

## UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

## **SEDE QUITO**

## CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

# ANÁLISIS GEOMECÁNICO DE CIMENTACIONES ROCOSAS DE PRESAS EN HORMIGÓN A GRAVEDAD

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniera Civil

AUTORES:Padilla Estévez SharonTUTOR:Carlos Alexandro Bohórquez Barba

Quito - Ecuador

2024

# CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Sharon Padilla Estévez con documento de identificación Nº1722703822; manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 04 de marzo del 2024

Atentamente,

Sperin Parti

Sharon Padilla Estévez 1722703822

# CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Sharon Padilla Estévez con documento de identificación Nº1722703822; expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Proyecto Técnico: "Análisis geo-mecánico de cimentaciones rocosas de presas en hormigón a gravedad", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 04 de marzo del 2024

Atentamente,

Sharon Padilla Estévez 1722703822

#### CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Alexandro Bohórquez Barba con documento de identificación N°1720297462, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS GEO-MECÁNICO DE CIMENTACIONES ROCOSAS DE PRESAS EN HORMIGÓN A GRAVEDAD, realizado por Sharon Padilla Estévez con documento de identificación N°1722703822, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 04 de marzo del 2024

Atentamente,

h. Bellu

Ing. Carlos Alexandro Bohórquez Barba, MSc. 1720297462

#### DEDICATORIA

A Dios en primer lugar por la fuerza y fortaleza. Por ayudarme a no darme por rendida y demostrar a mis profesores y tutor que si puedo.

A mi Padre que me permitió con su esfuerzo y trabajo estudiar en una universidad privada, que, con su sabiduría, me apoyó y me ayudó en los momentos de miedo e incertidumbre durante casi toda la carrera. Ahora en el cielo, le dedico después de Dios este trabajo, espero poder enorgullecerlo y cumplir el sueño que teníamos juntos.

A mi madre que después de nuestra perdida, me brindó palabras de aliento, y juntas hemos podido salir adelante con mucho amor.

A mi enamorado David Leiva que nunca me dejo sola durante los momentos de angustia y desesperación, por su compañía durante todo este proceso de carrera, por su paciencia y cariño y por ayudarme a no rendirme y continuar con la carrera en los momentos difíciles.

Al Ingeniero Oswaldo Arcentales, mejor amigo de mi difunto padre que me apoyo como un padre, me ayudo a poder finalizar mi trabajo de titulación y los conocimientos compartidos.

A mis perritos Noa, Thor, Melina, Casper, Memo, Luna, Gorda y Lucas que me enseñaron el amor incondicional y mi futura vocación.

#### AGRADECIMIENTO

Me gustaría agradecer de antemano a mi tutor de tesis el Ing. Carlos Alexandro Bohórquez Barba, por su apoyo, por compartir sus conocimientos para lograr la finalización de mi trabajo de titulación.

A la Ing. María Gabriela Soria Pugo MSc. Quien me apoyo, me brindo enteramente su amistad, por aconsejarme a tomar las mejores decisiones y no desistir de la carrera.

A mi madre por apoyarme aun después de tantas complicaciones y tener fe en mi capacidad de lograr obtener el título Universitario.

A todos los Ingenieros de la carrera que me brindaron todos sus conocimientos y me permitieron llenarme de sabiduría.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAP	PÍTU	JLO I
GEN	VER	ALIDADES Y ANTECEDENTES1
1.	1	Introducción1
1.2	2	Problema de estudio1
	1.2.	1 Antecedentes
	1.2.	2 Alcance:
	1.2.	3 Delimitación
1.	3	Justificación
1.4	4	Objetivos
	1.4.	1 Objetivo general
	1.4.	2 Objetivos específicos
CAP	PÍTU	JLO II
MA	RCO	) TEÓRICO6
2.	1	Aspectos fundamentales
	2.1.	1 Definiciones básicas
	2.1.	2 Aplicación de la mecánica de rocas en ingeniera civil11
CAF	РÍТІ	JLO III
ME	ГОІ	OOLOGÍA12
3.	1	Tipo de investigación12
3.2	2	Método investigativo
3.	3	Técnicas de recolección de información12
3.4	4	Proceso técnico de ingeniería civil
CAP	PÍTU	JLO IV14
PRC	)CE	DIMIENTOS Y EQUIPOS EN ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIOS
SOB	RE	ROCAS
4.	1	Técnicas de laboratorio15

4	.1.1	Obtención de la porosidad	15
4	.1.2	Obtención de peso específico	17
4	.1.3	Obtención del contenido de humedad	17
4.2	En	sayo de permeabilidad	18
4.3	En	sayo de alterabilidad	20
4.4	En	sayo de compresión uniaxial	21
4.5	En	sayo de velocidad de onda sísmica	22
4.6	En	sayo de tracción	25
4.7	En	sayo de compresión triaxial	26
4.8	En	sayos complementarios	27
4	.8.1	TILTEST	27
4	.8.2	Ensayo del martillo Schmidt	27
CAPÍ	TUL	0 V	31
PARÁ	<b>ÁME</b> I	FROS DEL MACIZO ROCOSO	31
5.1.	. Fra	acturación mediante la utilización de criterios de rotura	31
5	5.1.1	Criterio de Mohr Coulomb	32
5	5.1.2	Criterio de Hoek y Brown	32
5.2.	. De	eformabilidad del macizo rocoso	34
5.2	Ca	pacidad de soporte mediante métodos analíticos	35
5.3.	As	entamientos admisibles	36
CAPI	TUL	0 VI	38
ASPE	сто	S HIDROMECÁNICOS EN LAS PRESAS DE HORMIGÓN A GRAVEI	)AD
		38	
6.1	Fil	tración	38
6.2	Li	xiviación química de las rocas de cimentación	39
6.3	Cu	antificación de la subpresión	40
6	5.3.1	Ecuaciones de la subpresión en rocas	42

6.4	Incidencia de la subpresión en la distribución de esfuerzos y en la resistencia de la
presa	49
CAPÍTU	JLO VII
SISTEM	IAS DE CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE LAS ROCAS51
7.1	Bases teóricas de los principales sistemas de clasificación de rocas
7.1.	1 Clasificación del macizo rocoso mediante indicadores geo-mecánicos51
7.2	Parámetros que intervienen en cada uno de los sistemas de clasificación
7.2.	1 RMR (Rock mass rating)
7.2.	2 RQD (Rock quality desing)
7.2.	3 Índice Q (Rock Mass Quality)55
7.3	Rangos de evaluación de las rocas en los sistemas de clasificación considerados 56
7.3.	1 RMR (Rock mass rating)
7.3.	2 RQD (Rock quality desing)
7.3.	3 Índice Q (Rock Mass Quality)
CAPÍTU	JLO VIII
ANÁLIS	SIS COMPARATIVO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE
CLASIF	TICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO, REFERIDOS AL DISEÑO DE PRESAS
DE HO	RMIGÓN A GRAVEDAD DE DIFERENTES ALTURAS Y ESCENARIOS
GEO-M	ECANICOS,
8.1	Consideraciones de estudio
8.1.	1 Geometría utilizada en la presa de hormigón a gravedad considerada 59
8.1.	2 Cota del embalse
8.1.	3 Nivel de importancia de la presa según su altura61
8.1.	4 Determinación del nivel muerto del embalse
8.1.	5 Borde libre de la presa64
8.1.	6 Compendio geo-mecánico en la Sierra Ecuatoriana
8.1.	7 Riesgo sísmico
8.1.	8 Combinaciónes de fuerzas recomendadas por SPANCOLD (2017)71

8.1.	.9	Factores de seguridad
8.2	Dim	ensionamiento y verificación de la estabilidad y resistencia de presas de hormigón
a grav	redad	de 30 hasta 80 metros de altura para diferentes escenarios geo-mecánicos72
8.2.	.1	Datos generales72
8.2.	.2	Detalle de los cálculos realizados para un escenario de estudio y ecuaciones
apli	icada	s
8.3	Resi	ıltados
8.3. met	.1 tros.	Fuerzas aplicadas a las diferentes alturas de presa de estudio, 30, 50, 65, 80 118
8.3.	.2	Verificación al deslizamiento en cada presa 126
8.3.	.3	Verificación al volcamiento
8.3.	.4	Esfuerzos en la base de cimentación128
8.3. pará una	.5 ámeti 1 de la	Graficas de correlación entre la capacidad de carga admisible en función del ro %RQD y los esfuerzos máximos generados en la base de cimentación por cada as presas analizadas
8.3.	.6	Graficas de correlación entre la capacidad de carga admisible en función del
pará una	ámeti 1 de la	ro RMR y los esfuerzos máximos generados en la base de cimentación por cada as presas analizadas
8.4	Apli	cabilidad de los sistemas considerados al diseño de presas hormigón a gravedad
de peq	queña	s y medianas alturas
CAPÍTU	ULO	IX
ELEME	ENTO	<b>DS DE RIESGOS GEO-MECÁNICOS DE LAS PRESAS DE HORMIGÓN</b>
A GRAV	VED.	AD CIMENTADAS EN ROCAS 137
9.1	Intro	oducción
9.2	Elen	nentos de riesgos debidas a los aspectos hidromecánicos
9.2.	.1	Inestabilidad de la roca137
9.2.	.2	Erosión de la base de la presa137
9.2.	.3	Presión hidrostática
9.2.	.4	Sismicidad

9.2.5	Deslizamientos de rocas	139
9.2.6	Permeabilidad de la roca	139
9.2.7	Control de la subpresión durante la operación de la presa	141
9.3 Cri	terios de operación	
9.3.1	Niveles de embalse	143
9.3.2	Monitoreo geotécnico	143
9.3.3	Inspecciones regulares	143
9.3.4	Operación de compuertas	143
9.3.5	Mantenimiento preventivo	143
9.3.6	Contingencias y emergencias	144
CONCLUS	IONES	145
RECOMENDACIONES		
BIBLIOGR	RAFÍA	156
ANEXOS	••••••	160

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Clasificación geológica de las rocas7
Tabla 2.	Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación9
Tabla 3.	Clasificación de los macizos rocosos en función de la permeabilidad20
Tabla 4.	Clasificación de la durabilidad en base al índice $I_d$ 21
Tabla 5.	Clasificación de la resistencia ISMR (1982)- Bieniawski (1973)22
Tabla 6.	Velocidades longitudinales de onda sísmica en roca
Tabla 7.	Velocidades longitudinales de onda sísmica en minerales de la roca25
Tabla 8.	Resumen de las propiedades físicas de las rocas más comunes
Tabla 9.	Resumen de las propiedades mecánicas de las rocas más comunes
Tabla 10.	Resumen de las propiedades mecánicas de las rocas más comunes (continuación)
Tabla 11.	Criterios de rotura en macizos rocosos y datos necesarios para su aplicación 33
Tabla 12.	Efecto del módulo de elasticidad, en el comportamiento de presas de gravedad.
Tabla 13.	Mínimo módulo de deformación del terreno de cimentación de presas en
hormigón a g	gravedad
Tabla 14.	Descripción del macizo rocoso mediante el método Q
Tabla 15.	Influencia del cimiento en la deformación de la presa
Tabla 16.	Ecuaciones y valores de los coeficientes de supresión Grishin (1979)48
Tabla 17.	Parámetros de clasificación, Bieniawski (1989)54
Tabla 18.	Rango de variación de los parámetros56
Tabla 19.	Rango de clasificación del macizo rocoso RMR
Tabla 20.	Clases de roca RMR
Tabla 21.	Clasificación de las rocas índice RQD57
Tabla 22.	Criterio de calificación del macizo rocoso Barton et al. (1974)58
Tabla 23.	Clasificación en función de la altura de las presas62

Tabla 24.	Relación de la velocidad del viento en el agua y el Fetch
Tabla 25.	Clasificación de la presa, altura y nivel de importancia
Tabla 26.	Compendio de propiedades geomecánicas de las rocas de la sierra ecuatoriana68
Tabla 27.	Compendio de propiedades geomecánicas de las rocas en la sierra ecuatoriana y
la calidad de	la roca %RQD
Tabla 28.	Relación de la magnitud del sismo y sus efectos
Tabla 29.	Aceleración pico de la roca para un periodo de retorno 1000 años, obtenido de las
curvas de pel	igro sísmico en la sierra ecuatoriana, NEC-SE-DS (2014, p.110-114)70
Tabla 30.	Factores de seguridad, Lyapichev (2012)72
Tabla 31.	Datos iniciales y su simbología para una presa de 30m de altura, cimentado sobre
un macizo ro	coso con calidad Excelente75
Tabla 32.	Coeficiente de fricción y cohesión, hormigón-roca76
Tabla 33.	Revisión de la carga admisible en fusión del RMR de la roca82
Tabla 34.	Resumen de las fuerzas en las diferentes Combinaciones de estudio, en una presa
de 30m de al	to cimentada sobre un macizo rocos "excelente" 103
Tabla 35.	Resumen del cálculo de estabilizad para cada combinación de fuerzas de una
presa de 30m	y un macizo rocoso de cimentación- excelente
Tabla 36.	Resumen de la verificación al volcamiento de una presa de 30m y un macizo
rocoso de cin	nentación- excelente
Tabla 37.	Resumen de los esfuerzos en los extremos de la cortina aguas arriba y aguas abajo
de una presa	de 30m y un macizo rocoso de cimentación- excelente
Tabla 38.	Tabla resumen de la capacidad de carga admisible

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Clasificación de fisuramiento de especies en roca mediante la porosidad y la		
velocidad de	onda sísmica longitudinal24		
Figura 2. inyecciones.	Detalle de dimensiones de construcción para una galería, dren y cortina de		
Figura 3.	Datos de la subpresión en el bloque central de la presa Rules43		
<b>Figura 4.</b> abajo de la pr	Diagrama de la subpresión para una diferencia de niveles aguas arriba y aguas resa <25m de altura Grishin (1979)		
<b>Figura 5.</b> arriba y agua	Diagrama de la subpresión para subpresión para una diferencia de niveles aguas s abajo de la presa $\ge 25$ m y $\le 75$ m de altura Grishin (1979)45		
<b>Figura 6.</b> arriba y agua	Diagrama de la subpresión para subpresión para una diferencia de niveles aguas s abajo de la presa >75m de altura Grishin (1979)		
Figura 7.	La distribución de fuerzas en la presa de hormigón a gravedad		
Figura 8.	Ejemplo de Cálculo del RQD mediante la extracción de núcleos55		
Figura 9.	Diseño geométrico típico para una presa de hormigón a gravedad. USBR (1976)		
Figura 10.	Determinación de nivel muerto y normal de embalse61		
Figura 11. construcción	Evidencia fotográfica de los sedimentos arrastrados por la crecida del rio en la de la presa Toachi		
<b>Figura 12.</b> representativ	Esquema de direcciones y longitudes del Fetch en la superficie de un embalse o65		
Figura 13.	Perfil geológico del Ecuador sentido norte - sur		
Figura 14.	Perfil geológico del Ecuador sentido este - oeste		
Figura 15.	Estratigráficas del Ecuador67		
Figura 16.	Escenarios de calculo		
Figura 17.	Geometría para una presa de hormigón a gravedad con una altura de 30m,		
cimentada so	bre un macizo rocoso-excelente		
Figura 18.	Descripción gráfica de los elementos para el cálculo de áreas, volumen, peso		
propio de la presa de hormigón a gravedad y centro de gravedad			

Figura 19.	Detalle de la fuerza de la presión de agua paramento aguas arriba
Figura 20.	Detalle de la subpresión 1 rectangular
Figura 21.	Detalle de galería, eje de cortina de inyecciones y dren, para las presas de estudio
Figura 22.	Diagrama de la subpresión para una diferencia de niveles aguas arriba y aguas
abajo de la pr	resa <25m de altura Grishin (1979)90
Figura 23.	Nomogramas para los coeficientes Ka y Km92
Figura 24.	Detalle de galería, eje de cortina de inyecciones y dren, para las presas de estudio 99
Figura 25.	Diagrama de la subpresión para una diferencia de niveles aguas arriba y aguas
abajo de la p	resa >25m y <75m de altura Grishin (1979)101
Figura 26.	Detalle de los esfuerzos en los extremos de la cortina108
Figura 27.	Valores del coeficiente de carga de hundimiento Nβ114
Figura 28.	Coeficientes de seguridad parcial. Fp
Figura 29.	Verificación de la capacidad de carga última del macizo de cimentación
CALIDAD E	XCELENTE %RQD130
Figura 30.	Verificación de la capacidad de carga última del macizo de cimentación
CALIDAD R	EGULAR %RQD 131
<b>Figura 31.</b> CALIDAD N	Verificación de la capacidad de carga última del macizo de cimentación IUY MALA %ROD
Figure 37	Varificación de la canacidad de carga última del macizo de cimentación
clasificación	RMR=BUENA
Figura 33.	Verificación de la capacidad de carga última del macizo de cimentación
clasificación	RMR=MEDIA
Figura 34.	Verificación de la capacidad de carga última del macizo de cimentación
clasificación	RMR=MUY MALA135
Figura 36.	Ubicación de la cortina de inyecciones y drenes141

#### RESUMEN

Partiendo de una investigación y recopilación de información existente sobre las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos, se ha realizado un compendio en el cual se ha colocado estos valores promedio en función del tipo y considerando diferentes macizos rocos encontrados en la región sierra del Ecuador, con el fin de poder aplicarlo a la identificación de la calidad de la roca utilizando los parámetros geo-mecánicos RQD y RMR, mediante su interacción con una presa de hormigón a gravedad de 4 geometrías diferentes de 30, 50, 65, 85 metros respectivamente y en tres descripciónes de roca: excelente, regular y muy mala, dando un total de 12 escenarios de estudio, para finalmente evaluar su respuesta frente a las fuerzas que ejercerá la presa sobre el macizo rocos y poder determinar que si este soportara o no la carga aplicada

Palabras claves: RQD; RMR; Presas de hormigón a gravedad, correlación, esfuerzos admisibles

#### ABSTRACT

Starting from an investigation and compilation of existing information on the geomechanical properties of rock masses, a compendium has been made in which these average values have been placed depending on the type and considering different rock masses found in the mountain region of Ecuador, with in order to be able to apply it to the identification of rock quality using the geomechanical parameters RQD and RMR, through its interaction with a concrete gravity dam of 4 different geometries of 30, 50, 65, 85 meters respectively and in three descriptions of rock: excellent, average and very poor, giving a total of 12 study scenarios, to finally evaluate its response to the forces that the dam will exert on the rock mass and be able to determine whether or not it will support the applied load.

Keywords: RQD; RMR; Concrete dams to gravity, correlation, permissible stresses

#### **CAPÍTULO I**

#### **GENERALIDADES Y ANTECEDENTES**

#### 1.1 Introducción

Dentro del ámbito de la ingeniería civil, el análisis de los macizos rocosos constituye el punto inicial en la construcción de la mayoría de obras hidráulicas, mismas que a su vez desempeñan un papel trascendental en el desarrollo económico de un país, asociado a la construcción de infraestructuras eficientes. Por ello la comprensión de los indicadores geomecánicos de este tipo de cimentaciones rocosas se convierten en un elemento primordial para garantizar el éxito de estas obras y su sostenibilidad a largo plazo.

Los macizos rocosos son estructuras heterogéneas con estructura interna compleja, por ello su estudio representa un desafío para la ingeniería; afrontar el reto de evaluar y comprender sus parámetros e indicadores geo-mecánicos es la base para entender el comportamiento mecánico de las rocas bajo distintas condiciones a las que son expuestos al interactuar con obras civiles como presas de hormigón.

En el caso de presas de hormigón a gravedad cimentadas sobre roca, el macizo rocoso debe soportar fuerzas considerables generadas por el agua del embalse, las cargas del terreno circundante y el peso propio de la estructura. Los indicadores geo-mecánicos permiten al calculista tener mejores criterios al momento de evaluar la estabilidad y la capacidad de carga del macizo rocoso que trabaja como base de cimentación de una presa de hormigón a gravedad de mediana y gran altura.

#### 1.2 Problema de estudio

#### **1.2.1** Antecedentes

A lo largo del tiempo se ha estudiado el comportamiento del macizo rocoso y las construcciones de presas de hormigón a gravedad, sin embargo, no se ha logrado crear una guía

de trabajo teórico que permita que los ingenieros hidráulicos tengan una base que responda a esta demanda, la cual de forma general consiste en la determinación de la capacidad portante del macizo rocoso en función de sus propiedades mecánicas, particularmente de la Sierra ecuatoriana.

Las construcciones hidráulicas están supeditadas a una realidad geomecánica, en donde necesariamente el ingeniero hidráulico debe involucrase de lleno al estudio de los estratos de cimentación, principalmente en el estudio de las rocas como base de cimentación de presas de hormigón a gravedad, puesto que aún la roca más dura puede presentar fallas debido a su origen geológico.

Por lo expuesto anteriormente, surge la necesidad de identificar la capacidad de carga del macizo rocoso basándose en los indicadores geo-mecánicos asociados a la cimentación de las construcciones hidráulicas de mediana y gran altura, así como también el comportamiento de este tipo de cimentaciones rocosas ante diferentes escenarios.

#### 1.2.2 Alcance:

El presente trabajo se desarrolla con el propósito de obtener una base teórica para futuras construcciones hidráulicas sobre cimentaciones rocosas en el territorio de la sierra ecuatoriana, dado que el tema a desarrollar no ha sido estudiado previamente por razones externas desconocidas que pueden estar inmersas en la poca aplicación del tema, en la cual se pueda relacionar el índice de calidad del macizo rocoso con la altura de la presa que logra soportar el estrato de cimentación, desde un análisis para presas de mediana y gran altura de 30 a 80 metros y un macizo rocoso con una calidad en función del parámetro RQD ya sea: excelente, regular o de muy mala calidad.

Durante el análisis de estabilidad se identifican las fuerzas que actuarán sobre la presa de hormigón a gravedad, a partir de las cuales se determinará los esfuerzos en la base de cimentación, que será categorizada a través de su calidad en función de los parámetros geomecánicos estudiados con los cuales se puede obtener su capacidad de carga referencial a través de distintas fórmulas establecidas a partir de la clasificación de la calidad de la roca desde el punto de estudio de Bieniawski y de Deere.

Para ello se analizan 4 tipos de presas con las siguientes variaciones de altura: 30, 50, 65 y 80 metros respectivamente y 3 calidades en función del RQD de la roca, los esfuerzos máximos resultantes de cada presa de cada caso de estudio, se verificarán con la capacidad de carga última que tendrá el macizo rocoso de cimentación calculada con los parámetros geomecánicos RMR y RQD

Por último, a través de una caracterización de la estratigráfica de la sierra ecuatoriana, se identifica el probable tipo de roca sobre la cual se cimentaría una presa de hormigón a gravedad en esta región

#### 1.2.3 Delimitación

El presente trabajo se pretende utilizar diferentes fuentes bibliográficas que permitirán el desarrollo óptimo de la base teórica. Por otro lado, se trabajará sobre un levantamiento geológico realizado en el Ecuador, con el fin de realizar una caracterización de la geología de la Sierra ecuatoriana, puesto que esta zona es un posible sitio de emplazamiento de las estructuras que está analizando, y con esta información obtener las características geomecánicas de los macizos rocosos más comunes en el sector y dar solución al problema de estudio.

#### 1.3 Justificación

En la actualidad los datos recopilados de ciertos trabajos de investigación aportan significativamente en el estudio de las propiedades mecánicas y físicas de las cimentaciones, basándose en macizos rocosos, más no son suficientes para comprender y solucionar todos los problemas geo-mecánicos, los cuales no están direccionados completamente hacia el tema en cuestión, por ello se establece la necesidad de realizar investigaciones en casos específicos que permitan al ingeniero presentar soluciones sustentadas en métodos teóricos.

Por esta razón con este trabajo se busca establecer un procedimiento adecuado para evaluar un macizo geológico natural como base de cimentación de una presa de hormigón a gravedad, a través de diferentes métodos de indicadores geo-mecánicos, considerando que este tipo de presa es la más versátil entre las presas de hormigón, con el fin de unificar métodos y estudios preestablecidos, adicionalmente, se pretende entregar un aporte de investigación que reduzca la incertidumbre en el estudio de las cimentaciones sobre macizos rocosos y permitan a los profesionales en ingeniería tener una fuente de información para el análisis de estos estratos de cimentaciones.

#### 1.4 Objetivos

#### 1.4.1 Objetivo general

Formular el procedimiento y los criterios para la evaluación de las rocas de cimentación en presas de hormigón a gravedad, a partir del análisis comparativo de los métodos y sistemas de clasificación geomecánica existentes, con el fin de ser utilizado como guía en la elaboración de proyectos.

#### 1.4.2 Objetivos específicos

Establecer la clasificación de las rocas de cimentaciones para obras hidráulicas a través de una recopilación de información de diferentes indicadores geo-mecánicos.

Aplicar y comparar los sistemas de clasificación geomecánica para evaluar los macizos rocosos como base de cimentación en presas de hormigón a gravedad, con alturas de 30 hasta 80 metros.

Establecer los tipos de macizos rocosos existentes en la región sierra del Ecuador a través de los parámetros geo-mecánicos sobre la cual se ha de cimentar una presa de hormigón a gravedad

Formular medidas constructivas para revertir las condiciones geotécnicas adversas, a través del mejoramiento de los indicadores geo-mecánicos involucrados y considerando la conveniencia económica

#### **CAPÍTULO II**

#### **MARCO TEÓRICO**

#### 2.1 Aspectos fundamentales

El estudio de las rocas y macizos rocosos, es imprescindible para comprender y gestionar los recursos hídricos de manera efectiva; estas formaciones geológicas desempeñan un papel fundamental en el ciclo del agua, influyendo de esta manera en el almacenamiento, flujo y calidad, por lo tanto, para poder entender el comportamiento del agua en su interacción con el suelo y conocer conceptos básicos de rocas y macizos rocosos.

En primer lugar, conocer las propiedades de las rocas es esencial para entender como el agua se almacena en el subsuelo, tomando en cuenta que, las rocas actúan como reservorios subterráneos y son capaces de retener y liberar agua a través de sus poros y fracturas, por ello es importante comprender la permeabilidad, la porosidad y la capacidad de retención de agua en diferentes tipos de rocas, lo cual nos ayudará a evaluar la disponibilidad de agua subterránea (Jimenez, 2000).

Conocer los macizos rocosos es elemental para comprender como se desplaza el agua subterránea; las características geológicas de los macizos rocosos como la estructura de fracturas y la porosidad secundaria influyen en la dirección y la velocidad del flujo, adicional a ello estudiar la hidrogeología de los macizos rocosos permitirá identificar las rutas de flujo, los acuíferos y las áreas de recarga, para la gestión sostenible de los recursos hídricos (González de Vallejo et al, 2002).

#### 2.1.1 Definiciones básicas

#### 2.1.1.1 Roca:

Según (Jimenez, 2000), las rocas son conglomerados formados por cristales fuertemente unidos, de hecho, estas masas rocosas están atravesadas por diferentes familias de litoclasas que son superficies de debilidad que dividen la roca en bloques, es así que, cada bloque está compuesto por una roca matriz que puede ser mucho más resistente e inalterable que la masa rocosa en sí misma y comúnmente se la conoce simplemente como roca.

La masa rocosa que aflora en la superficie terrestre se divide en tres grupos, los cuales están sintetizados en la tabla 1, según su origen: rocas magmáticas o ígneas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas.

Las rocas poseen características, propiedades y una composición variable, y, debido a su inmenso volumen es prácticamente imposible realizar una modelación del campo a laboratorio, es por ello que el estudio de las rocas posee limitantes y se trabaja en base únicamente a escalas (González de Vallejo et al, 2002).

Algunas características a detallar de las rocas según Gonzales de Vallejo et al (2002). en comparación con los suelos son las siguientes:

- En el proceso de deformación de la roca se presentan fracturas
- En comparación con los suelos, las rocas presentan módulos de deformación elevados
- Tienen Baja permeabilidad

La tabla 1 indica la clasificación de rocas de acuerdo a la Enciclopedia Salvat

#### Tabla 1.

Clasificación geológica de las rocas.

Origen	Tipos	Rocas
		Granitos
	Plutónicas	Granodiorita
		Diorita
		Sienita
Magmáticas		Gabro
		Peridotita
		Riolita
	Volcánicas	Dacita
		Andesita

		Traquita
		Basalto
		Pórfidos
	Filonianas	Pegmatitas
	Filomanas	Aplitas
		Lampórfidos
		Lutitas
	Detríticas	Arenitas
		Ruditas
		Carbonatadas
Sedimentarias		Evaporitas
	No detríticas	Aluminosas
	No definicas	Ferruginosas
		Chert
		Orgánicas
	Pizarras	
	Esquistos	
	Gneis	
Metamórficas	Mármoles	
Wietumorrieus	Cuarcitas	
	Milonitas	
	Corneanas	
	Migmatitas	

Nota. Resumen de los tipos de rocas según su origen Fuente: Enciclopedia Geológica, (1954)

#### 2.1.1.2 Matriz rocosa.

La matriz rocosa se refiere a una estructura geológica tridimensional que comprende una combinación de minerales, rocas, espacios porosos y fluidos interconectados que se encuentran en el subsuelo terrestre; esta compleja red de elementos interactúa para formar un sistema de almacenamiento y transporte natural que puede contener y mover hidrocarburos, agua, gases u otros recursos geológicos valiosos (Braja M. Das, 2011).

La matriz rocosa hace referencia al componente que no presenta discontinuidades ni fracturas, aunque se considera una estructura continua su comportamiento es variado y anisótropo debido a su formación y microestructura mineral; las propiedades mecánicas de la matriz rocosa abarcan su densidad, resistencia y capacidad de deformación, En ciertos casos de la ingeniería geológica es de suma importancia estudiar detalladamente las propiedades de la matriz rocosa para comprender cómo se comporta en diversas circunstancias. A continuación, se presenta un resumen de las propiedades de la matriz rocosa (González de Vallejo et al., 2002).

#### Tabla 2.

Тіро	Propiedades	Métodos de determinación
	Composición mineralógica	Descripción visual, difracción de rayos x
Propiedades de	Porosidad	Técnica de laboratorio
identificación y	Peso especifico	Técnica de laboratorio
clasificación	Contenido de humedad	Técnica de laboratorio
	Permeabilidad	Ensayo de permeabilidad
	Durabilidad	Ensayo de alterabilidad
		Ensayo de compresión uniaxial.
	Resistencia a la compresión simple	Ensayo de carga puntual
Propiedades		Martillo de Schmidt
riopieuaues	Resistencia a la tracción	Ensayo de tracción directa
mecanicas	Valacidad da andra aźnicza	Medida de velocidad de ondas
	velocidad de olidas sollicas	elásticas
	Deformabilidad	Ensayo de compresión uniaxial

Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación

Fuente: (González de Vallejo et al., 2002)

#### 2.1.1.3 Macizo rocoso.

Los macizos rocosos constituyen una agrupación de bloques de matriz rocosa junto con diversas discontinuidades que afectan al medio rocoso desde una perspectiva mecánica, estos macizos se caracterizan por ser medios discontinuos, anisótropos y heterogéneos, donde la resistencia a la tracción se considera inexistente; para comprender su comportamiento mecánico, es esencial analizar tanto las propiedades de la matriz como las de las discontinuidades (González de Vallejo et al., 2002).

Cuando se presentan discontinuidades sistemáticas con determinadas orientaciones como planos de estratificación o superficies de laminación se genera un comportamiento anisótropo, es decir, con propiedades mecánicas que varían según la dirección considerada, de igual manera, los macizos rocosos exhiben heterogeneidad, lo que significa que las propiedades físicas y mecánicas varían en distintas zonas del conjunto. (González de Vallejo et al., 2002)

En este contexto, se definen tres propiedades clave:

#### 2.1.1.3.1 Anisotropía:

La existencia de planos de debilidad con orientaciones preferentes como estratificación, laminación o diaclasas tectónicas, ocasionan diferencias en las propiedades y el comportamiento mecánico dependiendo de la dirección considerada. Asimismo, la orientación de los esfuerzos aplicados sobre el material rocoso puede generar anisotropía asociada al estado tensional (González de Vallejo et al., 2002).

#### 2.1.1.3.2 Discontinuidad:

La presencia de discontinuidades como superficies de estratificación, juntas, fallas, diques, etc., interrumpe la continuidad de las propiedades mecánicas de los bloques rocosos, lo que resulta en un comportamiento geo-mecánico e hidráulico discontinuo influido por la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad (González de Vallejo et al., 2002).

#### 2.1.1.3.3 Heterogeneidad:

Gonzales de Vallejo et al (2002) indican que la heterogeneidad hace referencia a las diversas áreas del macizo que se distinguen por litologías variadas, grados de alteración o meteorización, y contenido de agua, estas diferencias pueden dar como resultado distintitas propiedades o características dentro del mismo macizo.

El macizo rocoso por su resistencia y estabilidad estructural, es esencial en aplicaciones de la geotécnica y la construcción de infraestructuras. La ingeniería en los macizos rocosos se enfoca en estudiar y comprender las características geomecánicas de estas formaciones para garantizar un diseño seguro y eficiente de túneles, cimentaciones, presas, y otros proyectos civiles que interactúan con el subsuelo; la estabilidad de un macizo rocoso es el pilar de la seguridad a largo plazo de estructuras y para evitar riesgos geotécnicos asociados con posibles deslizamientos o colapsos (Bazán et al., 2012).

#### 2.1.2 Aplicación de la mecánica de rocas en ingeniera civil

En el mundo de la ingeniería civil existe un elemento fundamental como es la roca, que a menudo es subestimado, a pesar del papel esencial que cumple en el desarrollo de proyectos de construcción de gran envergadura dentro de cualquier nación.

La mecánica de rocas se encarga de comprender y analizar el comportamiento de las formaciones rocosas bajo diversas cargas y condiciones, permitiendo a los ingenieros civiles afrontar desafíos geotécnicos con precisión y confianza mediante la aplicación de principios de geología, mecánica, hidrología e ingeniería, incluso brinda una comprensión holística de la interacción entre las formaciones rocosas y las estructuras humanas identificando riesgos potenciales, brindando herramientas para el diseño de medidas de mitigación adecuadas, así los ingenieros civiles pueden enfrentar con éxito los desafíos geotécnicos que pueden surgir en el camino hacia una sociedad más avanzada e infraestructuras más sólidas (Ramírez y Alejano, 2004)

Con el paso del tiempo la mecánica de rocas ha demostrado ser una disciplina dinámica y evolutiva, su impacto se ve reflejado en los edificios de gran altura y rascacielos cuya estructura siempre se apoya en el subsuelo de roca, en las cada vez más grandes presas que generan embalses para aprovechamiento hidroeléctrico u otros que desvían los caudales de causes de agua, hacia tierras antes desérticas, conformando la columna vertebral de la civilización moderna. La mecánica de rocas vincula la ingeniería civil con otras ingenierías como la geología y la geotecnia, permitiendo utilizar el pasado geológico del planeta en favor de construir un futuro sustentable para toda la sociedad (Ramírez y Alejano, 2004).

11

#### **CAPÍTULO III**

#### METODOLOGÍA

#### 3.1 Tipo de investigación

La investigación, adoptará un criterio correlacional, descriptivo y explicativo, basado en la información recopilada de fuentes oficiales, el enfoque general de la investigación es cualitativo, ya que se buscará establecer correlaciones existentes y utilizar cálculos conocidos para obtener una solución teórica.

#### 3.2 Método investigativo

La modalidad utilizada para la realización del proyecto es el meta-análisis de tipo científico, puesto que, mediante resultados cuantitativos se logrará obtener una correlación entre los mismos, de esta manera, se plantea como recurso para la realización del método de investigación correlacional, el uso de cálculos

#### 3.3 Técnicas de recolección de información

La técnica empleada en esta investigación será de carácter deductivo, ya que se pretende realizar un análisis de lo general a lo particular, es decir, por medio de la evaluación de las nociones teóricas-empíricas de la clasificación y uso de algún tipo de un determinado macizo rocoso como base de cimentación de una presa de hormigón a gravedad.

#### 3.4 Proceso técnico de ingeniería civil

El análisis geo-mecánico de cimentaciones rocosas de presas en hormigón a gravedad es un proceso técnico esencial en la ingeniería civil que involucra una serie de etapas rigurosas y especializadas. Este proceso abarca desde la recopilación de datos geológicos hasta la implementación de medidas de estabilización, y se lleva a cabo con el objetivo de garantizar la seguridad y estabilidad de estas importantes estructuras hidráulicas. A continuación, se describe el proceso técnico que se realizará en el proyecto. Recopilación de datos geológicos: se refiere a la recolección de información proveniente de libros, tesis, artículos científicos y otros documentos relacionados al tema de estudio. Además, se realizará un compendio de datos sobre las propiedades geotécnicas de los terrenos rocosos más comunes en la sierra ecuatoriana, en función de estos resultados se buscará información que lo relacione según los parámetros geo-mecánicos RMR y RQD en la zona de estudio

Presas de hormigón a gravedad: se realizará el pre-dimensionamiento en 4 escenarios diferentes, considerando presas con las siguientes alturas: 30, 50, 65 y 80 metros respectivamente, en las que se calcularán las fuerzas actuantes, a partir de las cuales, se determinará el esfuerzo máximo al que será sometido el macizo de cimentación en cada escenario de estudio.

Capacidad de carga última del macizo rocoso de cimentación: De acuerdo a lo que indican los parámetros de clasificación de la roca según el RQD y el RMR, con base en los tipos de roca encontrados en la sierra ecuatoriana previamente estudiados, se trabajó en 3 escenarios diferentes considerando cimentaciones rocosas con una clasificación en función del %RQD como: excelentes, regulares y de muy mala calidad respectivamente, así mismo se lo realizará con una clasificación del macizo rocoso de cimentación con el parámetro RMR como: Buena, media y muy mala. Con los valores que tiene cada uno de estos parámetros geomecánicos (RMR y %RQD) se calculó la capacidad de carga admisible, la cual se correlacionó con los esfuerzos aplicados en la base de cimentación.

Diseño de medidas de estabilización: a partir del análisis de presas cimentadas sobre macizos rocosos de distintas calidades se identifican riesgos geotécnicos significativos para los que se plantearán medidas teóricas de estabilización adecuadas para mitigarlos.

#### **CAPÍTULO IV**

## PROCEDIMIENTOS Y EQUIPOS EN ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIOS SOBRE ROCAS

La elección de una ubicación adecuada para la construcción de una presa de hormigón a gravedad implica un proceso de diseño y planificación que requiere la participación de diversos expertos en diferentes disciplinas, por ende, es imprescindible incluir ingenieros geológicos, hidráulicos y estructurales, así como personal de laboratorio y técnicos especializados.

Las propiedades físicas de los macizos rocosos se ven determinadas por factores como la composición mineralógica, densidad, estructura, porosidad, permeabilidad, alterabilidad y dureza, las cuales se entrelazan con las características mecánicas influenciadas por parámetros geológicos, litológicos y estratigráficos, así como la presencia de discontinuidades. En el contexto específico de este estudio, la profundidad emerge como un elemento crucial, dado que incide en el estado tensional de la roca y en su respuesta mecánica ante las fuerzas aplicadas (González de Vallejo et al., 2002).

Es crucial entender y tener en cuenta estas propiedades físicas y características mecánicas durante el análisis geo-mecánico de cimentaciones rocosas, ya que posibilitan la evaluación de la estabilidad de la presa y la determinación de la idoneidad del macizo rocoso como cimiento. Dada la gran escala de los macizos rocosos, las pruebas de laboratorio se basan en muestras pequeñas que sirven como una representación a escala micro de cómo el macizo responde a los esfuerzos aplicados (González de Vallejo et al., 2002). A continuación, se presentan las técnicas de laboratorio empleadas en este tipo de cimentaciones rocosas.

#### 4.1 Técnicas de laboratorio

#### 4.1.1 Obtención de la porosidad

Según Braja M, Das (2011) la porosidad es la relación entre el volumen ocupado por los huecos en la roca, Vv y el volumen total aparente de la roca V<sub>t</sub> (p.26) en el cual se presentan las partículas sólidas totales más los vacíos; el resultado de la porosidad se obtendrá en porcentaje y su nomenclatura será n (%) y por consecuente su ecuación será:

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_t}$$

Donde:

N (%) = porosidad

Vv= volumen ocupado por los huecos en la roca,

Vt= volumen total aparente de la roca

La porosidad es el parámetro más influyente sobre la resistencia mecánica de la roca puesto que, la existencia de poros da como resultado una deformabilidad de la misma y la presencia de zonas de debilidad. (Galván y Restrepo, 2015)

Como lo menciona Benavente et al. (2014) la porosidad permite clasificar las rocas según su grado de conexión con el ambiente externo, permitiendo identificar la porosidad cerrada, abierta y total de la roca.

La obtención de porcentaje de poros en ensayos de laboratorio se puede realizar mediante varias técnicas, entre las 6 más conocidas podemos resaltar: tratamiento de imágenes, poro-simetría de mercurio, capilaridad, adsorción de gases, picnometría de helio (He) y el método de inmersión en agua, de la última técnica se detalla su procedimiento en laboratorio (Benavente et al., 2014):

# 4.1.1.1 Obtención de la porosidad accesible abierta con el método de inmersión en agua

El método del Eurocódigo 7-2; ISRM Doc Nº 2 1977; UNE-EN 12404:2001 indica el siguiente proceso:

- a. Materiales: agua destilada, balanza, horno, muestra del macizo rocoso
- b. Procedimiento experimental descrito por Benavente et al., 2008, p.4:
- c. Limpiar y secar en el horno las probetas del material rocoso
- Medir las dimensiones y calcular el volumen de la probeta Vprob con unidades en cm3.
- e. Obtener el valor del peso seco de la muestra Mo con unidades en gramos.
- f. Introducir la probeta seca, en inmersión de agua destilada durante 48 horas.
- g. Obtener el peso saturado de la probeta en agua M con unidades en gramos.
- h. Calcular la porosidad abierta na (%) con la siguiente ecuación:

$$n_a(\%) = \frac{(M - M_d)/\rho_{\rm H2O}}{V_{prob}}$$

#### Donde:

- na (%) = porosidad abierta total de la probeta de roca
- M= peso saturado de la probeta (g)
- Md= peso seco de la probeta (g)
- $\rho$ \_H2O= densidad del agua (1 g/cm3)
- Vprob= Volumen de la probeta (cm3)

#### 4.1.2 Obtención de peso específico

Este valor se obtiene mediante la multiplicación de la densidad del material por la gravedad, este valor está influenciado por la composición mineralógica, la relación de vacíos y la forma de la muestra, es importante tener en cuenta que este valor puede variar dependiendo de qué porosidad se considere. En el laboratorio el peso se determina midiendo el volumen de la muestra con un peso conocido, ya sea seco o aparentemente saturado (González de Vallejo et al., 2002, p. 50)

Además, se pueden utilizar picnómetros de agua o de helio. A continuación, se detalla el procedimiento experimental según lo descrito por (Benavente et al., 2014, p. 4)

- a) Limpiar y secar en el horno la muestra de roca.
- b) Medir las dimensiones de la probeta y calcular su volumen Vprob con unidad en centímetros.
- c) Obtener el peso seco de la muestra Md con unidad en gramos.
- d) Calcular el peso específico mediante la siguiente ecuación:

$$G\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{M_d}{V_{prob}}$$

Donde:

G(g/cm3) = porosidad abierta total de la probeta de roca

Md= peso seco de la probeta (g)

Vprob= Volumen de la muestra (cm3)

#### 4.1.3 Obtención del contenido de humedad

Es la relación entre el peso del agua que contiene la muestra y el peso de la muestra seca, obteniendo un resultado en porcentaje (%), este valor puede variar entre el 5 y el 8% en

las rocas, este valor se obtiene mediante el siguiente procedimiento en laboratorio. (González de Vallejo et al., 2002)

El procedimiento utilizado es el siguiente:

- a) Obtener el peso natural de la muestra de roca Mn
- b) Secar en el horno la probeta.
- c) Obtener el peso seco de la muestra Md con unidad en gramos.
- d) Calcular el contenido de humedad en porcentaje mediante la siguiente ecuación:

$$W(\%) = \frac{M_n}{M_d}$$

Donde:

W(%) = Contenido de humedad de la muestra

Md= peso seco de la probeta (g)

Mn= peso natural de la probeta (g)

#### 4.2 Ensayo de permeabilidad

Es un parámetro hidráulico que se expresa en unidades de velocidad y presenta una amplia variabilidad, en comparación con los suelos, las rocas tienen una permeabilidad baja; la permeabilidad se refiere a la capacidad de un fluido para filtrarse a través de un cuerpo rocoso, en su mayoría, las rocas exhiben permeabilidades bajas o muy bajas, y el flujo de agua a través de la matriz rocosa ocurre a través de poros y fisuras dependiendo de la interconexión entre ellos, factores como el grado de meteorización, la anisotropía y el estado de esfuerzos del material. Para medir la permeabilidad de una roca se utiliza el coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica, representado por "k" y expresado en cm/s. (González de Vallejo et al., 2002)

La permeabilidad de una discontinuidad en la roca depende de su apertura y del tipo de relleno presente. La apertura de la discontinuidad está influenciada por el estado de esfuerzos en el macizo rocoso, por lo tanto, la permeabilidad también está relacionada con los esfuerzos in situ. Además, este valor está condicionado por el espaciado entre los planos de la discontinuidad. (González de Vallejo et al., 2002)

Un ensayo comúnmente aceptado para evaluar la permeabilidad es el de Lugeon, el cual se realiza in situ y permite obtener una estimación semicuantitativa de la permeabilidad, así como detectar fracturas en la roca. (González de Vallejo et al., 2002)

Mediante este ensayo, se inyecta agua a presión a través de un obturador, ya sea simple o doble, y se registra el caudal requerido. El ensayo se inicia a presión atmosférica y se aumenta gradualmente hasta volver a la presión atmosférica. En estudios de gran profundidad, es importante tener en cuenta la presión desde el manómetro hasta la cota superior a ensayar, y se suman los valores del manómetro correspondientes (Andrés Velásquez, 2015).

Una unidad de Lugeon es equivalente a un coeficiente de permeabilidad de 10<sup>(-5)</sup> cm/s (Gonzales de Vallejo et al., 2004). Por lo tanto, teóricamente, el coeficiente de permeabilidad se calcula mediante el ensayo de Lugeon utilizando la siguiente ecuación (Andrés Velásquez, 2015).

$$K = \frac{2.65 * 10^{-5} * Q}{L * H} * \ln \frac{10^3 * L}{r}$$

Donde:

K= coeficiente de permeabilidad cm/s.

L= longitud del tramo ensayado (m)

H= presión aplicada (kg/cm2)

Q= Caudal aplicado (l/min)
r= radio del instrumento (mm)

#### Tabla 3.

Clasificación de los macizos rocosos en función de la permeabilidad

Tipo de macizo	Unidades Lugeon	Presión (kg/cm2)
Muy impermeable	0-1	10
Prácticamente impermeable	1-3	10
Permeable	>3	10
	1.5-6	5
Muu normaabla	>3	10
Muy permeable	>6	5

Fuente: (Calero, 2019)

#### 4.3 Ensayo de alterabilidad

El ensayo de sequedad, humedad y desmoronamiento es utilizado para evaluar la durabilidad o alterabilidad del macizo rocoso, la cual puede ser afectada por diversos factores, como el entorno, la porosidad, la estructura mineralógica, procesos químicos y físicos que pueden alterar sus características (Gonzales de Vallejo et al., 2004).

En este ensayo, la muestra de roca se somete a un proceso de secado en un horno durante 10 minutos, luego se pesa y posteriormente la roca se coloca en un tambor con un cernidor de 2 mm y se llena con agua destilada hasta un nivel por debajo de la muestra, el tambor se rota durante un tiempo determinado y con un número definido de rotaciones. Luego, las muestras que quedaron en el cernidor se secan nuevamente, este proceso se repite una vez más, finalmente cuando que se obtienen los datos, se calcula el índice de durabilidad, el cual se expresa como un porcentaje que puede variar entre 0% y 100% (Gonzales de Vallejo et al., 2004).

$$I_d(\%) = \frac{\text{Peso de la probeta (1 - 2 ciclos)}}{\text{Peso inicial}}$$

## Tabla 4.

Durahilidad	Porcentaje de peso retenido después de:		
Durabilidad	Un ciclo	Dos ciclos	
Extremadamente alta	-	>95	
Muy alta	>99	90-95	
Alta	98-99	75-90	
Media-alta	95-98	-	
Media	85-98	50-75	
Baja	60-85	25-50	
Muy baja	<60	<25	

Clasificación de la durabilidad en base al índice Id

Fuente: (González de Vallejo et al., 2002)

#### 4.4 Ensayo de compresión uniaxial

Los requisitos para realizar el ensayo en el laboratorio son muy exigentes, ya que la muestra debe cumplir ciertos parámetros técnicos, como dimensiones específicas, una superficie lo más plana y lisa posible, no presentar ninguna alteración en la probeta, entre otros (Galván-Cevallos y Restrepo, 2016). Además, el ensayo puede estar sujeto a factores que afecten los resultados como la velocidad a la que se aplica la carga y su dirección (Walter Loayza, 2015).

El ensayo de compresión simple implica aplicar una carga puntual sobre una probeta de roca dentro de una prensa mecánica hasta que la muestra falle. Mediante este ensayo se obtienen la resistencia uniaxial no confinada, el coeficiente de Poisson y el módulo de Young (Walter Loayza, 2015).

Este ensayo examina la habilidad de la muestra para mantener cohesionados sus componentes, y su resultado está influenciado principalmente por la composición mineralógica y el nivel de alteración de la muestra (Bazán et al., 2012, p. 7). Según lo mencionado anteriormente, la fórmula aplicada será la siguiente (Galván-Cevallos y Restrepo, 2016).

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

Donde:

 $\sigma_c$  = Resistencia a la compresión simple (kgf/cm<sup>2</sup>)

F= Fuerza de ruptura (kgf)

A = Area de la sección transversal (cm<sup>2</sup>)

#### Tabla 5.

Clase	Descripción ISMR	Resistencia a la compresión simple (MPa)	Resistencia Bieniawski	Valores del ensayo PLT (Mpa)	Tipo	
R0	Extremadamente blanda	<1	Mary Daia	Na anlina	Suelos	
R1	Muy blanda	1-5	миу ваја	No aplica	Doors	
R2	Blanda	5-25			blandas	
R3	Moderadamente dura	25-50	Baja	1-2		
R4	Dura	50-100	Media	2-4	Deess	
R5	Muy Dura	100-250	Alta	4-8	Rocas	
R6	Extremadamente Dura	>250	Muy alta	>10	uuras	

Clasificación de la resistencia ISMR (1982)- Bieniawski (1973)

Fuente. (Bazán et al., 2012)

### 4.5 Ensayo de velocidad de onda sísmica

En una roca la velocidad de propagación de las ondas elásticas está influenciada por la densidad y las propiedades elásticas del material medir esta velocidad proporciona información sobre características como la porosidad, resistencia y deformabilidad, lo que a su vez permite calcular el módulo de formación elástico dinámico. (Pedroza, 1988)

Para estudios de profundidad de hasta 10 metros se genera una onda sísmica utilizando un martillo, mientras que para estudios más profundos se utiliza una carga pequeña de dinamita. Los geófonos captan las oscilaciones del suelo y las convierten en señales eléctricas, generalmente en la componente vertical. Estos geófonos se colocan equidistantes entre sí, y los resultados se registran en un oscilógrafo para obtener una gráfica tiempo-distancia o domocrónica. (Pedroza, 1988) Este tipo de ensayos generan dos tipos de ondas: ondas P (longitudinales) y ondas S (transversales). Las ondas P viajan más rápido que las ondas S, lo que implica que la llegada inicial de las ondas perturbadoras está relacionada con las velocidades de las ondas P en diferentes capas (Braja M, Das, 2011, p.119)

La carga dinámica se define por su velocidad y capacidad para generar ondas de esfuerzo en una roca. La forma en que una roca acepta o rechaza los esfuerzos dinámicos es importante en el diseño de estructuras en roca (Gamiño, 1986)

En el ensayo de laboratorio para medir la velocidad de las ondas sísmicas se transmiten ondas longitudinales y transversales a través de una muestra de roca y se mide el tiempo que tardan en atravesarla. Se utiliza un transmisor y un receptor ubicados en extremos opuestos de la muestra (González de Vallejo et al., 2002, p. 175)

Gracias a la porosidad y la velocidad de onda sísmica es posible obtener el valor de fisuramiento, que indica el grado de fisuración de la roca. Para determinar este grado, se utiliza el valor de las ondas longitudinales Vp, y se aplica la siguiente ecuación (Pedroza, 1988, p. 5)

$$IQ = \left(\frac{Vp}{Vp *}\right) * 100\%$$

Donde:

IQ= grado de fisuración

Vp= velocidad de onda longitudinal en minerales rocosos

Vp\*= velocidad de onda longitudinal en rocas

# Figura 1.

Clasificación de fisuramiento de especies en roca mediante la porosidad y la

velocidad de onda sísmica longitudinal



Fuente: (Pedroza, 1988, p. 7)

## Tabla 6.

Velocidades longitudinales de onda sísmica en roca

Roca	Vp *(m/s)
Gabro	5750
Basalto	4500-6500
Caliza	2500-6000
Dolomita	5000-6000
Arenisca y Cuarcita	1400-4200
Granito	4500-6000
Pizarra y esquisto	3500-5000

Nota. Adaptado de: Pedroza, (1988, p.5.), M. Das, (2011, p.121) y Gonzales de Vallejo

et al., (2004). Elaborado por: La Autora.

## Tabla 7.

Mineral	Vp (m/s)
Cuarzo	6050
Olivino	8400
Augita	7200
Anfíbola	7200
Muscovita	5800
Ortoclasa	5800
Plagioclasa	6250
Calcita	6600
Dolomita	5500
Magnetita	7400
Yeso	3500
Epidota	7450
Pirita	8000

Velocidades longitudinales de onda sísmica en minerales de la roca

Fuente: (Pedroza, 1988, p. 7)

#### 4.6 Ensayo de tracción

Las muestras de roca sometidas a ensayos de tracción tienden a romperse a tensiones aproximadamente 10 veces menor que cuando se someten a ensayos de compresión simple. Además, la presencia de discontinuidades en los macizos rocosos significa que, en la mayoría de los casos, prácticamente no existe resistencia a la tracción. En consecuencia, los macizos rocosos no son capaces de generar ni resistir la tracción (Ramírez y Alejano, 2004)

El método más utilizado para llevar a cabo ensayos de tracción en rocas es el método brasileño, que consiste en ensayar una muestra cilíndrica comprimiéndola a lo largo de sus generatrices opuestas (Guamán y Mendieta, 2013).

El ensayo directo de resistencia a la tracción en una roca se realiza mediante el siguiente proceso: primero se obtiene una muestra cilíndrica del macizo rocoso siguiendo los mismos pasos que para realizar el ensayo de compresión simple, seguido de ello se sujeta firmemente la muestra por sus extremos y se aplica una fuerza uniaxial en la dirección de su longitud principal hasta que se produce la rotura, se adhieren cabezales en los extremos del cilindro mediante resinas sobre los cuales se realiza la tracción, también es posible tallar ensanchamientos en los extremos de la muestra que se acoplan al sistema de tracción. La fuerza de tracción se aplica de forma continua dentro de un rango uniforme para lograr la rotura en pocos minutos (Guamán y Mendieta, 2013).

En este ensayo, se establece que las placas de la prensa en contacto con la roca deben tener una curvatura proporcional al radio del disco. Aunque existan tensiones de compresión y tracción actuando sobre el disco, dado que en el centro del disco la relación entre ellas es inferior a 3 (mucho menor que la relación normal entre las resistencias a compresión y tracción de las rocas), la rotura se produce por tracción. (González de Vallejo et al., 2002)

#### 4.7 Ensayo de compresión triaxial

En este ensayo, se coloca la muestra dentro de una cámara cubierta por una membrana de caucho, en la cual se aplica una presión de confinamiento mediante un fluido. Además, se aplica una presión triaxial con el fin de simular las condiciones de carga a las que la muestra estará expuesta en la realidad. En las muestras de roca, se considera el tipo de prueba consolidada no drenada (Braja M, Das, 2011).

El ensayo consiste en aplicar simultáneamente la carga axial y la presión de confinamiento. Una vez que se ha alcanzado el valor deseado de presión de confinamiento, se aplica la carga axial para obtener la rotura de la probeta. Es importante tener en cuenta que la presión de confinamiento debe mantenerse constante durante todo el ensayo. Una vez que se ha producido la rotura de la probeta, se debe aplicar el criterio de rotura de Mohr-Coulomb (González de Vallejo et al., 2002, p. 173)

Es necesario conocer con qué tipo de roca se realizará este tipo de ensayo. Las rocas permeables presentarán una respuesta mecánica controlada basada en una presión efectiva. Por esta razón, se obtendrán valores diferentes a los obtenidos mediante el aumento de la presión de confinamiento, lo cual podría generar resultados erróneos. También se debe tener en cuenta

la temperatura y la presencia de micro fisuras u otros factores que puedan limitar este tipo de ensayo (González de Vallejo et al., 2002, p. 173)

Gracias a este ensayo, es posible obtener los siguientes parámetros de nuestra muestra: la envolvente o línea de resistencia, cohesión y fricción (Gonzales de Vallejo et al., 2004).

#### 4.8 Ensayos complementarios

## **4.8.1 TILTEST**

Es un ensayo rápido, sencillo y económico, ya que se puede realizar tanto en campo como en laboratorio. Dependiendo de la geometría de las muestras, se pueden utilizar diferentes métodos. Barton propone que el método de prueba de inclinación se realice con muestras en forma de placas rectangulares, las cuales deben estar en buen estado, ser planas y estar secas. Por otro lado, Stimpson menciona que se pueden utilizar las mismas probetas que se utilizan para los ensayos de compresión uniaxial y/o triaxial, las cuales en su mayoría son de forma cilíndrica (Gaona y Rodriguez, 2019)

El procedimiento implica situar la muestra de roca sobre una superficie inclinada, que puede ser operada manualmente, por un motor, electrónicamente o mediante una inclinación metálica manual. Estas superficies cuentan con un sistema de nivelación, una plataforma inclinada y un dispositivo para medir el ángulo de inclinación. Las muestras se disponen en cualquiera de estas superficies, con la finalidad de incrementar progresivamente el ángulo de inclinación hasta que la muestra inicie su deslizamiento (Gaona y Rodriguez, 2019).

## 4.8.2 Ensayo del martillo Schmidt

El rebote del esclerómetro o martillo Schmidt se lleva a cabo tanto en campo como en laboratorio y constituye otro método para obtener la resistencia a la compresión simple de una matriz rocosa. Se trata de un ensayo de rebote que implica lanzar una masa contra un vástago en contacto con la roca, y al golpearla, se registra el número de rebotes. Este número de rebotes se correlaciona con la densidad de la roca y se utiliza como una medida de su resistencia. (Bazán et al., 2012)

Una vez conocidos algunos de los parámetros físicos y mecánicos de las rocas se realizó un resumen de todos los valores obtenidos y recopilados, estos valores se detallan a continuación gracias a las fuentes: Gonzales de Vallejo et al., (2004) y Ramírez y Alejano, (2004)

## Tabla 8.

Tino	Doco	Dongidad (ton/m3)	Porosidad	Peso específico	Permeabilidad primaria
Tipo	Koca	Delisidad (toli/1115)	(%)	(ton/m3)	(m/s)
	Andesita	2.3-2.75	0.2-8.0	2.2-2.35	-
	Basalto	2.75-3	0.2-1.5	2.7-2.9	-
	Diorita	-	-	2.7-2.85	-
	Gabro	2.92-3.05	2-5	3.0-3.1	(10^-9)- (10^-12)
Magmáticas	Granito	2.5-2.75	0.1-2.0	2.6-2.7	(10^-9)- (10^-12)
	Grauvaca	-	3	2.8	(10^-9)- (10^-12)
	Anfibolita	2.9-3.2	-	2.9-3.0	(10^-9)- (10^-12)
	Diabasa	2.9-3.1	0.3-0.7	2.9	(10^-9)- (10^-12)
	Toba	1.3-2.2	8-35	1.9-2.3	(10^-9)- (10^-12)
	Lutita	-	2-15	2.2-2.6	(10^-9)- (10^-13)
	Arenisca	2.1-2.5	1-8	2.3-2.6	(10^-5)- (10^-10)
C - dim - mtonio -	Caliza	1.5-2.5	1.5-6.0	2.3-2.6	(10^-6)- (10^-12)
Sedimentarias	Dolomita	2.2-2.7	0.2-4.0	2.5-2.6	(10^-6)- (10^-12)
	Sal	-	5	2.1-2.2	< (10^-11)- (10^-13)
	Yeso	-	5	2.3	< (10^-11)- (10^-13)
	Cuarcita	-	0.1-0.5	2.6-2.7	(10^-9)- (10^-12)
	Esquisto	2.4-2.75	0.2-0.4	2.5-2.8	(10^-7)- (10^-8)
Metamórficas	Gneis	2.6-2.78	1-5	2.7-3.0	(10^-9)- (10^-12)
	Mármol	2.6-2.75	0.1-0.5	2.6-2.8	-
	Pizarra	-	0.1-1	2.5-2.7	(10^-11)-(10^-13)

Resumen de las propiedades físicas de las rocas más comunes

*Nota.* Tabla realizada en base a datos obtenidos de: Gonzales de Vallejo et al., (2004) y Ramírez y Alejano, (2004). Elaborado por: La Autora.

Las tablas 9 y 10 son un resumen de las propiedades de las rocas en base la información entregada en los libros de Gonzales de Vallejo et al., (2004) y Ramírez y Alejano, (2004).

# Tabla 9.

Тіро	Roca	Resistencia a la compresión uniaxial (ton/m2)	Velocidad de propagación de ondas longitudinales	Módulo de elasticidad	Coeficiente de Poisson
	Andesita	21000-32000	-	3.0-4.0	0.11-0.20
	Basalto	8000-22000	4500-6500	3.2-10	0.14-0.20
	Diorita	18000-24500	-	0.2-1.7	0.09-0.2
	Gabro	21000-28000	4500-6500	1-6.5	0.12-0.25
Magmáticas	Granito	7000-20000	4500-6000	1.7-7.7	0.12-0.25
C	Grauvaca	10000-15000	-	4.7-6.3	-
	Anfibolita	28000	-	1.3-9.2	-
	Diabasa	24000-35000	5500-7000	6.9-9.6	0.12-0.20
	Toba	1000-4600	-	0.3-7.6	0.10-0.20
	Lutita	2000-4000	1400-3000	0.3-2.2	0.25-0.29
	Arenisca	5500-14000	1400-4200	0.3-6.1	0.07-0.12
Sedimentarias	Caliza	6000-14000	2500-6000	1.5-9.0	0.07-0.12
	Dolomita	6000-20000	5000-6000	0.4-5.1	0.08-0.20
	Sal	500-3000	4500-6000	0.5-2.0	0.22
	Yeso	2500	3000-4000	1.5-3.6	-
	Cuarcita	20000-32000	5000-6500	2.2-10	0.08-0.24
Matanatufiana	Esquisto	3000-6000	-	0.6-3.9	0.01-0.31
Metamorficas	Gneis	6000-20000	3100-5500	1.7-8.1	0.09-0.20
	Mármol	12000-20000	3500-6000	2.8-7.2	0.11-0.20
	Pizarra	4000-15000	3500-5000	0.5-3.0	-

Resumen de las propiedades mecánicas de las rocas más comunes

Nota. Tabla realizada en base a datos obtenidos de: Gonzales de Vallejo et al., (2004) y

Ramírez y Alejano, (2004). Elaborado por: La Autora. (2024)

# Tabla 10.

Тіро	Roca	Resistencia a la tracción (ton/m2)	Cohesión (ton/m2)	Angulo de fricción (°)
	Andesita	700	2800	45
	Basalto	500-2500	2000- 6000	48-55
	Diorita	800-3000	1500	50-55
	Gabro	1400-3000	3000	35
Magmáticas	Granito	700-2500	1500- 5000	45-58
	Grauvaca	550-1500	600-1000	45-50
	Anfibolita	2300		-
	Diabasa	5500	9000- 12000	40-50
	Toba	100-400	70	-
	Lutita	150-1000	300-3500	40-60
Calina anta sia a	Arenisca	500-2000	8000- 3500	30-50
Sedimentarias	Caliza	400-3000	500-4000	35-50
	Dolomita	500-2500	2200- 6000	25-35
	Sal		-	-
	Yeso	100-250	-	30
	Cuarcita	1000-3000	2500- 7000	40-55
Metamórficas	Esquisto	200-550	2500	25-30
	Gneis	500-2000	1500- 4000	30-40
	Mármol	650-2000	1500- 3500	35-45
	Pizarra	700-2000	1000- 5000	40-55

Resumen de las propiedades mecánicas de las rocas más comunes (continuación)

*Nota*. Tabla realizada en base a datos obtenidos de: Gonzales de Vallejo et al., (2004) y Ramírez y Alejano, (2004). Elaborado por: La Autora. (2024)

## **CAPÍTULO V**

## PARÁMETROS DEL MACIZO ROCOSO

## 5.1. Fracturación mediante la utilización de criterios de rotura

Se han desarrollado criterios de rotura que se basan en los esfuerzos o tensiones, ya que son más fáciles y prácticos de medir en comparación con otros parámetros, como la deformación o la cantidad de energía de deformación liberada durante el proceso de carga (González de Vallejo et al., 2002)

Estos criterios de rotura establecen una relación entre las tensiones y se utilizan para predecir la resistencia de una roca sometida a un campo de tensiones, generalmente asociados a la resistencia máxima del material, aunque también pueden ser empleados para predecir la resistencia residual. (Ramírez y Alejano, 2004)

En el contexto de la evaluación de la resistencia de los macizos rocosos, los criterios de rotura o resistencia se basan en los esfuerzos actuantes y en las propiedades del material rocoso, como la respuesta de la roca intacta ante diversas condiciones de esfuerzo, la influencia de las discontinuidades en el comportamiento del macizo y la capacidad de predecir el comportamiento global del macizo rocoso. (González de Vallejo et al., 2002)

En el diseño de cimentaciones, es de vital importancia contar con conocimiento sobre el tipo de falla que puede ocurrir en función del tipo de roca, así como comprender el mecanismo de falla en relación con las condiciones geológicas y las características del macizo rocoso. (Agudelo, 2012)

Dentro de los criterios de rotura, los más utilizados son los criterios de Mohr-Coulomb y el criterio de Hoek y Brown. Estos criterios proporcionan herramientas para el análisis y la evaluación de la resistencia de los macizos rocosos en diferentes aplicaciones geotécnicas. (González de Vallejo et al., 2002)

#### 5.1.1 Criterio de Mohr Coulomb

Se refiere a la representación gráfica en forma de línea recta que se traza en los círculos de Mohr, y representa las Combinaciónes críticas de las tensiones principales que conducen a la falla de un material, adicionalmente nos permiten determinar tanto la resistencia máxima como la residual de la roca. La rotura ocurre cuando la tensión cortante aplicada a la roca es igual a la resistencia friccional, asociada con la tensión normal en el plano de falla, sumada a la cohesión existente. (Ramírez y Alejano, 2004)

El modelo Mohr-Coulomb, puede ser obtenido a través de diferentes ensayos de laboratorio, siendo el ensayo triaxial el más adecuado para este propósito. Este tipo de ensayo permite obtener datos precisos sobre las propiedades mecánicas de la roca y determinar parámetros importantes para la evaluación de su resistencia y comportamiento ante las cargas aplicadas. (Vanegas, 2010)

#### 5.1.2 Criterio de Hoek y Brown

A diferencia de los suelos, las rocas exhiben un comportamiento mecánico no lineal, lo cual hace que los criterios de rotura lineales no sean apropiados, ya que pueden brindar información incorrecta sobre la deformación de la roca, especialmente a bajas tensiones. A pesar de su simplicidad, los criterios de rotura lineales no resultan idóneos para las rocas (González de Vallejo et al., 2002)

El criterio Hoek-Brown, basado en el sistema de clasificación RMR (Rock Mass Rating) detallado en el capítulo 7, es utilizado para evaluar la resistencia de los macizos rocosos. Asimismo, se emplea el índice de resistencia geológica GSI (Geological Strength Index) para evaluar la calidad del macizo rocoso considerando la fracturación y la estructura geológica. Estos criterios resultan valiosos para evaluar la resistencia de los macizos rocosos en diversas condiciones. (Vanegas, 2010) El criterio Hoek-Brown toma en cuenta diversos factores que influyen en la rotura de un macizo rocoso a gran escala, como la no linealidad con respecto al nivel de tensiones, la influencia del tipo de roca y del estado del macizo, la relación entre la resistencia a la compresión y a la tracción, así como la disminución del ángulo de rozamiento con el aumento de la tensión de confinamiento, entre otros aspectos (Gaona y Rodriguez, 2019)

Por otro lado, el criterio de Mohr-Coulomb, no es adecuado para estimar la resistencia del macizo rocoso debido a su enfoque lineal en términos de tensión-deformación. No obstante, puede ser utilizado en casos donde la falla se produce en superficies de discontinuidad en macizos rocosos de mayor resistencia. En este sentido, se sugieren valores orientativos para ambos parámetros en función del índice RMR (González de Vallejo et al., 2002).

## Tabla 11.

Características del macizo rocoso Rotura a favor de los planos de discontinuidades		Rotura a través de la matriz rocosa	
Macizo rocoso masivo sin	No es posible.	Hoek y Brown $(m - para roza intacta y s = 1)$	
discontinuidades	Mohr- Coulomb ( $c$ y Ø de	$(m_i, para 102a matta y s - 1).$	
Macizo rocoso estratificado	las discontinuidades).	Hoek y Brown $(m_i, para roza intacta y s = 1).$	
Macizo rocoso con dos	Mohr- Coulomb ( $c \neq 0$ de		
familias de discontinuidades	las discontinuidades).	Hoek y Brown $(m_i, para roza intacta y s = 1).$	
Macizo rocoso con tres	Hoek y Brown ( $m, s$ y $\propto$		
familias de discontinuidades ortogonales	del macizo).	No es posible	
Macizo rocoso con cuatro	Hoek y Brown ( $m, s$ y $\propto$		
más familias de discontinuidades	del macizo).	No es posible.	

Criterios de rotura en macizos rocosos y datos necesarios para su aplicación

Fuente: (González de Vallejo et al., 2002)

## 5.2. Deformabilidad del macizo rocoso

La determinación del módulo de deformación en un macizo rocoso sigue siendo un desafío teórico y práctico sin resolver. Las discontinuidades desempeñan un papel importante en la evaluación de la deformabilidad del macizo, y el factor de escala es un factor crítico a considerar. En muchos casos, el tamaño del volumen representativo es demasiado grande para realizar ensayos de laboratorio, lo que hace que los ensayos in situ a gran escala sean la única opción viable para estimar el módulo de deformación. Sin embargo, estos ensayos son costosos y se limitan a unas pocas pruebas en proyectos de gran envergadura. Debido a la heterogeneidad del macizo, se requiere realizar un número suficiente de ensayos para obtener una evaluación confiable de las propiedades geotécnicas promedio del material. (Rodríguez, 2012)

Para analizar la deformabilidad del macizo rocoso, es necesario considerar un conjunto de discontinuidades paralelas que están sometidas a un esfuerzo normal. Se asume que estas discontinuidades tienen una rigidez elástica lineal. Para calcular el módulo de deformación general, se divide la tensión aplicada por la deformación total. Se supone que el espesor de las discontinuidades es insignificante en comparación con la longitud total considerada. Además, se considera que la deformación se base en dos componentes: la deformación de la roca intacta y la deformabilidad de las discontinuidades (Hudson y Harrison, 1997)

En el caso de las presas de gravedad de hormigón, se considera que una relación de módulos de deformación superior a <sup>1</sup>/<sub>4</sub> es necesaria para garantizar la compatibilidad de deformaciones entre la masa rocosa de la cimentación y la presa. Sin embargo, según la tesis doctoral de Ceballos, que analizó 29 grandes presas de hormigón a gravedad, se encontró que casi ninguna de ellas tenía un valor de deformación mayor a 20 (Jaeger, 1979)

Para estimar la relación de los módulos de deformación utilizará la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{Ec}{Em}$$

Donde:

Ec: módulo de deformación del hormigón

Em: módulo de deformación de la cimentación

## Tabla 12.

Efecto del módulo de elasticidad, en el comportamiento de presas de gravedad.

Ec/Em	Influencia sobre la presa	Problemas
<4	Despreciable	Ninguno
4-8	Poco importante	Menores
8-16	Importante	Algunos
>16	Muy importante	Moderados a graves

Fuente: (Romana, 2011, p. 29)

## Tabla 13.

Mínimo módulo de deformación del terreno de cimentación de presas en hormigón a gravedad

Ec (Gpa) $\frac{Ea}{Na}$	Em – mínimo (Gpa)		Tine de prese/selided del hermigén
	Normal	Con problemas	Tipo de presa/candad del normigo
30	3	1.5	Presas de CVC/ buen hormigón
20	2	1	Presas de RCC/Hormigón medio
10	1	0.5	Presas antiguas/Hormigón malo

Fuente: (Romana, 2011, p. 29)

## 5.2 Capacidad de soporte mediante métodos analíticos

Según Rodríguez, E (2012) "es importante distinguir entre dos conceptos claves: la capacidad de soporte última y la capacidad de soporte admisible del macizo rocoso".

La capacidad de soporte última se refiere a la carga promedio por unidad de área necesaria para provocar la falla del macizo rocoso debido a la ruptura. En contraste, la capacidad de soporte admisible se define como la máxima presión permitida sobre el macizo rocoso, considerando factores de seguridad para prevenir la falla y evitar deformaciones que puedan dañar la estructura de cimentación (Rodriguez, E. 2012).

El cálculo de la capacidad de soporte se puede realizar mediante métodos analíticos o el uso de ecuaciones matemáticas. En este caso, nos centraremos exclusivamente en ecuaciones matemáticas que describen los diferentes modos de falla y permiten clasificar las rocas en cuatro categorías: roca intacta, macizo fracturado, macizo estratificado y macizo altamente fracturado. Además, existe un método conocido como "Q" que describe la condición de estabilidad del macizo rocoso y proporciona una aproximación para determinar el soporte necesario. El diseño del soporte dependerá de las dimensiones de la excavación y la relación de soporte de la excavación (ESR, por sus siglas en inglés). (González de Vallejo et al., 2002)

## Tabla 14.

Q	Valor	
Excepcionalmente pobre	< 0.01	
Extremadamente pobre	0.01-0.1	
Muy pobre	0.1-1.0	
Pobre	1.0-4.0	
Regular	4.0-10.0	
Buena	10.0-40.0	
Muy buena	40.0-100.0	
Extremadamente buena	100.0-400.0	
Excepcionalmente buena	>400.0	

Descripción del macizo rocoso mediante el método Q

Fuente. Gamiño. J. (1986, p. 105)

## 5.3. Asentamientos admisibles

El asentamiento de una estructura está directamente relacionado con la deformabilidad y dureza del macizo rocoso. La determinación de estas propiedades se puede lograr a través de ensayos de laboratorio previamente estudiados en el capítulo 4. Sin embargo, debido a las limitaciones a escala, resulta difícil obtener un valor preciso del asentamiento real (Ayala et al., 2000)

Es importante identificar el tipo de roca presente en la matriz rocosa, ya que cuando esta es homogénea los asentamientos también tienden a ser uniformes. Esto implica que se producirán incrementos de tensiones relativamente pequeños en la presa (Ayala et al., 2000)

Para determinar el asentamiento de manera precisa, se debe considerar la capacidad de soporte del cimiento, así como su deformabilidad y grado de fracturación. De esta forma, podemos evaluar la influencia del cimiento en la presa a través de su deformación, representada por la relación Em/Ec (Ayala et al., 2000)

## Tabla 15.

Influencia del cimiento en la deformación de la presa

Тіро	Influencia	Relación Em/Ec	
1	Muy importante	<1/15	
2	Importante	1/15 - 1/8	
3	Escasamente importante	$1/8 - \frac{1}{4}$	
4	Irrelevante	<sup>1</sup> / <sub>4</sub> -1	

Fuente: (Ayala et al., 2000)

#### **CAPITULO VI**

# ASPECTOS HIDROMECÁNICOS EN LAS PRESAS DE HORMIGÓN A GRAVEDAD

La subpresión en presas de hormigón a gravedad cimentadas en roca es un fenómeno que se debe tener en cuenta en el diseño y análisis de estas estructuras hidráulicas, debido a esta fuerza ejercida por el agua en la cimentación, pueden existir importantes implicaciones en la estabilidad de la presa, ya que generará esfuerzos adicionales en la estructura y aumentar la posibilidad de volcamiento.

## 6.1 Filtración

La filtración de agua en la presa de hormigón a gravedad está estrechamente relacionada con la permeabilidad del material con el que esta fue construida y del macizo rocoso de cimentación, por otra parte, el embalse puede verse afectado por la presión del agua, lo que genera fuerzas de origen físico, químico y biológico. La diferencia de carga hidráulica provoca el flujo de agua desde la zona aguas arriba hacia la zona aguas abajo, fenómeno conocido como filtración (Gonzales de Vallejo et al., 2004)

En relación al macizo rocoso que sirve como base de cimentación de la presa, Hudson y Harrison explican que:

"debido a la presencia de discontinuidades, existen dos tipos de permeabilidad: primaria y secundaria. La permeabilidad primaria se refiere a la capacidad de flujo de la matriz rocosa, mientras que la permeabilidad secundaria se refiere a la capacidad de flujo del macizo rocoso en su conjunto. En la ingeniería de rocas, se suele enfocar en la permeabilidad secundaria en los procedimientos de diseño y construcción, ya que se asume la presencia de fisuras en el macizo rocoso" (1997).

En términos generales, la matriz de roca tiene una permeabilidad muy baja, en el rango de 10-7 a 10-14 cm/s, dependiendo de la naturaleza de la roca, obstante, como señala L. Müller

(1972), a la escala considerada, los macizos rocosos siempre presentan articulaciones o fisuras. Además, Hudson y Harrison (1997), destacan la interrelación entre varias propiedades de las rocas, y explican que el flujo de agua a través de un macizo rocoso fracturado dependerá de la apertura de las fracturas, la cual está influenciada por el esfuerzo normal que actúa en ellas, el cual a su vez depende de la profundidad debajo de la superficie del suelo.

Por otro lado, es importante tomar precauciones en la presa para proteger las zonas de entrada y salida, las ranuras de compuertas, así como las áreas de curva inversa y los puntos donde se produzca un cambio abrupto en el límite de flujo. Según Zhebgzhou (2005), estos sectores pueden experimentar cavitaciones.

#### 6.2 Lixiviación química de las rocas de cimentación

La lixiviación en las rocas puede ser causada por diversos factores. Según Luca Palacios (2012), la lixiviación bacteriana, también conocida como biolixiviación o biooxidación, es un proceso natural en el cual las bacterias oxidan los minerales sulfurados, lo que resulta en la disolución de los metales presentes en esos minerales.

En cuanto a los minerales más propensos a la lixiviación en rocas, son aquellos que contienen hierro y magnesio. Además, las zonas de fracturas y fallas en las rocas favorecen una mayor permeabilidad, lo que aumenta la posibilidad de que se produzca la lixiviación de los minerales. Sin embargo, la lixiviación en grandes masas es un proceso lento, ya que puede tardar meses o incluso años en penetrar las fracturas finas o los poros de la roca para disolver el metal y luego filtrarse a través de las rocas (Anónimo, s.f).

Se ha observado que una disminución del pH en el agua acelera los procesos de oxidación, lo cual está relacionado con la lixiviación química y física de la roca. Esto también está asociado con la apertura de la permeabilidad, lo que aumenta la superficie de contacto y la oxidación en condiciones atmosféricas ambientales. Estas condiciones también son propicias para la biolixiviación. (Luca Palacios, 2012)

Además, es importante tener en cuenta que la lixiviación también puede afectar al hormigón de la presa. Sandoval (2019) menciona que, para proteger el hormigón contra la lixiviación en una presa, se recomienda mantener una distancia mínima de 2 metros entre la cara aguas arriba de la presa y la pared interna de la galería. Además, se establece que esta distancia debe ser mayor o igual a 1 metro y que la longitud total L debe ser mayor o igual a 0,05 a 0,07 veces la altura de la presa (H). Sin embargo, estos valores deben ajustarse según las condiciones específicas de la cimentación y la altura de la presa.

#### 6.3 Cuantificación de la subpresión

La filtración de agua en una presa puede generar un fenómeno conocido como subpresión, que se produce cuando el agua se infiltra por debajo de la base de la presa a través de las roturas y discontinuidades de la base de cimentación, así como a lo largo del cuerpo de la presa, creando una fuerza de abajo hacia arriba. (Almeida y Escobar, 2021)

Para reducir la magnitud de la fuerza de subpresión en la cimentación, se llevan a cabo inyecciones de lechada de cemento en la base de la cara aguas arriba de la presa, creando una cortina, estas inyecciones tienen como propósito llenar las fisuras entre las rocas y dificultar el flujo del agua filtrante (Sandoval, 2019)

Molina (2020) destaca las siguientes consideraciones sobre la subpresión:

- Es proporcional a la profundidad del embalse aguas arriba y aguas abajo.
- El comportamiento depende de los drenajes realizados:

Un drenaje eficaz, sin grietas, reduce la subpresión, lo que permite, la estructura de la presa trabaje siempre a compresión.

- Un drenaje ineficaz, sin grietas, no logra reducir la filtración.
- Un drenaje ineficaz con grietas genera tracciones en algunas partes, lo que provoca un aumento de las presiones intersticiales.

Según Sandoval (2019), las inyecciones se realizan en la cimentación con perforaciones de 7,62 cm de diámetro, que pueden llegar a cubrir hasta el 60% de la altura de la presa. La separación inicial entre las inyecciones suele ser de 10 m, aunque puede variar entre 2,5m y 4 m. La profundidad recomendada para las inyecciones es de 0,5 a 1,0 veces la altura de la presa, con un diámetro de 56 a 76 mm.

Después de la cortina de inyecciones, se llevan a cabo perforaciones adicionales en la roca para funcionar como drenes y reducir la subpresión mediante la presión atmosférica. Sandoval (2018)

Tomando en cuenta todas las consideraciones anteriores para poder disminuir la fuerza de subpresión ejercida en la base de la presa, es necesaria la construcción de una galería para la ejecución de la cortina de inyecciones y los drenajes durante las fases de construcción y operación (Sandoval, 2019). A continuación, se detalla los valores mínimos de construcción de acuerdo a las recomendaciones detalladas por Nedrigi y Subbotin (1983)

## Figura 2.

Detalle de dimensiones de construcción para una galería, dren y cortina de inyecciones.



Elaborado por: La Autora.

## 6.3.1 Ecuaciones de la subpresión en rocas

Grishin (como se citó en Sandoval, 2019) llevó a cabo un monitoreo de la subpresión en varias presas cimentadas en roca, en puntos claves donde se realizaron las cortinas de inyecciones y las perforaciones que funcionan como drenes en la base de la cimentación rocosa. Como resultado de este estudio, se obtuvieron tres tipos de ecuaciones para la subpresión en la zona irregular, cada una acompañada de sus respectivos diagramas, los cuales están estrechamente vinculados a la altura de la presa.

# Figura 3.



Datos de la subpresión en el bloque central de la presa Rules

Nota: Datos de la subpresión de la presa Rules-Soriano (2010). Elaborado por: La Autora.

- 1.- Subpresión con una hipotética falla de drenaje.
- 2.- Hipotética, drenaje normal.
- 3.- Subpresión con el embalse lleno
- 4.- Ecuación de Grishin

 a) Para una presa con una diferencia de niveles aguas arriba y aguas abajo menor a los 25m, Grishin (1979) detalla el siguiente diagrama de la subpresión.

# Figura 4.

Diagrama de la subpresión para una diferencia de niveles aguas arriba y aguas abajo de la presa <25m de altura Grishin (1979)



Elaborado por: La Autora

La subpresión estará definida por:

$$W_f = W_{f1} + W_{f2}$$
$$W_{f1} = A1 * \gamma_a * db$$
$$W_{f2} = 0.5\gamma_a H (1 - \alpha_0) L\alpha_2 * db$$

Donde:

Wf= Fuerza de subpresión (ton)

Wf1= Fuerza de subpresión rectangular (ton)

A1= es el área de la presa sumergida en su totalidad

Wf2= Fuerza de subpresión irregular (ton)

H= Diferencia de niveles entre aguas arriba y abajo (m)

 $\alpha 0$  = Coeficiente de perdida de carga inicial con un rango de valores adimensionales de 0.05-0.08

L= ancho desde el talud aguas arriba hasta el eje del drenaje (m)

 $\gamma_a$  = Peso específico del agua (ton/m3)

 $\alpha 2$  = Coeficiente de porosidad de la zona con un rango de valores adimensionales de 0.07-0.95

db= Ancho de la dovela de estudio (m)

b) Para una presa con una diferencia de niveles aguas arriba y abajas abajo ≥25m y
 ≤75m, Grishin (1979) detalla el siguiente diagrama de la subpresión.

## Figura 5.

Diagrama de la subpresión para subpresión para una diferencia de niveles aguas arriba y aguas abajo de la presa  $\geq 25m$  y  $\leq 75m$  de altura Grishin (1979)



Elaborado por: La Autora

La subpresión estará definida por:

$$W_f = W_{f1} + W_{f2}$$
$$W_{f1} = A1 * \gamma_a * db$$

$$W_{f2} = 0.5\gamma H \left[ L(1 - \alpha_0) + b\alpha_1'' \right] \alpha_2 * db$$

Donde:

Wf= Fuerza de subpresión (ton)

Wf1= Fuerza de subpresión rectangular (ton)

Wf2= Fuerza de subpresión irregular (ton)

H= Diferencia de niveles entre aguas arriba y abajo (m)

A1=es el área de la presa sumergida en su totalidad

 $\alpha 0$  = Coeficiente de perdida de carga inicial con un rango de valores adimensionales de 0.05-0.08

L= ancho desde el talud aguas arriba hasta el eje del drenaje (m)

 $\gamma_a$  = Peso específico del agua (ton/m3)

 $\alpha 2$  = Coeficiente de porosidad de la zona con un rango de valores adimensionales de 0.07-0.95

db= Ancho de la dovela de estudio (m)

 $\alpha$ 1" = coeficiente de subpresión con un valor igual a 0.15

c) Para una presa con una diferencia de niveles aguas arriba y aguas abajo >75m,
 Grishin (1979) detalla el siguiente diagrama de la subpresión.

# Figura 6.

Diagrama de la subpresión para subpresión para una diferencia de niveles aguas arriba y aguas abajo de la presa >75m de altura Grishin (1979)



## Elaborado por: La Autora

La subpresión estará definida por:

$$W_f = W_{f1} + W_{f2}$$
$$W_{f1} = A1 * \gamma_a * db$$

$$W_{f2} = 0.5\gamma H \left[ L(1 - \alpha_0) + b\alpha_1^{"} \right] \alpha_2 * db$$

Donde:

Wf= Fuerza de subpresión (ton)

Wf1= Fuerza de subpresión rectangular (ton)

Wf2= Fuerza de subpresión irregular (ton)

H= Diferencia de niveles entre aguas arriba y abajo (m)

A1=es el área de la presa sumergida en su totalidad

 $\alpha 0$  = Coeficiente de perdida de carga inicial con un rango de valores adimensionales de 0.05-0.08

L= ancho desde el talud aguas arriba hasta el eje del drenaje (m)

 $\gamma_a$  = Peso específico del agua (ton/m3)

 $\alpha 2$  = Coeficiente de porosidad de la zona con un rango de valores adimensionales de 0.07-0.95

db= Ancho de la dovela de estudio (m)

 $\alpha$ 1" = coeficiente de subpresión con un valor igual a 0.25

 $\alpha$ 1' = coeficiente de subpresión con un valor igual a 0.5

En la tabla 16 podemos revisar un resumen de las ecuaciones para la subpresión de forma irregular, detallada por Grishin (1979)

## Tabla 16.

Ecuaciones y valores de los coeficientes de supresión Grishin (1979)

Altura de la presa H. Gravedad	$\alpha_1'$	<i>α</i> <sub>1</sub> "	Ecuación
H < 25	0.3	0	$W_f = 0.5\gamma H (1 - \alpha_0) L \alpha_2$
25 < H < 75	0.4	0.15	$W_f = 0.5\gamma H \left[ L(1 - \alpha_0) + b\alpha_1^{"} \right] \alpha_2$
			$W_f = 0.5\gamma H [L_1(1 + \alpha_1')]$
H > 75	0.5	0.25	$- \alpha_1$ ") $L_2 \alpha_1'$
			$+ b\alpha_1"]\alpha_2$
$\alpha_0$ – Coeficiente de j	perdida	de carga inicial	0.05-0.08
$\alpha_2$ - Coeficiente de p	orosida	d de la zona	0.7-0.95

Nota. Ecuaciones determinadas por Grishin (1979), Fuente: Sandoval, (2018).

# 6.4 Incidencia de la subpresión en la distribución de esfuerzos y en la resistencia de la presa

En el caso de las presas, se permiten únicamente los esfuerzos de compresión, aunque en determinadas Combinaciónes también pueden tolerarse esfuerzos de tracción de forma temporal, siempre y cuando se mantengan dentro de los límites admisibles del material (Sandoval, 2018)

La determinación de los esfuerzos se calcula en la base de la cimentación, es decir los brazos de palanca de las fuerzas se las dirigirá a este punto. Si se conocen los valores de los esfuerzos en los extremos, se asume que su distribución en el interior de la estructura es lineal. Sandoval (2018)

En la figura 7 se puede observar la distribución de las fuerzas que actúan a la presa de hormigón a gravedad

## Figura 7.

La distribución de fuerzas en la presa de hormigón a gravedad



Elaborado por: Autora

## Donde:

- W1=Fuerza de la presión hidrostática aguas arriba
- W2=Fuerza la presión hidrostática aguas abajo
- W3=Fuerza generada por el peso del agua sobre el paramento aguas arriba
- W4=Fuerza generada peso del agua sobre el paramento aguas abajo
- Wf1=Subpresión rectangular
- Wf 2 = Subpresión forma irregular
- G= Fuerza ejercida por el peso propio de la presa
- S=Fuerza sísmica
- P1-P2= Fuerza de presión resultante de la ola
- Ws= Fuerza hidrodinámica debida al sismo
- Wa= Fuerza ejercida por los sedimentos
- Wsa= Fuerza hidrodinámica debida al sismo en sedimentos

## **CAPÍTULO VII**

# SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE LAS ROCAS

#### 7.1 Bases teóricas de los principales sistemas de clasificación de rocas

### 7.1.1 Clasificación del macizo rocoso mediante indicadores geo-mecánicos

Los sistemas de clasificación de macizos rocosos son ampliamente utilizados con el objetivo de evaluar y determinar la calidad de ellos. Para lograr una caracterización adecuada de un macizo rocoso, es necesario considerar diversos parámetros, como la resistencia de la roca, la presencia de discontinuidades, el espaciado de los planos de discontinuidad, las propiedades geomecánicas de dichas discontinuidades, las condiciones del agua, las tensiones naturales y las alteraciones que puedan afectar al macizo rocoso (Ramírez y Alejano, 2004)

A continuación, se presentan los conceptos de los sistemas de clasificación geomecánicas y geodinámicas utilizadas en el proyecto de estudio. Cada uno de estos sistemas sigue sus propias metodologías y criterios de evaluación, teniendo en cuenta factores como la resistencia de la roca, la orientación de las discontinuidades, la durabilidad, la deformabilidad y la estructura del macizo rocoso. Estos sistemas brindan a ingenieros y geólogos las herramientas necesarias para tomar decisiones fundamentadas sobre la estabilidad y el comportamiento de las formaciones rocosas en diversos proyectos (Plaza Diez, s.f).

#### 7.1.1.1 RMR (Rock mass rating).

Desarrollado por Bieniawski en 1973 y posteriormente actualizado, el sistema de clasificación del macizo rocoso (RMR) establece una relación entre los índices de calidad y los parámetros geotécnicos de un macizo rocoso. El índice de calidad RMR, que varía de 0 a 100, proporciona información sobre cómo estos parámetros influyen en el comportamiento geomecánico del macizo rocoso (Loayza, 2015).

Varios investigadores han destacado la utilidad del RMR como una herramienta valiosa para describir las masas rocosas utilizadas como fundación de presas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta afirmación debe ser interpretada en términos cualitativos en lugar de cuantitativos (Romana, 2012).

## 7.1.1.2 RQD (Rock quality desing).

Propuesta por Deere y Miller, RQD por sus siglas en ingles se describe como la designación de la calidad de roca y se fundamenta en el porcentaje de recuperación de núcleos de roca utilizando barrenos de diamante con un diámetro de 57.15 mm o más (Gamiño, 1986). El valor se obtiene sumando la longitud total de los núcleos recuperados, considerando únicamente las piezas que miden 10 cm o más de longitud y que se encuentran en buen estado y son sólidas. El resultado se expresa como un porcentaje en relación a la longitud total perforada (Jaeger, 1972).

Es importante destacar que este índice se utiliza como una medida rápida y se complementa con otras clasificaciones. Sin embargo, se debe tener precaución al interpretar la calidad del macizo obtenido, ya que factores como la mecánica del sondeo y la forma en que se lleva a cabo pueden ocasionar roturas en el testigo, lo que podría afectar la precisión de los resultados (Guamán y Mendieta, 2013). La ecuación que rige esta clasificación será la siguiente:

$$RQD = \frac{Longitud \ recuperada \ en \ piezas \ge 0.1m * 100}{Longitud \ del \ sondeo}$$

## 7.1.1.3 Índice Q (Rock Mass Quality).

El índice Q, desarrollado por Barton, se utiliza para evaluar la calidad de un macizo rocoso, considerando varios factores como la resistencia de la roca, las condiciones de las discontinuidades y la deformabilidad (Guamán y Mendieta, 2013). Según Barton, este índice se basa en tres coeficientes principales: el tamaño del bloque, el esfuerzo cortante interbloque y el esfuerzo activo, donde el tamaño del bloque se relaciona con la relación entre el índice de

calidad de la roca (RQD) y el número de familias estructurales presentes, el esfuerzo cortante interbloque indica la interacción entre fracturas y está relacionado con la rugosidad y la alteración en las fracturas. Por otro lado, el esfuerzo activo se refiere al esfuerzo de presión del agua en el macizo rocoso en relación con la pérdida de carga o la resistencia de la roca (Pérez et al., 2017).

Este índice se trabajará mediante la siguiente ecuación, cuyos parámetros se encuentran descritos en el apartado 7.2

$$Q = \frac{RQD}{Jn} * \frac{Jr}{Ja} * \frac{Jw}{SRF}$$

## 7.2 Parámetros que intervienen en cada uno de los sistemas de clasificación.

#### 7.2.1 RMR (Rock mass rating)

Esta clasificación geomecánica considera varios factores, como la resistencia a la compresión de la roca intacta, el índice de calidad de la roca RQD, el espaciamiento y la condición de las discontinuidades, la condición del agua subterránea y la orientación de las discontinuidades (Manuel Pérez et al., 2017).

Este parámetro proporciona una estimación inicial de los parámetros mecánicos del macizo rocoso de manera simple y económica. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas clasificaciones tienden a simplificar en exceso y pueden sobrevalorar las propiedades mecánicas resistentes, especialmente en macizos rocosos blandos y alterados, sin considerar aspectos importantes como la deformabilidad del macizo. Por lo tanto, al aplicar estas clasificaciones, es necesario interpretar los resultados con criterio y basándose en el conocimiento de las propiedades y el comportamiento geo-mecánico de los diferentes tipos de

macizos rocosos (Walter Loayza, 2015). Para calcular la clasificación del macizo rocoso se

debe trabajar tomando en cuenta los datos que se encuentran en la tabla 17

## Tabla 17.

	Resistencia de	Ensayo de carga puntual	>10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)
23	rocosa (MPa)	Compresión simple	>250	250-100	100-50	50-25	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
	Puntuación	-	15	12	7	4	2 1 0
	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25
	Puntuación		20	17	13	6	3
	Separación entre diaclasas (m)		>2	0.6-2	0.2-0.6	0.06-0.2	< 0.06
	Puntuación		20	15	10	8	5
		Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1-3	3-10	10-20	>20
		Puntuación	6	4	2	1	0
	las discontinuidades	Abertura	Nada	<0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5mm	>5mm
		Puntuación	6	5	3	1	0
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	ondulada	Suave
4		Puntuación	6	5	3	1	0
		Relleno	ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm
	de	Puntuación	6	4	2	2	0
	stado	Alteración	inalterada	Ligeramente alterada	Medianamente alterada	Muy alterada	Descompuesta
	Щ	Puntuación	6	5	3	1	0
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	nulo	<10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	>125 litros/min
		Relación: presión de agua/ tensión principal mayor	0	01	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo
	Puntuación		15	10	7	4	0

#### Parámetros de clasificación, Bieniawski (1989)

Fuente: Gonzales de Vallejo et al., 2004, p. 232.

### 7.2.2 RQD (Rock quality desing)

Como se mencionó en el apartado 7.1.1.2, este valor es obtenido mediante sondeos, sin embargo, cuando este valor no puede obtenerse por este medio Palmstrom propone la siguiente ecuación:

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

El parámetro que controla esta ecuación es Jv, que representa el número total de discontinuidades presentes en un metro cúbico del macizo rocoso. Este valor se puede determinar contando las discontinuidades de cada familia dentro de una longitud específica (Guamán y Mendieta, 2013).

Este valor debe ser anotado en el lugar una vez se recuperen todos los núcleos, ya que algunas rocas pueden descomponerse con el tiempo debido a la liberación de estrés o la hinchazón. (Gonzales de Vallejo et al., 2004)

## Figura 8.

Ejemplo de Cálculo del RQD mediante la extracción de núcleos



Fuente: Chunga Kervin, (2020)

## 7.2.3 Índice Q (Rock Mass Quality)

Este índice utiliza tres coeficientes para su cálculo, los cuales son: el tamaño del bloque el coeficiente, es el esfuerzo cortante interbloque y el esfuerzo activo (Manuel Pérez et al., 2017).

$$Q = \frac{RQD}{Jn} * \frac{Jr}{Ja} * \frac{Jw}{SRF}$$

A continuación, se describe cada parámetro (Guamán y Mendieta, 2013),

RQD: índice de calidad de la roca

Jr: Parámetro que evalúa la continuidad y rugosidad de las superficies de las grietas

Jn: Parámetro cuantifica de la cantidad de sistemas de discontinuidades

Ja: grado de alteración de las grietas

Jw: Parámetro que evalúa la cantidad de agua en las rocas
SRF: parámetro que evalúa el estado tensional del macizo rocoso.

Guaman y Medienta (2013) detallan los valores en los cuales cada coeficiente varian y pueden ser observados en la tabla 18.

#### Tabla 18.

ת 1	• • • /	1 1	/ /
Rango de	variación	de los	narametros
nungo uc	variación	<i>uc 105</i>	parametros

Parámetro	Rango	
RQD	0-100	
Jn	0.5-20	
Jr	0.5-4	
Ja	0.75-20	
$J_{W}$	0.05-1	
SRF	0.5-20	

Fuente: Guamán y Mendieta, 2013

# 7.3 Rangos de evaluación de las rocas en los sistemas de clasificación considerados

# 7.3.1 RMR (Rock mass rating)

Esta clasificación geotécnica categoriza el macizo rocoso en cinco clases distintas, cada una con su propia calidad y características geotécnicas, aunque estas clases no están estrechamente relacionadas a un rango de clasificación RMR específica, y su valor esta estrechamente relacionado con las discontinuidades existentes en el macizo rocoso (Walter Loayza, 2015).

# Tabla 19.

Rangos de clasificación del macizo rocoso (RMR)	Clasificación	
100-81	Muy buena	
80-61	Buena	
60-41	Media	
40-21	Mala	
<20	Muy mala	

Rango de clasificación del macizo rocoso RMR.

Fuente: Gonzales de Vallejo et al., 2004, p. 233

# Tabla 20.

Clases de roca RMR.

Class	Calidad d	e Cohesión	Ángulo de
Clase	roca	(kg/cm2)	rozamiento (°)
Ι	Muy buena	>4	>45
II	Buena	3-4	35-45
III	Media	2-3	25-35
IV	Mala	1-2	15-25
V	Muy mala	<1	<15

Fuente: Gonzales de Vallejo et al., 2004, p. 233

# 7.3.2 RQD (Rock quality desing)

El índice de la calidad de la roca como se detalló en anteriores apartados se lo obtiene

en porcentaje y sus valores van según los siguientes rangos.

# Tabla 21.

Clasificación de las rocas índice RQD

<b>RQD</b> (%)	Calidad de la roca
90-100	Excelente
75-90	Buena
50-75	Regular
25-50	Mala
0-25	Muy mala

Fuente: Jay Ameratunga et al., 2016, p.85

# 7.3.3 Índice Q (Rock Mass Quality)

Los criterios de este índice varían entre 0.001 y 1000, con la siguiente clasificación del macizo rocoso (Manuel Pérez et al., 2017)

# Tabla 22.

Calificación de la roca	Rango Q
Excepcionalmente mala	0.001-0.01
Extremadamente mala	0.01-0.1
Muy mala	0.1-1
Mala	1-4
Media	4-10
Buena	10-40
Muy buena	40-100
Extremadamente buena Excepcionalmente buena	100-400 400-1000

Criterio de calificación del macizo rocoso Barton et al. (1974)

Fuente: Gonzales de Vallejo et al., 2004, p508

# CAPÍTULO VIII

# ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO, REFERIDOS AL DISEÑO DE PRESAS DE HORMIGÓN A GRAVEDAD DE DIFERENTES ALTURAS Y ESCENARIOS GEO-MECÁNICOS,

#### 8.1 Consideraciones de estudio

- Para construir un modelo que pueda trabajar para un metro de ancho de dovela, se parte de la premisa de que el ancho de la sección de cierre en el emplazamiento de la presa debe ser tres veces mayor o igual a la altura de la presa (Sandoval, 2019)
- En este estudio no se tomará en cuenta la gravedad en los pesos específicos de los materiales.
- La norma ecuatoriana NEC 2015, (MIDUVI, 2015), permite el uso de otras normas que estén propuestas por "organismos nacionales o internacionales de normalización, institutos o centros de investigación igualmente reconocidos", desarrolladas por otros países para este ámbito.

#### 8.1.1 Geometría utilizada en la presa de hormigón a gravedad considerada

Se regirá por una configuración geométrica típica sugerida por la USBR (1976), el cual menciona que la pendiente aguas abajo debe coincidir con el nivel formado de embalse, como se lo detalla a continuación:

#### Figura 9.

Diseño geométrico típico para una presa de hormigón a gravedad. USBR (1976)



Elaborado por: La Autora

# 8.1.2 Cota del embalse

La altura de la presa se determina según las necesidades específicas del proyecto en cuanto al volumen de almacenamiento requerido, para el efecto es necesario distinguir 4 cotas características de un embalse, los cuales son:

- Nivel normal de embalse (NNE), se puede definir como: la cota del espejo de agua máximo ordinario (NAMO), nivel de agua del proyecto (NAP) y nivel máximo normal (NMN), el cual permite satisfacer el grafico de demanda del usuario del sistema (Calero. I, 2019).
- Nivel forzado de embalse (NFE), también puede ser definido como: la cota del espejo de agua máximo extraordinario (NAME), es el nivel en el cual el agua del embalse puede incrementar cuando se presentan periodos de crecida (Calero. I, 2019).
- Nivel aguas abajo (NAA)

 Nivel muerto de embalse (NME), generalmente es el nivel mínimo de operación del embalse, y está asociado al volumen muerto en el cual se acumulan los sedimentos que llegan al embalse durante la vida útil del sistema (Calero. I, 2019).

# Figura 10.

Determinación de nivel muerto y normal de embalse



Nota. Adaptado de los apuntes de Iván Calero. I, (2019) Elaborado por: La Autora

#### 8.1.3 Nivel de importancia de la presa según su altura

La altura es el principal parámetro para clasificar una presa, ya que esta tiene una relación directa con el riesgo de falla, en tal sentido, según el comité español de grandes presas SPANCOLD (2005), una presa se considera importante y de gran dimensión cuando su altura es mayor a 15metros y su capacidad del embalse es superior a 100,000m3 (p,24), asimismo podemos visualizar en la tabla 23 la clasificación hecha por Negridi (1983), misma que se puede asociar con el nivel de importancia de la presa.

#### Tabla 23.

Clasificación de las presas	Altura de la presa (m)
Pequeña	<25
Mediana	25-60
Grande	60-100
Extra grande	>100

Clasificación en función de la altura de las presas

Fuente: Nedrigi, (1983)

#### 8.1.4 Determinación del nivel muerto del embalse

Conforme lo descrito anteriormente es el nivel mínimo de operación y donde se acumularán los sedimentos acarreados por el cauce, cuya colmatación no debe superar la cota inferior de la compuerta del desagüe; este valor puede ser hasta un tercio de la altura de la presa (Calero. I, 2019)

Con respecto a los sedimentos que se acumularán en el volumen descrito en el párrafo anterior, es necesario conocer su peso específico sumergido a partir del cual se determina la fuerza ejercida por los mismos en el paramento aguas arriba de la presa; con respecto a este valor Dasel y Novak mencionan los siguiente:

- Dasel, E Hallmark (1978) menciona que en presas pequeñas el peso saturado de los sedimentos puede tener valores entre 1.362 a 1.922 (ton/m3).
- P. Novak et al (2007) indica que el peso sumergido de los azolves puede tener un rango de 18 a 20 KN/m3 y un valor del ángulo de resistencia al corte de 30°

Para poder obtener un valor que se asemeje a la realidad se realizó una visita técnica al área de aproximación a la Presa Toachi, actualmente en construcción, donde tras presentarse una crecida del rio, este arrastró sedimentos los mismos que, se depositaron en la zona en mención de la presa, cuya evidencia fotográfica se presenta en la figura 11.

#### Figura 11.

Evidencia fotográfica de los sedimentos arrastrados por la crecida del rio en la construcción de la presa Toachi



*Nota:* Sedimentos recolectados paramento aguas arriba. Fotografía tomada por: La Autora.

Mediante la visita técnica realizada se pudo determinar que los sedimentos encontrados son suelos finos, como las arenas bien compactas. Para obtener más detalles sobre las características de estos suelos, se recurre a del libro "Ingeniería Geológica" de Gonzales de Vallejo et al. (2004), específicamente en el capítulo 2.2, p 20-27, del cual se obtuvieron los siguientes datos referenciales para el análisis:

- Peso específico de partículas sólidas de suelos finos (Gs) =2.6 t/m3
- Índice de poros para suelos finos (e)= 0.8
- Para obtener el peso específico saturado de las arenas bien compactas se emplea la siguiente ecuación detallada por Gonzales de Vallejo et al. (2004, p.26)

$$\gamma_{sat} = \frac{(G+e)*\gamma w}{1+e}$$
 (ton/m3)

$$\gamma_{sat} = \frac{(2.6+0.8)*1}{1+0.8} (\text{ton/m3})$$

$$\gamma_{sat} = 1.89 \text{ ton/m3}$$

$$\gamma_{w}=\gamma_{sat}-\gamma_{w}$$

 $\gamma_{w}=1.89-1$ 

 Para presas cimentadas en roca, Rasskazov, (como se citó en Sandoval, 2019 p.87), menciona que el coeficiente de presiones activas del suelo (Ka) para una arena tendrá un valor ka =0.49

#### 8.1.5 Borde libre de la presa

El borde libre de la presa será la suma de la altura mínima de seguridad y la altura de la ola, que puede producirse por efecto de la velocidad del viento, y del movimiento ejercido por el sismo. Para el efecto se considera: "la longitud de recorrido crítico del viento sobre la superficie libre del embalse" o más conocido por sus siglas en ingles Fetch (figura 12), cuyo valor para el presente caso de estudio se ha tomado referencialmente de 2 Km; la velocidad del viento del viento del seguridad del viento del seguridad del viento en tierra se obtuvo de los registros de las estaciones ubicadas en la zona sierra centro del Ecuador detallados en los anuarios meteorológicos del INAMHI, en las cuales se especifican velocidades entre 6 a 15 m/s en tierra. Para proyecto de estudio usaremos el valor de la velocidad del viento en tierra de 10 m/s

A través de una interpolación de los valores sobre la velocidad del viento en agua y la velocidad del viento en tierra obtenido de Sandoval, (2018) se puede obtener el valor de la velocidad del viento en el agua con un Fetch =2, con el valor adoptado de Fetch y el valor conocido de la velocidad del viento en tierra se interpoló los valores en la tabla 24 y con el fin de obtener la variable mencionada, dando como resultado W= 12 m/s,

# Tabla 24.

Vagua/Vtierra	Fetch (km)
1.09	1
1.2	3
1.27	6
1.31	15

Relación de la velocidad del viento en el agua y el Fetch

Fuente: Sandoval, (2018)

# Figura 12.

Esquema de direcciones y longitudes del Fetch en la superficie de un embalse representativo



Elaborado por: La Autora (2024)

Negridi, (1983) (como se citó en Sandoval, 2019, p. 79) menciona que se puede establecer una relación entre la altitud de la presa, su clasificación, nivel de Importancia y la altura mínima de seguridad, como se indica a continuación:

# Tabla 25.

Clasificación de	Altura de la	Nivel de importancia	altura mínima de
las presas	presa (m)	de la presa	seguridad "a" (m)
Pequeña	<25	IV	0.4
Mediana	25-60	III	0.4
Grande	60-100	II	0.6
Extra grande	>100	Ι	0.8

Clasificación de la presa, altura y nivel de importancia.

Nota. Adaptado de Negridi, (1983). Elaborado por: La Autora.

# 8.1.6 Compendio geo-mecánico en la Sierra Ecuatoriana

A continuación, se presenta el perfil geológico del Ecuador tomado del "Perfil Geológico del Ecuador" (Baldock, 1982), mostrando las distintas estratigrafías existentes; las cuales se aprecian de mejor en el **Anexo A**.

# Figura 13.





Fuente: (Baldock, 1982)

# Figura 14.

Perfil geológico del Ecuador sentido este - oeste



Fuente: (Baldock, 1982)

La Figura 15 ilustra estratigrafía del Ecuador y un resumen de este.

# Figura 15.

Estratigráficas del Ecuador.



Fuente: (Baldock, 1982)

Con base a la recopilación de información de las figuras 13,14,15 se identificaron los macizos rocosos que podemos encontrar en la sierra ecuatoriana, sobre los cuales podrían construirse presas de hormigón a gravedad. A continuación, para poder obtener valores referenciales respecto a la resistencia a la compresión uniaxial de cada una de ellas, entre otras características relevantes, se ocupó las tablas 8 a la 10 que fueron realizadas como un compendio de datos sobre rocas en fusión del libro de Gonzales de Vallejo et al. (2004), cuyo resumen se detalla en la tabla 26.

#### Tabla 26.

Simbolo	Tipo de roca	Resistencia a la tracción	Cohesión	Angulo de fricción	Resistencia a la compresión uniaxial
		(ton/m2)	(kp/cm2)	(°)	(ton/m2)
Qvx	Lavas	700	280	45	21000-32000
Qc	Cangagua	700	280	45	21000-32000
KM	tobas	100-400	7	-	100-4600
Pz	Esquistos	1000-3000	250-700	40-55	20000-32000
Mz	Pizarras	700-2000	100-500	40-55	4000-15000
Ma	Lutitas	150-1000	30-350	40-60	2000-4000
Рс	Lavas andesiticas	150-1000	30-350	40-60	2000-4000
Simbolo	Tipo de roca	Coeficiente de Poisson	Densidad	Porosidad	Peso específico
			(ton/m3)	(%)	(ton/m3)
Qvx	Lavas	0.11-0.20	2.3-2.750	0.2-8.0	2.2-2.35
Qc	Cangagua	0.11-0.20	2.3-2.750	0.2-8.0	2.2-2.35
KM	Andesiticas +	0.10-0.20	1.3-2.2	8-35	1.9-2.3
Pz	Esquistos	0.08-0.24	-	0.1-0.5	2.6-2.7
Mz	Pizarras	-	-	0.1-1	2.5-2.7
Ma	Lutitas	0.25-0.29	-	2-15	2.2-2.6
Pc	Lavas andesiticas	0.25-0.29	-	2-15	2.2-2.6

Compendio de propiedades geomecánicas de las rocas de la sierra ecuatoriana

Elaborado por: La Autora.

Una vez que se han identificado los valores de la resistencia a la compresión uniaxial de cada una de las rocas en la sierra ecuatoriana, podemos clasificarlas de acuerdo a los parámetros geo-mecánicos RMR y %RQD. De esta manera, en función del %RQD se categorizó los macizos rocosos como: excelente, regular y muy mala, conforme lo detallado en la tabla 27.

#### Tabla 27.

Compendio de propiedades geomecánicas de las rocas en la sierra ecuatoriana y la calidad de la roca %RQD

Tipo de roca	Símbolo	Resistencia a la compresión uniaxial (ton/m2)	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	Descripción según la calidad de la roca RQD
Lavas andesíticas	Qvx	21000-32000	210 - 320	Excelente
Cuarcitas	Pz	20000-32000	195 - 300	Buena - Excelente
Pizarras- Esquistos	Mz	4000-15000	40 - 150	Regular
Lutitas	Ma	2000-4000	20-40	Muy mala - Mala
Tobas	KM	1000-4600	1-46	Muy mala - Mala

Elaborado por: La Autora.

#### 8.1.7 Riesgo sísmico

Como efecto sísmico se ha considerado una magnitud mayor a 8 en la escala de Richter, que según la tabla 28, son terremotos que causan una destrucción total; este valor se mantiene para todos los escenarios de estudio

# Tabla 28.

Relación de la magnitud del sismo y sus efectos

Magnitud, escala Richter	Efectos del sismo o terremoto
<3,5	Generalmente no se siente, pero logra ser registrado

3,5-5,4	A menudo se siente, causa daños menores
5,5-6,0	Ocasiona daños ligeros a edificios sismorresistentes
6,1-6,9	Daños severos
7,0-7,9	Terremoto- graves daños
>8	Destrucción total

Fuente: Charles Richter (1935)

Así mismo, según el comité español de grandes presas SPANCOLD (2005), en su detalle para la seguridad de las presas menciona que para presas de categoría I y para una altura mayor a 15m, el periodo de retorno debe ser de 1000 años (p.53), considerando este aspecto, es necesario obtener el valor de la Aceleración Pico del Terreno (PGA) en la sierra ecuatoriana, para el efecto se utilizó las curvas de peligro sísmico detalladas en la NEC-SE-DS (2014, p.110-114). A continuación, se presentan los valores de PGA para cada provincia en la sierra ecuatoriana:

#### Tabla 29.

Aceleración pico de la roca para un periodo de retorno 1000 años, obtenido de las curvas de peligro sísmico en la sierra ecuatoriana, NEC-SE-DS (2014, p.110-114)

PROVINCIA	PGA=Z
Carchi	0.32
Imbabura	0.35
Pichincha	0.55
Cotopaxi	0.5
Tungurahua	0.48
Chimborazo	0.39
Bolívar	0.33
Cañar	0.27
Cuenca	0.26
Loja	0.25

Elaborado por: La Autora.

De los valores obtenidos, para el caso de estudio se trabajará con un valor Z=0.55 siendo el valor critico de la tabla 29 Poliakov, 1983 (como se citó en Sandoval, 2019, p.90) permite también conocer el periodo natural de vibración en rocas (te) que será de 0.2-0.45 en unidades de segundos.

# 8.1.8 Combinaciónes de fuerzas recomendadas por SPANCOLD (2017)

# 8.1.8.1 Combinación en condiciones normales N21

Esta combinación tomará en cuenta las siguientes fuerzas:

- Peso propio
- Empuje hidrostático al nivel normal de embalse (NNE)
- Subpresión
- Empuje sedimentos
- Efectos térmicos
- Ola máxima en el nivel normal

# 8.1.8.2 Combinación en condiciones accidentales A23

En esta combinación se consideran las siguientes fuerzas:

- Peso propio
- Empuje hidrostático (NNE)
- Subpresión
- Efecto sísmico (NNE)
- Empuje sedimentos

# 8.1.8.3 Combinación en condiciones extremas E22

Es la combinación más crítica, que considera las siguientes fuerzas:

- Peso propio
- Empuje hidrostático al novel forzado de embalse (NFE)
- subpresión
- Empuje sedimentos

• Efecto sísmico extremo

#### 8.1.9 Factores de seguridad

Yury Lyapichev miembro de la ICOLD (2012) (como se citó en Sandoval, 2019, p.93) detalla los factores de seguridad según la combinación de carga en la siguiente tabla:

#### Tabla 30.

# Factores de seguridad, Lyapichev (2012)

Deserinción	Combinación de cargas			
Descripcion	Normal	Accidental	Extrema	
Estabilidad al volteo	>1.5	>1.25	>1.1	
Estabilidad al deslizamiento (fricción +cohesión) Contacto hormigón- roca	>3	>2	>1	
Esfuerzos de compresión Fundación Rocosa	4	2.7	1.3	

Fuente: Sandoval (2019, p.93). Elaborado por: La Autora.

8.2 Dimensionamiento y verificación de la estabilidad y resistencia de presas de hormigón a gravedad de 30 hasta 80 metros de altura para diferentes escenarios geo-mecánicos

# **8.2.1 Datos generales**

Para poder realizar el dimensionamiento de las presas analizadas, necesitamos los siguientes datos iniciales:

- a) Ancho de la dovela = 1m (Sandoval, 2019)
- b) Altura de la presa = 30, 50, 65, 80, metros (Autora, 2024)
- c) Peso específico del hormigón= 2.4 ton/m3 (Autora, 2024)

- d) Peso específico del agua= 1 ton/m3 (Calero. I,2019)
- e) Pendiente del paramento aguas arriba (0.05-0.1) Vallarino (1994)
- f) Velocidad del viento en el agua= 12 m/s, apartado 8.1.5 (INAMHI) (Sandoval, 2019)
- g) Longitud de recorrido crítico del viento sobre la superficie libre del embalse
  Fetch=2km apartado 8.1.5
- h) Calidad de la roca en la sierra ecuatoriana, clasificada en función del parámetro
  RQD% = excelente, regular y muy mala, apartado 8.1.6. (Autora, 2024)
- i) Magnitud del sismo (I)= 8, destrucción total, apartado 8.1.7
- j) Coeficiente sísmico para un periodo de retorno 1000 años, Z=0.55, apartado 8.1.7, NEC-SE-DS (2014, p.11-114)
- k) Peso específico de los sedimentos sum= 1.89 ton/m3, apartado 8.1.4, Gonzales de Vallejo et al. (2004, p.26)
- Coeficiente de presiones activas de una arena ka=0.49, apartado 8.1.4, (Rasskazov, como se citó en Sandoval, 2019 p.87).
- m) Combinaciónes de fuerzas (N21, A23, E22) apartado 8.1.8
- n) Factores de seguridad, apartado 8.1.9

*Nota:* para simplificar el cálculo en el peso específico no se considerará la gravedad, únicamente la masa conforme a lo indicado en el apartado 8.1

# 8.2.2 Detalle de los cálculos realizados para un escenario de estudio y ecuaciones aplicadas

Como se evidenció en la sección 8.1.6, en la sierra ecuatoriana existen macizos rocosos con distintas calidades dé %RQD, las cuales fueron categorizadas como excelentes, regulares y muy malas; para cada una de ellas se desarrolló un estudio individual, resultando en los siguientes escenarios de cálculo:

# Figura 16.

Escenarios de calculo



#### Elaborado por: La Autora.

A continuación, se indica el proceso de predimensionamiento, determinación de fuerzas, análisis de estabilidad de la presa y cálculo de los esfuerzos máximos actuantes en la base de cimentación, para el escenario de una presa de hormigón a gravedad de 30 metros de altura, cimentada sobre un macizo rocoso de excelente calidad. El mismo procedimiento se aplica para los demás casos de estudio.

# 8.2.2.1 Datos generales resumidos y detallados el apartado 8.2.1.

# Tabla 31.

Datos iniciales y su simbología para una presa de 30m de altura, cimentado sobre un macizo rocoso con calidad Excelente

Parámetro	Valor	Unidad	Símbolo
Ancho de la dovela	1.00	m	bd
Altura de la presa	30	m	Н
Peso específico del hormigón	2.40	T/m3	y <sub>hor</sub>
Peso específico del agua	1.00	T/m3	۷ <sub>a</sub>
Pendiente del paramento aguas arriba (0.05-0.1)	0.05	-	m1
Velocidad del viento en agua	12	m/s	W
Fetch	2	Km	D
Calidad de la roca con el Factor RQD	Excelente		
Magnitud del sismo	8	ML	Ι
Coeficiente sísmico para un periodo de retorno 1000 años NEC (2014)	0.55	-	Z
Peso específico del sedimento sumergido	0.89	ton/m3	۷ <sub>sum</sub>
Coeficiente de presión pasiva del suelo en arenas	0.49	-	Ka

Elaborado por: La Autora

# 8.2.2.2 Ancho de la base de la presa en contacto hormigón-roca

El ancho de la base de la presa está directamente relacionado con el factor de fricción entre el hormigón y la roca de cimentación, que según Rasskazov, (2008) podrá tener los siguientes valores:

#### Tabla 32.

Calidad de la roca	Coeficiente de fricción f	Cohesión hormigón- roca C (t/m2)
Muy mala	0.7	10.20
Mala	0.75	20.39
Regular	0.85	30.59
Buena	0.9	35.69
Excelente	0.95	40.79

Coeficiente de fricción y cohesión, hormigón-roca

Fuente: Rasskazov (2008) (como se citó en Sandoval 2019, p.93). Elaborado por: La autora

La base de la presa se calcula a partir de la siguiente ecuación

$$b = (0.7 \ a \ 0.9) * H$$
 (Rasskazov, 2008)

Donde:

B: base de la presa (m)

H: altura de la presa (m)

Con la consideración de que el macizo rocoso de cimentación es de excelente calidad, se tiene un factor de fricción (f) de 0.95, la ecuación para poder obtener el ancho de la base preliminar será:

$$b = 0.88 * H$$
  
 $b = 0.88 * 30 = 26.40 m$ 

El ancho de la base asumida para poder mejorar la estabilidad de la presa será:

$$b = 30 \, m$$

#### 8.2.2.3 Ancho de la corona de la presa

El ancho de la corona de la presa se determina a partir de la fórmula:

$$bc = (1.6 * H^{0.315})$$
 Sandoval (2019)

#### Donde:

bc: ancho de la corona de la presa (m)

H: altura de la presa (m)

$$bc = (1.6 * 30^{0.315})$$
  
 $bc = 4.67 m$ 

Conociendo que el ancho mínimo para una vía es de 3m y puesto que el ancho de la corona calculado es mayor a 3m, se asumirá un valor de 6 m, requerido para que se pueda movilizar un vehículo en cada sentido por la corona de la presa.

$$bc = 6m$$

#### 8.2.2.4 Borde libre de la presa aguas arriba

El borde libre de la presa será el resultado de la suma entre la altura mínima de seguridad y la altura máxima de la ola.

$$Bl = a + ho \tag{Sandoval, 2019}$$

#### 8.2.2.4.1 Altura mínima

Con base en la tabla 25, podemos clasificar a la presa por su altura; teniendo el caso de 30m, resulta ser una presa Mediana, cuya altura mínima de seguridad según Nedrigi (1983) será:

$$a = 0.4m$$

#### 8.2.2.4.2. Altura de la ola en función del viento

La altura de la ola generada por la acción del viento puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$ho_1 = 0.073 * k * W * \sqrt{D * \beta}$$
 (Labzovckiy, 1983)

Donde:

K= constate adimensional obtenido de:

$$k = 1 + e^{-0.4*\left(\frac{D}{W}\right)}$$
(Labzovckiy, 1983)

Fetch (D)=2km

Velocidad del viento en agua (W)=12 m/s

$$k = 1.94$$

 $\beta$ = pendiente de la ola en metros, obtenida de la siguiente fórmula:

$$\beta = \frac{1}{9+19*e^{\left(-\frac{14}{W}\right)}}$$
(Labzovckiy, 1983)

Velocidad del viento en agua (W)=12 m/s

$$\beta = 0.07 \text{m}$$

 $\lambda$ = longitud de la ola en metros, se calculará con la siguiente ecuación:

$$\lambda = 0.073 * W * \left(\frac{D}{\beta}\right)$$
 (Labzovckiy, 1983)

Fetch (D) = 2km

Pendiente de la ola ( $\beta$ ) =0.07m

$$\lambda = 4.78 m$$

Una vez calculados la constante k y la pendiente de la ola podemos obtener el resultado de nuestra altura de la ola:

$$ho_{1} = 0.073 * k * W * \sqrt{D * \beta}$$
  
$$ho_{1} = 0.073 * 1.94 * 12 * \sqrt{2 * 0.07}$$
  
$$ho_{1} = 0.62m$$

#### 8.2.2.4.3. Altura de la ola en función de la intensidad del sismo

La altura de la ola ejercida por el sismo de acuerdo a Rasskazov (2008) se la puede determinar por la siguiente ecuación:

$$ho_2 = 0.4 + 0.76 * (I - 6)$$

La magnitud del sismo (I) Mercalli = 8

$$ho_2 = 0.4 + 0.76 * (8 - 6)$$

$$ho_2 = 1.92 m$$

8.2.2.4.4. Altura de la ola máxima

De ambos valores calculados se tomará el valor más crítico, siendo la altura de la ola:

$$ho = 1.92m$$

El borde libre por tanto tendrá como resultado:

$$Bl = a + ho$$

$$Bl = 0.4 + 1.92$$

$$Bl = 2.4m$$

#### 8.2.2.5 Determinación de los Niveles de embalse de la presa

 Nivel forzado de embalse estará determinado por la resta entre la altura de la presa y el borde libre:

$$NFE = H - Bl$$
$$NFE = 30 - 2.4$$
$$NFE = 27.6 m$$

 Nivel normal del embalse se asume una variación debido al incremento por crecida de 2 metros medidos desde la base de la presa, este valor es conservador y dependeré únicamente de la cantidad de lluvia laminada, así como también de las características del vertedero de excesos.

NNE = NFE - 2NNE = 27.6 - 2NNE = 25.6 m

• Nivel muerto del embalse tendrá la siguiente ecuación:

$$NME = H/3$$
(Calero. I, 2019)  
$$NME = 10m$$

#### 8.2.2.6 Profundidad de excavación de la cimentación

Este valor se asume en función de la potencia del suelo residual de la superficie hasta lograr encontrar el macizo rocoso donde se cimentará la presa; en el escenario de estudio la base de cimentación será un macizo rocoso-excelente, y la profundidad de excavación (exc) se asume de 1m

# 8.2.2.7 Detalle geométrico de la presa

# Figura 17.

Geometría para una presa de hormigón a gravedad con una altura de 30m,

cimentada sobre un macizo rocoso-excelente



Elaborado por: La Autora

# 8.2.2.8 Fuerzas que actúan en la presa de hormigón a gravedad

Sobre la presa actúan una serie de fuerzas según lo detallado en el apartado 6.4, en donde se puede observar gráficamente la aplicación de cada una de ellas, la descripción y su simbología será la siguiente:

- G= Fuerza ejercida por el peso propio de la presa
- W1=Fuerza de la presión hidrostática aguas arriba
- W2=Fuerza de la presión hidrostática aguas abajo
- W3=Fuerza generada por el peso del agua sobre el paramento aguas arriba
- W4=Fuerza generada por el peso del agua sobre el paramento aguas abajo
- Wf1=Subpresión rectangular

- Wf 2 = Subpresión forma irregular
- S=Fuerza sísmica
- P1-P2= Fuerza de presión resultante de la ola
- Ws= Fuerza hidrodinámica debida al sismo
- Wa= Fuerza ejercida por los sedimentos
- Wsa= Fuerza hidrodinámica debida al sismo en sedimentos

8.2.2.8.1 Determinación del preso propio de la presa de hormigón a gravedad.

# Figura 18.

Descripción gráfica de los elementos para el cálculo de áreas, volumen, peso propio de la presa de hormigón a gravedad y centro de gravedad



Elaborado por: La Autora

En función de cada elemento podemos realizar una tabla para poder obtener el área de cada una de ellas, su volumen y su respectivo peso.

# Tabla 33.

Revisión de la carga admisible en fusión del RMR de la roca

Descripción	Área m2	Volumen m3	Peso ton
Elemento 1	180.00	180.00	432.00
Elemento 2	19.04	19.04	45.71

Elemento 3	246.71	246.71	592.11
Elemento 4	30.00	30.00	72.00

Elaborado por: La Autora.

La sumatoria de los 4 elementos nos da como resultado el peso propio de la presa (G)

$$G = 432 + 45.71 + 592.11 + 72$$
  
 $G = 1141.82 \ ton$ 

8.2.2.8.2 Fuerzas ejercidas por el agua paramento aguas arriba y aguas abajo

#### Figura 19.

Detalle de la fuerza de la presión de agua paramento aguas arriba



*Nota*: Debido a la inclinación casi nula en el paramento aguas arriba la fuerza resultante de la presión hidrostática, se considera únicamente un componente horizontal Elaborado por: La autora.

#### A. Combinación de fuerzas en situaciones normales N21 y accidentales A23

Para estas Combinaciónes se trabajará las ecuaciones con el nivel normal de embalse NNE= 25.6 m

A.1. Fuerza de la presión hidrostática en el paramento aguas arriba

Las siguientes ecuaciones estarán determinadas mediante geometría básica y formulas hidráulicas dictadas en clase (Calero. I, 2019):

$$W1 = \frac{(\sqrt{(NNE^2 + (NNE * m1)^2})^2}{2} * \gamma_a * sen(\alpha 1) * db$$

Donde:

NNE= 25,6m

m1 = 0,05

 $\gamma_a = 1 ton/m3$ 

db=1m

 $\alpha 1 = 87.1^{\circ}$ 

# W1 = 328.088 ton

A.2. Fuerza de la presión hidrostática en el paramento aguas abajo

$$W2 = \frac{(\sqrt{(NAA^2 + (NAA * m2)^2})^2}{2} * \gamma_a * sen(\alpha 2) * db$$

Donde:

NAA = 2m

m2 = 1.04

 $\gamma_a = 1 \: ton/m3$ 

db=1m

 $\alpha 2 = 43.96^{\circ}$ 

A.3. Fuerza debida al peso del agua sobre el paramento aguas arriba

$$W3 = \frac{NNE^2}{2} * m1 * \gamma_a * db$$
$$W3 = 16.36 ton$$

A.4. Fuerza debida al peso del agua sobre el paramento aguas abajo

$$W4 = \frac{NAA^2}{2} * m2 * \gamma_a * db$$

$$W4 = 2.08 ton$$

#### A.5. Fuerza de la subpresión

La subpresión lo dividiremos en dos diagramas, el primero tendrá una forma rectangular y el segundo una forma irregular que variará según la altura de la presa para ello debemos revisar el apartado 6.3.

A.5.1. Subpresión rectangular.

# Figura 20.

Detalle de la subpresión 1 rectangular



Elaborado por: La autora

La ecuación para determinar esta subpresión será la descrita por Sandoval (2019)

$$Wf_1 = A1 * db * \gamma_a$$

Donde el área se podrá determinar con la siguiente ecuación obtenida por geometría básica:

$$A1 = (b * exc) + ((b - (NAA * m1) - (NAA * m2)) * NAA) + \cdots$$
$$\dots + (NAA * m1) + (NAA * m2)$$

Donde:

Nivel aguas abajo NAA= 2m

m1 = 0,05

m2=1,04

#### b=30m

Excavación (exc)=1m

$$A1 = 87.82m^2$$

Por lo tanto, la subpresión rectangular tendrá un valor de:

$$Wf_1 = A1 * db * \gamma_a$$
  
$$Wf_1 = 87.82 m^2 * 1m * 1ton/m3$$
  
$$Wf_1 = 87.82 ton$$

#### A.5.2. Subpresión irregular

La ecuación estará en función de los drenajes, cortinas de inyección en la cimentación y la ubicación de la galería, conociendo esto nosotros determinamos que la galería para todos los métodos de estudio estará ubicada a 2m metros desde el paramento de aguas arriba hasta la pared interna de la galería, así como también, un ancho de galería de 3m, mientras que la longitud izquierda l1 desde el eje la cortina de inyecciones será de 2m y la longitud derecha l2 desde el eje de la cortina de inyecciones será de 3m, para ello debemos revisar el apartado 6.3 donde se detalla las dimensiones mínimas de construcción, en la figura 21 se realiza el detalle constructivo para el estudio.

# Figura 21.

Detalle de galería, eje de cortina de inyecciones y dren, para las presas de estudio



Elaborado por: La Autora

El siguiente dato necesario para el cálculo de la subpresión irregular es la diferencia de niveles entre aguas arriba y aguas abajo en este caso:

Hwf = NNE - NAAHwf = 25.6 - 2Hwf = 23.6m

La diferencia de niveles nos da un valor <25m por lo que caemos en el caso **a** del apartado 6.3, el cual el diagrama de la subpresión será el detallado en la figura 22 y su ecuación:

$$W_{f2} = 0.5\gamma_a Hwf(1 - \alpha_0)L\alpha_2 * db \qquad \text{Grishin} (1979)$$

Donde:

Wf2= Fuerza de subpresión irregular (ton)

Hwf= Diferencia de niveles entre aguas arriba y abajo (m) =23.5

 $\alpha 0$  = Coeficiente de perdida de carga inicial =0.08

L= ancho desde el talud aguas arriba hasta el eje del drenaje (m)=5

 $\gamma_a$ = Peso específico del agua (ton/m3) =1

 $\alpha 2$  = Coeficiente de porosidad de la zona =0.95

db= Ancho de la dovela de estudio (m) =1

Despejando los valores en la formula del caso **a** tendremos la siguiente resultante de la subpresión irregular en Combinaciónes normales y accidentales:

$$W_{f^2} = 51.57 \ ton$$

A.5.3. Subpresión total

 $W_f = W_{f1} + W_{f2}$  $W_f = 87.82 + 51.57$  $W_f = 139.39 \ ton$ 

# Figura 22.

Diagrama de la subpresión para una diferencia de niveles aguas arriba y aguas abajo de la presa <25m de altura Grishin (1979)



#### Elaborado por: La Autora

#### A.6. Fuerza de empuje debida a los sedimentos

El sedimento acumulado en el tiempo en el paramento aguas arriba del talud ejercerá una fuerza la cual desestabilizará a la presa de hormigón a gravedad, su ecuación se formula en base a las ecuaciones obtenidas en mecánica de suelos:

$$Wa = \gamma_{sum} * \frac{NME^2}{2} * ka * db$$
 Rasskazov (2008) –

mecánica de suelos (2019)

Donde:

 $\gamma_{sum}$ =0.89 ton/m3

NME=10m

Ka=0.49

db=1m

$$Wa = 21.78 ton$$

#### A.7. Fuerza de la ola ejercida por el viento

Sandoval (2019) en su investigación menciona lo siguiente: "Para taludes verticales o casi verticales se podrá ocupar las ecuaciones determinadas por Zagriadskaya, N (1975)", con esta premisa las ecuaciones ocupadas serán las siguientes para poder obtener la máxima fuerza de presión de la ola y su momento máximo respecto a la base de la estructura:

$$PmaxOla = Kp * \gamma a * ho * \left(Hw + \frac{ho}{2}\right) * db \qquad \text{Zagriadskaya, N (1975)}$$

$$MmaxOla = Km * \gamma_a * ho * \left(\frac{ho^2}{6} + \frac{ho*Hw}{2} + \frac{Hw^2}{2}\right) \quad \text{Zagriadskaya, N (1975)}$$

Para poder resolver estas ecuaciones necesitamos conocer lo siguiente:

 $\lambda$  = Longitud de la ola, previamente calculada en el apartado 8.2.2.4.2

ho= Altura de la ola máxima de estudio calculada en el apartado 8.2.2.4.2

ho1= Altura de la ola ejercida por el viento calculada en el apartado 8.2.2.4.2

H o Hw = Altura libre sin sedimentos máxima

Teniendo los siguientes datos:

 $\lambda = 4.78 \ m$ 

ho= 1.92 m

ho1=0.62m

La altura libre sin sedimentos ocupará la siguiente ecuación:
$H \ o \ Hw = NFE - NME$  $H \ o \ Hw = 27.6 - 10$  $H \ o \ Hw = 17.6m$  Zagriadskaya, N (1975)

Los coeficientes Ka y Km, se los debe obtener de los nomogramas detallados en la

figura 22, los cuales ocupan los siguientes datos:

$$\frac{\lambda}{Hw} = \frac{4.78}{17.6} = 0.27$$
$$\frac{ho1}{\lambda} = \frac{0.62}{4.78} = 0.12$$

# Figura 23.

Nomogramas para los coeficientes Ka y Km



Fuente: (Sandoval, 2018)

Como se puede observar el dato  $(ho1/\lambda)$  en la abscisa supera los valores límites de los monogramas por lo que, se toma el valor mínimo de las curvaturas

Conociendo los datos podemos calcular las ecuaciones de la fuerza y el momento de la ola máxima:

$$PmaxOla = Kp * \gamma a * ho * \left(Hw + \frac{ho}{2}\right) * db$$
$$PmaxOla = 0.1 * 1 * 1.92 * \left(17.6 + \frac{1.92}{2}\right) * 1$$

PmaxOla = 3.56 ton

$$MmaxOla = Km * \gamma_a * ho * \left(\frac{ho^2}{6} + \frac{ho * Hw}{2} + \frac{Hw^2}{2}\right) * db$$

$$MmaxOla = 0.2 * 1 * 1.92 * \left(\frac{1.92^2}{6} + \frac{1.92 * 17.6}{2} + \frac{17.6^2}{2}\right) * 1$$

MmaxOla = 66.2 ton \* m

## A.8. Fuerza sísmica

Gracias a la conferencia y curso realizado por Yury Lyapichev, miembro de la ICOLD en Perú (2012), se entregó un boletín informativo en el cual se pudo recabar la siguiente información, con respecto a un análisis pseudoestatico los coeficientes sísmicos van a estar determinados por la siguiente ecuación:

$$\alpha_{h} = \frac{Z}{1+3*Z}$$
Recomendaciones ICOLD, Yury Lyapichev (2012)
  
 $\alpha_{v} = \frac{2}{3} \alpha_{h}$ 
Recomendaciones ICOLD, Yury Lyapichev (2012)

Donde:

 $\propto_v$ : coeficiente sísmico vertical adimensional

∝<sub>h</sub> coeficiente sísmico horizontal adimensional

Así mismo, necesitamos la aceleración pico del terreno Z, para un periodo de retorno 1000 años aplicado en la zona de estudio, gracias a la investigación realizada y detallada en el apartado 8.1.7, tenemos que, nuestro valor Z=0,55 (tr=1000). Para métodos de cálculo el efecto causal del sismo se considerará en el sentido más crítico.

De esta forma los factores de zona sísmica ( $\alpha$ ) vertical y horizontal son:

$$\alpha_h = \frac{Z}{1+3*Z} = \frac{0.55}{1+3*0.55} = 0.2075$$
$$\alpha_v = \frac{2}{3} \alpha_h = \frac{2}{3} * 0.21 = 0.138$$

Sandoval (2019) menciona que "para poder obtener la fuerza sísmica aplicada en el centro de masa del cuerpo de la presa" se podrá utilizar la siguiente ecuación recomendada por US ARMY CORPS, EM 1110-2-2200 (1995)

$$S(h, v) = G * \propto_{h-v}$$

Donde:

 $\propto_v$ : coeficiente sísmico vertical-horizontal

S(h,v): presión sísmica vertical y horizontal

Dando como resultado la siguiente fuerza sísmica horizontal:

$$S_h = G * \propto_h$$
$$S_h = 1141.8 * 0.207$$
$$S_h = 236.98 \text{ ton}$$

fuerza sísmica vertical:

$$S_v = G * \propto_v$$
$$S_h = 1141.8 * 0.138$$
$$S_h = 157.99 \text{ ton}$$

A.8.1. Fuerzas originadas por el sismo

• Fuerza hidrodinámica originada por el sismo

Esta fuerza requiere del periodo de vibración de la estructura en base a lo indicado por el US ARMY CORPS; EM 1110-2-2200 de 1995 citado por Sandoval, (2019).

$$W_s = \frac{2}{3} * c_e * \alpha_h * y * \sqrt{y * H} * db$$

Donde:

Ws: presión hidrodinámica

Ce: factor que depende de la carga de agua

∝<sub>h</sub> coeficiente sísmico horizontal

Te: periodo natural de vibración

H=y: profundidad libre de sedimentos en la sección de análisis,

Para poder obtener la resultante de la fuerza hidrodinámica por sismo necesitamos obtener el siguiente coeficiente que nos permite obtener la fuerza en toneladas

$$C_e = \frac{0.817}{\sqrt{1 - 0.72 * \left(\frac{Hw}{304.8 * t_e}\right)^2}}$$

Donde:

Te= El periodo de vibración en rocas esta entre 0,20-0.45 s, detallado en el apartado 8.1.7, en este caso como tenemos una base de cimentación rocosa con una calidad %RQD excelente podemos deducir que te puede ser de 0,45s

У о Hw=17.6m

 $\propto_{h} = 0.207$ 

$$C_e = \frac{0.817}{\sqrt{1 - 0.72 * \left(\frac{17.6}{304.8 * 0.45}\right)^2}}$$
$$C_e = 0.82$$

Con el coeficiente Ce se determina la presión hidrodinámica mediante la siguiente ecuación:

$$W_{s} = \frac{2}{3} * c_{e} * \propto_{h} * y * \sqrt{y * H} * db$$
$$W_{s} = \frac{2}{3} * 0.82 * 0.207 * 17.60 * \sqrt{17.60 * 17.60} * 1 = 35.23 Ton$$

### • Fuerza de los sedimentos originada por el sismo

Para el cálculo de la presión hidrodinámica de los sedimentos se utiliza la siguiente ecuación:

$$W_{sa} = 2.15 * \propto_h * \gamma_{sum} * H^2 * db \qquad \text{CFE} (2008)$$

Wsa: presión hidrodinámica de los sedimentos

 $\propto_h$  coeficiente sísmico horizontal

 $\gamma_w$ : peso específico de los sedimentos saturado

H: altura de los sedimentos

Donde:

∝<sub>h</sub> :0.207

γ<sub>sum</sub>: 0.89 t/m3

H: 10m

$$W_{sa} = 2.15 * 0.207 * 0.89 * 10^2 * 1 = 39.66 Ton$$

### B. Combinación de fuerzas en situaciones Extremas E22

Para esta combinación se trabajará las ecuaciones con el nivel forzado de embalse NFE= 27.6 m

### B.1. Fuerza de la presión hidrostática en el paramento aguas arriba

Las siguientes ecuaciones estarán determinadas mediante geometría básica y formulas hidráulicas dictadas en clase (Calero. I, 2019):

$$W1 = \frac{(\sqrt{(NFE^2 + (NFE * m1)^2})^2}{2} * \gamma_a * sen(\alpha 1) * db$$

Donde:

NFE= 27,6m

m1 = 0,05

 $\gamma_a = 1 \: ton/m3$ 

db=1m

 $\alpha 1 = 87.1^{\circ}$ 

#### W1 = 381.35 ton

B.2. Fuerza de la presión hidrostática en el paramento aguas abajo

$$W2 = \frac{(\sqrt{(NAA^2 + (NAA * m2)^2})^2}{2} * \gamma_a * sen(\alpha 2) * db$$

Donde:

NAA = 2m

m2=1.04

 $\gamma_a = 1 ton/m3$ 

db=1m

 $\alpha 2 = 43.96^{\circ}$ 

### W2 = 2.881 ton

B.3. Fuerza debida al peso del agua sobre el paramento aguas arriba

$$W3 = \frac{NFE^2}{2} * m1 * \gamma_a * db$$

$$W3 = 19.04 ton$$

B.4. Fuerza debida al peso del agua sobre el paramento aguas abajo

$$W4 = \frac{NAA^2}{2} * m2 * \gamma_a * db$$

## W4 = 2.08 ton

### B.5. Fuerza de la subpresión

Se realiza el mismo procedimiento detallado en el apartado de la Combinaciónes normales y accidentales A.5

B.5.1. Subpresión rectangular.

Este valor no varía y se mantendrá el mismo que fue calculado para la combinación en situaciones normales N21 y accidentales A23

$$Wf_1 = A1 * db * \gamma_a$$
  
 $Wf_1 = 87.82 m^2 * 1m * 1ton/m3$ 

 $Wf_1 = 87.82 ton$ 

B.5.2. Subpresión irregular

Para poder obtener este valor debemos revisar el apartado 6,3, adicionalmente la ubicación de la galería, eje de cortina de inyecciones y el dren vertical se mantendrá como se lo puede observar en la figura 24

## Figura 24.

Detalle de galería, eje de cortina de inyecciones y dren, para las presas de estudio



Elaborado por: La Autora

El siguiente dato necesario para el cálculo de la subpresión irregular es la diferencia de niveles entre aguas arriba y aguas abajo en este caso:

$$Hwf = NFE - NAA$$
  
 $Hwf = 27.6 - 2$   
 $Hwf = 25.6 m$ 

La diferencia de niveles nos da un valor >25 m pero <75m por lo que caemos en el caso **b** del apartado 6.3, el cual el diagrama de la subpresión tendrá el detallado en la figura 25 y su ecuación será:

$$W_{f2} = 0.5\gamma H \left[ L(1 - \alpha_0) + b\alpha_1'' \right] \alpha_2 * db$$

Donde:

Wf2= Fuerza de subpresión irregular (ton)

H= Diferencia de niveles entre aguas arriba y abajo (m) = 25.6

 $\alpha 0$  = Coeficiente de perdida de carga inicial = 0.08

L= ancho desde el talud aguas arriba hasta el eje del drenaje (m)= 5

 $\gamma_a$  = Peso específico del agua (ton/m3) = 1

 $\alpha 2$  = Coeficiente de porosidad de la zona=0.95

b= ancho de la base de la presa (m) =30

db= Ancho de la dovela de estudio (m) =1

 $\alpha 1$ " = coeficiente de subpresión = 0.15

Despejando los valores en la formula del caso **b** tendremos la siguiente resultante de la subpresión en Combinaciónes extremas:

$$W_{f2} = 110.66 ton$$

# B.5.4. Subpresión total

$$W_f = W_{f1} + W_{f2}$$
  
 $W_f = 87.82 + 110.66$   
 $W_f = 198.48 \ ton$ 

# Figura 25.

Diagrama de la subpresión para una diferencia de niveles aguas arriba y aguas abajo de la presa >25m y <75m de altura Grishin (1979)



Elaborado por: La Autora

A partir de este punto las siguientes fuerzas se mantienen con los mismos valores calculados con anterioridad, teniendo así los siguientes resultados

# B.6. Fuerza de empuje debida a los sedimentos

$$Wa = 21.78 ton$$

B.7. Fuerza de la ola ejercida por el viento

$$PmaxOla = 3.56 ton$$

$$MmaxOla = 66.2 \ ton * m$$

B.8.Fuerza sísmica

$$\propto_h = 0.2075$$
  
 $\propto_v = 0.138$ 

Dando como resultado la siguiente fuerza sísmica horizontal:

$$S_h = 236.98 \text{ ton}$$

Fuerza sísmica vertical:

$$S_h = 157.99$$
 ton

B.8.1. Fuerzas originadas por el sismo

• Fuerza hidrodinámica originada por el sismo

$$W_s = 35.23 \, Ton$$

• Fuerza de los sedimentos originada por el sismo

$$W_{sa} = 39.66 \, Ton$$

# 8.2.2.9 Resumen de las fuerzas para cada combinación de carga en una presa de

### 30m de altura y una base de cimentación con calidad excelente

### Tabla 34.

Resumen de las fuerzas en las diferentes Combinaciones de estudio, en una presa de 30m de alto cimentada sobre un macizo rocos "excelente"

Energe	Combinación de fuerzas				
ruerzas	Combinación N21	Combinación A23	Combinación E22		
W1=	328.09	328.09	381.35		
W2=	2.88	2.88	2.88		
W3=	16.38	16.38	19.04		
W4=	2.07	2.07	2.07		
G=	1141.82	1141.82	1141.82		
Wf_2=	51.57	51.57	110.66		
Wa=	21.78	21.78	21.78		
PmaxOla=	3.56	0.00	0.00		
Wf_1=	87.83	87.83	87.83		
Sh=		236.98	236.98		
Sv=		157.99	157.99		
Ws=		35.23	35.23		
Wsa=		39.66	39.66		

Elaborado por: La Autora.

### 8.2.2.10 Seguridad al deslizamiento para cada una de las Combinaciones

El coeficiente de seguridad al deslizamiento se podrá obtener gracias a la siguiente ecuación citada por Sandoval (2019)

$$ksd = \frac{(f * \Sigma Fv * cos\alpha) + (\Sigma Fh * sen\alpha) + (C * b)}{(\Sigma Fh * cos\alpha) + (\Sigma Fv * sen\alpha)}$$

Donde:

F= Coeficiente de fricción entre hormigón - roca, revisar tabla 33 =0.95

C= Cohesión entre hormigón-roca, revisar tabla 33 = 40.79 ton/m3

 $\alpha$ = Angulo de inclinación en la base de la presa, para el caso de estudio la presa estará

cimentada horizontalmente con un ángulo de inclinación =0

 $\Sigma F v$ = sumatoria de fuerzas verticales (ton)

 $\Sigma Fh$ = sumatoria de fuerzas horizontales (ton)

Datos generales:

F=0.95 C= 40.79 ton/m3  $\cos (\alpha) = 1$  $\sin (\alpha) = 0$ b=30 m

## Tabla 35.

Resumen del cálculo de estabilizad para cada combinación de fuerzas de una presa de 30m y un macizo rocoso de cimentación- excelente

Datos / Combinación de cargas	Combinación N21	Combinación A23	Combinación E22
f	0.95	0.95	0.95
С	40.79	40.79	40.79
$\cos{(\alpha)}$	1	1	1
sen ( $\alpha$ )	0	0	0
b	30	30	30
ΣΓυ	1020.89	862.90	806.47
$\Sigma Fh$	350.55	658.86	712.12
ksd	6.26	3.10	2.79
Condición	>3	>2	>1
Conclusión	Cumple	Cumple	Cumple

Elaborado por: La Autora.

# 8.2.2.11 Verificación al volcamiento para cada una de las Combinaciones de fuerzas

$$Fs_{vol} = \frac{\Sigma M_{estabilizantes}}{\Sigma M_{volcadores}}$$

### Tabla 36.

Resumen de la verificación al volcamiento de una presa de 30m y un macizo

Datos / Combinación de cargas	Combinación N21	Combinación A23	Combinación E22
$\Sigma M_{estabilizantes}$	22896.61	22896.61	22976.28
$\Sigma M_{volcadores}$	6066.77	12569.18	14458.23
Fs <sub>vol</sub>	3.77	1.82	1.59
Condición	>1.3	>1.25	>1.1
Conclusión	Cumple	Cumple	Cumple

rocoso de cimentación- excelente

Elaborado por: La Autora.

### 8.2.2.12 Esfuerzos en la presa

Para obtener el valor de los esfuerzos resultantes en la presa, debemos obtener la distancia donde estará la resultante de todas las fuerzas verticales, esta distancia tiene que cumplir la siguiente condición  $1/3*b \ge x \ge 2/3*b$ , siendo b, el ancho de la base de la presa, conociendo esto las ecuaciones serán las siguientes:

$$x = \frac{\Sigma M}{\Sigma F_{v}}(m)$$
 Calero. I (2019)

Donde:

 $\Sigma M$  = Sumatoria de momentos estabilizantes – sumatoria de momentos volcadores

 $\Sigma F v$ = sumatoria de fuerzas verticales (ton)

Una vez obtenido este valor necesitamos encontrar la excentricidad:

$$e = \frac{b}{2} - x (m)$$
 Calero. I (2019)

Donde:

b= es el ancho de la base de la presa (m)

Para poder calcular los esfuerzos en los extremos de la cortina se ocupará la siguiente formula:

$$\sigma y_{1-2} = \frac{\Sigma F_v}{b * db} * \left(1 \pm \left(6 * \frac{e}{b}\right)\right)$$
 Calero. I (2019)

Donde:

b= es el ancho de la base de la presa (m)

 $\Sigma F v$ = sumatoria de fuerzas verticales (ton)

db= ancho de la dovela (m)

e= excentricidad (m)

Conociendo las ecuaciones podemos realizar un resumen de los esfuerzos en los extremos de la cortina tanto aguas arriba como aguas abajo, para cada una de las combinaciones estudiadas:

# Tabla 37.

Resumen de los esfuerzos en los extremos de la cortina aguas arriba y aguas abajo

Datos / Combinación de cargas	Combinación N21	Combinación A23	Combinación E22
$\Sigma M$ (ton*m)	16829.84017	10327.4345	8518.044759
$\Sigma F_{v}$ (ton)	1020.89	862.90	806.47
X (m)	16.49	11.97	10.56
e (m)	-1.49	3.03	4.44
b (m)	30	30	30
db (m)	1	1	1
$\sigma y_1$ (ton/m2) Esfuerzos en los extremos de la cortina aguas arriba	23.92	11.32	3.02
$\sigma y_2$ (ton/m2) Esfuerzos en los extremos de la cortina aguas abajo	44.14	46.20	50.74

de una presa de 30m y un macizo rocoso de cimentación- excelente

Elaborado por: La Autora.

# Figura 26.

Detalle de los esfuerzos en los extremos de la cortina.



Elaborado por: La Autora

# 8.2.2.13 Cálculo de la capacidad de carga admisible de la cimentación mediante el parámetro geo mecánico %RQD

Para poder obtener la capacidad de carga admisible mediante el parámetro geomecánico %RQD, Bowles (1996), reporta que se puede obtener la capacidad de carga ultima modificada en función del parámetro %RQD mediante la siguiente ecuación:

$$q_{u(modificada)} = qu * RQD^2$$

Donde

qu: Resistencia a la compresión simple de la roca ton/m2

RQD: valor designado a través de la clasificación del RQD

Para poder iniciar los cálculos debemos conocer que la resistencia de la roca mediante el parámetro %RQD está en función de las discontinuidades, por tanto, puede involucrar una resistencia a la compresión simple bajo o alto, en concordancia con lo investigado para la Sierra ecuatoriana serán entonces:

Macizo rocoso excelente, en esta categoría se encontró: Lavas andesíticas - Cuarcitas con un valor a la compresión simple qu=250 Mpa,

Macizo rocoso regular, esta clasificación de roca se encontró: Pizarras -Esquistos, con un valor a la compresión simple qu= 70Mpa.

Macizo rocoso muy malo, se puede categorizar a este tipo de rocas como: Tobas, con un valor a la compresión simple qu= 10Mpa

Adicionalmente, tenemos que considerar un factor de seguridad, Braja, M. Dass menciona que este factor debe tener un valor por lo menos de 3, también se debe considerar el factor de seguridad en el estado sísmico el cual es la mitad del factor de seguridad del estado estático, por lo que la ecuación de la carga admisible en función del parámetro %RQD, estará regida por la siguiente ecuación:

$$Qa = \frac{qu * RQD^2}{3/2}$$
 Bowles (1996)

En función de la ecuación detallada se presenta una tabla de resumen para cada uno de los macizos rocosos para un RQD = 90%

### Tabla 38.

Parámetro	Lavas andesíticas- cuarcitas	Pizarras- Esquistos	Tobas
RQD	0.9	0.9	0.9
qu (ton/m2)	25492.90	7138.01	1019.72
Fs	1.5	1.5	1.5
Qa (ton/m2)	13766.17	3854.53	550.65

Tabla resumen de la capacidad de carga admisible

Elaborado por: La Autora

El esfuerzo máximo que genera la presa en la base de cimentación es de 50.74 ton/m2 (tabla 37), mientras que el macizo de cimentación resulta con una capacidad de carga admisible en función del parámetro %RQD para lavas andesíticas de 13766,17 ton/m2, en pizarras y esquistos de 3854.53 ton/m2 y finalmente en Tobas de 550.65 ton/m2, por lo que se concluye que soportará la carga aplicada por la presa.

# 8.2.2.14 Cálculo de la capacidad de carga admisible de la cimentación mediante el parámetro geo mecánico RMR

Se puede obtener la capacidad de carga admisible según el método analítico desarrollado por Serrano y Olalla (como se citó en Gonzales de Vallejo et al, 2002, p.419) el método se encuentra resuelto mediante ábacos de entrada directa. La ecuación la cual se puede obtener la capacidad de carga ultima o la carga de hundimiento Ph será:

$$P_h = \beta * (N_\beta - \tau)$$
 Serrano y Olalla (2001)

Donde:

$$\beta = \frac{m * \sigma_{c1}}{8}$$
 Serrano y Olalla (2001)

$$au = \frac{8*s}{m^2}$$
 Serrano y Olalla (2001)

Siendo m y s, los parámetros del criterio de Hoek y Brown y  $\sigma_i$  el valor de la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa.

Para poder iniciar los cálculos debemos conocer que una clasificación de la resistencia de la roca mediante el parámetro RMR está en función de las discontinuidades al igual que el parámetro %RQD, por lo que de igual manera con lo citado en el apartado 8.2.2.13, el parámetro RMR puede involucrar una resistencia a la compresión simple uniaxial baja o alta, por lo cual los datos a trabajar serán entonces:

Macizo rocoso bueno, con un valor a la compresión simple 210 - 320 MPA, el valor adoptado será  $\sigma_{c1} = 250$  Mpa, en la investigación se puede determinar que en esta categoría se encontró en la Sierra ecuatoriana: Lavas andesíticas - Cuarcitas

Macizo rocoso medio, con un valor a la compresión simple 40 - 150 MPA, el valor adoptado será  $\sigma_1 =$ 70Mpa, en la investigación se puede determinar que en esta categoría se encontró en la Sierra ecuatoriana: Pizarras -Esquistos

Macizo rocoso muy malo, con un valor a la compresión simple 1-46 MPA, el valor adoptado será  $\sigma_1 = 10$ Mpa, en la investigación se puede determinar que en esta categoría se encontró en la Sierra ecuatoriana: Tobas Para nuestro ejemplo sabemos que el macizo de cimentación tiene una calidad %RQD excelente, que en semejanza el valor RMR estará en un rango de (80-100), para rocas con una clasificación Buena, el valor adoptado dentro de ese rango será RMR=85, adicionalmente necesitamos conocer las constantes empíricas del macizo rocoso para cada clase de roca de un RMR=85, estos valores se podrán obtener del libro de Gonzales de Vallejo et al (2002, p.194). los cuales se detallan a continuación:

## Tabla 39.

Coeficientes m y s para presa de 30 m sobre roca de calidad excelente

Clasificación del macizo rocoso	Macizo rocoso	Lavas andesíticas- cuarcitas	Pizarras- Esquistos	Tobas
RMR	Constanta (a)	Constante	Constante	Constante
	Constante (s)	(m)	(m)	(m)
85	0.18	11.12	4.68	8.78

Elaborado por: La Autora.

Teniendo estos valores se puede calcular el valor Beta y el coeficiente Tao para cada una de las clases, para ello retomamos la ecuación y detallamos los valores a trabajar en una tabla de resumen:

$$\beta = \frac{m * \sigma_1}{8} \text{ t/m2}$$
$$\tau = \frac{8 * s}{m^2}$$

## Tabla 40.

Obtención de los parámetros Beta y Tao para una presa de 30 m sobre roca de

Parámetro	Lavas andesíticas- cuarcitas	Pizarras- Esquistos	Tobas
$\sigma_1 \text{ MPA}$	250	70	10

$\sigma_1$ (ton/m2)	25492.9	7138.012	1019.716
m	11.12	4.68	8.78
S	0.18	0.18	0.18
$\beta$ (ton/m2)	35434.40	4177.52	1118.98
τ	0.012	0.068	0.019

Elaborado por: La Autora.

Una vez obtenidos los coeficientes Beta (*B*) y Tao ( $^{\gamma}$ ) podremos obtener la sobrecarga externa normalizada  $\sigma_{01}$ : la cual se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_{01} = \frac{\sigma_1}{\beta} + \tau$$
 Serrano y Olalla (2001)

Donde  $\sigma_1$  es la presión actuante máxima vertical aplicado por la presa este valor será 50.74 (tabla 38).

Para cada clase de roca en la clasificación RMR=85 tendremos entonces los siguientes resultados detallados en la siguiente tabla

## Tabla 41.

Sobrecarga externa normalizada

Parámetro	Lavas andesíticas- cuarcitas	Pizarras- Esquistos	Tobas
$\sigma_1$ (ton/m2)	50.74	50.74	50.74
$\beta$ (ton/m2)	35434.40	4177.52	1118.98
τ	0.012	0.068	0.019
$\sigma_{01}$	0.013	0.075	0.044

Elaborado por: La Autora.

Con el valor de la sobrecarga externa normalizada podremos obtener el coeficiente de carga Np, la cual esta función de la inclinación del terreno, en este caso la inclinación del terreno será i=0, es así que, para poder obtener este valor, debemos entonces referirnos la figura 27, e

ingresar con la sobrecarga externa normalizada calculada en la zona de las abscisas, topar la línea de inclinación de terreno y obtener el valor NP

# Figura 27.

Valores del coeficiente de carga de hundimiento N $\beta$ 



Fuente: (González de Vallejo et al., 2002)

Teniendo como resultado la capacidad de carga del macizo rocos en función del RMR detallada en la tabla 42 y considerando la ecuación:

$$P_h = \beta * \left( N_\beta - \tau \right)$$

### Tabla 42.

Capacidad de carga del macizo rocos Ph, Serrano y Olalla (2001)

Parámetro	Lavas andesíticas- cuarcitas	Pizarras- Esquistos	Tobas
$\beta$ (ton/m2)	35434.40	4177.52	1118.98
τ	0.012	0.068	0.019
Np	5.2	7	6.5
$P_h$ (ton/m2)	183825.87	28954.75	7251.44

Es necesario obtener la capacidad de carga admisible, la cual resulta de la división de la capacidad de carga Ph, por un coeficiente de seguridad global, F, que puede expresarse como el producto de dos factores (Serrano y Olalla,2001):

$$F = F_p * F_m$$

Donde:

F: factor de seguridad global

Fp: factor en función de los parámetros de la roca

Fm: factor de seguridad en función de la rotura por fragilidad

En la Figura 28 se muestran los coeficientes de seguridad parcial Fp a utilizar, en función del valor RMR y de la resistencia a la compresión simple  $\sigma_{01}$ . En el caso de cimentaciones sobre macizos rocosos debe tenerse en cuenta el comportamiento frágil de la roca; si  $\sigma_1$ > 100 MPa, el macizo rocoso es de respuesta frágil y han de adoptarse órdenes de magnitud de Fm en torno a 5 u 8. para  $\sigma_1$ < 12.5 MPa, el factor Fm tendrá un valor =1 (Gonzales de Vallejo et al, 2002).

Teniendo como primicia lo detallado anteriormente realizaremos un ejemplo para poder obtener el factor Fp, para ello necesitamos los siguientes datos:

Resistencia a la compresión simple para Lavas andesíticas- cuarcitas  $\sigma c_1$  (MPa)=250

RMR=85

Con estos datos ingresamos al nomograma detallado en la figura 28, siendo RMR el valor en las ordenadas y el esfuerzo a la compresión simple en MPa en las abscisas, dando como resultado un Fp=40

# Figura 28.

Coeficientes de seguridad parcial. Fp.



Nota. Adaptado de Serrano y Olalla, (2001). Fuente: (González de Vallejo et al., 2002)

En el caso de una presa de 30 m de altura y un macizo de cimentación con una clasificación RMR=85 se tiene los siguientes valores de la capacidad de carga admisible:

$$Qu(RMR) = \frac{Ph}{Fp * Fm}$$

## Tabla 43.

	Capacida	d de carga	admisible	<i>RMR</i> =85,	presa	de 30m	altura
--	----------	------------	-----------	-----------------	-------	--------	--------

Parámetro	Lavas andesíticas- cuarcitas	Pizarras- Esquistos	Tobas
$P_h$ (ton/m2)	183825.87	28954.75	7251.44
Fp	40	35	17

Fm	8	4	1
$Qa_{(RMR)} ton/m2$	1148.91	413.64	853.11
Carga máxima aplicada por la presa (ton/m2)	50.74	50.74	50.74

Elaborado por: La Autora.

El esfuerzo máximo aplicado por la presa es de 50.74 ton/m2 (tabla 38), mientras que el macizo de cimentación resulta con una capacidad de carga admisible en función del parámetro RMR=85, con los siguientes valores por cada clase de roca: Lavas Andesíticas-Cuarcitas= 1148.91 (ton/m2), Pizarras- Esquistos= 413.64 (ton/m2) y Tobas= 853.11 (ton/m2), por lo que se concluye que soportará la carga aplicada por la presa y se encuentra dentro de los valores aceptables

# 8.3 Resultados

Una vez conocido el método de cálculo, se podrá detallar los siguientes resúmenes de resultados globales

# 8.3.1 Fuerzas aplicadas a las diferentes alturas de presa de estudio, 30, 50, 65, 80

metros.

# Tabla 44.

Resumen de las fuerzas aplicadas a la presa de 30m según las diferentes

	Altura de la presa		30 m		
Combinación de fuerzas		Combinación N21			
Calid	ad de la roca, descripción RQD/RMR	Excelente/ Muy Buena	Regular / Media	Muy mala / Muy mala	
W1=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas arriba	328.09	328.09	328.09	
W2=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas abajo	2.88	2.96	3.03	
W3=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas arriba	16.38	16.38	16.38	
W4=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas abajo	2.07	2.18	2.28	
G=	Fuerza ejercida por el peso propio de la presa	1141.82	1268.63	1395.00	
Wf_2=	Subpresion 2 forma irregular	51.57	51.57	51.57	
Wa=	Fuerza ejercida por los sedimentos	21.78	21.78	21.78	
PmaxOla=	Fuerza resultante de la ola	3.56	3.56	3.56	
Wf_1=	Subpresion 1 rectangular	87.83	123.72	161.62	
Sh=	Fuerza sísmica horizontal				
Sv=	Fuerza sísmica vertical				
Ws=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo				
Wsa=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo en sedimentos				
	Combinación de fuerzas	Cor	nbinación	A23	
W1=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostatica aguas arriba	328.09	328.09	328.09	
W2=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas abajo	2.88	2.96	3.03	
W3=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas arriba	16.38	16.38	16.38	

*Combinaciones de fuerzas calculadas* 

W4=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas abaio	2.07	2.18	2.28
G=	Fuerza ejercida por el peso propio de la presa	1141.82	1268.63	1395.00
Wf_2=	Subpresion 2 forma irregular	51.57	51.57	51.57
Wa=	Fuerza ejercida por los sedimentos	21.78	21.78	21.78
PmaxOla=	Fuerza resultante de la ola	0.00	0.00	0.00
Wf_1=	Subpresion 1 rectangular	87.83	123.72	161.62
Sh=	Fuerza sísmica horizontal	236.98	263.30	289.53
Sv=	Fuerza sísmica vertical	157.99	175.53	193.02
Ws=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo	35.23	35.42	36.12
Wsa=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo en sedimentos	39.66	39.66	39.66
	Combinación de fuerzas	Co	mbinaciór	n E22
	Calidad de la roca, descripción RQD/RMR	Excelente/ Muy Buena	Regular / Media	Muy mala / Muy mala
W1=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas arriba	381.35	381.35	381.35
W2=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas abajo	2.88	2.96	3.03
W3=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas arriba	19.04	19.04	19.04
W4=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas abajo	2.07	2.18	2.28
G=	Fuerza ejercida por el peso propio de la presa	1141.82	1268.63	1395.00
Wf_2=	Subpresion 2 forma irregular	110.66	113.39	115.76
Wa=	Fuerza ejercida por los sedimentos	21.78	21.78	21.78
PmaxOla=	Fuerza resultante de la ola	0.00	0.00	0.00
Wf_1=	Subpresion 1 rectangular	87.83	123.72	161.62
Sh=	Fuerza sísmica horizontal	236.98	263.30	289.53
Sv=	Fuerza sísmica vertical	157.99	175.53	193.02
Ws=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo	35.23	35.42	36.12
Wsa=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo en sedimentos	39.66	39.66	39.66

# Tabla 45.

Resumen de las fuerzas aplicadas a la presa de 50m según las diferentes

Combinaciones de fuerzas calculadas

Altura de la presa		50 m			
	Combinación de fuerzas	Co	Combinación N21		
Calid	Calidad de la roca, descripción RQD/RMR		Regular / Media	Muy mala / Muy mala	
W1=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas arriba	1040.98	1040.98	1040.98	
W2=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas abajo	2.83	2.87	2.92	
W3=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas arriba	51.98	51.98	51.98	
W4=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas abajo	2.01	2.06	2.13	
G=	Fuerza ejercida por el peso propio de la presa	3065.47	3265.30	3484.14	
Wf_2=	Subpresion 2 forma irregular	251.21	255.25	259.91	
Wa=	Fuerza ejercida por los sedimentos	60.49	60.49	60.49	
PmaxOla=	Fuerza resultante de la ola	6.12	6.12	6.12	
Wf_1=	Subpresion 1 rectangular	148.49	203.84	262.77	
Sh=	Fuerza sísmica horizontal				
Sv=	Fuerza sísmica vertical				
Ws=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo				
Wsa=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo en sedimentos				
	Combinación de fuerzas	Co	mbinaciór	n A23	
W1=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas arriba	1040.98	1040.98	1040.98	
W2=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas abajo	2.83	2.87	2.92	
W3=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas arriba	51.98	51.98	51.98	
W4=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas abajo	2.01	2.06	2.13	
G=	Fuerza ejercida por el peso propio de la presa	3065.47	3265.30	3484.14	
Wf_2=	Subpresion 2 forma irregular	251.21	255.25	259.91	
Wa=	Fuerza ejercida por los sedimentos	60.49	60.49	60.49	
PmaxOla=	Fuerza resultante de la ola	0.00	0.00	0.00	
Wf_1=	Subpresion 1 rectangular	148.49	203.84	262.77	
Sh=	Fuerza sísmica horizontal	636.23	677.70	723.12	
Sv=	Fuerza sísmica vertical	424.15	451.80	482.08	

Ws=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo	110.21	112.18	119.85
Wsa=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo en sedimentos	110.18	110.18	110.18
	Combinación de fuerzas	Co	mbinaciór	n <b>E22</b>
	Calidad de la roca, descripción RQD/RMR	Excelente/ Muy Buena	Regular / Media	Muy mala / Muy mala
W1=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas arriba	1134.29	1134.29	1134.29
W2=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas abajo	2.83	2.87	2.92
W3=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas arriba	56.64	56.64	56.64
W4=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas abajo	2.01	2.06	2.13
G=	Fuerza ejercida por el peso propio de la presa	3065.47	3265.30	3484.14
Wf_2=	Subpresion 2 forma irregular	262.74	266.96	271.83
Wa=	Fuerza ejercida por los sedimentos	60.49	60.49	60.49
PmaxOla=	Fuerza resultante de la ola	0.00	0.00	0.00
Wf_1=	Subpresion 1 rectangular	148.49	203.84	262.77
Sh=	Fuerza sísmica horizontal	636.23	677.70	723.12
Sv =	Fuerza sísmica vertical	424.15	451.80	482.08
Ws=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo	110.21	112.18	119.85
Wsa=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo en sedimentos	110.18	110.18	110.18

# Tabla 46.

Resumen de las fuerzas aplicadas a la presa de 65m según las diferentes

Combinaciones de fuerzas calculadas

Altura de la presa		65 m			
	Combinación de fuerzas	Co	Combinación N21		
Calid	Calidad de la roca, descripción RQD/RMR		Regular / Media	Muy mala / Muy mala	
W1=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas arriba	1826.35	1826.35	1826.35	
W2=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas abajo	2.81	2.85	2.89	
W3=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas arriba	91.20	91.20	91.20	
W4=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas abajo	1.98	2.03	2.08	
G=	Fuerza ejercida por el peso propio de la presa	5088.89	5362.89	5660.43	
Wf_2=	Subpresion 2 forma irregular	397.24	403.48	410.55	
Wa=	Fuerza ejercida por los sedimentos	102.23	102.23	102.23	
PmaxOla=	Fuerza resultante de la ola	8.01	8.01	8.01	
Wf_1=	Subpresion 1 rectangular	192.32	263.07	337.82	
Sh=	Fuerza sísmica horizontal				
Sv=	Fuerza sísmica vertical				
Ws=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo				
Wsa=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo en sedimentos				
	Combinación de fuerzas	Co	mbinaciór	n A23	
W1=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas arriba	1826.35	1826.35	1826.35	
W2=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas abajo	2.81	2.85	2.89	
W3=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas arriba	91.20	91.20	91.20	
W4=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas abajo	1.98	2.03	2.08	
G=	Fuerza ejercida por el peso propio de la presa	5088.89	5362.89	5660.43	
Wf_2=	Subpresion 2 forma irregular	397.24	403.48	410.55	
Wa=	Fuerza ejercida por los sedimentos	102.23	102.23	102.23	
PmaxOla=	Fuerza resultante de la ola	0.00	0.00	0.00	
Wf_1=	Subpresion 1 rectangular	192.32	263.07	337.82	
Sh=	Fuerza sísmica horizontal	1056.18	1113.05	1174.81	
Sv=	Fuerza sísmica vertical	704.12	742.04	783.20	

Ws=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo	193.82	200.14	227.70
Wsa=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo en sedimentos	186.20	186.20	186.20
	Combinación de fuerzas	Co	mbinaciór	n E22
	Calidad de la roca, descripción RQD/RMR	Excelente/ Muy Buena	Regular / Media	Muy mala / Muy mala
W1=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas arriba	1949.31	1949.31	1949.31
W2=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas abajo	2.81	2.85	2.89
W3=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas arriba	97.34	97.34	97.34
W4=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas abajo	1.98	2.03	2.08
G=	Fuerza ejercida por el peso propio de la presa	5088.89	5362.89	5660.43
Wf_2=	Subpresion 2 forma irregular	410.84	417.30	424.61
Wa=	Fuerza ejercida por los sedimentos	102.23	102.23	102.23
PmaxOla=	Fuerza resultante de la ola	0.00	0.00	0.00
Wf_1=	Subpresion 1 rectangular	192.32	263.07	337.82
Sh=	Fuerza sísmica horizontal	1056.18	1113.05	1174.81
Sv=	Fuerza sísmica vertical	704.12	742.04	783.20
Ws=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo	193.82	200.14	227.70
Wsa=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo en sedimentos	186.20	186.20	186.20

# Tabla 47.

Resumen de las fuerzas aplicadas a la presa de 80m según las diferentes

Combinaciones de fuerzas calculadas

Altura de la presa		80 m		
Combinación de fuerzas		Combinación N21		
Calid	Calidad de la roca, descripción RQD/RMR		Regular / Media	Muy mala / Muy mala
W1=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas arriba	2846.12	2846.12	2846.12
W2=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas abajo	2.83	2.86	2.91
W3=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas arriba	142.13	142.13	142.13
W4=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas abajo	2.01	2.04	2.11
G=	Fuerza ejercida por el peso propio de la presa	7833.88	8095.05	8539.99
Wf_2=	Subpresion 2 forma irregular	870.75	883.83	905.62
Wa=	Fuerza ejercida por los sedimentos	154.86	154.86	154.86
PmaxOla=	Fuerza resultante de la ola	9.93	9.93	9.93
Wf_1=	Subpresion 1 rectangular	234.24	288.36	382.54
Sh=	Fuerza sísmica horizontal			
Sv=	Fuerza sísmica vertical			
Ws=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo			
Wsa=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo en sedimentos			
	Combinación de fuerzas	Co	mbinaciór	n A23
W1=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas arriba	2846.12	2846.12	2846.12
W2=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas abajo	2.83	2.86	2.91
W3=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas arriba	142.13	142.13	142.13
W4=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas abajo	2.01	2.04	2.11
G=	Fuerza ejercida por el peso propio de la presa	7833.88	8095.05	8539.99
Wf_2=	Subpresion 2 forma irregular	870.75	883.83	905.62
Wa=	Fuerza ejercida por los sedimentos	154.86	154.86	154.86
PmaxOla=	Fuerza resultante de la ola	0.00	0.00	0.00
Wf_1=	Subpresion 1 rectangular	234.24	288.36	382.54
Sh=	Fuerza sísmica horizontal	1625.90	1680.10	1772.45
Sv=	Fuerza sísmica vertical	1083.93	1120.07	1181.63

Ws=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo	306.45	323.06	410.94
Wsa=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo en sedimentos	282.06	282.06	282.06
	Combinación de fuerzas	Co	mbinaciór	n E22
	Calidad de la roca, descripción RQD/RMR	Excelente/ Muy Buena	Regular / Media	Muy mala / Muy mala
W1=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas arriba	2999.11	2999.11	2999.11
W2=	Fuerza de empuje debida a la presión hidrostática aguas abajo	2.83	2.86	2.91
W3=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas arriba	149.77	149.77	149.77
W4=	Fuerza de empuje debida al peso del agua sobre el paramento aguas abajo	2.01	2.04	2.11
G=	Fuerza ejercida por el peso propio de la presa	7833.88	8095.05	8539.99
Wf_2=	Subpresion 2 forma irregular	894.48	907.91	930.29
Wa=	Fuerza ejercida por los sedimentos	154.86	154.86	154.86
PmaxOla=	Fuerza resultante de la ola	0.00	0.00	0.00
Wf_1=	Subpresion 1 rectangular	234.24	288.36	382.54
Sh=	Fuerza sísmica horizontal	1625.90	1680.10	1772.45
Sv =	Fuerza sísmica vertical	1083.93	1120.07	1181.63
Ws=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo	306.45	323.06	410.94
Wsa=	Fuerza hidrodinámica debida al sismo en sedimentos	282.06	282.06	282.06

# 8.3.2 Verificación al deslizamiento en cada presa

## Tabla 48.

Verificación al deslizamiento Presa-Fundación (ksd) - Calidad de la roca

Combinación de	Condición	Altura de la presa en metros				
fuerzas	Condicion	30	50	65	80	
N21	>3	6.26	4.19	3.62	3.28	
A23	>2	3.10	2.16	1.88	1.69	
E21	>1	2.79	2.06	1.82	1.64	

Excelente / Buena

Elaborado por: La Autora.

#### Tabla 49.

Verificación al deslizamiento Presa- Fundación (ksd) - Calidad de la roca

Regular/ Media

Combinación de	Condición	A	Altura de la p	resa en metro	DS
fuerzas	Condicion	30	50	65	80
N21	>3	5.45	3.63	3.2	2.84
A23	>2	2.57	1.81	1.60	1.44
E21	>1	2.31	1.73	1.54	1.39

Elaborado por: La Autora.

### Tabla 50.

Verificación al deslizamiento Presa-Fundación (ksd) – Calidad de la roca Muy

mala/ Muy mala

Combinación de fuerzas	Condición -	Altura de la presa en metros			
		30	50	65	80
N21	>3	3.35	2.40	2.2	2.01
A23	>2	1.46	1.13	1.0	1.69
E21	>1	1.30	1.1	1	1.64

## 8.3.3 Verificación al volcamiento

## Tabla 51.

Verificación al Volcamiento de la presa - Calidad de la roca Excelente / Buena

Combinación de fuerzas	Condición -	Altura de la presa en metros			
		30	50	65	80
N21	>1.3	3.77	3.34	3.37	3.14
A23	>1.25	1.82	1.72	1.72	1.67
E21	>1.1	1.59	1.65	1.67	1.62

Elaborado por: La Autora.

## Tabla 52.

Verificación al Volcamiento de la presa – Calidad de la roca Regular / Media

Combinación de fuerzas	Condición -	Altura de la presa en metros			
		30	50	65	80
N21	>1.3	3.69	3.29	3.3	3.15
A23	>1.25	1.81	1.71	1.7	1.67
E21	>1.1	1.59	1.64	1.7	1.63

Elaborado por: La Autora.

## Tabla 53.

Verificación al Volcamiento de la presa - Calidad de la roca Muy mala/Muy mala

Combinación de fuerzas	Condición -	Altura de la presa en metros			
		30	50	65	80
N21	>1.3	3.60	3.26	3.3	3.18
A23	>1.25	1.79	1.70	1.7	1.66
E21	>1.1	1.59	1.63	1.7	1.62
## 8.3.4 Esfuerzos en la base de cimentación

# Tabla 54.

Resumen los esfuerzos la base de la cimentación - Calidad de la roca Excelente /

Buena

		Altura de la presa en metros							
Combinac ión de fuerzas	Condici ón	30		50		65		80	
		(σy1)	(σy2)	(σy1)	( <del>σ</del> y2)	(σy1)	( <del>σ</del> y2)	(σy1)	(σy2)
		Ton/	Ton/	Ton/	Ton/	Ton/	Ton/	Ton/	Ton/
		m2	m2	m2	m2	m2	m2	m2	m2
N21	σy2< (f'c/Fs) σy1>0	23.92	44.14	45.40	62.96	62.17	79.57	74.72	93.95
A23	σy2< (f'c/Fs) σy1>1	11.32	46.20	10.79	80.67	11.98	108.0 3	12.37	129.6 9
E22	σy2< (f'c/Fs) σy1>2	3.02	50.74	5.17	86.01	6.27	113.5 1	6.69	134.9 8

Elaborado por: La Autora.

## Tabla 55.

Resumen los esfuerzos en la base de la cimentación- Calidad de la roca Regular / Media

		Altura de la presa en metros							
Combinac ión de fuerzas	Condici ón	30		50		65		80	
		(σy1)	( <del>o</del> y2)	(σy1)	( <del>σ</del> y2)	( <del>o</del> y1)	( <del>σ</del> y2)	(σy1)	( <del>oy</del> 2)
		Ton/	Ton/	Ton/	Ton/	Ton/	Ton/	Ton/	Ton/
		m2	m2	m2	m2	m2	m2	m2	m2
N21	σy2< (f'c/Fs) σy1>0	25.25	45.35	47.12	63.96	63.5	81.0	74.55	95.74
A23	σy2< (fc/Fs) σy1>1	11.76	47.69	10.56	82.97	12.1	110.0	13.43	129.8 7
E22	σy2< (f'c/Fs) σy1>2	3.59	52.11	5.00	88.26	6.5	115.4	7.86	135.0 5

Elaborado por: La Autora.

# Tabla 56.

Resumen los esfuerzos en la base de cimentación- Calidad de la roca Muy mala /

Muy mala

		Altura de la presa en metros							
Combinac ión de fuerzas	Condici ón	30		50		65		80	
		(σy1) Ton/ m2	(σy2) Ton/ m2	(σy1) Ton/ m2	(σy2) Ton/ m2	(σy1) Ton/ m2	(σy2) Ton/ m2	(σy1) Ton/ m2	(σy2) Ton/ m2
		1112	1112	1112	1112	1112	1112	1112	1112
N21	σy2< (fc/Fs) σy1>0	26.77	46.43	48.41	65.38	64.5	82.7	74.32	98.69
A23	σy2< (fc/Fs) σy1>1	11.75	49.68	10.55	85.06	11.7	112.5	12.74	132.6 3
E22	σy2< (fc/Fs) σy1>2	3.65	54.03	5.08	90.25	6.1	117.8	7.34	137.6 3

Elaborado por: La Autora.

8.3.5 Graficas de correlación entre la capacidad de carga admisible en función del parámetro %RQD y los esfuerzos máximos generados en la base de cimentación por cada una de las presas analizadas.

## Figura 29.

Verificación de la capacidad de carga última del macizo de cimentación CALIDAD EXCELENTE %RQD



#### Elaborado por: La Autora

## Figura 30.

Verificación de la capacidad de carga última del macizo de cimentación

CALIDAD REGULAR %RQD



Elaborado por: La Autora

# Figura 31.

Verificación de la capacidad de carga última del macizo de cimentación

CALIDAD MUY MALA %RQD



Elaborado por: La Autora

8.3.6 Graficas de correlación entre la capacidad de carga admisible en función

del parámetro RMR y los esfuerzos máximos generados en la base de

cimentación por cada una de las presas analizadas

## Figura 32.

Verificación de la capacidad de carga última del macizo de cimentación

clasificación RMR=BUENA



#### Elaborado por: La Autora

## Figura 33.

Verificación de la capacidad de carga última del macizo de cimentación

clasificación RMR=MEDIA



Elaborado por: La Autora

## Figura 34.

Verificación de la capacidad de carga última del macizo de cimentación

clasificación RMR=MUY MALA



Elaborado por: La Autora

# 8.4 Aplicabilidad de los sistemas considerados al diseño de presas hormigón a gravedad de pequeñas y medianas alturas.

En función de la investigación realizada, se puede determinar que, para presas, con alturas menores o igual de 50m cimentadas sobre roca con calidad excelente o regular según el parámetro %RQD, o de clasificación buena y media según el parámetro RMR, su cimentación soportara la carga de la presa, mientras que, para estas mismas alturas de presa cimentadas sobre rocas con calidad muy mala, no soportara la carga.

•

# **CAPÍTULO IX**

# ELEMENTOS DE RIESGOS GEO-MECÁNICOS DE LAS PRESAS DE HORMIGÓN A GRAVEDAD CIMENTADAS EN ROCAS

## 9.1 Introducción

El siguiente capítulo es un compendio de recomendaciones generales que se ha de tener para un correcto control y operación de una presa de hormigón a gravedad cimentada en roca, para ello se utilizada diversos trabajos como los de: (Calero, 2019), (Sandoval, 2018), junto a demás información filtrada y recolectada por la autora.

## 9.2 Elementos de riesgos debidas a los aspectos hidromecánicos

#### 9.2.1 Inestabilidad de la roca

La presencia de fracturas, fallas o discontinuidades en la roca puede llevar a la inestabilidad de la presa, especialmente si se ve afectada por la presión del agua almacenada., entra las fallas más comunes pueden ser: la rotura en cuña, la rotura planta (Gonzales de Vallejo et al, 2002).

#### 9.2.2 Erosión de la base de la presa

El flujo de agua a través de la roca subyacente puede provocar erosión en la base de la presa, lo que compromete su estabilidad.

#### 9.2.2.1 Control de la erosión en la base de una presa cimentada en roca

El control de la erosión en la base de una presa cimentada en roca es necesario para garantizar la estabilidad de la estructura, puesto que puede comprometer su integridad y provocar problemas de filtración, socavación y eventual colapso, es así, que podemos detallar algunas medidas para controlar esta problemática:

• Revestimiento de la base: Aplicar revestimientos protectores en la base de la presa para reducir la erosión causada por el flujo de agua, la abrasión y otros procesos

erosivos, este trabajo puede incluir concreto proyectado, geomembranas, geotextiles u otros materiales impermeables y resistentes a la erosión (Calero, 2019).

- Drenaje adecuado: Implementar sistemas de drenaje efectivos para desviar el agua de la base de la presa, evitando la acumulación de presión hidrostática y reduciendo el riesgo de erosión (Sandoval,2019).
- Control de caudales: Regular el flujo de agua liberado desde la presa mediante compuertas de descarga y vertederos para evitar sobrecargas hidráulicas en la base que puedan provocar erosión (Calero, 2019).
- Monitoreo geotécnico: Establecer programas de monitoreo geotécnico para detectar signos de erosión en la base de la presa, utilizando instrumentación como piezómetros, inclinómetros y extensómetros para evaluar cambios en las condiciones del suelo y la roca.
- Mantenimiento preventivo: Realizar inspecciones periódicas y labores de mantenimiento preventivo para identificar y corregir posibles áreas de erosión en la presa antes de que se conviertan en problemas graves.
- Restauración de erosión: En caso de detectarse erosión en la base de la presa, se debe de llevar a cabo trabajos de restauración y refuerzo utilizando técnicas de inyección de materiales, anclajes o estructuras de protección adicionales.

## 9.2.3 Presión hidrostática

La acumulación de agua detrás de la presa ejerce una presión significativa sobre la roca subyacente, lo que puede aumentar el riesgo de deslizamientos o deformaciones.

## 9.2.4 Sismicidad

En áreas sísmicamente activas, la interacción entre la presa, la roca y los movimientos sísmicos puede representar un riesgo importante para la integridad de la estructura.

## 9.2.5 Deslizamientos de rocas

La presencia de rocas sueltas o inestables en las laderas adyacentes a la presa puede representar un riesgo de deslizamientos que afecten la estabilidad de la presa.

#### Figura 35.

Procesos de deterioro en macizos rocosos



Nota. Adaptado de Nicholson y Hencher, (1997)

## 9.2.6 Permeabilidad de la roca

Si la roca subyacente es altamente permeable, existe el riesgo de que el agua pueda filtrarse a través de ella, socavando el macizo rocoso de cimentación que afecta a la integridad de la presa. No existen macizos rocosos teóricamente impermeables, por otro lado, es bien conocido, que la permeabilidad en un macizo rocoso se produce tanto a través de la roca matriz, como a través de las discontinuidades que presente.

#### 9.2.6.1 Control de la permeabilidad de la roca en presas cimentadas en roca

El control de la permeabilidad de la roca en presas cimentadas en roca ayuda a garantizar la estabilidad y seguridad de la presa, si no se realiza este proceso, puede generar una problemática que afecta directamente a la capacidad de retención de agua de la presa y su resistencia a largo plazo. Algunas medidas indicadas por Iván Calero. I (2019), para controlar la permeabilidad de la roca en presas cimentadas en roca incluyen:

- Investigación geológica detallada: Realizar estudios geológicos exhaustivos para comprender la naturaleza y las características de la roca subyacente, incluyendo su permeabilidad natural, fracturación y posibles zonas de debilidad.
- Inyección de consolidación: Utilizar técnicas de inyección de materiales consolidantes para reducir la permeabilidad de las zonas rocosas fracturadas, rellenando los espacios vacíos y fortaleciendo la roca.
- Sellado de fracturas: Identificar y sellar las fracturas y discontinuidades de la roca mediante el uso de materiales sellantes o resinas epoxi para minimizar la infiltración de agua a través de la roca.
- Drenaje de aguas subterráneas: Implementar sistemas de drenaje para controlar las el nivel freático que pueda aumentar la presión hidrostática y la permeabilidad de la roca.
- Revestimiento de la presa: Aplicar revestimientos impermeables en la estructura de la presa para reducir la filtración de agua a través de la roca subyacente.

- Monitoreo continuo: Establecer programas de monitoreo continuo de la permeabilidad de la roca, utilizando instrumentación geotécnica para detectar cambios en la permeabilidad y tomar medidas correctivas de manera oportuna.
- El control efectivo de la permeabilidad de la roca en presas cimentadas en roca es esencial para prevenir problemas de filtración, erosión interna y pérdida de estabilidad, contribuyendo a la seguridad y fiabilidad a largo plazo de la presa.

## 9.2.7 Control de la subpresión durante la operación de la presa

Durante la operación de una presa, se debe implementar un adecuado control de la subpresión para garantizar la seguridad de la estructura y el entorno circundante.

Para reducir la fuerza de subpresión, se realizan algunas obras en la cimentación, como las inyecciones de lechada de cemento en la base de la cara de aguas arriba de la presa, así como también drenes y galerías, para poder conocer sus dimensiones de construcción se debe revisar el capítulo 6.3.

#### Figura 36.





#### Nota. Adaptado de Sandoval, (2019). Elaborado por: La Autora.

El control de la subpresión implica la gestión del exceso de agua y la liberación controlada de caudales para prevenir desbordamientos y minimizar el riesgo de daños aguas abajo. Según Ivan Calero. I (2019) algunas medidas clave para el control de la supresión durante la operación de la presa incluyen:

- Utilización de vertederos o aliviaderos para liberar caudales de agua excedentes de manera controlada, evitando así que el nivel del embalse supere niveles críticos.
- Instalación de compuertas o válvulas de descarga para regular el flujo de agua liberado desde el embalse, permitiendo ajustes precisos de acuerdo a las condiciones hidrológicas.
- Implementación de sistemas de monitoreo hidrológico para evaluar de forma continua el nivel del embalse, las precipitaciones, el caudal de entrada y salida, y otros parámetros relevantes.
- Elaboración de un plan de operación detallado que establezca los procedimientos para el control de la subpresión en diferentes escenarios, considerando condiciones climáticas, estacionales y de emergencia.
- Establecer protocolos de comunicación y sistemas de alerta temprana para informar a las comunidades aguas abajo sobre cambios en el caudal del río y posibles riesgos.

El control eficaz de la subpresión durante la operación de la presa es esencial para mitigar riesgos asociados a desbordamientos, proteger la vida humana y la propiedad, así también preservar la integridad de la infraestructura de la presa

#### 9.3 Criterios de operación

Los criterios de operación buscan preservar la integridad de la presa, garantizar la seguridad de las comunidades aguas abajo y optimizar el aprovechamiento de los recursos

hídricos, contribuyendo un funcionamiento eficiente y sostenible de las presas cimentadas en roca.

## 9.3.1 Niveles de embalse

Es importante establecer los niveles de operación del embalse que garanticen la seguridad de la presa y el óptimo aprovechamiento de los recursos hídricos. Esto implica definir los niveles máximos y mínimos de almacenamiento, así como los caudales de descarga controlada. (Calero. I, 2019)

#### 9.3.2 Monitoreo geotécnico

Implementación de programas de monitoreo geotécnico para evaluar la presión de poros, la deformación de la roca y otros parámetros que puedan afectar la estabilidad de la presa.

#### 9.3.3 Inspecciones regulares

Realización de inspecciones periódicas para detectar posibles problemas en la presa, como erosión, filtraciones, deslizamientos de roca, entre otros.

#### 9.3.4 Operación de compuertas

Establecimiento de procedimientos claros y protocolos de operación para las compuertas de la presa, asegurando que el flujo de agua se maneje de manera segura y eficiente.

#### 9.3.5 Mantenimiento preventivo

Implementación de programas de mantenimiento preventivo para garantizar que la presa y sus componentes se encuentren en óptimas condiciones de funcionamiento.

# 9.3.6 Contingencias y emergencias

Desarrollo de planes de contingencia y respuesta ante posibles situaciones de emergencia, incluyendo protocolos de evacuación, operación de sistemas de alivio de presión, entre otros.

#### CONCLUSIONES

En el presente proyecto se han logrado establecer clasificaciones basadas en diversos indicadores geo-mecánicos del macizo rocoso. Para el proceso de cálculo, nos hemos centrado exclusivamente en dos parámetros clave: el índice de calidad de roca (RQD) y la discontinuidad de calidad de roca (RMR). Estos parámetros nos brindan la capacidad de distinguir de manera clara y precisa entre rocas de calidad excelente, regular o deficiente. A partir del compendio sobre el tipo de macizos rocosos existentes en la zona interandina del Ecuador se ha establecido que las rocas de excelente calidad pueden ser catalogadas como andesíticas y cuarcitas, la roca regular como esquistos o pizarras y la muy mala como tobas; como se indica en la siguiente tabla a través de una relación de la resistencia a la compresión axial.

#### Tabla 57.

Denominación %RQD	Resistencia a la compresión uniaxial	Tipo de roca		
Muy mala	1 - 25	Tobas		
Mala	25 - 50	Lutitas - tobas		
Regular	50 - 100	Esquistos- Pizarras		
Buena	100 - 250	Cuarcitas		
Excelente	> 250	Lavas andesíticas – Cuarcitas		

Clasificación del macizo rocoso en la región sierra del Ecuador

Elaborado por: La Autora (2024).

Se han definido cuatro alturas distintas para las presas, abarcando un rango de 30 a 80 metros, en función de esto se concluye que estas presas se clasifican como de mediana y gran altura. Las alturas seleccionadas son 30, 50, 65 y 80 metros, y cada una de ellas ha sido objeto de estudio y cálculo considerando tres calidades de macizos de cimentación: excelente, regular y mala. Este enfoque ha resultado en la identificación de 12 escenarios únicos de estudio. Es importante destacar que las rocas de calidad "excelente" reciben un esfuerzo máximo de la presa con valores comprendidos entre 50.74-134.98 ton/m2. En el caso de las rocas de calidad regular, se registran esfuerzos máximos provenientes de la presa en el rango de 52.11-135.05

ton/m2. Por último, las rocas de calidad "muy mala" son las que soportan mayores esfuerzos de la presa, con valores que oscilan entre 54.03-137.63ton/m2

En algunos casos la estabilidad al deslizamiento de la presa, los valores no cumplen con las condiciones de diseño, por lo que se recomienda realizar dentellones en el paramento aguas arriba, también, se pueden construir plataformas a diferentes niveles en la base de la presa para poder garantizar la estabilidad de la misma y evitar un sobredimensionamiento y un efecto contrastante sobre el costo de la construcción.

A partir de la ecuación que nos permite obtener la capacidad de carga admisible del macizo rocoso en función del parámetro RQD, se deduce que sería necesario considerar estratos de roca diversos para obtener valores variables. Sin embargo, en el caso de estudio que contempla tres categorías de calidad de roca definidas, los resultados obtenidos no varían en ninguna altura de presa. Por otro lado, este método no posee una completa referencia sobre los factores de seguridad a ocupar, por lo que los valores obtenidos son muy conservadores, se concluye que es necesario realizar un análisis diferente ocupando otro parámetro.

La determinación de la carga admisible en función del parámetro RMR, arroja resultados más precisos, convirtiéndola en una herramienta más práctica para cimentaciones en macizos rocosos. Esta ecuación considera datos que varían por las clases de roca existentes en cada categoría del parámetro RMR, lo que posibilita una diferenciación más precisa y conclusiones específicas para cada altura determinada de presa y su respectiva calidad de cimentación rocosa, mientras que el factor de seguridad considera la incertidumbre en las fracturas y por ende posee valores muy altos los cuales deberían ser cuidadosamente aplicados e investigados para ser utilizados.

Como conclusión primordial y dando como resultado el objetivo de investigación se obtienen para las diferentes alturas de presa los siguientes resultados significativos:

#### 1. Presa de 30 metros de altura

**Calidad de Roca Excelente:** El esfuerzo máximo aplicado en la base de la cimentación rocosa de calidad excelente es de 50.74 ton/m2. La capacidad de carga admisible (RQD) para lavas andesíticas es de 13766,17 ton/m2, en pizarras y esquistos de 3854.53 ton/m2 y finalmente en tobas de 550.65 ton/m2, y el esfuerzo admisible a través de la correlación del parámetro RMR, para Lavas andesíticas o cuarcitas: 1148.9 ton/m2, Pizarras-Esquistos: 413.6 ton/m2y para Tobas: 853.1 ton/m2. Por lo tanto, se concluye que la calidad de roca excelente puede soportar una presa de 30 metros de hormigón a gravedad sin la necesidad de realizar extensos trabajos de mejora en el macizo rocoso.

**Calidad de Roca Regular**: El esfuerzo máximo aplicado en la base de la cimentación rocosa de calidad regular es de 52.11 ton/m2. La capacidad de carga admisible (RQD) para lavas andesíticas es de 6118.3 ton/m2, en pizarras y esquistos de 1713.12 ton/m2 y finalmente en tobas de 244.73 ton/m2, y el esfuerzo admisible a través de la correlación del parámetro RMR, para Lavas andesíticas o cuarcitas: 327.7 ton/m2, Pizarras-Esquistos: 202.8 ton/m2y para Tobas: 357.4 ton/m2. Como resultado, se concluye la calidad de roca regular puede soportar una presa de 30 metros de hormigón a gravedad sin la necesidad de realizar extensos trabajos de mejora en el macizo rocoso.

**Calidad de Roca Muy Mala**: El esfuerzo máximo aplicado en la base de la cimentación rocosa de calidad muy mala es de 54.03 ton/m2 La capacidad de carga admisible (RQD) para lavas andesíticas es de 679.81 ton/m2, en pizarras y esquistos de 190.35 ton/m2 y finalmente en tobas de 27.19 ton/m2, y el esfuerzo admisible a través de la correlación del parámetro RMR, para Lavas andesíticas o cuarcitas: 153.8 ton/m2, Pizarras-Esquistos: 95.1 ton/m2y para Tobas: 254.1 ton/m2. En consecuencia, se concluye que la calidad de roca muy mala puede soportar

una presa de 30 metros de hormigón a gravedad sin la necesidad de realizar extensos trabajos de mejora en el macizo rocoso.

## 2. Presa de 50 metros de altura

**Calidad de Roca Excelente:** El esfuerzo máximo aplicado en la base de la cimentación rocosa de calidad excelente es de 86.01 ton/m2. La capacidad de carga admisible (RQD) para lavas andesíticas es de 13766,17 ton/m2, en pizarras y esquistos de 3854.53 ton/m2 y finalmente en tobas de 550.65 ton/m2, y el esfuerzo admisible a través de la correlación del parámetro RMR, para Lavas andesíticas o cuarcitas: 1148.9 ton/m2, Pizarras-Esquistos: 413.6 ton/m2y para Tobas: 853.1 ton/m2. Por lo tanto, se concluye que la calidad de roca excelente puede soportar una presa de 50 metros de hormigón a gravedad sin la necesidad de realizar extensos trabajos de mejora en el macizo rocoso.

**Calidad de Roca Regular**: El esfuerzo máximo aplicado en la base de la cimentación rocosa de calidad regular es de 88.26 ton/m2. La capacidad de carga admisible (RQD) para lavas andesíticas es de 6118.3 ton/m2, en pizarras y esquistos de 1713.12 ton/m2 y finalmente en tobas de 244.73 ton/m2, y el esfuerzo admisible a través de la correlación del parámetro RMR, para Lavas andesíticas o cuarcitas: 327.7 ton/m2, Pizarras-Esquistos: 202.8 ton/m2y para Tobas: 357.4 ton/m2. Como resultado, se concluye la calidad de roca regular puede soportar una presa de 50 metros de hormigón a gravedad sin la necesidad de realizar extensos trabajos de mejora en el macizo rocoso.

**Calidad de Roca Muy Mala**: El esfuerzo máximo aplicado en la base de la cimentación rocosa de calidad muy mala es de 90.25 ton/m2. La capacidad de carga admisible (RQD) para lavas andesíticas es de 679.81 ton/m2, en pizarras y esquistos de 190.35 ton/m2 y finalmente en tobas de 27.19 ton/m2, y el esfuerzo admisible a través de la correlación del parámetro RMR, para Lavas andesíticas o cuarcitas: 153.8 ton/m2, Pizarras-Esquistos: 95.1 ton/m2y para Tobas:

254.1 ton/m2. En consecuencia, se concluye que la calidad de roca muy mala de tipo Toba no puede sostener una presa de 50 metros de hormigón a gravedad. Es imperativo retirar esta calidad de roca y reemplazarla con una roca de mayor calidad, dado que este tipo de roca se asemeja más a una arena o arcilla muy dura, siendo inapropiada para soportar cargas significativas y potencialmente peligrosa si no se trata o mejora adecuadamente. Consultar las recomendaciones detalladas en el capítulo 9 para abordar esta situación.

#### 3. Presa de 65 metros de altura

**Calidad de Roca Excelente:** El esfuerzo máximo aplicado en la base de la cimentación rocosa de calidad excelente es de 113.51 ton/m2. La capacidad de carga admisible (RQD) para lavas andesíticas es de 13766,17 ton/m2, en pizarras y esquistos de 3854.53 ton/m2 y finalmente en tobas de 550.65 ton/m2, y el esfuerzo admisible a través de la correlación del parámetro RMR, para Lavas andesíticas o cuarcitas: 1148.9 ton/m2, Pizarras-Esquistos: 413.6 ton/m2y para Tobas: 853.1 ton/m2. Por lo tanto, se concluye que la calidad de roca excelente puede soportar una presa de 65 metros de hormigón a gravedad sin la necesidad de realizar extensos trabajos de mejora en el macizo rocoso.

**Calidad de Roca Regular**: El esfuerzo máximo aplicado en la base de la cimentación rocosa de calidad regular es de 115.4 ton/m2. La capacidad de carga admisible (RQD) para lavas andesíticas es de 6118.3 ton/m2, en pizarras y esquistos de 1713.12 ton/m2 y finalmente en tobas de 244.73 ton/m2, y el esfuerzo admisible a través de la correlación del parámetro RMR, para Lavas andesíticas o cuarcitas: 327.7 ton/m2, Pizarras-Esquistos: 202.8 ton/m2y para Tobas: 357.4 ton/m2. Como resultado, se concluye la calidad de roca regular puede soportar una presa de 65 metros de hormigón a gravedad sin la necesidad de realizar extensos trabajos de mejora en el macizo rocoso.

**Calidad de Roca Muy Mala**: El esfuerzo máximo aplicado en la base de la cimentación rocosa de calidad muy mala es de 117.8 ton/m2. La capacidad de carga admisible (RQD) para lavas andesíticas es de 679.81 ton/m2, en pizarras y esquistos de 190.35 ton/m2 y finalmente en tobas de 27.19 ton/m2, y el esfuerzo admisible a través de la correlación del parámetro RMR, para Lavas andesíticas o cuarcitas: 153.8 ton/m2, Pizarras-Esquistos: 95.1 ton/m2y para Tobas: 254.1 ton/m2. En consecuencia, se concluye que la calidad de roca regular como pizarras o esquistos no pueden sostener una presa de 65 metros de hormigón a gravedad. Es imperativo retirar esta calidad de roca y reemplazarla con una roca de mayor calidad, dado que este tipo de roca se asemeja más a una arena o arcilla muy dura, siendo inapropiada para soportar cargas significativas y potencialmente peligrosa si no se trata o mejora adecuadamente. Consultar las recomendaciones detalladas en el capítulo 9 para abordar esta situación

#### 4. Presa de 80 metros de altura

**Calidad de Roca Excelente:** El esfuerzo máximo aplicado en la base de la cimentación rocosa de calidad excelente es de 134.98 ton/m2. La capacidad de carga admisible (RQD) para lavas andesíticas es de 13766,17 ton/m2, en pizarras y esquistos de 3854.53 ton/m2 y finalmente en tobas de 550.65 ton/m2, y el esfuerzo admisible a través de la correlación del parámetro RMR, para Lavas andesíticas o cuarcitas: 1148.9 ton/m2, Pizarras-Esquistos: 413.6 ton/m2y para Tobas: 853.1 ton/m2. Por lo tanto, se concluye que la calidad de roca excelente puede soportar una presa de 80 metros de hormigón a gravedad sin la necesidad de realizar extensos trabajos de mejora en el macizo rocoso

**Calidad de Roca Regular**: El esfuerzo máximo aplicado en la base de la cimentación rocosa de calidad regular es de 135.05 ton/m2. La capacidad de carga admisible (RQD) para lavas andesíticas es de 6118.3 ton/m2, en pizarras y esquistos de 1713.12 ton/m2 y finalmente en tobas de 244.73 ton/m2, y el esfuerzo admisible a través de la correlación del parámetro RMR, para Lavas andesíticas o cuarcitas: 327.7 ton/m2, Pizarras-Esquistos: 202.8 ton/m2y para

Tobas: 357.4 ton/m2. Como resultado, se concluye la calidad de roca regular puede soportar una presa de 80 metros de hormigón a gravedad sin la necesidad de realizar extensos trabajos de mejora en el macizo rocoso.

**Calidad de Roca Muy Mala**: El esfuerzo máximo aplicado en la base de la cimentación rocosa de calidad muy mala es de 137.63 ton/m2. La capacidad de carga admisible (RQD) para lavas andesíticas es de 679.81 ton/m2, en pizarras y esquistos de 190.35 ton/m2 y finalmente en tobas de 27.19 ton/m2, y el esfuerzo admisible a través de la correlación del parámetro RMR, para Lavas andesíticas o cuarcitas: 153.8 ton/m2, Pizarras-Esquistos: 95.1 ton/m2y para Tobas: 254.1 ton/m2. En consecuencia, se concluye que la calidad de roca regular o muy mala como tobas, pizarras o esquistos no pueden sostener una presa de 80 metros de hormigón a gravedad. Es imperativo retirar esta calidad de roca y reemplazarla con una roca de mayor calidad, dado que este tipo de roca se asemeja más a una arena o arcilla muy dura, siendo inapropiada para soportar cargas significativas y potencialmente peligrosa si no se trata o mejora adecuadamente. Consultar las recomendaciones detalladas en el capítulo 9 para abordar esta situación.

Para poder observar de mejor manera los resultados se puede visualizar una tabla de resumen a continuación:

# Tabla 58.

Altura de la presa		30 m		65 m						
Calidad de la roca	Excelente	Regular	Muy Mala	Excelente	Regular	Muy Mala				
Esfuerzo máximo aplicado (ton/m2)	50.74	52.11	54.03	113.51	115.42	117.82				
	Esfuerzo admisible RQD (ton/m2)									
Lavas andesíticas- cuarcitas (ton/m2)	13766.17	6118.30	679.81	13766.17	6118.30	679.81				
Pizarras- Esquistos(ton/m2)	3854.53	1713.12	190.35	3854.53	1713.12	190.35				
Tobas (ton/m2)	550.65	244.73	27.19	550.65	244.73	27.19				
	Esfuerzo	admisible l	RMR (ton	/m2)						
Lavas andesíticas- cuarcitas (ton/m2)	1148.90	327.7	153.8	1148.90	327.7	153.8				
Pizarras- Esquistos(ton/m2)	413.6	202.8	95.1	413.6	202.8	95.1				
Tobas (ton/m2)	853.1	357.4	254.1	853.1	357.4	254.1				
Altura de la presa		50 m			80 m					
Calidad de la roca	Excelente	Regular	Muy Mala	Excelente	Regular	Muy Mala				
Esfuerzo máximo aplicado (MPa)	86.01	88.26	90.25	134.98	135.05	137.63				
	Esfuerzo	admisible	RQD (ton/	/m2)						
Lavas andesíticas- cuarcitas (ton/m2)	13766.17	6118.30	679.81	13766.17	6118.30	679.81				
Pizarras- Esquistos(ton/m2)	3854.53	1713.12	190.35	3854.53	1713.12	190.35				
Tobas (ton/m2)	550.65	244.73	27.19	550.65	244.73	27.19				
	Esfuerzo admisible RMR (ton/m2)									
Lavas andesíticas- cuarcitas (ton/m2)	1148.90	327.7	153.8	1148.90	327.7	153.8				
Pizarras- Esquistos(ton/m2)	413.6	202.8	95.1	413.6	202.8	95.1				
Tobas (ton/m2)	853.1	357.4	254.1	853.1	357.4	254.1				

Comparación de valores obtenidos de esfuerzo admisible para RQD y RMR

Elaborado por: La Autora (2024)

En el capítulo 9 se han establecido una serie de recomendaciones para la construcción y operación de presas de hormigón a gravedad, agregando una serie de lineamientos básicos que se deben tomar en cuenta al momento de diseñar y construir este tipo de presas.

#### RECOMENDACIONES

La clasificación RMR (Rock Mass Rating) es un sistema ampliamente utilizado para evaluar la calidad y la capacidad de soporte de una masa rocosa. Esta clasificación tiene en cuenta varios parámetros geológicos y geotécnicos para determinar la calidad de la roca. Es importante tener en cuenta que estos valores pueden variar dependiendo del contexto específico del proyecto, y es esencial realizar evaluaciones geotécnicas detalladas para determinar los esfuerzos admisibles con mayor precisión, por otro lado, este método trabaja con factores de seguridad muy conservadores y de muy alto valor por lo que, se recomienda realizar estudios más exhaustivos para conocer valores de seguridad más cercanos a la realidad.

Al aplicar el RQD (Rock Quality Designation) en la evaluación de rocas, es importante seguir ciertas recomendaciones para obtener resultados precisos y significativos; los testigos deben obtenerse de forma adecuada y cuidadosa para evitar la contaminación de los núcleos de roca.

Durante el análisis del factor de seguridad al volcamiento, se observó que en varios de los casos de análisis no se cumplió con este parámetro por lo que, si una presa no cumple con el factor de seguridad al volcamiento, es importante abordar esta situación de manera urgente para garantizar la seguridad de la estructura y prevenir posibles riesgos. Algunas medidas que podrían considerarse incluyen:

• Refuerzo de la estructura: Dependiendo de los resultados de la evaluación, puede ser necesario implementar medidas de refuerzo en la presa, como la adición de contrafuertes, anclajes, refuerzos de hormigón o cualquier otra solución que mejore la estabilidad y aumente el factor de seguridad al volcamiento.

• Restricción de carga: En algunos casos, puede ser necesario restringir la carga sobre la presa mientras se implementan las medidas de refuerzo necesarias. Esto podría implicar

154

la reducción del nivel de embalse o la implementación de restricciones en la operación de la presa.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Agudelo, D. (2012). Influencia de los procesos de meteorización en la estructura del suelo y la estabilidad de taludes [Tesis de Grado, Pontificia Universidad Javeriana]. https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/11109
- Almeida, D., y Escobar, k. (2021). Análisis de la estabilidad al deslizamiento profundo de las presas de hormigón a gravedad cimentadas en suelo, en los sistemas fluviales de derivación, [Tesis de Grado, Universidad Politécnica Salesiana]. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19868
- Arreguín, F. (2021). Obras Hidráulicas. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México
- Ayala, F., Rodríguez, J., y González de Vallejo, L. (2000). *Manual de Ingeniería Geológica*.Ministerio de Industria y Energía.
- Baldock, J. (1982). Mapa Geológico Nacional de la República del Ecuador. Quito: Institute of Geological Sciences (NERC).
- Bazán, O., Falconi, A., Herrera, A., Spelucín, J., Torres, D., y Tuesta, J. (2012). Caracterización del Macizo Rocoso. Universidad Nacional de Cajamarca.

Benavente, D., Bernabéu, A., y Cañaveras, J. (2014). Study of physical properties of the rocks.

Buik, J., Cajete, J., Diaz - Caneja, J., Gil, A., Giron, F., y Penas, J. (2005). *Guías técnicas de seguridad de presas*. Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos.

- Calero. I, I. (2019). Hidráulica Apuntes de clase. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Carillo, M., y Zúñiga, H. (2002). Clasificación geomecánica y análisis de estabilidad de taludes del macizo rocoso coris. Universidad de Costa Rica.
- Charles, A., Paul, T., y Warren, A. (2011). *Delivering benefits through evidence*. Bristol: Environment Agency, Horizon House, Deanery Road.
- Das, B. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica. 2015: Cengage Learning Editores, S.A.

Dasel, E Hallmark (1978). Presas pequeñas de concreto. Mexico

Enciclopedia Geológica (Vol. 17). (1954). Madrid: Salvat Editores.

- *Espinoza, D., y Maraboto, L.* (2005). *Funciones de confiabilidad y desempeño sísmico de cortinas de concreto*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Estaire, J. (2019). Cálculos de estabilidad de presas con efecto sísmico. Laboratorio de Geotecnia-CEDEX
- Galván, M., y Restrepo, I. (2015). *Resistance correlation with compression uniaxial effective humidit Redalyc. Correlación de la resistencia a compresión uniaxial con la humedad y porosidad eficaz en rocas.*
- Gamiño, J. (1986). Descripción, Clasificación y Propiedad ingenieriles de las Rocas, [Tesis de Grado, Universidad Nacional Autónoma de México].
   http://132.248.9.195/pmig2018/0027765/0027765.pdf
- Gaona, C., y Rodríguez, E. (2019). *Equipos para ensayos de "TIlt Test" y "Carga Puntual* [*Tesis de Grado*, Universidad Santo Tomas]. https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/20061/2019cesargaona.pdf?sequ ence=1
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Guamán, V., y Mendieta, F. (2013). Evaluación Geomecánica del Macizo rocoso en la cantera de materiales de construcción "Las Victorias" [Tesis de Grado, Universidad de Cuenca]. http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/4312/3/Tesina.pdf
- Hudson, J., y Harrison, J. (1997). Engineering Rock Mechanics. Pergamon.
- Hughes, R., Bermúdez, R., y Espinel, G. (1998). *Mapa Geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 0° 1° S*. Quito: Instituto Geográfico Militar del Ecuador.
- INAMHI. (2017). Anuario Meteorológico N°53-2013. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, p. 165.
- Jaeger, C. (1979). Rock Mechanics and Engineering. Cambridge University Press.
- Jiménez, J. (2000). Introducción. En F. Ayala, *Manual de Ingeniería Geológica* (pp. 5-10). Instituto Tecnológico Geominero de España.

- Luca, R. (2012). Procesos de oxidación química y bioquímica en rocas sulfuro mineralizadas y relación con la generación de iones libres y gases de hidrocarburos: Aplicación a la exploración de yacimientos bajo cobertura, [Tesis de Doctorado, Universidad de Chile]. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112260
- Lyapichev, Y. (2012). *Diseño de presas en regiones sísmica*. Universidad Agraria La Molina (UNALM).
- Mena, U., y Pérez, L. (2015). Espectros de diseño sísmico para el territorio mexicano. México, D.F. Comisión federal de electricidad.
- Mena, U., y Pérez, L. (2008). Manual de diseño de obras civiles. México, D.F. Comisión federal de electricidad.
- Molina, P. (2020). Análisis de la estabilidad de presas a gravedad en condiciones de incertidumbre. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Muller, L. (1972). Rock Mechanics. Springer-Verlag Wien.
- Muñiz, M. (2016). *Correlaciones para la estimación del módulo de deformación en macizos rocosos*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- Pedroza, G. (1988). *Compendio de problemas relativos a la Mecánica de Rocas*/. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pérez, B. (2009). Análisis de riesgo y confiabilidad en presas de tierra: un caso en el estado México [Tesis de Grado, Universidad Autónoma del Estado de México]. http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/64549/TesisBenjaminPerezFV.pdf ?seque

P.Novak el al (2007) Hidraulic Structure. United States.

https://www.khuisf.ac.ir/Dorsapax/Data/Sub\_118/File/Hydraulic%20Structures\_4th% 20edition\_.pdf

Ramírez, P., y Alejandro, L. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Universidad Politécnica de Madrid.

Ramírez, R. (2023). Visita técnica al proyecto Mazar - Pauta 2018. (S. Padilla, Entrevistador)

- Rodríguez, E. (2012). *Metodologías para el diseño de cimentaciones en Roca [Tesis de Grado,* Universidad de Costa Rica]. http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4114/34250. pdf?sequence=1
- Rodríguez, j. (2007). *Caracterización de Macizos Rocosos*. Ingeniería geológica: Caracterización de macizos rocosos.
- Romana, M. (2011). Cimentaciones de presas de gravedad: requisitos geo-mecánicos. *Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil* (3527), 25-36.
- Sandoval, W. (2018). Presas de hormigón a gravedad en roca. En W. Sandoval, *Presas de hormigón a Gravedad* (pp. 71-121). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Segui, P. (2023). *Cómo evaluar y revisar daños en casas y estructuras tras un sismo*. Ovacen: https://ovacen.com/evaluar-danos-casas-estructuras-sismo/
- Vanegas, C. (2010). Estudio sobre criterios de rotura mediante métodos tenso deformacionales y métodos de equilibrio límite para un macizo rocoso con aplicación al talud izquierdo del cuenco disipador del proyecto hidroeléctrico Mazar [Tesis de Posgrado, Universidad de Cuenca].
  http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/2577/1/tm4329.pdf

Walter, A. (2015).Caracterización del macizo rocoso del condominio los ingleses e identificación de las propiedades físico mecánicas de las rocas a fin de determinar el limite del método de explotación de las empresas EMINZA S.A y Tocadulomo ubicado en el sitio Birón de la parroquia Bella María del cantón Santa Rosa de la provincia de El Oro, [Tesis de posgrado, Universidad de Loja] https://alumni.unl.edu.ec/directorio/listar\_carrera/171/L

Zhebgzhou. (2005). *Desing Standard for Concrete Gravity Dams*. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China.

# ANEXOS

Los Anexos se encuentran en formato PDF en un solo archivo que se entregaron en biblioteca

en una carpe