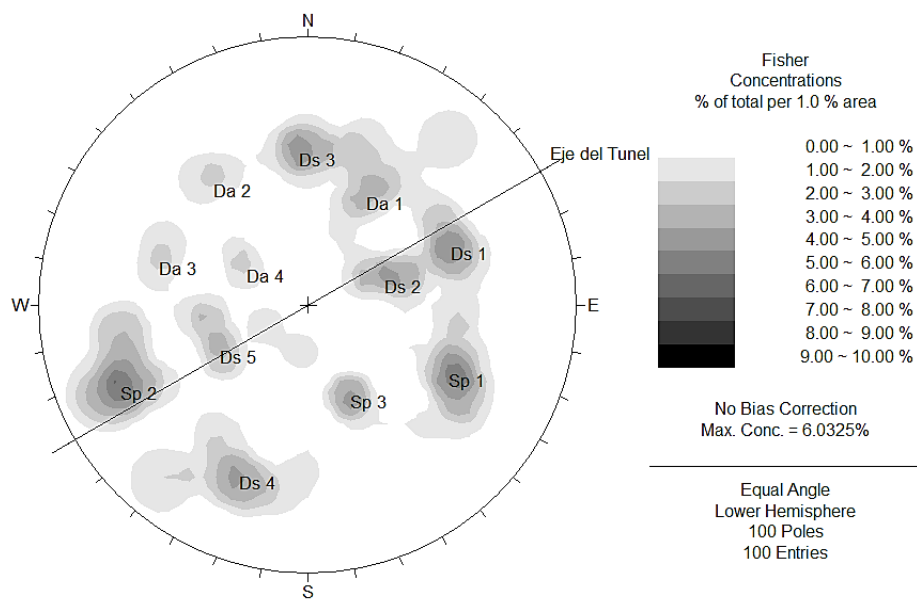
Dp1	N25°E/60°NW	295/60
Dp2	N23°W/74°NE	67/74
Dp3	N64°E/40°NW	334/40

Discontinuidades Secundarias:

Ds 1	N67°W/60°SW	247/60
Ds 2	N70°W/34°SW	250/34
Ds 3	N87°E/60°SE	177/60
Ds 4	N68°W/80°NE	22/80
Ds 5	N26°W/40°NE	64/40

Discontinuidades Aleatorias:

Da 1	N28°W/50°SW	208/50
Da 2	N53°E/60°SE	143/60
Da 3	N17°E/60°SE	107/60
Da 4	N32°E/30°SE	122/30



**Figura 33. Estereograma de las familias de discontinuidades existentes en el Túnel de Carga
Pilatón Sarapullo, abscisa 5+100.00 – 4+600.00**

10.3. RECOMENDACIONES

- ✓ Se aconseja colocar estaciones de convergencia especialmente en zonas donde la roca presenta zonas cizallas (roca IV), para llevar un control estadístico de como el túnel se va deformando debido a las tensiones presente en el macizo y reforzar esa zona con un sostenimiento mayor.
- ✓ Tomar muestras de roca para estudios de resistencia a la compresión simple, donde se presenten cambios en las características geológicas o cuando se produzcan cambios de sostenimiento, para así tener datos exactos de resistencia de la roca, que ayudarían a valorar de una forma más precisa al macizo rocoso.
- ✓ Se debería hacer análisis de cuñas (intersección de discontinuidades), para prevenir caídas de bloques en hastiales y bóveda para así recomendar la colocación de pernos ocasionales con el fin de evitar desprendimientos en la zona de excavación. El análisis de cuñas se puede hacer mediante programas de software como Unwedge o Phase de la compañía ROCKSCIENCE.
- ✓ Se sugiere utilizar más de una clasificación geomecánica, para tener un mayor entendimiento de los parámetros geológicos, que podrían definir de mejor manera el índice de calidad del macizo rocoso.

BIBLIOGRAFÍA

Barton, N., (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. International journal of rock mechanics & mining sciences, 39 (185 - 216), 185.

Bieniawski Z. T., (1990, January). Tunnel design by rock mass classifications (Report GL-79-19).US Army corps of engineers Washington DC.pp. 31.

Brady, B.H.G., and Brown, E.T., (2005). Rock mechanics for underground mining (third edition). Kluwer academic publishers. Estados Unidos. pp. 78-81.

Bristow, C., Hoffstetter, R., (1977). Léxico Estratigráfico Internacional. Volumen 5. Fascículo 5. Ecuador. pp. 187-312.

Chunga, K., Michetti, A., Gorshkov, A., Panza, G., Soloviev, A., Martillo, C., (2011). Aplicación del método de zonación morfo-estructural para identificar nudos sismogenicos en la región costera y cadenas montañosas de los andes septentrionales del Ecuador. Acta oceanográfica del pacifico, vol 16, N°1, 123-124.http://www.inocar.mil.ec/docs/ACTAS/OCE16/OCE1601_10.pdf (descargado 8 de julio 2014).

Corominas, J., Tipos de rotura en laderas y taludes. pp. 9.
<http://www2.etcg.upc.edu/asg/Talussos/pdfs/ClasificacionDeslizamientos.pdf>

Gavilanes, H., Andrade, B., (2004). Introducción a la ingeniería de túneles. Asociación de ingenieros de minas del Ecuador. Quito. pp. 88.

Geoconsult S.A., (1995). Manual de criterios técnicos relacionados con el proyecto, construcción y explotación de los túneles de carretera. España. pp. 104-120.

Goodman, R., (1989). Introduction rock mechanics (second edition). Wiley.Canadá. pp.42.

Guadalupe, R., (2011). Análisis del uso del método gin (Grouting Intensity Number) en el proyecto hidroeléctrico mazar. Tesis de Grado, EPN, Quito, Ecuador. pp. 12.

Hidrotoapi EP (2011), “Descripción del proyecto toachi – pilatón”.

Hidrotoapi EP (2009), “Informe ejecutivo – alternativa 300 MW”.

Hidrotoapi EP (2012), “Informe final geofísico de tierra”.

Hidrotoapi EP (2010), “Informe geológico y comentario geotécnico para obras subterráneas”.

Latorre, C., (2009). Manual para levantamiento geológico – geotécnico de macizos rocosos aplicados a excavaciones subterráneas. Ecuador. pp.1-3.

Litherland, G.S., Aspden, J., and Jemielita, R.A., (1994). The metamorphic belts of Ecuador. Nottingham, British Geological Survey, Overseas Memoir N° 11. pp.10.

Milne, D., Hadjigeorgiou, j., Pakalnis R., Rock mass characterization for underground hard rock mines. pp. 3-4:

http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/dgaam/publicaciones/curso_cierr_eminas (descargado 26 de julio 2014)

Muñoz Fernández, L.M., Gonzales de Vallejo, L.I., (1987). Aplicación de las clasificaciones geomecánicas al estudio de excavaciones subterráneas. Henares revista geológica, 1 (71-76), 74.

Nieto, A., (1987). Geología General del Nororiente Ecuatoriano. Departamento de Geología. Universidad de Illinois, Urbana, Estados Unidos. p. 20-22.

Núñez del Arco, Eugenio., (2003). Geología del Ecuador. Escuela Politécnica del Litoral. Guayaquil. pp. 52-53.

Palmstrom, A., Broch, E., (2006) .Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. Tunnels and underground space technology, vol 21, (575-593), 4-13.

Ramírez, P., De la cuadra, L., Lain, R., Grijalbo, E., (1987). Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea. Instituto geológico y minero de España. pp. 262.

Romana, M., (2000, Julio). Nuevas recomendaciones de excavación y sostenimiento para túneles y boquillas. Universidad Politécnica de Valencia. España, pp.1.

Sauer, W., (1965). Geología del Ecuador. Editorial del Ministerio de Educación. Primera Edición Castellana. Quito. pp. 297.

Singh, B., Goel, R., Hudson, Freng, J., (2006). Tunnelling in weak rocks. Elsevier geo-engineering book series, vol 5, pp. 40, 51-52.

Stille, H., Palmstrom, A., (2003). Classification as a tool in rock engineering. Published in: Tunnelling and underground space technology, vol. 18, (331-345), 13-15.

ANEXOS

Anexo 1

Descripción mineralógica de las muestras de roca.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

MUESTRA: Muestra TP-1 **Abs:** 5+100,00

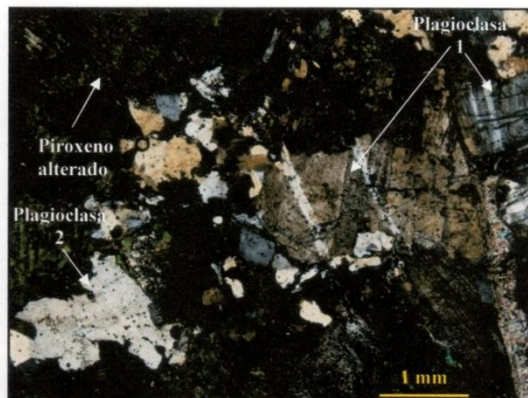
1) DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

- **Color:** La roca presenta un color gris verdoso oscuro, con cristales y agregados de cristales de color blanco.
- **Textura:** Fanerítica, de grano medio entre 3 y 4 mm. Ocasionalmente se observa granos policristalinos que alcanzan 1 cm de diámetro.
- **Minerales x 20:** Piroxeno y plagioclasa. Adicionalmente clorita como producto de alteración de los minerales mencionados.
- **Observaciones:** La muestra presenta esporádicamente vetillas mineralizadas, de color verdoso.



2) DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

- **Textura:** *Fanerítica - Holocristalina*, el grado de cristalinidad es del 100%. La roca está formada por cristales de piroxeno y plagioclasa, de tamaños entre 0,5 a 4 mm.



- **Componentes:**
 - ♦ **Fracción Fenocristales 100%:**
 - ❖ **Plagioclasa 60%:** Los cristales son de dos tipos. 1) En un caso son subhedrales, con diámetros de hasta 4 mm, presentan maclas tipo Carlsbad y Polisintéticas; en este caso la plagioclasa ha comenzado a alterarse a minerales arcillosos y sericita. 2) La segunda familia de plagioclasa corresponde a cristales frescos, más pequeños, de hasta 2 mm de diámetro, de forma anhedral y en los cuales las maclas están presentes con menor intensidad.
 - ❖ **Piroxeno 40%:** Son cristales anhedral. La mayor parte de ellos no presentan su característica forma prismática, debido a que se están alterando a clorita y epidota, es decir están sufriendo saussuritización. Una fracción menor de cristales de piroxeno están parcialmente preservados.
- **Observaciones:**

La muestra presenta vetillas en diferentes direcciones, que afectan a los cristales y que están rellenas con clorita y epidota. La clorita también está presente como producto de alteración de plagioclasa.

Aproximadamente en un 2% del volumen de la muestra se observa minerales opacos.

3) NOMBRE DE LA ROCA

Gabro saussuritizado.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

MUESTRA: Muestra TP-2 Abs: 5+000,50

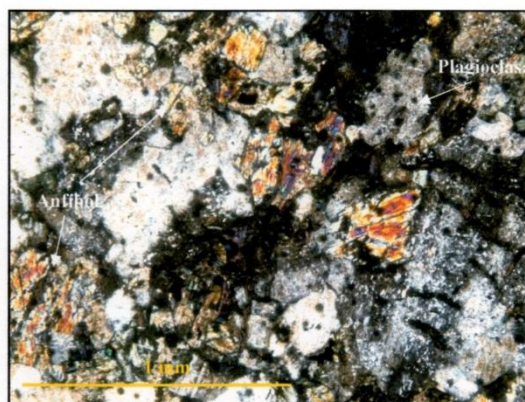
1) DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

- **Color:** La roca seca presenta un color gris verdoso oscuro.
- **Textura:** Fanerítica de grano fino, con cristales diseminados de plagioclasa y de minerales máficos, de diámetro medio de 2 mm.
- **Minerales x 20:** Plagioclasa y minerales máficos.
- **Observaciones:** La muestra presenta vetillas rellenas con calcita y óxidos de hierro (Fe).



2) DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

- **Textura:** Microcristalina, formada por cristales de plagioclasa y piroxeno, de tamaño fino, pues el diámetro en todos los casos es menor a 1 mm. El tamaño de grano general se caracteriza por ser inequigranular.



▪ **Componentes:**

♦ **Fracción Fenocristales 100%:**

- ❖ **Plagioclasa 58%:** Los cristales son principalmente anhedral y con menor frecuencia son subhedral. Su tamaño es siempre menor a 1 mm. Tienen clivaje, así como maclas tipo Carlsbad y polisintéticas. Ocasionalmente como granos policristalinos. La mayor parte de estos cristales se alteran a minerales arcillosos.
- ❖ **Anfibol 42%:** Cristales subhedral, presentan colores de birrefringencia altos, debido a que están siendo alterados a epidota y clorita.

▪ **Observaciones:**

La calcita está presente como mineral secundario reemplazando al anfibol.

Se puede observar vetillas rellenas por bandas de calcita, que a la vez contienen bandas de cuarzo de menor espesor. Se observa otro tipo de vetillas, rellenas con epidota y clorita y otras rellenas con óxidos de hierro.

3) NOMBRE DE LA ROCA

Microdiorita propilitizada.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

MUESTRA: Muestra TP-3 Abs: 4+900,90

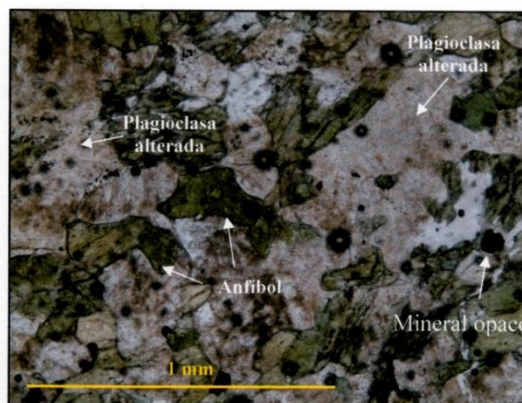
1) DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

- **Color:** La roca presenta un color gris oscuro, con vetillas de color blanco en diferentes direcciones y de un espesor menor a 2 mm.
- **Textura:** Fanerítica de grano fino, los cristales tienen diámetros menores a 1 mm.
- **Minerales x 20:** Plagioclasa, anfíbol, piroxeno y pirita diseminada.
- **Observaciones:** La muestra presenta calcita, relleno de vetillas, como costras en la superficie y también como cristales diseminados, éste último debido a que la roca reacciona con ácido clorhídrico en la mayor parte de su superficie, inclusive en donde no se encuentran vetillas.
Adicionalmente, la muestra ha sido afectada por cizallamiento.



2) DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

- **Textura:** *Holocristalina*, formada por cristales de plagioclasa alterada, anfíbol y piroxeno, en todos los casos de grano fino (< 1 mm). El grado de cristalinidad de la roca es del 100 %, a pesar de que el tamaño de los cristales es siempre menor a 1mm. En general los cristales presentan formas subhedrales y ocasionalmente euhedrales. Según la distribución de los tamaños de grano, la textura de la muestra puede ser caracterizada como equigranular. Los cristales de anfíbol están parcialmente orientados.



- **Componentes:**

- ♦ **Fracción Fenocristales 100%:**

- ❖ **Plagioclasa 52%:** Cristales subhedrales, su tamaño promedio es de 0,4 mm. Están siendo transformados a minerales arcillosos y sericita.
- ❖ **Anfíbol 45%:** Cristales subhedrales a euhedrales, con una distribución bimodal según el tamaño de grano: 1) Cristales de 0,15 – 0,4 mm. 2) Cristales de 0,5 – 1 mm, en este caso presentan maclas tipo Carlsbad. Adicionalmente en algunos cristales se puede observar el clivaje a manera de estrías y en otros el clivaje típico en ángulos agudos.
- ❖ **Piroxeno 3%:** Cristales subhedrales a euhedrales, de tamaño menor a 0,2 mm.

- **Observaciones:**

Se observa en la totalidad de la muestra vetillas rellenas por calcita principalmente, menos frecuentemente por epidota.

Los cristales de epidota también se encuentran diseminados en un contenido menor al 1%.

La muestra contiene minerales opacos diseminados y que corresponden a un volumen aproximado del 2% de la muestra. Con seguridad corresponde a cristales de pirita, ya que éstos son evidentes en la muestra de mano.

3) NOMBRE DE LA ROCA

Microdiorita.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

MUESTRA: Muestra TP-4 **Abs:** 4+862,72

1) DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

- **Color:** La muestra fresca presenta un color gris oscuro, sin embargo, en ciertas zonas el color es gris verdoso, debido a la presencia de minerales de alteración; además se observa vetas de color blanco. Esporádicamente se encuentra vetillas rellenas de un material verdoso y de un espesor máximo de 1 mm.
- **Textura:** Fanerítica, tanto en las vetas, como en el resto de la muestra el tamaño promedio de los cristales oscila entre 1 y 2 mm.
- **Minerales x 20:** Piroxeno, plagioclasa y pirita diseminada. Las vetas están constituidas por cuarzo, plagioclasa, calcita y cristales esporádicos de piroxeno.
- **Observaciones:** La muestra presenta vetas de color blanco, constituidas por cuarzo y plagioclasa, tienen entre 1 y 3 cm de espesor y constituyen al menos el 30% en volumen de la muestra. Fuera de las vetas, la muestra presenta carbonatos, debido a que reacciona al contacto con el ácido clorhídrico.

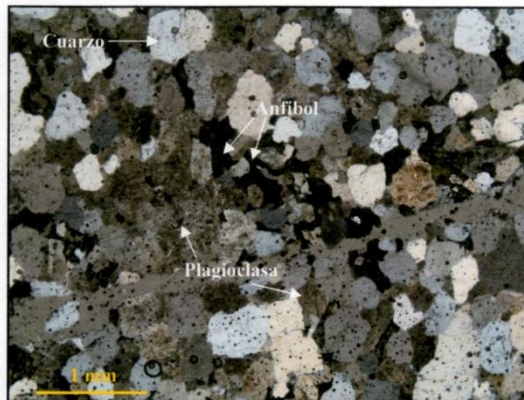


2) DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

- **Textura:** *Holocristalina*, formada por cristales de cuarzo, anfíbol y plagioclasa. El tamaño promedio de los cristales es de 0,5 mm. Ocasionalmente los cristales alcanzan tamaños de hasta 2 mm, por lo que la distribución general del tamaño de grano es bimodal. La muestra presenta cristalinidad total. La forma dominante de los cristales es anhedral y con menor frecuencia es subhedral.
- **Componentes:**
 - ♦ **Fracción Fenocristales 100%:**
 - ❖ **Cuarzo 62%:** Cristales anhedrales, redondeados y subangulosos. Su tamaño promedio es de 0,5 mm. Ocasionalmente se observa inclusiones cristalinas en los cristales de cuarzo, muy probablemente correspondientes a circón.
 - ❖ **Anfíbol 8%:** Cristales anhedrales, con tamaños menores a 1 mm, pero en distintos rangos, 0,2 0,5 0,7 y 0,9 mm. La distribución del tamaño de grano es inequigranular.
 - ❖ **Plagioclasa 30%:** Se presentan de dos tipos: a) Cristales incoloros, frescos, subhedrales, maclados, con un tamaño promedio de 0,5 mm; b) Cristales alterados a arcillas, de color café claro, subangulosos, en este caso alcanzan diámetros de hasta 2 mm.
- **Observaciones:**

Se debe mencionar que la descripción microscópica ha sido realizada en una de las vetas.

La muestra presenta a su vez vetillas, rellenas en unos casos por cuarzo y plagioclasa, en otros por epidota y clorita y en otros por calcita. Adicionalmente se observa minerales opacos, dispersos y en un bajo porcentaje (< 2 %).



3) NOMBRE DE LA ROCA

Diorita con vetas de cuarzo y plagioclasa.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

MUESTRA: Muestra TP-5 **Abs:** 4+800,00

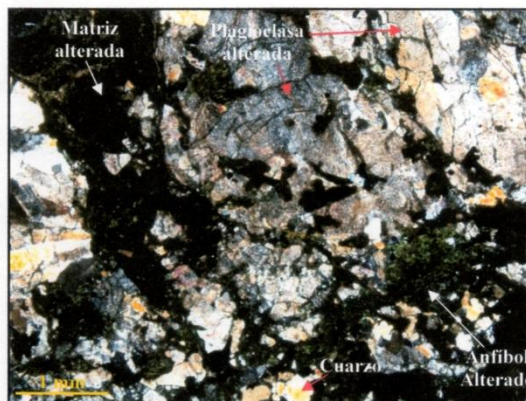
1) DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

- **Color:** La muestra es de color gris verdoso y en ciertas zonas es de color café — anaranjado, debido a la presencia de óxidos; esporádicamente tiene minerales de color blanco. Presenta además vetillas de color café — anaranjado. En uno de los bordes de la muestra se observa una cobertura de minerales secundarios, precipitados posteriormente, de color blanco rojizo (calcita afectada por óxidos)
- **Textura:** Porfírica. El tamaño de los cristales es de 2 — 4 mm.
- **Minerales x 20:** Plagioclasa y anfíbol.
- **Observaciones:** La muestra está muy fracturada y presenta vetillas de un espesor menor a 1 mm, rellenas con calcita y óxidos de Fe. La cobertura de minerales secundarios en uno de los bordes de la muestra, tiene 2 mm de espesor y también corresponde a cristales de calcita, afectados por óxidos de Fe.



2) DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

- **Textura:** Porfírica, formada por cristales de plagioclasa, y anfíbol principalmente. El tamaño máximo que alcanzan los cristales es de 4 mm, el mínimo es de 0,5 mm. Los componentes están muy fracturados, corresponden en su totalidad a cristales y a minerales alterados. Las fracturas afectan tanto a los fenocristales como a la matriz y han sido rellenas por minerales secundarios, como calcita, epidota y cuarzo. La forma dominante de los cristales es anhedral y son angulosos. Según la distribución del tamaño de grano, la textura se caracteriza también como inequigranular.



- **Componentes:**

- ♦ **Fracción Fenocristales 80%:**

- ❖ **Plagioclasa 60%:** Cristales anhedral, redondeados y subhugulosos, fracturados, con relleno de minerales secundarios en las fracturas. Su tamaño promedio es de 2 mm. Los cristales están alterados a minerales arcillosos principalmente y ocasionalmente a calcita. Presenta maclas tipo Carlsbad y polisintéticas, sin embargo en la mayor parte de los cristales éstas han comenzado a ser borradas por alteración.
- ❖ **Cuarzo 12%:** Cristales fracturados, anhedral, con diámetros entre 0,1 y 0,5 mm.
- ❖ **Anfíbol 8%:** Cristales fracturados, están siendo alterado a epidota y clorita, por lo que ya no presentan su forma prismática característica, si no que se encuentran en forma de masas irregulares, de un tamaño máximo de 4 mm.

- ♦ **Fracción Matriz 20%:**

- ❖ **Matriz alterada 15%:** Está cloritizada y epidotizada. Corresponde a masas oscuras y café, irregulares. Es el producto de la alteración de piroxeno principalmente.
- ❖ **Plagioclasa 4%:** Cristales anhedral, pocas veces frescos, la mayor parte alterados a arcilla y calcita.
- ❖ **Anfíbol 1%:** Cristales anhedral y subhedral.

- **Observaciones:**

La muestra presenta frecuentemente vetillas, que afectan a los fenocristales, a la matriz y están rellenas por calcita, epidota y cuarzo. Se observa escasamente minerales opacos diseminados. Es importante mencionar el grado de fracturamiento de los componentes, lo que indica un grado de brechificación de la roca.

2) NOMBRE DE LA ROCA.

Dacita brechificada. Se trata de una roca subvolcánica, lo cual es indicado por la presencia de la fracción matriz.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

MUESTRA: Muestra TP-6 **Abs:** 4+700,00

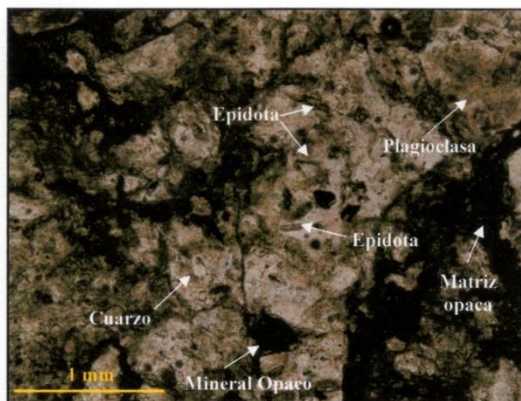
1) DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

- **Color:** La muestra es de color gris verdoso, sin embargo en ciertas zonas y debido al grado de alteración, presenta un color verde oscuro. Se observa la acumulación de minerales (epidota) que localmente le dan una coloración verde clara a la muestra. Lo similar ocurre con acumulaciones de óxidos de hierro y de cuarzo — calcita, por lo que puntualmente la muestra toma un color rojizo y blanco, respectivamente.
- **Textura:** Brechoide.
- **Minerales x 20:** Plagioclasa y anfíbol.
- **Observaciones:** La muestra presenta minerales secundarios tales como: epidota, calcita, cuarzo, epidota, además de pirita diseminada. Se observa vetillas en diferentes direcciones, rellenas con óxidos de Fe y carbonatos. En general la muestra contiene minerales carbonatados, ya que a en zonas donde éstos no son visibles, la roca reacciona con ácido clorhídrico.



2) DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

- **Textura:** *Porfírica Brechoide*, corresponde a una textura relicta, en la cual los minerales primarios han sido reemplazados por minerales finogranulares, tales como cuarzo, plagioclasa y epidota. El tamaño de los cristales es inferior a 0,2 mm.



- **Componentes:**
 - ❖ **Cuarzo 65%:** Presenta forma anhedral. Son Cristales grandes (0,1 — 0,4 mm), algunos de éstos son granos policristalinos. También se observa cristales pequeños (<0,1 mm).
 - ❖ **Plagioclasa 18%:** Cristales de forma subhedral, con tamaños de grano entre 0,7 y 0,3 mm. Gran parte de estos cristales están empolvados, es decir transformándose a arcillas.
 - ❖ **Epidota 7%:** Cristales aciculares, con diámetros menores a 0,1 mm.
 - ❖ **Anfíbol 2%:** Cristales reemplazados por minerales de epidota y calcita.
 - ❖ **Matriz opaca 8%:** Son masas irregulares, oscuras, con presencia de carbonatos.
- **Observaciones:**

Se observa minerales opacos diseminados. La roca tiene una textura brechosa y ha sido fuertemente afectada por mineralizaciones posteriores que han reemplazado la mayor parte de componentes primarios.

3) NOMBRE DE LA ROCA

Dacita alterada.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

MUESTRA: Muestra TP-7 Abs: 4+600,00

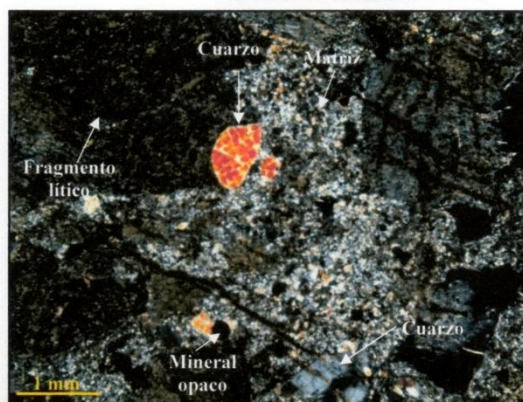
1) DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

- **Color:** La muestra fresca presenta un color gris verdoso claro. Tiene zonas de color crema y fragmentos verdosos y amarillentos.
- **Textura:** Cataclástica, de matriz soportada, constituida por fragmentos angulosos de 1 a 4 cm de diámetro.
- **Minerales x 20:** Cuarzo y minerales máficos.
- **Observaciones:** La muestra presenta una alteración general de sus componentes a minerales arcillosos, fácilmente disgregables. Existen carbonatos, debido a que existe reacción de la muestra con el ácido clorhídrico.



2) DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

- **Textura:** *Brechoide*. El tamaño promedio de los cristales es de 0,5 mm. Ocasionalmente, los cristales, alcanzan tamaños de hasta 2 mm, por lo que la distribución general del tamaño de grano es bimodal. La forma dominante de los cristales es anhedral y con menor frecuencia es subhedral.



- **Componentes:**

- ♦ **Fracción Líticos y de cristales 40 %:**

- ❖ **Líticos 30%:** Corresponden a líticos volcánicos e inclusive de otras brechas volcánicas. Son de formas angulosas a subangulosas, presentan una fuerte alteración de sus componentes a minerales arcillosos. Sus tamaños son variables, desde 1 mm, hasta 2 cm.
- ❖ **Cuarzo 10%:** Cristales anhedrales, angulosos a subangulosos. Su tamaño promedio es de 0,5 mm.

- ♦ **Fracción Matriz 60%:**

- ❖ **Cuarzo 35%:** Aparecen en la matriz en forma de microlitos, de forma anhedral, subangulosos.
- ❖ **Matriz alterada 25%:** Es un material finogranular, constituido en unas zonas por minerales de alteración, tales como epidota y calcita. La mayor parte de esta matriz corresponde a una masa de minerales arcillosos (esmectita), que en ocasiones incluso cubren los fragmentos líticos y de cristales.

- **Observaciones:**

Se observa la presencia de minerales opacos y óxidos de Fe, éstos últimos como producto de la oxidación del piroxeno. Además existen vetillas rellenas por minerales arcillosos, epidota y calcita.

La muestra presenta fuerte alteración de todos sus componentes a minerales arcillosos (esmectita), epidota y calcita.

3) NOMBRE DE LA ROCA

Brecha argilitizada.

Anexo 2

Ensayos de compresión simple.

PROYECTO HIDROELECTRICO TOACHI PILATON

中国水利电力对外公司
CHINA INTERNATIONAL WATER & ELECTRIC CORP.

DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN DE NÚCLEOS DE ROCA

Numero	Fecha de Moldeo	Edad Ensayo	Fecha de rotura	Hora de Muestreo	Via	f'c de Diseño	Planta	Fórmula	Espesor en Obra	Tipo de Roca	Masa de Probeta	Diámetro de Probeta (cm)	Altura sin capping (cm)	Altura con capping (cm)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Ubicación del Sitio de Vaciado del Hormigón
r1	09-ene-14	7	16-ene-14	13:00	-	-	L	-		IV		7,00	13,20	14,00	432,49	112,37	Tunel de Carga Pilatón Sarapullo, Muestra de Roca, , 'Núcleos: 4+966,60
r2	09-ene-14	7	16-ene-14	13:00	-	-	L	-		IV		7,00	13,10	14,00	252,17	65,52	Tunel de Carga Pilatón Sarapullo, Muestra de Roca, , 'Núcleos: 4+966,60



MUESTRA DE ROCA - ABSCISA 4+966,60
 NUCLEO N°1: CARGA (kN) 432,49 - RESISTENCIA (MPa) 112,37
 NUCLEO N°2: CARGA (kN) 252,17 - RESISTENCIA (MPa) 65,52

CWE-ECUADOR

Nombre:
 ING. ROBERTO PALACIOS

PROYECTO HIDROELECTRICO TOACHI PILATON



DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN DE NÚCLEOS DE ROCA

Numero	Fecha de Moldeo	Edad Ensayo	Fecha de rotura	Hora de Muestreo	Via	f'c de Diseño	Planta	Fórmula	Espesor en Obra	Tipo de Roca	Masa de Probeta	Diámetro de Probeta (cm)	Altura sin capping (cm)	Altura con capping (cm)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Ubicación del Sitio de Vaciado del Hormigón
r3	25-feb-14	15	12-mar-14	13:00	-	-	L	-	-	IV	-	7,00	13,10	14,00	215,53	56,00	Tunel de Carga Pilatón Sarapullo, (Sarapullo) Muestra de Roca, . 'Nucleos: 4+862,72



MUESTRA DE ROCA - ABSCISA 4+862,72
CARGA (kN): 215,53
RESISTENCIA (MPa): 56,00

CWE-ECUADOR

Nombre: _____

ING. ROBERTO PALACIOS

Anexo 3

Tabla de la Clasificación RMR y descripción de las discontinuidades.

DESCRIPCIÓN GEOLOGICA:

F7	A. Parámetros de clasificación con sus valores									
	Parámetros		Rango de Valores							
	1	Resistencia de la roca intacta	> 10 MPa	4 – 10 MPa	2 – 4 MPa	1 – 2 MPa	Para estos rangos es recomendable			
		Resistencia de la roca a compresión uniaxial	> 250MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	25 – 50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa	
		Puntaje	15	12	7	4	2	1	0	
	2	Espacio entre fracturas mayores a 10cm (ROD(%))	Ex= 90 - 100	B= 75 - 90	R= 50- 75	P= 25 - 50	MP= <25			
		Puntaje	20	17	13	8	3			
	3	Espaciado de las discontinuidades	MA= >2m	A=0,6 – 2 m	M=200-600 mm	C=60 – 200 mm	MC= <60 mm			
		Puntaje	20	15	10	8	5			
	E. Guías para la clasificación según las condiciones de las discontinuidades									
4.1	Longitud (Persistencia)	A	B	C	D	E	F			
		Puntaje	6	4	2	1	0			
4.2	Separación (diaclasa)	Mjun=<0,1 mm	Juntas=0,1-0,5 mm	L abier=0,5 – 2,5mm	Abiert=2,5 - 10mm	Mabiert=>10 mm				
		Puntaje	6	5	4	1	0			
4.3	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Muy lisa				
		Puntaje	6	5	3	1	0			
4.4	Relleno	Ninguno	Duro <5 mm	Duro >5 mm	Blando <5 mm	Blando >5 mm				
		Puntaje	6	4	2	2	0			
4.5	Meteorización	Inalterada	Ligeramente meteorizada	Modernamente meteorizada	Altamente meteorizada	Descompuesta				
		Puntaje	6	5	3	1	0			
4	Condición de las discontinuidades (ver E)	Superficies muy rugosas, sin continuidad, sin separación, paredes de rocas sin alteración.	Superficies rugosas, con separación < 1mm. Paredes de roca ligeramente meteorizadas	Superficies ligeramente rugosas, con separación < 1mm. Paredes altamente meteorizadas	Superficies pulidas o rellenos <5mm de espesor o separación 1-5 mm. Continuas	Relleno blando > 5mm de espesor. Continuas				
		Puntaje	30	25	20	10	0			
5	Agua Subterránea	Flujo por cada 10 m de longitud del túnel (l/min.)	Ninguno	<10	10-25.	25 – 125	> 125			
		(Presión de agua en la diaclasa) / (tensión principal mayor σ_1)	0 kPa	<0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	>0,5			
		Condiciones generales	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo			
		Puntaje	15	10	7	4	0			
B. Ajuste la orientación de las discontinuidades										
Orientación del rumbo y buzamiento.		Muy Favorable roca sana	Favorable diaclas perpendicular	Regular diaclas. Inclinaas	Desfavorable diaclas. Horizontals cuñas decimetricas	Muy desfavorable cuñas metricas				
Puntaje	Túneles y minas	0	-2	-5	-10	-12				
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25				
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60				
RMR BASICO		GSI =		RMR AJUSTADO =						
F4	F5	F6	C. Tipos de macizos rocosos determinados a partir de la valuación total							
	Tipos de Roca		I	II	III	IV	V			
	Descripción		Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala			
	Puntaje		100<-81	80<-61	60<-41	40<-21	<21			
D. Significado de los tipos de roca										
Tipo de Roca		I	II	III	IV	V				
Cohesión del macizo rocoso (kPa)		>400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	<100				
Angulo de fricción del macizo rocoso (°)		>45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	<15°				
Tiempo medio de sostén		10 meses a 20 años, tramo excavado de 5 a 20 m	30 días a 10 meses, tramo excavado de 5 a 20 m	2 días a 1 mes, tramo excavado de 5 a 12 m	4 horas a 2 días, tramo excavado de 1 a 5 m	1 a 4 horas, tramo excavado de 0,5 a 2 m				
F. Efecto de la orientación del rumbo y buzamiento de las discontinuidades en los túneles										
Rumbo perpendicular al eje del túnel					Rumbo paralelo al eje del túnel					
F 1	Avance en el sentido del buzamiento – Buz.45-90°		F 2	Avance en el sentido del buzamiento – Buz.20-45°		F 3	Buzamiento 45-90°		Buzamiento 20-45°	
Muy favorable (0)			Favorable (-2)			Muy desfavorable (-12)			Regular (-5)	
F 5	Avance contra el sentido del buzamiento – Buz.45-90°		F 6	Avance contra el sentido del buzamiento – Buz.20-45°		F 7 Buzamiento 0-20° Independiente del rumbo				
F 1	Regular (-5)		Desfavorable (-10)			Desfavorable (-10 clave; 0 para hastial)				

Abscisa		RMR (Bieniawsky)												Clase de Macizo Rocoso
		Resistencia a la compresion simple (Puntaje)	RQD % (Puntaje)	Espaciado (Puntaje)	Longitud (Puntaje)	Separacion (Puntaje)	Rugosidad (Puntaje)	Relleno (Puntaje)	Meteorizacion (Puntaje)	Agua Subterranea (Puntaje)	RMR basico	Correlacion por orientacion (tuneles)	RMR Ajustado	
5+100,00	5+098,00	12	17	15	2	4	5	4	5	4	68	-5	63	Roca Buena II
5+098,00	5+094,50	12	17	15	2	4	5	4	5	7	71	-5	66	
5+094,50	5+089,80	12	13	15	2	5	5	4	5	10	71	-5	66	
5+089,80	5+085,50	12	13	15	2	5	5	4	5	10	71	-5	66	
5+085,50	5+080,50	7	17	15	2	5	5	4	5	10	70	-5	65	
5+080,50	5+071,90	12	17	15	2	5	5	4	5	10	75	-5	70	
5+071,90	5+067,20	7	17	15	2	4	5	4	5	10	69	-5	64	
5+067,20	5+063,00	12	17	15	2	4	5	4	5	15	79	0	79	
5+063,00	5+058,20	12	17	15	2	5	5	4	5	10	75	-5	70	
5+058,00	5+053,00	12	17	15	2	5	5	4	5	10	75	-5	70	
5+053,00	5+046,00	12	17	15	2	5	5	4	5	10	75	0	75	
5+046,00	5+041,00	12	13	15	2	4	5	4	5	10	70	0	70	
5+041,00	5+038,75	7	13	15	2	4	5	2	3	10	61	-2	59	Roca Regular IIIa
5+038,75	5+034,80	7	13	10	2	5	5	4	3	10	59	0	59	
5+034,80	5+029,40	12	17	15	2	5	5	4	5	10	75	-12	63	
5+029,40	5+022,00	12	17	15	2	5	5	4	5	10	75	0	75	Roca Buena II
5+022,00	5+017,00	12	17	15	2	5	5	4	5	10	75	-12	63	
5+017,00	5+014,50	12	13	15	2	4	5	4	3	10	68	0	68	
5+014,50	5+011,00	7	13	10	2	1	5	2	3	7	50	-12	38	Roca Mala IV
5+011,00	5+006,00	4	8	8	2	1	1	2	3	10	39	-12	27	
5+006,00	5+003,70	4	8	8	2	1	3	2	3	10	41	-12	29	
5+003,70	5+000,50	7	13	8	2	1	3	2	3	7	46	-12	34	
5+000,50	4+996,10	7	13	10	2	4	3	2	3	7	51	-12	39	
4+996,10	4+993,50	7	13	10	2	1	3	2	3	10	51	-12	39	
4+993,50	4+991,50	4	8	8	2	4	3	2	3	10	44	-12	32	
4+991,50	4+987,30	7	8	8	2	1	3	2	1	10	42	-5	37	
4+987,30	4+983,50	4	8	8	2	4	1	2	3	10	42	-5	37	
4+983,50	4+979,85	7	8	8	2	4	3	2	3	10	47	-12	35	
4+979,85	4+977,40	7	13	8	2	4	3	2	3	7	49	-12	37	
4+977,40	4+972,35	7	13	8	2	1	3	2	3	10	49	-12	37	
4+972,35	4+969,10	7	13	8	2	1	3	2	3	10	49	-12	37	
4+969,10	4+966,60	7	13	8	2	1	3	2	3	10	49	-12	37	
4+966,60	4+963,00	7	13	8	2	1	3	2	3	10	49	-12	37	

Abscisa		RMR (Bieniawsky)												Clase de Macizo Rocosos
		Resistencia a la compresion simple (Puntaje)	RQD % (Puntaje)	Espaciado (Puntaje)	Longitud (Puntaje)	Separacion (Puntaje)	Rugosidad (Puntaje)	Relleno (Puntaje)	Meteorizacion (Puntaje)	Agua Subterranea (Puntaje)	RMR basico	Correlacion por orientacion (tuneles)	RMR Ajustado	
4+963,00	4+960,80	7	13	8	2	1	3	2	3	10	49	-12	37	Roca Mala IV
4+960,80	4+958,20	7	13	8	2	1	3	2	3	10	49	-12	37	
4+958,20	4+956,00	7	13	8	2	1	3	2	3	10	49	-10	39	
4+956,00	4+953,60	7	13	8	2	1	3	2	3	10	49	-12	37	
4+953,60	4+951,80	7	13	8	2	1	3	2	3	10	49	-12	37	
4+951,80	4+947,50	7	13	8	2	4	3	2	1	10	50	-10	40	
4+947,50	4+945,00	7	13	8	2	1	3	2	3	10	49	-12	37	
4+945,00	4+941,00	7	8	8	2	4	1	2	3	10	45	-10	35	
4+941,00	4+937,45	7	8	8	2	4	1	2	3	15	50	-12	38	
4+937,45	4+934,45	4	8	8	2	4	3	2	3	15	52	-12	40	
4+934,45	4+932,00	4	8	8	2	4	3	2	3	15	52	-10	42	
4+932,00	4+927,40	7	13	8	2	1	3	2	3	7	46	-10	36	
4+927,40	4+925,00	7	13	8	2	1	3	2	3	7	46	-12	34	
4+925,00	4+922,80	7	13	8	2	1	3	2	3	7	46	-10	36	
4+922,80	4+918,00	7	13	8	2	1	3	2	3	10	49	-12	37	
4+918,00	4+916,70	7	13	8	2	1	3	2	3	10	49	-12	37	
4+916,70	4+913,20	7	13	8	2	1	3	2	3	7	46	-10	36	
4+913,20	4+911,50	4	8	8	2	4	1	2	3	10	42	-12	30	
4+911,50	4+907,80	7	8	8	2	4	1	2	3	10	45	-12	33	
4+907,80	4+904,70	7	8	8	2	4	3	2	3	10	47	-12	35	
4+904,70	4+902,20	7	13	10	2	1	3	2	3	7	48	-10	38	
4+902,20	4+900,90	7	13	8	2	1	3	2	3	4	43	-12	31	
4+900,90	4+898,35	7	8	8	2	1	3	2	3	7	41	-10	31	
4+898,35	4+896,55	7	8	8	2	1	3	2	3	7	41	-12	29	
4+896,55	4+894,00	7	8	8	2	1	1	2	3	7	39	-12	27	
4+894,00	4+892,00	7	8	8	2	1	3	2	3	7	41	-5	36	
4+892,00	4+890,00	7	8	8	2	1	3	2	3	7	41	-10	31	
4+890,00	4+888,00	7	8	8	2	1	3	2	3	7	41	-12	29	
4+888,00	4+885,00	4	8	8	2	1	3	0	1	10	37	-10	27	
4+885,00	4+884,00	4	8	8	2	1	3	0	1	10	37	-10	27	
4+884,00	4+881,00	4	8	8	2	1	1	0	1	10	35	-10	25	
4+881,00	4+880,00	7	8	8	2	1	1	0	1	10	38	-10	28	
4+880,00	4+878,00	4	8	10	2	4	1	2	3	10	42	-10	32	

Abscisa		RMR (Bieniawsky)												Clase de Macizo Rocosos
		Resistencia a la compresion simple (Puntaje)	RQD % (Puntaje)	Espaciado (Puntaje)	Longitud (Puntaje)	Separacion (Puntaje)	Rugosidad (Puntaje)	Relleno (Puntaje)	Meteorizacion (Puntaje)	Agua Subterranea (Puntaje)	RMR basico	Correlacion por orientacion (tuneles)	RMR Ajustado	
4+878,00	4+876,00	4	8	8	2	4	1	2	3	10	42	-10	32	Roca Mala IV
4+876,00	4+874,00	7	8	8	2	1	3	2	3	10	44	-10	34	
4+874,00	4+871,00	7	8	8	2	4	3	2	3	10	47	-10	37	
4+871,00	4+869,00	4	8	8	2	1	3	2	3	10	41	-10	31	
4+869,00	4+867,00	7	8	8	2	1	3	2	3	10	44	-10	34	
4+867,00	4+864,00	7	8	8	2	1	3	2	3	10	44	-10	34	
4+864,00	4+862,00	7	8	8	2	1	3	2	3	10	44	-10	34	
4+862,00	4+860,00	7	13	10	2	1	3	2	3	10	51	-12	39	
4+860,00	4+857,00	7	13	8	2	1	3	2	3	10	49	-10	39	
4+857,00	4+855,00	7	13	8	2	4	1	2	3	10	50	-12	38	
4+855,00	4+853,50	7	13	10	2	4	3	2	3	10	54	-5	49	Roca Regular IIIb
4+853,50	4+845,00	7	13	10	2	4	3	4	3	10	56	-10	46	
4+845,00	4+840,50	7	13	8	2	4	3	2	3	10	52	-5	47	
4+840,50	4+838,50	7	13	8	2	4	3	2	3	10	52	-5	47	
4+838,50	4+833,40	7	13	10	2	4	3	2	3	10	54	-5	49	
4+833,40	4+828,80	7	13	10	2	4	3	2	3	10	54	-5	49	
4+828,80	4+825,00	7	13	10	2	4	3	2	3	10	54	-5	49	
4+825,00	4+820,00	7	13	10	2	4	3	2	3	10	54	-5	49	
4+820,00	4+815,00	7	13	10	2	4	3	2	3	10	54	-10	44	
4+815,00	4+809,00	7	13	10	2	4	3	2	3	10	54	-5	49	
4+809,00	4+805,00	7	13	10	2	4	3	0	3	15	52	-5	47	
4+805,00	4+799,00	7	13	10	2	4	3	0	3	15	57	-10	47	
4+799,00	4+795,00	7	13	10	2	4	3	0	3	15	57	-10	47	
4+795,00	4+790,00	7	13	10	2	4	3	2	3	10	54	-10	44	
4+790,00	4+785,30	7	13	10	2	4	3	2	3	10	54	-10	44	
4+785,30	4+781,00	7	13	10	2	4	3	2	3	15	59	-10	49	
4+781,00	4+776,00	7	13	10	2	4	3	4	3	15	61	-5	56	Roca Regular IIIa
4+776,00	4+772,00	7	13	10	2	4	3	4	3	10	56	-5	51	
4+772,00	4+769,40	7	13	10	2	4	3	2	3	15	59	-5	54	
4+769,40	4+765,00	7	13	10	2	4	3	2	3	15	59	-5	54	
4+765,00	4+761,00	7	13	15	2	4	5	4	5	10	65	-5	60	Roca Buena II
4+761,00	4+758,90	7	13	15	2	5	5	4	5	10	66	0	66	
4+758,90	4+754,00	12	17	15	2	4	5	4	5	10	74	-5	69	

Abscisa		RMR (Bieniawsky)												Clase de Macizo Rocos
		Resistencia a la compresion simple (Puntaje)	RQD % (Puntaje)	Espaciado (Puntaje)	Longitud (Puntaje)	Separacion (Puntaje)	Rugosidad (Puntaje)	Relleno (Puntaje)	Meteorizacion (Puntaje)	Agua Subterranea (Puntaje)	RMR basico	Correlacion por orientacion (tuneles)	RMR Ajustado	
4+754,00	4+747,80	12	17	15	2	4	5	4	5	10	74	-5	69	Roca Buena II
4+747,70	4+743,00	12	17	15	2	4	5	4	5	10	74	-10	64	
4+743,00	4+738,20	12	17	15	2	4	5	4	5	15	79	-2	77	
4+738,20	4+732,00	12	17	15	2	4	5	4	5	15	79	0	79	
4+732,00	4+729,17	12	17	15	2	5	3	4	5	10	73	-10	63	
4+729,17	4+725,80	12	17	15	2	4	5	2	5	15	77	-10	67	
4+725,80	4+719,50	12	13	15	2	4	5	2	5	10	68	-5	63	
4+719,50	4+716,70	12	17	15	2	4	5	4	5	10	74	-5	69	
4+716,70	4+705,50	12	17	15	2	4	3	4	5	10	72	-5	67	
4+705,50	4+702,00	12	17	15	2	5	5	4	5	10	75	-5	70	
4+702,00	4+696,00	12	17	15	2	5	5	4	5	10	75	0	75	
4+696,00	4+692,00	12	17	15	2	4	5	4	5	10	74	-5	69	
4+692,00	4+690,00	12	17	15	2	5	5	4	5	10	75	-5	70	
4+690,00	4+684,00	12	13	15	2	5	5	2	5	10	69	-5	64	
4+684,00	4+679,00	12	13	15	2	4	5	2	5	10	68	-5	63	
4+679,00	4+676,00	12	17	15	2	4	5	4	5	10	74	-5	69	Roca Regular IIIa
4+676,00	4+671,00	7	13	10	2	4	5	2	3	10	56	-5	51	
4+671,00	4+664,00	7	13	10	2	4	5	2	3	10	56	-5	51	
4+664,00	4+658,00	7	17	15	2	5	5	4	3	15	73	0	73	Roca Buena II
4+658,00	4+654,00	7	17	15	2	5	5	4	3	15	73	0	73	
4+654,00	4+649,00	7	17	15	2	5	5	4	5	15	75	-5	70	
4+649,00	4+647,00	7	17	15	2	4	5	4	5	10	69	-2	67	
4+647,00	4+641,00	7	17	15	2	4	5	4	5	10	65	-2	63	
4+641,00	4+635,00	7	17	15	2	5	5	2	5	15	73	-5	68	
4+635,00	4+630,00	12	13	10	2	4	5	2	5	15	68	0	68	
4+630,00	4+623,00	12	13	10	2	4	3	4	5	15	68	-5	63	
4+623,00	4+614,50	12	13	10	2	4	5	4	5	15	70	-5	65	
4+614,50	4+609,50	12	13	10	2	4	5	4	5	15	70	0	70	
4+609,50	4+602,00	12	13	10	2	5	5	4	5	15	69	-5	64	Roca Regular IIIb
4+602,00	4+600,00	7	13	10	2	1	3	2	3	10	51	-5	46	

Anexo 4

**Tabla de la Clasificación Índice Q y
descripción de las discontinuidades.**

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA - ÍNDICE Q - BARTON GRIMSTAD (1993)

RQD - DESIGNACIÓN DE CALIDAD DE ROCA (OBS. A)		
R1	MUY POBRE	0-25
R2	POBRE	26-50
R3	REGULAR	51-75
R4	BUENA	76-90
R5	EXCELENTE	91-100

Jn - NÚMERO DE FAMILIAS DE JUNTAS (OBS. B)		
A	ROCA MASIVA, JUNTAS ESPORÁDICAS	0,5-1,0
B	UN SISTEMA DE JUNTAS	2
C	UN SISTEMA DE JUNTAS MÁS JUNTAS ALEATORIAS	3
D	DOS SISTEMAS DE JUNTAS	4
E	DOS SISTEMAS DE JUNTAS MÁS JUNTAS ALEATORIAS	6
F	TRES SISTEMAS DE JUNTAS	9
G	TRES SISTEMAS DE JUNTAS MÁS JUNTAS ALEATORIAS	12
H	CUATRO O MÁS SISTEMAS DE JUNTAS, JUNTAS ALEATORIAS, ROCA MUY FRACTURADO, POLIEDROS IRREGULARES	15
I	ROCA FRAGMENTADA, "TRITURADA"	20

Jr - ÍNDICE DE RUGOSIDAD DE LAS JUNTAS		
a) PAREDES DE LAS JUNTAS EN CONTACTO (OBS. C)		
b) PAREDES DE JUNTAS EN CONTACTO ANTES DE UN CIZALLAMIENTO INFERIOR A 10 cm		
A	DISCONTINUAS	4
B	ONDULADAS, IRREGULARES Y RUGOSAS	3
C	ONDULADAS Y LISAS	2
D	ONDULADAS CON ESTRIAS DE FRICCIÓN	1,5
E	PLANAS, IRREGULARES Y RUGOSAS	1,5
F	PLANAS Y LISAS	1,0
G	PLANAS CON ESTRIAS DE FRICCIÓN	0,5
c) PAREDES DE JUNTAS SIN CONTACTO DESPUÉS DE UN CIZALLAMIENTO (OBS. D)		
H	ZONAS CON MINERALES ARCILLOSOS DE ESPESOR SUFICIENTE PARA IMPEDIR EL CONTACTO ENTRE PAREDES	1,0
J	ZONAS ARENOSAS Y FRAGMENTOS CON ESPESOR SUFICIENTE PARA IMPEDIR EL CONTACTO ENTRE PAREDES.	1,0

Ja - ÍNDICE DE ALTERACIÓN Y RELLENO DE JUNTAS			
a) PAREDES DE JUNTA EN CONTACTO (SOLO PÁGINAS)			
A	SELLADA, DURA, RELLENO IMPERMEABLE, EJ. CUARZO, EPIDOTA.	ϕ_r	Ja
B	PAREDES SANAS, SUPERFICIE APENAS DESCOLORIDA	25°-35°	1,0
C	PAREDES POCO ALTERADAS, SIN MINERALES BLANDOS ARCILLA NI ROCA DESINTEGRADA	25°-30°	2,0
D	PAREDES CON LIMO O ARENO-ARCILLOSA, Poca fricción de arcilla.	20°-25°	3,0
E	RECUBRIMIENTO DE MINERALES ARCILLOSOS DE BAJA FRICCIÓN, CAOLINITA O MICAS TAMBIÉN CLORITA, TALCO, GIPSITA, ETC. Y Poca cantidad de MINERALES EXPANSIVOS.	8°-16°	4,0
b) PAREDES DE JUNTAS EN CONTACTO ANTES DE UN CIZALLAMIENTO INFERIOR A 10 cm (RELLENO MINERAL DELGADO)			
F	PARTÍCULAS ARENOSAS, SIN MINERALES ARCILLOSOS Y ROCA DESINTEGRADA	25°-30°	4,0
G	ARCILLA RÍGIDA, DURA, CONTINUA ESPESOR ≤ 5 mm	14°-4°	6,0
H	ARCILLA POCO A MEDIANAMENTE CONSOLIDADA, CONTINUA, ESPESOR ≤ 5 mm	12°-16°	8,0
J	MINERALES ARCILLOSOS EXPANSIVOS, MONTMORILLONITA, CONTINUA ESPESOR ≤ 5 mm; VALOR DE Ja DEPENDERÁ DEL % DE ARCILLA EXPANSIVAS Y ACCESO A AGUA, ETC.	6°-12°	8-12
c) PAREDES DE JUNTAS SIN CONTACTO DESPUÉS DE UN CIZALLAMIENTO			
KLM	ZONAS DESINTEGRADAS, ROCA FRAGMENTADA Y ARCILLA, VER G, H, J	6°-24°	5, 8 o 12
N	ZONAS DE LIMO O ARCILLO-ARENOSO Y PEQUEÑA FRACCIÓN DE MINERALES ARCILLOSOS (DURA).	-	5,0
OPR	ZONAS DE ARCILLA ESPESA Y CONTINUA VER G, H, J, PARA DESCRIPCIÓN.	6°-24°	10, 13 o 13-20

OBSERVACIÓN:

Jr, ÍNDICE DE RUGOSIDAD DE JUNTAS, Y Ja, ÍNDICE DE ALTERACIÓN, SON APLICADOS PARA SISTEMAS DE JUNTAS O DISCONTINUIDADES QUE SON LAS MENOS FAVORABLES PARA LA ESTABILIDAD, AMBAS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE ORIENTACIÓN Y RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO, T ($T = \sigma_n \tan^{-1} (J_r/J_n)$). ESCOJA E INICIE LA CLASIFICACIÓN POR LA DISCONTINUIDAD MÁS DESFAVORABLE A LA ESTABILIDAD.

Jw - FACTOR DE REDUCCIÓN DEBIDO A PRESENCIA DE AGUA (OBS. E)		
A	EXCAVACIÓN SECA O GOTEÓ, ≤ 5 l/min LOCALMENTE	1,0
B	CAUDAL O PRESIÓN MEDIA, PUEDE LAVAR EL RELLENO	0,66
C	CAUDAL O PRESIÓN ALTA EN ROCA COMPETENTE Y JUNTAS SIN RELLENO	0,5
D	CAUDAL O PRESIÓN ALTO, CONSIDERABLE LAVADO DE LAS JUNTAS	0,33
E	CAUDALES EXCEPCIONALES DESPUÉS DE LA DETONACIÓN, DECRECIENDO CON EL TIEMPO	0,2-0,1
F	CAUDALES EXCEPCIONALES DESPUÉS DE LA DETONACIÓN, SIN DISMINUCIÓN SIGNIFICATIVA.	0,1-0,05

SRF - FACTOR DE REDUCCIÓN DEBIDO A TENSIONES EN EL MACIZO			
a) ZONAS DE DEBILIDAD: INTERCEPTANDO LA EXCAVACIÓN, LAS CUALES PODRÍAN CAUSAR CAÍDA DE BLOQUES DE ROCA CUANDO EL TÚNEL ES EXCAVADO (OBS. F)			
A	ABUNDANTES ZONAS DE DEBILIDAD O MILONITOS CON ARCILLA O ROCA QUÍMICAMENTE DESINTEGRADA, MUCHO MATERIAL SUELTO EN LA SUPERFICIE DE LA ROCA (CUALQUIER PROFUNDIDAD).		10
B	ZONAS DE DEBILIDAD AISLADAS, CON ARCILLA O ROCA DESINTEGRADA (PROFUNDIDAD ≤ 50 m)		5
C	ZONAS DE DEBILIDAD AISLADAS, CON ARCILLA O ROCA DESINTEGRADA (PROFUNDIDAD ≥ 50 m)		2,5
D	ABUNDANTES ZONAS CIZALLADAS EN ROCA COMPETENTE, ARCILLA; MATERIAL SUELTO ALREDEDOR DE LA ROCA (CUALQUIER PROFUNDIDAD).		7,5
E	ZONAS CIZALLADAS AISLADAS, EN ROCA COMPETENTE, SIN ARCILLA; (PROFUNDIDAD ≤ 50 m)		5,0
F	ZONAS CIZALLADAS AISLADAS, EN ROCA COMPETENTE, SIN ARCILLA; (PROFUNDIDAD ≥ 50 m)		2,5
G	ROCA MUY FRAGMENTADA, JUNTAS ABIERTAS, ROCA "TRITURADA" (CUALQUIER PROFUNDIDAD).		5,0
b) ROCA COMPETENTE; PROBLEMAS DE TENSIÓN EN EL MACIZO (OBS. G)			
H	TENSIÓN BAJA, PEQUEÑA COBERTURA	σ_c/σ_1	σ_3/σ_c SRF
J	TENSIÓN MEDIA, CONDICIONES TENSIONALES FAVORABLES	>200	$<0,01$ 2,5
K	TENSIONES ELEVADAS, ESTRUCTURA COMPACTA, FAVORABLE PARA LA ESTABILIDAD DESFAVORABLE PARA LOS HASTIALES.	200-10	0,01-0,3 1
L	LAJAMIENTO MODERADO DESPUÉS DE UNA HORA EN ROCAS MASIVAS.	10-5	0,3-0,4 0,5-2
M	LAJAMIENTO Y ESTALLIDO DESPUÉS DE UNOS MINUTOS EN ROCAS MASIVAS.	5-3	0,5-0,65 5-50
N	ESTALLIDOS VIOLENTOS (DEFORMACIÓN EXPLOSIVA) Y DEFORMACIÓN DINÁMICA INMEDIATA EN ROCAS MASIVAS.	3-2	0,65-1 50-200
c) TERRENO FLUYENTE (SQUEEZING ROCK): FLUJO PLÁSTICO DE ROCAS INCOMPETENTES BAJO LA INFLUENCIA DE ALTAS PRESIONES LITOSTÁTICAS (OBS. H)			
O	MODERADO "SQUEEZING" CON BAJAS PRESIONES LITOSTÁTICAS.	< 2	$>1,0$ 200 400
P	INTENSO "SQUEEZING" CON ALTAS PRESIONES LITOSTÁTICAS.		
d) TERRENOS EXPANSIVOS: EXPANSIÓN EN FUNCIÓN DE LA PRESENCIA DE AGUA			
R	MODERADA PRESIÓN DE EXPANSIÓN DE ROCA		5-10
S	INTENSA PRESIÓN DE EXPANSIÓN DE ROCA		10-15

OBSERVACIONES :

A- CUANDO EL RQD MEDIDO ES ≤ 10 (INCLUSIVE CERO), USAR EL VALOR 10 PARA LA DETERMINACIÓN DE Q; USAR VALORES DE INTERVALOS MÚLTIPLOS DE 5. PARA DETERMINACIÓN EN EL TRAMO EXCAVADO, ESCOJA EL TRECHO MÁS REPRESENTATIVO DEL MACIZO, Y HAGA LA CUENTA VOLUMÉTRICA DE LAS JUNTAS EN TRES EJES ORTOGONALES.
 $RQD = 115 - 3,3 J_w$ (J_w ES LA SUMATORIA DE LAS JUNTAS POR METRO, ENCONTRADAS EN LOS 3 EJES).

B- PARA INTERSECCIÓN DE TÚNELES USAR $3 \times J_n$; PARA PORTALES, USAR $2 \times J_n$.

C- DESCRIPCIÓN REFERENTE A LAS CONDICIONES A ESCALA PEQUEÑA E INTERMEDIA, EN ESTE ORDEN.

D- ADICIÓN 1 SI EL ESPACIAMIENTO ENTRE EL SISTEMA PRINCIPAL DE JUNTAS FUESE MAYOR QUE 3 METROS.

E- LOS ÍTEMES C, E Y F SON ESTIMACIONES GROSERAS; LOS VALORES DE J_w PODRÁN AUMENTARSE SI LOS CAUDALES SON MEDIDOS EN LOS DRENAJES EJECUTADOS.

F- REDUCIR ESOS VALORES DE SRF, DE 25% A 50%, SI ZONAS RELEVANTES DE DEBILIDAD INFLUYEN MAS NO INTERCEPTAN CON LA EXCAVACIÓN.

G- PARA FUERTE CAMPO DE TENSIONES VIRGENES (SI FUESE): CUANDO $5 < \sigma_1/\sigma_3$, REDUCIR σ_c EN 25%; $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ REDUCIR σ_c EN 50%, DONDE σ_c = RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MONOAXIAL, σ_1 Y σ_3 TENSIONES PRINCIPALES MÁXIMA Y MÍNIMA ACTUANTES, σ_3 TENSION TANGENCIAL MÁXIMA (ESTIMADA DE LA TEORÍA DE LA ELASTICIDAD). PARA POCOS CASOS REGISTRADOS, DONDE LA COBERTURA ES MENOR QUE EL VANO, SE SUGIERE EL AUMENTO DEL SRF DE 2,5 PARA 5,0, ÍTEM H.

H- "SQUEEZING" PUEDE OCURRIR EN PROFUNDIDADES DE $h > 350 \sigma_1^{1/3}$ LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL MACIZO PUEDE SER ESTIMADA DE LA SIGUIENTE RELACIÓN: $5,7 \sigma_1^{1/3}$ (MPa). DONDE σ_1 = PESO ESPECÍFICO DE LA ROCA EN kN/m³.

I- LA COMPROBACIÓN DEL SRF ADOPTADO DEBERÁ REALIZARSE A TRAVÉS DE LA INSTALACIÓN, LECTURA Y ANÁLISIS DE LOS DATOS DE CONVERGENCIA EN SECCIONES DE MACIZO RÓCOSO.

J- PARA PORTALES E INTERSECCIONES DE TÚNELES, EN LARGO HASTA 1,5 x DIÁMETRO (VANO), EL ESR DEBERÁ SER IGUAL A 1, INDEPENDIENTEMENTE DEL ESR ADOPTADO EN LA TABLA.

Abscisa		Q (Barton)								Clase de Macizo Rocoso
		Jv - Indice de Blocosidad	RQD %	Jn - numero de familia de juntas	Jr - Indice de rugosidad de las juntas	Ja - Indice de alteracion y relleno de juntas	Jw - Factor de reduccion debido a prsencia de agua	SRF - Factor de reduccion debido a tensiones en el macizo	Q	
5+100,00	5+098,00	12	75,4	6	1,5	0,75	0,66	2,5	6,631	Roca Regular III
5+098,00	5+094,50	12	75,4	6	1,5	0,75	0,66	2,5	6,631	
5+094,50	5+089,80	13	72,1	6	1,5	0,75	1	2,5	9,608	
5+089,80	5+085,50	13	72,1	6	1,5	0,75	1	2,5	9,608	
5+085,50	5+080,50	12	75,4	9	1,5	0,75	1	2,5	6,696	
5+080,50	5+071,90	12	75,4	9	1,5	0,75	1	2,5	6,696	
5+071,90	5+067,20	13	72,1	9	1,5	0,75	1	2,5	6,408	
5+067,20	5+063,00	12	75,4	9	1,5	0,75	1	2,5	6,696	
5+063,00	5+058,20	12	75,4	6	1,5	0,75	1	2,5	10,048	Roca Buena II
5+058,00	5+053,00	12	75,4	9	1,5	0,75	1	2,5	6,696	Roca Regular III
5+053,00	5+046,00	12	75,4	9	1,5	0,75	1	2,5	6,696	
5+046,00	5+041,00	13	72,1	6	1,5	0,75	1	2,5	9,608	Roca Mala IV
5+041,00	5+038,75	13	72,1	6	1,5	3	1	2,5	2,402	
5+038,75	5+034,80	13	72,1	9	1,5	3	1	2,5	1,602	
5+034,80	5+029,40	12	75,4	6	1,5	0,75	1	2,5	10,048	Roca Buena II
5+029,40	5+022,00	12	75,4	6	1,5	0,75	1	2,5	10,048	
5+022,00	5+017,00	12	75,4	6	1,5	0,75	1	2,5	10,048	
5+017,00	5+014,50	13	72,1	6	1,5	0,75	1	2,5	9,608	Roca Regular III
5+014,50	5+011,00	13	72,1	6	1,5	6	0,66	2,5	0,792	Roca Muy Mala V
5+011,00	5+006,00	21	45,7	6	1,5	6	1	2,5	0,761	
5+006,00	5+003,70	20	49	6	1,5	6	1	2,5	0,816	
5+003,70	5+000,50	19	52,3	6	1,5	6	0,66	2,5	0,574	
5+000,50	4+996,10	17	58,9	6	1,5	6	0,66	2,5	0,647	
4+996,10	4+993,50	16	62,2	6	1,5	6	1	2,5	1,036	Roca Mala IV
4+993,50	4+991,50	23	39,1	9	1,5	6	1	5	0,144	Roca Muy Mala V
4+991,50	4+987,30	21	45,7	9	1,5	6	1	5	0,253	
4+987,30	4+983,50	22	42,4	9	1,5	6	1	5	0,235	
4+983,50	4+979,85	20	49	9	1,5	6	1	2,5	0,544	
4+979,85	4+977,40	19	52,3	6	1,5	6	0,66	2,5	0,574	
4+977,40	4+972,35	19	52,3	9	1,5	6	1	2,5	0,581	
4+972,35	4+969,10	17	58,9	9	1,5	6	1	2,5	0,654	
4+969,10	4+966,60	16	62,2	6	1,5	6	1	2,5	1,846	Roca Mala IV

Abscisa		Q (Barton)								Clase de Macizo Rocoso
		Jv - Indice de Blocosidad	RQD %	Jn - numero de familia de juntas	Jr - Indice de rugosidad de las juntas	Ja - Indice de alteracion y relleno de juntas	Jw - Factor de reduccion debido a prsencia de agua	SRF - Factor de reduccion debido a tensiones en el macizo	Q	
4+966,60	4+963,00	19	52,3	6	1,5	6	1	2,5	0,581	Roca Muy Mala V
4+963,00	4+960,80	18	55,6	9	1,5	6	1	2,5	0,617	
4+960,80	4+958,20	19	52,3	6	1,5	6	1	2,5	0,871	
4+958,20	4+956,00	17	58,9	9	1,5	6	1	2,5	0,654	
4+956,00	4+953,60	17	58,9	6	1,5	6	1	2,5	0,981	
4+953,60	4+951,80	15	65,5	9	1,5	6	1	2,5	0,727	
4+951,80	4+947,50	18	55,6	9	0,5	3	1	2,5	0,409	
4+947,50	4+945,00	19	52,3	9	1,5	3	1	2,5	1,162	Roca Mala IV
4+945,00	4+941,00	20	49	9	1,5	6	1	5	0,272	Roca Muy Mala V
4+941,00	4+937,45	24	35,8	9	1,5	6	1	5	0,198	
4+937,45	4+934,45	22	42,4	9	1,5	6	1	5	0,235	
4+934,45	4+932,00	20	49	9	1,5	6	1	7,5	0,176	
4+932,00	4+927,40	17	58,9	9	1,5	6	0,66	2,5	0,431	
4+927,40	4+925,00	17	58,9	9	1,5	6	0,66	2,5	0,431	
4+925,00	4+922,80	16	62,2	9	1,5	6	0,66	2,5	0,456	
4+922,80	4+918,00	15	65,5	9	1,5	3	1	2,5	1,454	Roca Mala IV
4+918,00	4+916,70	16	62,2	9	1,5	3	1	2,5	1,382	
4+916,70	4+913,20	15	65,5	9	1,5	3	0,66	2,5	0,959	
4+913,20	4+911,50	24	35,8	9	1,5	3	1	2,5	0,794	Roca Muy Mala V
4+911,50	4+907,80	24	35,8	9	1,5	3	1	2,5	0,794	
4+907,80	4+904,70	25	49	9	1,5	3	0,66	2,5	0,598	
4+904,70	4+902,20	18	55,6	9	1,5	3	0,66	2,5	0,814	
4+902,20	4+900,90	18	55,6	9	1,5	6	0,5	2,5	0,308	
4+900,90	4+898,35	20	49	9	1,5	6	0,66	2,5	0,353	
4+898,35	4+896,55	26	29,2	9	1,5	6	0,66	2,5	0,213	
4+896,55	4+894,00	22	42,4	9	1,5	6	0,66	2,5	0,310	
4+894,00	4+892,00	20	49	9	1,5	6	0,5	2,5	0,272	
4+892,00	4+890,00	20	49	9	1,5	3	0,66	2,5	0,718	
4+890,00	4+888,00	20	49	9	1,5	3	0,66	2,5	0,718	
4+888,00	4+885,00	23	39,1	9	1,5	5	0,66	10	0,085	
4+885,00	4+884,00	25	32,5	6	1,5	5	0,66	10	0,107	
4+884,00	4+881,00	20	47	9	1,5	5	1	10	0,156	

Abscisa		Q (Barton)								Clase de Macizo Rocoso
		Jv - Indice de Blocosidad	RQD %	Jn - numero de familia de juntas	Jr - Indice de rugosidad de las juntas	Ja - Indice de alteracion y relleno de juntas	Jw - Factor de reduccion debido a prsencia de agua	SRF - Factor de reduccion debido a tensiones en el macizo	Q	
4+881,00	4+880,00	23	39,1	9	1,5	5	1	10	0,130	Roca Muy Mala V
4+880,00	4+878,00	21	45,7	9	1,5	3	1	2,5	1,014	
4+878,00	4+876,00	22	42,4	9	1,5	3	1	2,5	0,942	
4+876,00	4+874,00	22	42,9	9	1,5	3	1	2,5	0,942	
4+874,00	4+871,00	20	49	9	0,5	3	1	2,5	0,361	
4+871,00	4+869,00	17	58,9	9	1,5	3	1	2,5	1,318	Roca Mala IV
4+869,00	4+867,00	16	62,2	9	1,5	3	1	2,5	1,382	
4+867,00	4+864,00	20	49	9	1,5	3	1	2,5	1,088	
4+864,00	4+862,00	20	49	9	1,5	3	1	2,5	1,088	
4+862,00	4+860,00	15	65,5	9	1,5	3	1	2,5	1,454	
4+860,00	4+857,00	16	62,2	9	1,5	3	1	2,5	1,382	
4+857,00	4+855,00	14	72,1	9	1,5	3	1	2,5	1,602	
4+855,00	4+853,50	15	65,5	9	1,5	2	1	2,5	2,181	
4+853,50	4+845,00	18	55,6	9	1,5	2	1	2,5	1,851	
4+845,00	4+840,50	15	65,5	9	1,5	3	1	2,5	1,454	
4+840,50	4+838,50	15	65,5	9	1,5	3	1	2,5	1,454	
4+838,50	4+833,40	13	72,1	9	1,5	3	1	2,5	1,602	
4+833,40	4+828,80	14	68,8	9	1,5	3	1	2,5	1,528	
4+828,80	4+825,00	13	72,1	9	1,5	3	1	2,5	1,602	
4+825,00	4+820,00	14	68,8	9	1,5	3	1	2,5	1,528	
4+820,00	4+815,00	13	72,1	9	1,5	3	1	2,5	1,602	
4+815,00	4+809,00	16	62,2	9	1,5	3	1	2,5	1,382	
4+809,00	4+805,00	13	72,1	9	1,5	3	1	2,5	1,602	
4+805,00	4+799,00	15	65,5	9	1,5	5	1	10	0,218	Roca Muy Mala V
4+799,00	4+795,00	15	65,5	9	1,5	5	1	10	0,218	
4+795,00	4+790,00	13	72,1	9	1,5	3	1	2,5	1,602	Roca Mala IV
4+790,00	4+785,30	13	72,1	9	1,5	3	1	2,5	1,602	
4+785,30	4+781,00	13	72,1	9	1,5	3	1	2,5	1,602	
4+781,00	4+776,00	14	68,8	9	1,5	2	1	2,5	2,292	
4+776,00	4+772,00	13	72,1	9	1,5	2	1	2,5	2,403	
4+772,00	4+769,40	13	72,1	9	1,5	2	1	2,5	2,403	

Abscisa		Q (Barton)								Clase de Macizo Rocoso
		Jv - Indice de Blocosidad	RQD %	Jn - numero de familia de juntas	Jr - Indice de rugosidad de las juntas	Ja - Indice de alteracion y relleno de juntas	Jw - Factor de reduccion debido a prsencia de agua	SRF - Factor de reduccion debido a tensiones en el macizo	Q	
4+769,40	4+765,00	13	72,1	9	1,5	2	1	2,5	2,403	Roca Mala IV
4+765,00	4+761,00	13	72,1	9	1,5	1	1	2,5	4,806	Roca Regular III
4+761,00	4+758,90	16	62,2	9	1,5	1	1	2,5	4,146	
4+758,90	4+754,00	12	75,4	9	1,5	0,75	1	2,5	6,664	
4+754,00	4+747,80	8	88,6	9	1,5	0,75	1	2,5	7,872	
4+747,70	4+743,00	11	78,7	9	1,5	0,75	1	2,5	6,992	
4+743,00	4+738,20	10	82	9	1,5	0,75	1	2,5	7,288	
4+738,20	4+732,00	9	85,3	9	1,5	0,75	1	2,5	7,576	
4+732,00	4+729,17	11	78,7	9	1,5	2	1	2,5	2,622	Roca Mala IV
4+729,17	4+725,80	12	75,4	9	1,5	0,75	1	2,5	6,664	Roca Regular III
4+725,80	4+719,50	13	72,1	9	1,5	0,75	1	2,5	6,408	
4+719,50	4+716,70	12	75,4	9	1,5	0,75	1	2,5	6,664	
4+716,70	4+705,50	11	78,7	9	1,5	0,75	1	2,5	6,992	
4+705,50	4+702,00	9	85,3	9	1,5	0,75	1	2,5	7,576	
4+702,00	4+696,00	12	75,4	9	1,5	0,75	1	2,5	6,696	
4+696,00	4+692,00	11	78,7	9	1,5	0,75	1	2,5	6,992	
4+692,00	4+690,00	12	75,4	9	1,5	0,75	1	2,5	6,664	
4+690,00	4+684,00	13	72,1	9	1,5	0,75	1	2,5	6,408	
4+684,00	4+679,00	14	68,8	9	1,5	0,75	1	2,5	6,112	
4+679,00	4+676,00	11	78,7	9	1,5	0,75	1	2,5	6,992	
4+676,00	4+671,00	15	65,5	9	1,5	6	1	2,5	0,727	Roca Muy Mala V
4+671,00	4+664,00	16	52,8	9	1,5	6	1	2,5	0,586	
4+664,00	4+658,00	11	78,7	9	1,5	0,75	1	2,5	6,992	Roca Regular III
4+658,00	4+654,00	12	75,4	9	1,5	0,75	1	2,5	6,664	
4+654,00	4+649,00	10	82	9	1,5	0,75	1	2,5	7,288	
4+649,00	4+647,00	12	75,4	9	1,5	0,75	1	2,5	6,664	
4+647,00	4+641,00	12	75,4	9	1,5	0,75	0,66	2,5	4,398	
4+641,00	4+635,00	12	75,4	9	1,5	0,75	1	2,5	6,696	
4+635,00	4+630,00	16	62,2	9	1,5	0,75	1	2,5	5,528	
4+630,00	4+623,00	19	52,3	9	1,5	0,75	1	2,5	4,646	
4+623,00	4+614,50	14	68,8	9	1,5	0,75	1	2,5	6,112	
4+614,50	4+609,50	12	75,4	6	1,5	0,75	1	2,5	10,048	

Abscisa		Q (Barton)								Clase de Macizo Rocoso
		Jv - Indice de Blocosidad	RQD %	Jn - numero de familia de juntas	Jr - Indice de rugosidad de las juntas	Ja - Indice de alteracion y relleno de juntas	Jw - Factor de reduccion debido a prsencia de agua	SRF - Factor de reduccion debido a tensiones en el macizo	Q	
4+609,50	4+602,00	15	65,5	9	1,5	0,75	1	2,5	5,816	Roca Regular III
4+602,00	4+600,00	17	58,9	9	1,5	2	1	2,5	1,962	Roca Mala IV

Anexo 5

Correlación entre las Clasificación RMR e Índice Q.

						Correlacion (Barton, 1995) RMR = 15 log Q + 50 - Q = 10 (RMR – 50) / 15			
Abscisa		RMR (Bieniawsky)	Clase de Macizo Rocoso	Índice Q (Barton)	Clase de Macizo Rocoso	RMR en funcion de Q	Clase de Macizo Rocoso	Q en funcion de RMR	Clase de Macizo Rocoso
5+100,00	5+098,00	63	Buena II	6,631	Regular III	62	Buena II	7,356	Regular III
5+098,00	5+094,50	66	Buena II	6,631	Regular III	62	Buena II	11,660	Buena II
5+094,50	5+089,80	66	Buena II	9,608	Regular III	64	Buena II	11,660	Buena II
5+089,80	5+085,50	66	Buena II	9,608	Regular III	64	Buena II	11,660	Buena II
5+085,50	5+080,50	65	Buena II	6,696	Regular III	62	Buena II	10,000	Buena II
5+080,50	5+071,90	70	Buena II	6,696	Regular III	62	Buena II	21,544	Buena II
5+071,90	5+067,20	64	Buena II	6,408	Regular III	62	Buena II	8,576	Regular III
5+067,20	5+063,00	79	Buena II	6,696	Regular III	62	Buena II	85,770	Muy buena I
5+063,00	5+058,20	70	Buena II	10,048	Buena II	65	Buena II	21,544	Buena II
5+058,00	5+053,00	70	Buena II	6,696	Regular III	62	Buena II	21,544	Buena II
5+053,00	5+046,00	75	Buena II	6,696	Regular III	62	Buena II	46,415	Muy buena I
5+046,00	5+041,00	70	Buena II	9,608	Regular III	64	Buena II	21,544	Buena II
5+041,00	5+038,75	59	Regular IIIa	2,402	Mala IV	55	Regular IIIa	3,981	Mala IV
5+038,75	5+034,80	59	Regular IIIa	1,602	Mala IV	53	Regular IIIa	3,981	Mala IV
5+034,80	5+029,40	63	Buena II	10,048	Buena II	65	Buena II	7,356	Regular III
5+029,40	5+022,00	75	Buena II	10,048	Buena II	65	Buena II	46,415	Muy buena I
5+022,00	5+017,00	63	Buena II	10,048	Buena II	65	Buena II	7,356	Regular III
5+017,00	5+014,50	68	Buena II	9,608	Regular III	64	Buena II	15,848	Buena II
5+014,50	5+011,00	38	Mala IV	0,792	Muy Mala V	48	Regular IIIb	0,158	Muy mala V
5+011,00	5+006,00	27	Mala IV	0,761	Muy Mala V	48	Regular IIIb	0,029	Extrem. Mala V
5+006,00	5+003,70	29	Mala IV	0,816	Muy Mala V	48	Regular IIIb	0,039	Extrem. Mala V
5+003,70	5+000,50	34	Mala IV	0,574	Muy Mala V	46	Regular IIIb	0,085	Extrem. Mala V
5+000,50	4+996,10	39	Mala IV	0,647	Muy Mala V	47	Regular IIIb	0,184	Muy mala V
4+996,10	4+993,50	39	Mala IV	1,036	Roca Mala IV	50	Regular IIIa	0,184	Muy mala V
4+993,50	4+991,50	32	Mala IV	0,144	Muy Mala V	37	Mala IV	0,063	Extrem. Mala V
4+991,50	4+987,30	37	Mala IV	0,253	Muy Mala V	41	Regular IIIb	0,135	Muy mala V
4+987,30	4+983,50	37	Mala IV	0,235	Muy Mala V	40	Mala IV	0,135	Muy mala V

						Correlacion (Barton, 1995) RMR = 15 log Q + 50 - Q = 10 (RMR – 50) / 15			
Abscisa		RMR (Bieniawsky)	Clase de Macizo Rocoso	Índice Q (Barton)	Clase de Macizo Rocoso	RMR en funcion de Q	Clase de Macizo Rocoso	Q en funcion de RMR	Clase de Macizo Rocoso
4+983,50	4+979,85	35	Mala IV	0,544	Muy Mala V	46	Regular IIIb	0,544	Muy mala V
4+979,85	4+977,40	37	Mala IV	0,574	Muy Mala V	46	Regular IIIb	0,135	Muy mala V
4+977,40	4+972,35	37	Mala IV	0,581	Muy Mala V	46	Regular IIIb	0,135	Muy mala V
4+972,35	4+969,10	37	Mala IV	0,654	Muy Mala V	47	Regular IIIb	0,135	Muy mala V
4+969,10	4+966,60	37	Mala IV	1,846	Mala IV	53	Regular IIIa	0,135	Muy mala V
4+966,60	4+963,00	37	Mala IV	0,581	Muy Mala V	46	Regular IIIb	0,135	Muy mala V
4+963,00	4+960,80	37	Mala IV	0,617	Muy Mala V	46	Regular IIIb	0,135	Muy mala V
4+960,80	4+958,20	37	Mala IV	0,871	Muy Mala V	49	Regular IIIb	0,135	Muy mala V
4+958,20	4+956,00	39	Mala IV	0,654	Muy Mala V	47	Regular IIIb	0,184	Muy mala V
4+956,00	4+953,60	37	Mala IV	0,981	Muy Mala V	49	Regular IIIb	0,135	Muy mala V
4+953,60	4+951,80	37	Mala IV	0,727	Muy Mala V	47	Regular IIIb	0,135	Muy mala V
4+951,80	4+947,50	40	Mala IV	0,409	Muy Mala V	44	Regular IIIb	0,215	Muy mala V
4+947,50	4+945,00	37	Mala IV	1,162	Mala IV	50	Regular IIIa	0,135	Muy mala V
4+945,00	4+941,00	35	Mala IV	0,272	Muy Mala V	41	Regular IIIb	0,100	Muy mala V
4+941,00	4+937,45	38	Mala IV	0,198	Muy Mala V	39	Mala IV	0,158	Muy mala V
4+937,45	4+934,45	40	Mala IV	0,235	Muy Mala V	40	Mala IV	0,215	Muy mala V
4+934,45	4+932,00	42	Mala IV	0,176	Muy Mala V	38	Mala IV	0,292	Muy mala V
4+932,00	4+927,40	36	Mala IV	0,431	Muy Mala V	44	Regular IIIb	0,116	Muy mala V
4+927,40	4+925,00	34	Mala IV	0,431	Muy Mala V	44	Regular IIIb	0,085	Extrem. Mala V
4+925,00	4+922,80	36	Mala IV	0,456	Muy Mala V	44	Regular IIIb	0,116	Muy mala V
4+922,80	4+918,00	37	Mala IV	1,454	Mala IV	52	Regular IIIa	0,135	Muy mala V
4+918,00	4+916,70	37	Mala IV	1,382	Mala IV	52	Regular IIIa	0,135	Muy mala V
4+916,70	4+913,20	36	Mala IV	0,959	Muy Mala V	49	Regular IIIb	0,116	Muy mala V
4+913,20	4+911,50	30	Mala IV	0,794	Muy Mala V	48	Regular IIIb	0,046	Extrem. Mala V
4+911,50	4+907,80	33	Mala IV	0,794	Muy Mala V	49	Regular IIIb	0,073	Extrem. Mala V
4+907,80	4+904,70	35	Mala IV	0,598	Muy Mala V	46	Regular IIIb	0,1	Muy mala V
4+904,70	4+902,20	38	Mala IV	0,814	Muy Mala V	48	Regular IIIb	0,158	Muy mala V

						Correlacion (Barton, 1995) RMR = 15 log Q + 50 - Q = 10 (RMR – 50) / 15			
Abscisa		RMR (Bieniawsky)	Clase de Macizo Rocoso	Índice Q (Barton)	Clase de Macizo Rocoso	RMR en funcion de Q	Clase de Macizo Rocoso	Q en funcion de RMR	Clase de Macizo Rocoso
4+902,20	4+900,90	31	Mala IV	0,308	Muy Mala V	42	Regular IIIb	0,054	Extrem. Mala V
4+900,90	4+898,35	31	Mala IV	0,353	Muy Mala V	43	Regular IIIb	0,054	Extrem. Mala V
4+898,35	4+896,55	29	Mala IV	0,213	Muy Mala V	39	Mala IV	0,039	Extrem. Mala V
4+896,55	4+894,00	27	Mala IV	0,310	Muy Mala V	42	Regular IIIb	0,029	Extrem. Mala V
4+894,00	4+892,00	36	Mala IV	0,272	Muy Mala V	41	Regular IIIb	0,115	Muy mala V
4+892,00	4+890,00	31	Mala IV	0,718	Muy Mala V	47	Regular IIIb	0,054	Extrem. Mala V
4+890,00	4+888,00	29	Mala IV	0,718	Muy Mala V	47	Regular IIIb	0,039	Extrem. Mala V
4+888,00	4+885,00	27	Mala IV	0,085	Muy Mala V	33	Mala IV	0,029	Extrem. Mala V
4+885,00	4+884,00	27	Mala IV	0,107	Muy Mala V	35	Mala IV	0,029	Extrem. Mala V
4+884,00	4+881,00	25	Mala IV	0,156	Muy Mala V	37	Mala IV	0,021	Extrem. Mala V
4+881,00	4+880,00	28	Mala IV	0,130	Muy Mala V	36	Mala IV	0,034	Extrem. Mala V
4+880,00	4+878,00	32	Mala IV	1,014	Muy Mala V	50	Regular IIIa	0,063	Extrem. Mala V
4+878,00	4+876,00	32	Mala IV	0,942	Muy Mala V	49	Regular IIIb	0,063	Extrem. Mala V
4+876,00	4+874,00	34	Mala IV	0,942	Muy Mala V	49	Regular IIIb	0,085	Extrem. Mala V
4+874,00	4+871,00	37	Mala IV	0,361	Muy Mala V	43	Regular IIIb	0,135	Muy mala V
4+871,00	4+869,00	31	Mala IV	1,318	Mala IV	51	Regular IIIa	0,054	Extrem. Mala V
4+869,00	4+867,00	34	Mala IV	1,382	Mala IV	52	Regular IIIa	0,085	Extrem. Mala V
4+867,00	4+864,00	34	Mala IV	1,088	Mala IV	50	Regular IIIa	0,085	Extrem. Mala V
4+864,00	4+862,00	34	Mala IV	1,088	Mala IV	50	Regular IIIa	0,085	Extrem. Mala V
4+862,00	4+860,00	39	Mala IV	1,454	Mala IV	52	Regular IIIa	0,184	Muy mala V
4+860,00	4+857,00	39	Mala IV	1,382	Mala IV	52	Regular IIIa	0,184	Muy mala V
4+857,00	4+855,00	38	Mala IV	1,602	Mala IV	53	Regular IIIa	0,158	Muy mala V
4+855,00	4+853,50	49	Regular IIIb	2,181	Mala IV	55	Regular IIIa	0,857	Muy mala V
4+853,50	4+845,00	46	Regular IIIb	1,851	Mala IV	54	Regular IIIa	0,541	Muy mala V
4+845,00	4+840,50	47	Regular IIIb	1,454	Mala IV	52	Regular IIIa	0,630	Muy mala V
4+840,50	4+838,50	47	Regular IIIb	1,454	Mala IV	52	Regular IIIa	0,630	Muy mala V
4+838,50	4+833,40	49	Regular IIIb	1,602	Mala IV	53	Regular IIIa	0,857	Muy mala V

						Correlacion (Barton, 1995) RMR = 15 log Q + 50 - Q = 10 (RMR – 50) / 15			
Abscisa		RMR (Bieniawsky)	Clase de Macizo Rocoso	Índice Q (Barton)	Clase de Macizo Rocoso	RMR en funcion de Q	Clase de Macizo Rocoso	Q en funcion de RMR	Clase de Macizo Rocoso
4+833,40	4+828,80	49	Regular IIIb	1,528	Mala IV	52	Regular IIIa	0,857	Muy mala V
4+828,80	4+825,00	49	Regular IIIb	1,602	Mala IV	53	Regular IIIa	0,857	Muy mala V
4+825,00	4+820,00	49	Regular IIIb	1,528	Mala IV	52	Regular IIIa	0,857	Muy mala V
4+820,00	4+815,00	44	Regular IIIb	1,602	Mala IV	53	Regular IIIa	0,398	Muy mala V
4+815,00	4+809,00	49	Regular IIIb	1,382	Mala IV	52	Regular IIIa	0,857	Muy mala V
4+809,00	4+805,00	47	Regular IIIb	1,602	Mala IV	53	Regular IIIa	0,630	Muy mala V
4+805,00	4+799,00	47	Regular IIIb	0,218	Muy Mala V	40	Mala IV	0,630	Muy mala V
4+799,00	4+795,00	47	Regular IIIb	0,218	Muy Mala V	40	Mala IV	0,630	Muy mala V
4+795,00	4+790,00	44	Regular IIIb	1,602	Mala IV	53	Regular IIIa	0,398	Muy mala V
4+790,00	4+785,30	44	Regular IIIb	1,602	Mala IV	53	Regular IIIa	0,398	Muy mala V
4+785,30	4+781,00	49	Regular IIIb	1,602	Mala IV	53	Regular IIIa	0,857	Muy mala V
4+781,00	4+776,00	56	Regular IIIa	2,292	Mala IV	55	Regular IIIa	2,511	Mala IV
4+776,00	4+772,00	51	Regular IIIa	2,403	Mala IV	55	Regular IIIa	1,165	Mala IV
4+772,00	4+769,40	54	Regular IIIa	2,403	Mala IV	55	Regular IIIa	1,847	Mala IV
4+769,40	4+765,00	54	Regular IIIa	2,403	Mala IV	55	Regular IIIa	1,847	Mala IV
4+765,00	4+761,00	60	Regular IIIa	4,806	Regular III	60	Buena II	4,641	Regular III
4+761,00	4+758,90	66	Buena II	4,146	Regular III	59	Regular IIIa	11,66	Buena II
4+758,90	4+754,00	69	Buena II	6,664	Regular III	62	Buena II	18,478	Buena II
4+754,00	4+747,80	69	Buena II	7,872	Regular III	63	Buena II	18,478	Buena II
4+747,70	4+743,00	64	Buena II	6,992	Regular III	62	Buena II	8,576	Regular III
4+743,00	4+738,20	77	Buena II	7,288	Regular III	62	Buena II	63,095	Muy buena I
4+738,20	4+732,00	79	Buena II	7,576	Regular III	63	Buena II	85,77	Muy buena I
4+732,00	4+729,17	63	Buena II	2,622	Roca Mala IV	56	Regular IIIa	7,356	Regular III
4+729,17	4+725,80	67	Buena II	6,664	Regular III	62	Buena II	13,603	Buena II
4+725,80	4+719,50	63	Buena II	6,408	Regular III	62	Buena II	7,356	Regular III
4+719,50	4+716,70	69	Buena II	6,664	Regular III	62	Buena II	18,478	Buena II
4+716,70	4+705,50	67	Buena II	6,992	Regular III	62	Buena II	13,603	Buena II

						Correlacion (Barton, 1995) RMR = 15 log Q + 50 - Q = 10 (RMR – 50) / 15			
Abscisa		RMR (Bieniawsky)	Clase de Macizo Rocoso	Índice Q (Barton)	Clase de Macizo Rocoso	RMR en funcion de Q	Clase de Macizo Rocoso	Q en funcion de RMR	Clase de Macizo Rocoso
4+705,50	4+702,00	70	Buena II	7,576	Regular III	63	Buena II	21,544	Buena II
4+702,00	4+696,00	75	Buena II	6,696	Regular III	62	Buena II	46,415	Muy buena I
4+696,00	4+692,00	69	Buena II	6,992	Regular III	62	Buena II	18,478	Buena II
4+692,00	4+690,00	70	Buena II	6,664	Regular III	62	Buena II	21,544	Buena II
4+690,00	4+684,00	64	Buena II	6,408	Regular III	62	Buena II	8,576	Regular III
4+684,00	4+679,00	63	Buena II	6,112	Regular III	61	Buena II	7,356	Regular III
4+679,00	4+676,00	69	Buena II	6,992	Regular III	62	Buena II	18,478	Buena II
4+676,00	4+671,00	51	Regular IIIa	0,727	Muy Mala V	47	Regular IIIb	0,727	Muy mala V
4+671,00	4+664,00	51	Regular IIIa	0,586	Muy Mala V	46	Regular IIIb	1,165	Mala IV
4+664,00	4+658,00	73	Buena II	6,992	Regular III	62	Buena II	34,145	Buena II
4+658,00	4+654,00	73	Buena II	6,664	Regular III	62	Buena II	34,145	Buena II
4+654,00	4+649,00	70	Buena II	7,288	Regular III	62	Buena II	21,544	Buena II
4+649,00	4+647,00	67	Buena II	6,664	Regular III	62	Buena II	13,603	Buena II
4+647,00	4+641,00	63	Buena II	4,398	Regular III	59	Regular IIIa	7,356	Regular III
4+641,00	4+635,00	68	Buena II	6,696	Regular III	62	Buena II	15,848	Buena II
4+635,00	4+630,00	68	Buena II	5,528	Regular III	61	Buena II	15,848	Buena II
4+630,00	4+623,00	63	Buena II	4,646	Regular III	60	Regular IIIa	7,356	Regular III
4+623,00	4+614,50	65	Buena II	6,112	Regular III	61	Buena II	10	Buena II
4+614,50	4+609,50	70	Buena II	10,048	Regular III	65	Buena II	21,544	Buena II
4+609,50	4+602,00	64	Buena II	5,816	Regular III	61	Buena II	8,576	Regular III
4+602,00	4+600,00	46	Regular IIIb	1,962	Mala IV	54	Regular IIIa	0,541	Muy mala V

Anexo 6

Registro fotográfico



Foto N°1: Sector de sarapullo donde se construyó los túneles de carga Pilatón Sarapullo – Aguas Abajo, Toachi Alluriquín - Aguas Arriba, Casa de Máquinas Sarapullo y la Presa de Gravedad del río Toachi.



Foto N°2: Vista del río Pilatón donde se encuentra la estructura de toma para conducir las aguas proveniente del río al Túnel de Carga Pilatón Sarapullo.



Foto N°3: Entrada del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo – Aguas Abajo.
Sector Sarapullo.



Foto N°4: Entrada del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo – Aguas Arriba.
Sector La Esperie.



Foto N°5: Vista interior del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo – Aguas Abajo. Abscisa 4+825.00

Foto N°6: Vista interior del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo – Aguas Abajo. Abscisa 3+114.00





Foto N°7: Perforación del frontón. Abscisa 5+021.00



Foto N°8: Utilización del pie de avance para la perforación del frontón.
Abscisa 5+021.00



Foto N°9: Después de realizar la voladura, se efectúa el macizado que consiste en derrocar los pedazos de roca que han quedado sueltas en los hastiales, bóveda y frontón por efecto de la voladura. Abscisa 5+017.00



Foto N°10: Después del macizado se realiza el levantamiento geológico geomecánico del tramo excavado, se define la clase del macizo rocoso, mediante los parámetros de la clasificaciones geomecánica a utilizar.



Foto N°11: Aplicación del sostenimiento. Hormigón lanzado con fibra.



Foto N°12: Elementos de sostenimiento: Pernos, longitud 3 mts.



Foto N°13: Aplicación del sostenimiento: colocación de pernos, a través jumbo.
Abscisa 4+667.00



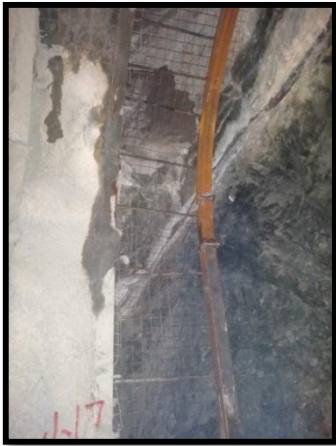
Foto N°14: Pernos. Abscisa 4+667.00



Foto N°15: Cerchas HEB 140 embebidas en hormigón. Abscisa 4+879.00



Foto N°16: Se observa los elementos de sostenimiento: cerchas, mallas y tuberías de acero (anclajes) ya colocados en tramo de excavación. Abscisa 4+860.00



Fotos N°17-19: Se observa una cizalla que cruza toda la zona de excavación. Abscisa 4+941.00



Foto N°20: Aplicación del sostenimiento. Cerchas embebidas en hormigón. Abscisa 4+941.00

Anexo 7

Plano Geológico del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo

Anexo 8

Plano de Sostenimiento del Túnel de Carga Pilatón Sarapullo

Anexo 9

**Planos Geológicos – Geotécnicos del
Túnel de Carga Pilatón Sarapullo.
Abscisas 5+100.00 – 4+600.00**