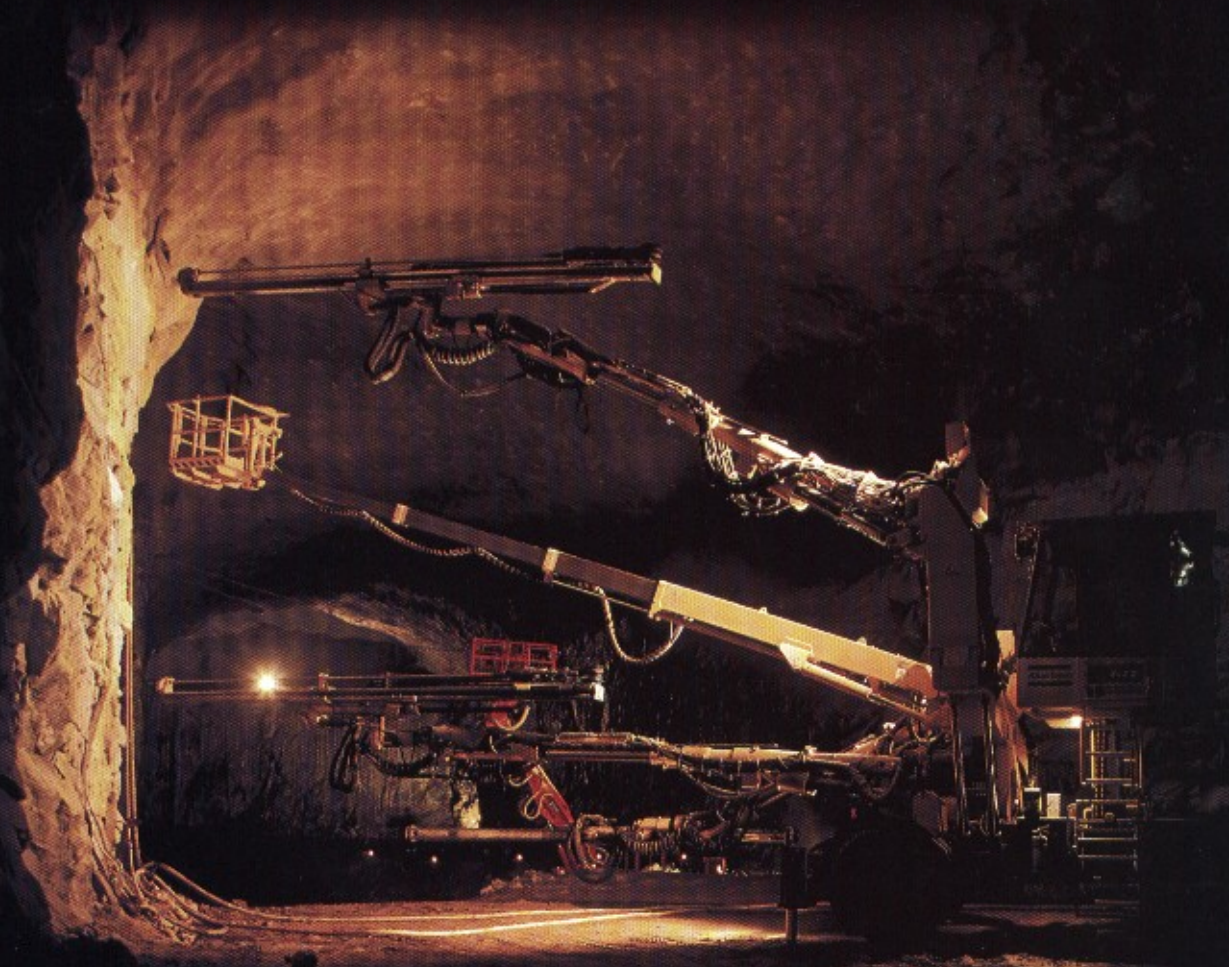


HERNÁN GAVILANES J.  
BYRON ANDRADE HARO



INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA DE

# TÚNELES

CARACTERIZACIÓN, CLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS  
GEOMECÁNICO DE MACIZOS ROCOSOS

<b>Título:</b>	<b><i>INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA DE TÚNELES</i></b>
<b>Clasificación bibliográfica</b>	Ingeniería, Geotecnia y Geomecánica
<b>Resumen</b>	<p>Este texto le ofrece al lector los conceptos básicos a ser considerados cuando se diseñan túneles y labores subterráneas, ya sea en obras civiles, como en minería. Los temas abordados en el título de esta publicación son presentados de manera sucesiva y ordenada para facilitar su comprensión. La temática planteada parte del conocimiento geológico empleado en la caracterización de macizos rocosos, revisa los principales sistemas de clasificación geomecánica y proporciona principios básicos y actualizados para comprender el comportamiento geomecánico del macizo rocoso frente a procesos de construcción.</p> <p>Esta publicación está recomendada a estudiantes y profesionales en Geología, Ingeniería de Minas, Ingeniería Civil e Ingeniería Mecánica que deseen afianzar, actualizar e incrementar sus conocimientos en temas relacionados con la Ingeniería de Túneles.</p>
<b>Edición</b>	<a href="#"><u>Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador (AIME)</u></a>
<b>Fecha de publicación</b>	Tercera reimpresión, 2007
<b>Autores</b>	<a href="#"><u>Hernán Gavilanes Jiménez</u></a> Byron Andrade Haro
<b>Páginas</b>	340 (A4) <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Introducción</li> <li>▪ Caracterización de macizos rocosos</li> <li>▪ Clasificaciones Geomecánicas</li> <li>▪ Análisis de tensiones</li> <li>▪ Deformación y relaciones tenso-deformacionales</li> <li>▪ Estado de tensión de los macizos rocosos</li> <li>▪ Resistencia de los macizos rocosos</li> <li>▪ Principios del diseño de excavaciones subterráneas</li> <li>▪ Nociones del dimensionamiento del sostenimiento en roca</li> <li>▪ Nociones de los métodos numéricos empleados en Geomecánica</li> </ul>
<b>Información y ventas</b>	<a href="mailto:publiaime@yahoo.com"><u>publiaime@yahoo.com</u></a> Venta directa en Ecuador, Perú y Chile

---

---

# CONTENIDO

---

---

## Capítulo 1 **INTRODUCCIÓN**

1.1	MODELO GEOLÓGICO.....	15
1.2	MODELO GEOMECÁNICO.....	17
1.3	MODELO NUMÉRICO.....	17
1.4	CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS GEOMECÁNICO DE MACIZOS ROCOSOS EN LA INGENIERÍA DE TÚNELES.....	17
1.5	ORGANIZACIÓN Y ALCANCE DE ESTA PUBLICACIÓN.....	18

## I PARTE (CARACTERIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN)

*Autor: Byron Andrade Haro*

## Capítulo 2 **CARACTERIZACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS**

2.1	INTRODUCCIÓN.....	21
2.2	DEFINICIÓN DE ROCA Y SU CLASIFICACIÓN.....	21
2.2.1	Clasificación por el origen o génesis.....	23
2.2.1.1	Rocas ígneas.....	23
2.2.1.2	Rocas sedimentarias.....	24
2.2.1.3	Rocas metamórficas.....	25
2.2.2	Clasificación geológica o litológica.....	25
2.2.3	Clasificación ingenieril.....	30
2.3	EL MACIZO ROCOSO COMO MATERIAL INGENIERIL.....	30
2.4	TERMINOLOGÍA.....	32
2.4.1	Discontinuidades.....	32
2.4.2	Fracturas.....	32
2.4.3	Diaclasas.....	32
2.4.4	Fallas.....	33
2.4.5	Grietas.....	33
2.4.6	Fisuras.....	33
2.4.7	Estratificación.....	33
2.4.8	Foliación o esquistosidad.....	33
2.4.9	Pizarrosidad.....	34
2.4.10	Zonas de cizalla.....	34
2.4.11	Pliegues.....	34
2.4.12	Dominio estructural y estructura del macizo rocoso.....	34
2.5	CARACTERIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE AFLORAMIENTOS ROCOSOS.....	35
2.5.1	Caracterización de la roca intacta.....	35
2.5.1.1	Mineralogía y litología.....	35
2.5.1.2	Grado de meteorización.....	35
2.5.2	Descripción de las discontinuidades.....	36
2.5.2.1	Orientación.....	36
2.5.2.2	Espaciado.....	37
2.5.2.3	Persistencia.....	38

	2.5.2.4 Rugosidad.....	39
	2.5.2.5 Resistencia de la pared de la discontinuidad.....	43
	2.5.2.6 Abertura.....	44
	2.5.2.7 Relleno.....	45
	2.5.2.8 Flujo.....	47
2.5.3	Caracterización del macizo rocoso.....	48
	2.5.3.1 Grado de meteorización del macizo rocoso.....	48
	2.5.3.2 Número de familias (sets) de discontinuidades.....	48
	2.5.3.3 Tamaño de bloque y grado de fracturación del macizo rocoso.....	49
<b>2.6</b>	<b>CARACTERIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE MACIZOS POR SONDAJES.....</b>	<b>52</b>
	2.6.1 Toma de datos.....	52
	2.6.2 Porcentaje de recuperación.....	52
	2.6.3 Frecuencia de fracturas.....	53
	2.6.4 R.Q.D (Rock Quality Designation).....	53
	2.6.5 Orientación.....	53
	2.6.6 Espaciado.....	54
	2.6.7 Tamaño de las discontinuidades.....	54
	2.6.8 Rugosidad.....	54
	2.6.9 Resistencia de las paredes de la discontinuidad.....	54
	2.6.10 Abertura.....	54
	2.6.11 Relleno.....	55
	2.6.12 Circulación de agua.....	55
	2.6.13 Número de familias.....	55
	2.6.14 Tamaño de los bloques.....	55
<b>2.7</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>55</b>
	2.7.1 Conceptos generales.....	55
	2.7.2 Características y factores geológicos importantes.....	56
	2.7.3 Características hidrológicas de algunos ambientes geológicos.....	56
	2.7.3.1 Rocas ígneas y metamórficas.....	56
	2.7.3.2 Rocas sedimentarias consolidadas.....	57
	2.7.3.3 Rocas volcánicas.....	57
	2.7.3.4 Efecto de fallas y diques.....	57
	2.7.3.5 Rocas sujetas de disolución.....	57
	2.7.3.6 Aguas termales.....	57
	2.7.3.7 Análisis del flujo de agua.....	58
<b>2.8</b>	<b>MÉTODOS GEOFÍSICOS.....</b>	<b>58</b>

## II PARTE (CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA)

*Autor: Byron Andrade Haro*

### **Capítulo 3 CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS**

<b>3.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>63</b>
<b>3.2</b>	<b>CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DEL MACIZO ROCOSO.....</b>	<b>63</b>
<b>3.3</b>	<b>INGENIERÍA DE LA CLASIFICACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS.....</b>	<b>64</b>

<b>3.4</b>	<b>CLASIFICACIONES PRELIMINARES</b> .....	66
3.4.1	Clasificación de Terzaghi.....	66
3.4.2	Clasificación de Lauffer.....	67
3.4.3	Índice de Calidad de la Roca (R.Q.D).....	69
	3.4.3.1 Definición del sistema.....	69
	3.4.3.2 Correlaciones.....	70
	3.4.3.3 Guía de sostenimiento.....	71
<b>3.5</b>	<b>CONCEPTO DE VALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA ROCOSA (RSR)</b> .....	72
3.5.1	Definición del sistema.....	72
3.5.2	Procedimiento de clasificación.....	73
	3.5.2.1 Correlaciones.....	75
	3.5.2.2 Diseño del sostenimiento.....	75
	3.5.2.3 Recomendaciones de sostenimiento.....	76
	3.5.2.4 Ejemplo de cálculo.....	76
<b>3.6</b>	<b>CLASIFICACIÓN DE BIENIAWSKI (RMR)</b> .....	77
3.6.1	Definición del sistema.....	77
3.6.2	Procedimiento de clasificación.....	78
3.6.3	Recomendaciones de sostenimiento.....	82
3.6.4	Correlaciones.....	83
3.6.5	Alcance y limitaciones.....	85
3.6.6	Ejemplo de cálculo.....	86
<b>3.7</b>	<b>ÍNDICE Q</b> .....	87
3.7.1	Definición del sistema.....	87
3.7.2	Procedimiento de clasificación.....	88
3.7.3	Diseño del sostenimiento.....	94
3.7.4	Recomendaciones de sostenimiento.....	95
3.7.5	Correlaciones.....	96
3.7.6	Ejemplo de cálculo.....	96
<b>3.8</b>	<b>COMPARACIÓN ENTRE EL RMR Y EL ÍNDICE Q</b> .....	97
<b>3.9</b>	<b>CLASIFICACIÓN DE LAUBSCHER</b> .....	98
3.9.1	Definición del sistema.....	98
3.9.2	Procedimiento de clasificación.....	99
	3.9.2.1 Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta (IRS).....	99
	3.9.2.2 Espaciado de fracturas y diaclasas (RQD+ JS ó FF).....	100
	3.9.2.3 Comparación de las dos técnicas.....	103
	3.9.2.4 Condición de las diaclasas y presencia del agua (CD).....	103
3.9.3	Valor <i>in situ</i> del Índice RMR <sub>L</sub> .....	104
3.9.4	Ajustes del RMR <sub>L</sub> para calcular el MRMR.....	104
3.9.5	Resistencia del macizo rocoso (RMS).....	105
3.9.6	Resistencia de diseño del macizo rocoso (DRMS).....	105
3.9.7	Recomendaciones de sostenimiento.....	105
3.9.8	Diseño del sostenimiento.....	107
3.9.9	Correlaciones.....	107

3.9.10	Diseño de pilares.....	108
3.9.11	Sistema de explotación relacionado con el MRMR.....	108
3.9.12	Ejemplo de cálculo.....	109
<b>3.10</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	109
3.10.1	Clasificación Geomecánica RMR e Índice Q.....	110
3.10.2	Clasificación de Laubsher.....	110

### **III PARTE (ANÁLISIS GEOMECÁNICO)**

*Autor: Hernán Gavilanes Jiménez*

#### **Capítulo 4 ANÁLISIS DE TENSIONES**

4.1	INTRODUCCIÓN.....	115
4.2	CONCEPTOS BÁSICOS (TENSIÓN, ESTADO Y CAMPO DE TENSIONES).....	115
4.3	TERMINOLOGÍA.....	116
4.4	TENSIONES EN DOS DIMENSIONES.....	118
4.4.1	Tensión normal y cizallante.....	118
4.4.2	Círculo de Mohr.....	120
4.5	TENSIONES EN TRES DIMENSIONES.....	124
4.5.1	Elipsoide de tensiones.....	130

#### **Capítulo 5 DEFORMACIÓN Y RELACIONES TENSO - DEFORMACIONALES**

5.1	INTRODUCCIÓN.....	131
5.2	DEFORMACIONES EN DOS Y TRES DIMENSIONES.....	131
5.2.1	Ecuaciones de deformación.....	132
5.2.2	Deformación volumétrica.....	133
5.3	RELACIONES TENSO – DEFORMACIONALES.....	133
5.3.1	Terminología.....	133
5.3.2	Tensión plana.....	135
5.3.3	Deformación plana.....	136
5.3.4	Tensiones y deformaciones en tres dimensiones.....	137
5.3.5	Requerimientos básicos en la teoría de la elasticidad.....	140

#### **Capítulo 6 ESTADO DE TENSIÓN DE LOS MACIZOS ROCOSOS**

6.1	INTRODUCCIÓN.....	143
6.2	NECESIDAD DEL CONOCIMIENTO DEL CAMPO DE TENSIONES IN SITU.....	143
6.3	TENSIONES NATURALES E INDUCIDAS.....	143
6.3.1	Tensiones naturales.....	144
6.3.1.1	Tensiones de tipo gravitatorio.....	144
6.3.1.2	Tensiones de origen tectónico.....	147

6.3.1.3	Tensiones de origen térmico y residual.....	147
6.3.2	Tensiones inducidas.....	147
<b>6.4</b>	<b>MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE TENSIONES.....</b>	<b>148</b>
6.4.1	Evaluaciones sismológicas y geoestructurales.....	148
6.4.2	Principales métodos cuantitativos para la determinación de tensiones <i>in situ</i> .....	149
6.4.2.1	Técnica de la fracturación hidráulica.....	149
6.4.2.2	El método del gato hidráulico plano.....	151
6.4.2.3	Técnica de liberación de tensiones (Doorstopper).....	153

## **Capítulo 7 RESISTENCIA DE LOS MACIZOS ROCOSOS**

<b>7.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>155</b>
<b>7.2</b>	<b>MODOS DE ROTURA EN LA ROCA.....</b>	<b>155</b>
<b>7.3</b>	<b>ENSAYOS DE LABORATORIO PARA CARACTERIZAR LA RESISTENCIA DE LA ROCA.....</b>	<b>156</b>
7.3.1	Compresión uniaxial.....	156
7.3.2	Compresión triaxial.....	157
7.3.3	Ensayo Brasileiro.....	158
7.3.4	Ensayo de flexión.....	159
7.3.5	Ensayo de cizallamiento.....	159
7.3.5.1	Ensayo de cizallamiento doble.....	160
7.3.5.2	Ensayo de cizallamiento directo.....	160
7.3.5.3	Ensayo de cizallamiento en muestras cúbicas de roca.....	161
<b>7.4</b>	<b>COMPORTAMIENTO TENSO-DEFORMACIONAL EN COMPRESIÓN TRIAXIAL.....</b>	<b>162</b>
7.4.1	Compresión hidrostática.....	163
7.4.2	Compresión desviadora.....	164
7.4.3	Efecto de la presión de confinamiento.....	165
7.4.4	Efecto del agua y concepto de tensión efectiva.....	166
<b>7.5</b>	<b>EL SIGNIFICADO DE ROTURA Y RESISTENCIA.....</b>	<b>167</b>
<b>7.6</b>	<b>ROCA INTACTA VERSUS MACIZO ROCOSO.....</b>	<b>168</b>
<b>7.7</b>	<b>FUNDAMENTOS SOBRE CRITERIOS DE ROTURA (TEORÍA DE MOHR-COULOMB).....</b>	<b>168</b>
<b>7.8</b>	<b>CRITERIOS EMPÍRICOS DE ROTURA PARA LA ROCA INTACTA.....</b>	<b>172</b>
7.8.1	Criterios existentes.....	172
7.8.2	Criterio original de Hoek-Brown (1980).....	174
7.8.3	Influencia del tamaño de la muestra.....	176
<b>7.9</b>	<b>RESISTENCIA DE LOS MACIZOS ROCOSOS DIACLASADOS.....</b>	<b>177</b>
7.9.1	Criterio original de Hoek-Brown (1980).....	177
7.9.2	Criterio generalizado de Hoek-Brown (2002).....	179
7.9.2.1	El Índice de Resistencia Geológica (GSI).....	179
7.9.2.2	Determinación de los parámetros de Mohr-Coulomb.....	184
7.9.2.3	Resistencia del macizo rocoso.....	185
7.9.2.4	Envoltente de Mohr en la rotura.....	186
7.9.2.5	Estimación del factor de perturbación D.....	186
7.9.2.6	Módulo de deformación.....	187

7.9.2.7	¿Cuándo utilizar el criterio de Hoek-Brown?.....	187
7.9.3	Comportamiento en la pos-rotura.....	189
7.9.3.1	Macizos rocosos de excelente calidad.....	189
7.9.3.2	Macizos rocosos de mediana calidad.....	189
7.9.3.3	Macizos rocosos de mala calidad.....	189
7.9.4	El Índice del Macizo Rocoso (RMi).....	190
7.9.4.1	Principio y utilización del RMi para caracterizar un macizo rocoso.....	190
7.9.4.2	Beneficios y limitaciones del RMi.....	195
7.9.4.3	Principales aplicaciones del RMi: determinación de las constantes m y s del criterio de Hoek-Brown.....	195
<b>7.10</b>	<b>RESISTENCIA DE LA ROCA ANISOTRÓPICA.....</b>	<b>196</b>
7.10.1	Consideraciones teóricas (Anisotropía de Resistencia).....	196
7.10.2	Criterio de rotura para determinar la resistencia al cizallamiento de las diaclasas.....	197
7.10.2.1	Discontinuidades planas.....	198
7.10.2.2	Resistencia en planos inclinados.....	199
7.10.2.3	Resistencia al cizallamiento de discontinuidades rugosas sin relleno.....	202
7.10.2.4	Resistencia al cizallamiento de discontinuidades rugosas con relleno.....	202

## **Capítulo 8 PRINCIPIOS DEL DISEÑO DE EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS**

<b>8.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>205</b>
<b>8.2</b>	<b>EXCAVACIONES EN ROCA COMPETENTE.....</b>	<b>205</b>
8.2.1	Distribución de tensiones alrededor de excavaciones subterráneas.....	205
8.2.2	Zona de influencia.....	208
8.2.3	Efectos de planos de debilidad en la distribución de tensiones en un medio elástico.....	209
8.2.4	Forma de la excavación y tensiones en la periferia.....	210
8.2.5	Aberturas múltiples (cámaras y pilares) en macizos rocosos masivos y competentes.....	211
8.2.5.1	Teoría del área tributaria.....	212
8.2.5.2	Teoría del arco.....	214
<b>8.3</b>	<b>EXCAVACIONES EN ROCA ESTRATIFICADA.....</b>	<b>215</b>
<b>8.4</b>	<b>EXCAVACIONES EN ROCA DIACLASADA.....</b>	<b>218</b>
8.4.1	Evaluación de la forma y volumen de las cuñas que caen del techo.....	218
8.4.1.1	Caída de cuñas sin deslizamiento desde el techo.....	218
8.4.1.2	Caída de cuñas por deslizamiento del techo.....	220
8.4.2	Evaluación de la forma y volumen de las cuñas que caen desde las paredes.....	221
8.4.3	Influencia de las tensiones horizontales.....	223
<b>8.5</b>	<b>EXCAVACIÓN EN ROCA DE COMPORTAMIENTO PLÁSTICO.....</b>	<b>225</b>
8.5.1	Distribución de tensiones en torno a un túnel circular en un medio elástico-plástico perfecto.....	226
8.5.2	Aplicación del criterio de rotura de Mohr-Coulomb.....	226
8.5.3	Aplicación del criterio de rotura de Hoek-Brown.....	228

## **Capítulo 9 NOCIONES DIMENSIONAMIENTO DEL SOSTENIMIENTO EN ROCA**

<b>9.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	231
<b>9.2</b>	<b>TERMINOLOGÍA</b> .....	231
<b>9.3</b>	<b>PRINCIPIOS DEL DISEÑO DEL SOSTENIMIENTO</b> .....	232
<b>9.4</b>	<b>MÉTODOS DEL DISEÑO DEL SOSTENIMIENTO</b> .....	232
9.4.1	Métodos empíricos.....	233
9.4.2	Métodos analíticos.....	233
9.4.3	Métodos numéricos.....	233
<b>9.5</b>	<b>CATEGORIZACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN</b> .....	233
9.5.1	Refuerzo y sostenimiento en terrenos discontinuos.....	233
9.5.2	Refuerzo y sostenimiento en terrenos continuos.....	235
<b>9.6</b>	<b>ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN ROCA-SOSTENIMIENTO</b> .....	235
9.6.1	Cálculo de las curvas características del terreno (CCT).....	236
9.6.1.1	Aplicación del criterio de rotura de Hoek-Brown (Método de Carranza Torres y Fairhurst).....	237
9.6.1.2	Aplicación del criterio de rotura de Mohr-Coulomb.....	239
9.6.2	Cálculo de las curvas características del sostenimiento (CCS).....	241
9.6.2.1	Revestimiento de hormigón lanzado u hormigón.....	242
9.6.2.2	Marcos de acero retacados.....	243
9.6.2.3	Pernos de anclaje sin cementar.....	244
9.6.2.4	Reacción de soportes combinados.....	245
9.6.3	Primeras estimaciones de los requerimientos de sostenimiento.....	246
9.6.4	Cálculo del Factor de Seguridad de los elementos del sostenimiento.....	247
9.6.4.1	Efecto de la rigidez del sostenimiento.....	248
9.6.4.2	Efecto de la deformación previa.....	248
9.6.4.3	Efecto del tiempo.....	250
<b>9.7</b>	<b>USO DEL R<sub>Mi</sub> EN LA EVALUACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DEL SOSTENIMIENTO</b> .....	252
9.7.1	Sostenimiento en terrenos continuos.....	253
9.7.1.1	El estallido en roca.....	254
9.7.1.2	Convergencia en terrenos continuos.....	256
9.7.2	Estabilidad y sostenimiento en materiales discontinuos (diaclasados).....	257

## **Capítulo 10 NOCIONES DE LOS MÉTODOS NUMÉRICOS EMPLEADOS EN GEOMECÁNICA**

<b>10.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	261
<b>10.2</b>	<b>OBJETIVO DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA</b> .....	261
<b>10.3</b>	<b>MÉTODOS NUMÉRICOS EN GEOMECÁNICA</b> .....	261
10.3.1	Método de los Elementos de Contorno (MEC).....	262
10.3.2	Método de los Elementos Finitos (MEF).....	262
10.3.3	Método de los Elementos Distintos (MED).....	262
<b>10.4</b>	<b>GENERALIDADES DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)</b> .....	263
10.4.1	Implementación del MEF.....	263

---

	10.4.2	Visión General del MEF.....	263
<b>10.5</b>		<b>APLICACIÓN DEL MEF EN LA DETERMINACIÓN DEL SOSTENIMIENTO EN UNA EXCAVACIÓN SUBTERRÁNEA.....</b>	<b>266</b>

**BIBLIOGRAFÍA**, 271

**Apéndice I GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS**, 275

**Apéndice II PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DE LAS ROCAS**, 295

**Apéndice III MÉTODOS PARA DETERMINAR EL TAMAÑO DEL BLOQUE**, 309

**Apéndice IV RECOMENDACIONES DE SOSTENIMIENTO SEGÚN EL ÍNDICE Q**, 313

**Apéndice V CLASIFICACIONES SMR PARA TALUDES (M. ROMANA)**, 319

**Apéndice VI PROYECCIONES ESTEREOGRÁFICAS**, 327

**Apéndice VII SISTEMA DE UNIDADES Y CONVERSIÓN DE FACTORES**, 337