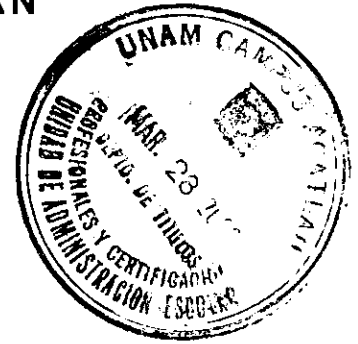


10
261



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

CAMPUS ACATLÁN



"CONTROL DE LA EROSIÓN EN TALUDES"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

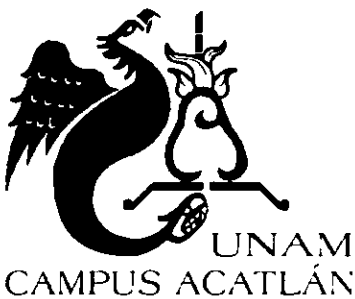
I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A :

ERNESTO MONDRAGÓN CASTILLO

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Gabriel Auvinet.



Acatlán, Edo. de Méx., 1999

277183

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

FALTAN PAGINAS

De la: **I**

A la: **III**

R E C O N O C I M I E N T O S

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme permitido el privilegio de realizar mis estudios profesionales en el Campus Acatlán.

La realización de este trabajo no hubiera sido posible sin la asesoría y comentarios de las siguientes personas:

Mi más profunda gratitud al Dr. Gabriel Auvinet G. (investigador del Instituto de Ingeniería de la UNAM), quien ha fungido como director de tesis, por su tiempo, paciencia y dedicación en asesorías y correcciones, (y por que no mencionar su intervención en la liposucción literaria). Agradezco de antemano la información otorgada (de su diagnóstico geotécnico en el caso Tlalnepantla), para la realización del último capítulo ya que, éste trabajo no tendría el mismo valor sin sus aportaciones a la ingeniería civil y por su infranqueable amistad.

Mi más sincero agradecimiento al M. Ing. Manuel Sánchez G. (especialista consultor en Mecánica de rocas), por haber aportado de manera notable, parte de sus conocimientos e investigaciones en el campo de la erosión en taludes.

Fungiendo como asesor externo y apreciable amigo, le agradezco su tiempo y dedicación en sus asesorías, recorridos y correcciones que se plasmaron en enseñanzas y sirvieron de mucho para la realización de este trabajo.

Al equipo de trabajo del grupo CICONSA, especialmente a los ingenieros: Francisco Sánchez Jr. y Julio Sánchez por sus valiosos comentarios.

Estoy muy agradecido con el profesorado de Acatlán, que desde el primero hasta el último semestre de la carrera aportaron sus conocimientos en mi formación como ingeniero. En especial con los ingenieros que fungieron como sinodales: Dr. Gabriel Auvinet G. Ing. Juan V. Padilla C. Ing. Enrique del Castillo F. Ing. Celso Barrera C. Ing. Alejandro López M. y al Ing. Agustín Valera N. por sus consejos y comentarios al trabajo.

DEDICATORIAS

Esta tesis está dedicada a:

El grato e inolvidable recuerdo de mi Abue quien ha sido una persona trascendente en mi vida y formación educativa.

Mi madre y tía por su cariño, impulso e incondicional apoyo.

Layla y Rodrigo los más latosos.

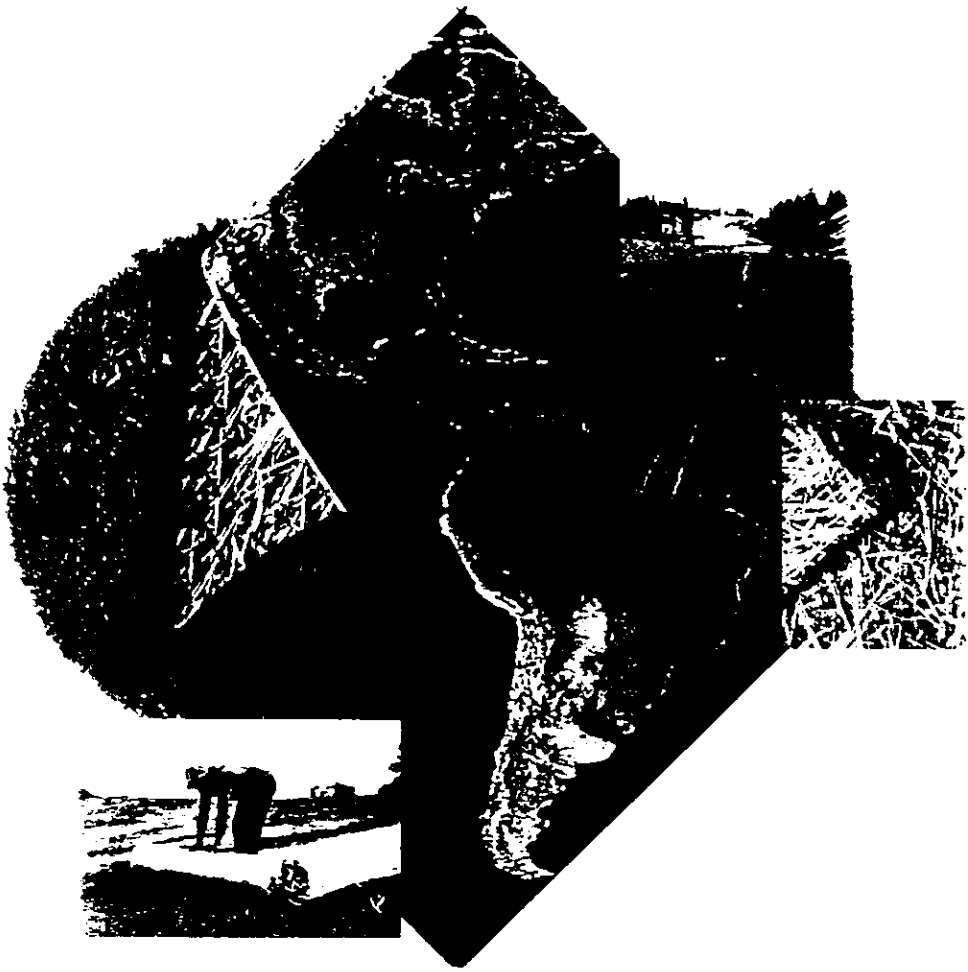
Mis tíos: Isaías, Germán, Marco Antonio y Bernardo.

A todos ellos los quiero y... ¡Mil gracias!!!

A mis compañeros y amigos con los que he compartido momentos inolvidables.

"La mejor recompensa de una cosa bien hecha es haber tenido que hacerla".

Ralph Waldo Emerson.



• C O N T E N I D O

I N T R O D U C C I O N

L I S T A D E T E R M I N O S , S I M B O L O S , U N I D A D E S D E L S . I . Y M U L T I P L O S R E C O M E N D A D O S

L I S T A D E F I G U R A S

L I S T A D E T A B L A S

L I S T A D E F O T O S

CAPITULO No. I G E N E R A L I D A D E S

- I.1 **Introducción**
- I.2 **Términos esenciales**
- I.3 **Términos geológicos**
- I.4 **Términos geométricos**
- I.5 **Referencias**

CAPITULO No. II G E O L O G I A Y G E O M E C A N I C A D E T A L U D E S

- II.1 **Introducción**
- II.2 **Importancia de la geología en los taludes**
- II.3 **Clasificación geológica de las rocas**
- II.4 **Fallas de taludes en roca**
- II.5 **Propiedades mecánicas de los macizos rocosos**
- II.6 **Fuerzas inducidas en los macizos rocosos**
- II.7 **Respuesta del macizo rocoso**
- II.8 **Características geotécnicas de las rocas**
- II.9 **Investigación general de macizos rocosos**
- II.10 **Muestreo de roca**
- II.11 **Referencias**

CAPITULO No. III E R O S I O N E N T A L U D E S

- III.1 **Introducción**
- III.2 **El proceso de denudación y sus agentes**
- III.3 **Intemperismo**
- III.4 **Erosión**
- III.5 **El problema de la erosión en taludes**
- III.6 **Factores que contribuyen a la erosión**
- III.7 **Patología de los taludes excavados en roca**
- III.8 **Diagnóstico de los taludes excavados en roca**
- III.9 **Terapia de los taludes excavados en roca**
- III.10 **Análisis de algunas técnicas utilizadas para el control de la erosión en taludes**
- III.11 **Referencias**

CAPITULO No. IV NUEVOS SISTEMAS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL CONTROL DE LA EROSION EN TALUDES

- IV.1 **Introducción**
- IV.2 **Nuevos sistemas y procedimientos**
- IV.3 **Hidrosiembra**
- IV.4 **Mantas Compuestas**
- IV.5 **Mallas Compuestas**
- IV.6 **Pruebas y diseño de mantas para la protección de taludes**
- IV.7 **Resultados globales de los sistemas y procedimientos aplicados en taludes**
- IV.8 **Guía patrón para el engrapado de mantas**
- IV.9 **Guía de instalación práctica**
- IV.10 **Referencias**

CAPITULO No. V TRATAMIENTO DE UN TALUD

- V.1 **Introducción**
- V.2 **Antecedentes**
- V.3 **Localización**
- V.4 **Descripción física del sitio**
- V.5 **Condiciones geotécnicas**
- V.6 **Medidas técnicas correctivas aplicadas al talud**
- V.7 **Sistemas aplicados para el control de la erosión del talud**
- V.8 **Conclusiones**
- V.9 **Referencias**

A P E N D I C E S

- A. **CUADRO CLINICO DE LOS TALUDES EXCAVADOS EN ROCA**
- B. **CUADRO COMPARATIVO DE LA APLICACION DIRECTA DEL PEGANTE ORGANICO Y LAS MANTAS COMPUESTAS**

C O N C L U S I O N E S

I N T R O D U C C I O N

La ecología estudia la interrelación en un espacio y tiempo conocidos entre los organismos vivos, y entre éstos y los factores abióticos en los que se desenvuelven, en especial su intercambio de materia y energía.

La ingeniería ambiental es una disciplina que esencialmente estudia y propone diferentes procesos que permiten evitar, atenuar o disminuir contaminantes diversos en el agua, aire y tierra. Por su parte, la protección ambiental hace uso de manera muy importante de la ingeniería ambiental y de la ecología; sin embargo, se nutre de prácticamente todas las disciplinas del saber humano, e incluye las variables social, económica y política. Su objetivo principal es minimizar los costos ambientales provocados por la actividad humana y maximizar los beneficios ambientales de dicha actividad, tomando en cuenta los factores social, económico y político en un lugar y tiempo determinados.

El ingeniero civil crea muchas de las más conspicuas obras que modifican a la naturaleza.

Casi todas las obras civiles provocan impactos tanto adversos como benéficos al ambiente. Hasta hace poco los impactos adversos habían ocurrido sin que el ingeniero tuviera conocimiento previo o estuviera advertido de los posibles efectos negativos. Muchos de los cuales pueden ser mitigados a bajo costo, mediante acciones planeadas desde la concepción del proyecto.

Uno de los retos de la ingeniería civil en el futuro es introducir la variable ambiental desde la concepción, planeación, diseño, construcción y operación de las obras y hasta su desmantelamiento.

Una vez elegido el sitio o trayectoria de la obra y en la etapa de diseño deberán incorporarse al proyecto las medidas de prevención, mitigación y restauración de los impactos ambientales identificados y evaluados durante la planeación.

Un aspecto de suma importancia es que el ingeniero en la práctica se convierta en un actor activo en la protección ambiental.

La erosión y la sedimentación del suelo son problemas que siempre han recibido atención en la industria agrícola. La erosión reduce la productividad del terreno y la liberación subsiguiente de sedimento obstruye las corrientes de agua, arruina el inapreciable habitat de la vida salvaje y causa daños en la infraestructura de vies terrestres. Sin embargo, debido al aumento en la conciencia pública acerca del medio ambiente y de los costos para la reparación de lugares deteriorados por erosión, el control de la erosión y la sedimentación del suelo se ha convertido en una preocupación general.

Lugares de construcción con taludes empinados y/o con vías de drenajes superficiales sin vegetación son blancos claves para la erosión y liberación de grandes cantidades de sedimento.

La erosión de lugares no agrícolas ha sido reconocida finalmente como un problema importante.

Los cortes creados por las excavaciones en superficie, producen en muchos casos un impacto ambiental severo que exige la adecuación de medidas protectoras y correctoras.

Controlar la erosión de los taludes es controlar el impacto ambiental producido por las excavaciones en corte y por la ocupación de espacio de los terraplenes que se ejecutan durante la construcción de las obras.

Controlar la erosión mediante sistemas que incluyen la revegetación de las superficies alteradas y la mitigación del proceso de decompresión en el caso de cortes con fuertes pendientes en roca, constituye la base de la regeneración positiva del ecosistema.

La vegetación protege al terreno contra el impacto de la gota de lluvia y disminuye la capacidad de erosión de las aguas que discurren por la superficie del talud.

Asimismo, el efecto protector se manifiesta incrementando las características mecánicas de la capa de suelo más superficial que queda reforzada por la acción de sujeción de las raíces. La vegetación también disminuye el contenido en agua a través de la transpiración, reduciendo así el grado de inestabilidad del talud.

Los sistemas empleados para mitigar el efecto de la decompresión de la roca en la zona superficial del talud deben permitir la revegetación del mismo, dentro de las posibilidades del macizo rocoso en que se encuentra ubicado, y nunca ser barreras para el disfrute estético, pedagógico y/o científico de la arquitectura geológica puesta al descubierto por la excavación.

Antes de iniciar el análisis del contenido del presente trabajo, estableceremos una breve ubicación de lo que implica el tratamiento del control de la erosión en taludes dentro de lo que se conoce en materia geotécnica como; "métodos de estabilización de taludes"; atendiendo al cuadro sinóptico siguiente:

METODOS TECNICOS DE ESTABILIZACION DE TALUDES:

I. PREVENTIVOS:

- a) Instrumentación.
- b) Monitoreo de la instrumentación.
(Interpretación de información)
- c) Control de voladuras.

II. CORRECTIVOS:

- a) Excavaciones.
 - 1. Reducción de la altura del talud
 - 2. Reducción del volumen del talud
 - 3. Reducción de la inclinación del talud
 - 4. Utilización de bermas
- b) Anclajes.
- c) Muros de contención.
- d) Drenaje en macizos rocosos.
 - 1. Galerías
 - 2. Abanicos de drenes
 - 3. Drenes sub-horizontales
 - 4. Pozos de bombeo
- e) Protección superficial.
 - 1. Vegetación
 - 2. Sellado de grietas
 - 3. Cunetas y contracunetas
 - 4. Lavaderos

El control de la erosión en taludes se encuentra ubicado en el nivel más superficial dentro de lo que implicaría un análisis de estabilidad del propio talud, por tanto, es considerado como un método de estabilización superficial correctivo, que normalmente no se plantea durante el propio diseño del talud, sino que lamentablemente se aplica, hasta que el mismo presenta los síntomas característicos de inestabilidad superficial.

Todas las pendientes tienen una tendencia a moverse, unas más rápido que otras. El origen y magnitud de tales movimientos puede variar desde perturbaciones cercanas a la superficie de zonas intemperizadas hasta desplazamientos de asiento profundo de grandes masas de roca. Estos movimientos se presentan cuando la resistencia de la pendiente es superada por los esfuerzos que operan dentro de ella. Los movimientos restringidos a los lechos superficiales están controlados comúnmente por esfuerzos que se derivan de ambientes superficiales, o casi superficiales, como son la precipitación y la temperatura, mientras que los movimientos que se efectúan a la profundidad indican la presencia de esfuerzos antagónicos en lo profundo. Los movimientos que ocurren pueden oscilar entre los desplazamientos pequeños y lentos asociados con el arrastre o "creep", hasta los desplazamientos rápidos y grandes, que normalmente resultan catastróficos.

De esta manera se considera muy importante tomar en cuenta la estabilidad de las pendientes en el diseño de excavaciones artificiales como: en la explotación a cielo abierto, en la apertura de una cantera, en los cortes y terraplenes de las carreteras o caminos, y en la construcción de un cimiento grande o una trinchera profunda. Las pendientes naturales se hacen inestables, como una fase normal en la erosión de

ellas, la estabilidad de estas pendientes forman los acantilados costeros y las laderas de los valles. Una inspección somera se debe tener en cuenta ante las acciones desgastantes de la erosión, especialmente donde se forman los márgenes de los embalses y en los estribos de las presas y puentes se deben valorar sobretodo si en un momento determinado, el desgaste representa un peligro para las estructuras públicas o sea, las obras de ingeniería.

Presentado el contexto de la problemática a tratar, expondremos brevemente el contenido de los cinco capítulos del presente trabajo.

En el capítulo primero se han incluido las generalidades, es decir, una serie de definiciones de términos, a los que se hará referencia a lo largo del desarrollo del trabajo.

El capítulo segundo abarca los aspectos esenciales de dos ciencias implícitas en el análisis de los taludes creados en la construcción de vías terrestres: la Geología y la Geomecánica aplicada a taludes.

En un tercer capítulo se analiza propiamente la problemática a enfrentar en materia de erosión en taludes.

El cuarto capítulo abarca una descripción de los nuevos sistemas y procedimientos que han sido diseñados específicamente para el control de la erosión en taludes.

En el último capítulo se presenta el tratamiento de un talud como una aplicación real de los sistemas y procedimientos antes analizados.

Finalmente, en las conclusiones, se hacen destacar los principales aspectos de ésta difícil técnica del control de la erosión de taludes.

LISTA DE TERMINOS, SIMBOLOS, UNIDADES DEL S.I., Y MULTIPLOS RECOMENDADOS

TERMINOS	SIMBOLOS	UNIDAD Y MULTIPLOS RECOMENDADOS
altura vertical del talud	H	m
echado	α	grados
rumbo	β	grados
longitud	L, l	m (km, cm, mm)
altura	H, h	m (km, cm, mm)
profundidad	D, z	m (km, cm, mm)
diámetro	D	m (km, cm, mm)
área	A	m ² (km ² , ha, cm ² , mm ²)
volumen	V	m ³ (cm ³ , mm ³)
tiempo	t	s
velocidad	v	m/s
aceleración	a	m/s ²
presión, esfuerzo	σ	Pa, N/m ² (MPa, kPa)
esfuerzo cortante	τ	Pa, N/m ² (MPa, kPa)
fuerza, carga	Q	N (MN, kN)
temperatura	T, t	grados celsius (°C)
deformación unitaria	ϵ	-
coeficiente de dilatación térmica	α	grados celsius ⁻¹ (°C) ⁻¹
módulo de elasticidad	E	Pa, N/m ² (MPa, kPa)
porosidad	n	-
densidad	ρ	kg/m ³
peso específico	γ	kN/m ³
relación de Poisson	ν	-
gasto	q	m ³ /s
coeficiente de permeabilidad (conductividad hidráulica)	k	m/s

LISTA DE FIGURAS

FIGURA:	PAG:	
I.1	EROSION EN TALUDES EXCAVADOS	2
I.2	NOMENCLATURA DE UN TALUD	3
I.3	HISTORIA DE LA PENDIENTE PARA EL PICO JOHNSON	4
I.4	PRINCIPALES DISCONTINUIDADES DE LAS ROCAS	8
I.5	FALLAS	12
I.6	FALLAS MENORES Y FRACTURAS PARALELAS A UNA FALLA PRINCIPAL	14
I.7	REPRESENTACION ESQUEMATICA DE ALGUNOS TIPOS DE PLIEGUES	14
I.8	CRUCERO EN PIZARRA FORMADO PERPENCICULARMENTE A LA COMPRESION MAXIMA DURANTE EL METAMORFISMO DEL SEDIMINETO ORIGINAL	15
I.9	ESTEREODIAGRAMAS ILUSTRATIVOS DE ESQUISTOSIDAD	15
I.10	CLINOMETRO CON UNA PLACA COMO BASE PARA "PROMEDIAR" LOS ECHADOS	16
I.11	DEFINICION DE TERMINOS GEOMETRICOS	17
II.1	CLASIFICACION DE LAS FORMAS DE FALLA EN TALUDES DE ROCA	24
II.2	ANALISIS DEL ESTADO INICIAL DE ESFUERZOS EN UN PERFIL DE TALUD	28
II.3	ESQUEMA DE UNA MUESTRA DE SUELO, PARA INDICACION DE LOS SIMBOLOS USADOS	32
II.4	PROBADOR DE CARGA CONCENTRADA	34
II.5	ELEMENTOS DE UNA CAJA DE ESFUERZO CORTANTE DIRECTO	34
II.6	ESQUEMA DE BARRENACION PARA LA EXTRACCION DE UNA MUESTRA DE ROCA	40
III.1	PROCESO DE SALTACION EN EROSION EOLICA	52
III.2	GRAFICA: VELOCIDAD FINAL DE LAS GOTAS DE AGUA, EN AIRE ESTATICO	57
III.3	GRAFICA: DISTRIBUCION DE TAMAÑOS DE GOTAS E INTENSIDAD DE LA PRECIPITACION	58
III.4	EQUILIBRIO INESTABLE DE UN ELEMENTO DIFERENCIAL DE ROCA POR EFECTO DE LA EXCAVACION DE UN TALUD	61
III.5	UBICACION DE LA FRANJA DE RELAJAMIENTO EN EL PERFIL DE UN MACIZO ROCO SO POR EFECTO DE LA EXCAVACION DEL TALUD	63
III.6	PROCESO DE DEGRADACION DE LA SUPERFICIE DE UN TALUD EXCAVADO EN ROCA FRACTURADA	66

FIGURA:	PAG:	
IV.1	GRAFICA: RESULTADOS DE PRUEBAS COMPARATIVAS ENTRE EL PEGANTE ORGANICO Y OTROS MATERIALES	86-87
IV.2	MANTA TEMPORARIA FOTODEGRADABLE CON MATRIZ DE FIBRAS DE PAJA	89
IV.3	MANTA TEMPORARIA FOTODEGRADABLE CON MATRIZ DE FIBRAS DE PAJA Y ALGUNAS APLICACIONES	90
IV.4	MANTA TEMPORARIA CON PROTECCION A LARGO PLAZO Y MATRIZ DE FIBRAS DE PAJA/COCO	91
IV.5	MANTA TEMPORARIA CON PROTECCION A LARGO PLAZO Y MATRIZ DE FIBRAS DE COCO	92
IV.6	ESTRUCTURA DE DISTINTOS TIPOS DE MANTAS	93
IV.7	MANTA CON PERMANENTE REFUERZO DE CESPED Y MATRIZ DE COCO Y POLIMERO	94
IV.8	MANTA CON PERMANENTE REFUERZO DE CESPED Y MATRIZ DE POLIPROPILENO	95
IV.9	MALLAS COMPUESTAS	100
IV.10	CABLES DE FIJACION PARA MALLAS COLGANTES	105
IV.11	DETALLE DEL ELEMENTO DE SUJECION	105
IV.12	GUIA PATRON PARA ENGRAPADO DE MANTAS	111-112
IV.13	GUIA DE INSTALACION PRACTICA	113
IV.14	ACCESORIOS PARA INSTALACION DE MANTAS QUE CONTROLAN LA EROSION DE TALUDES	114
V.1	LOCALIZACION DEL SITIO	119
V.2	CROQUIS DE UBICACION DEL TALUD	121
V.3	ESQUEMATIZACION DE LOS ELEMENTOS INSTALADOS EN EL TALUD PARA SU PROTECCION SUPERFICIAL CONTRA EROSION	122
V.4	CORTE TRANSVERSAL AL TALUD EN LA COTA 0+390	126
V.5	CORTE TRANSVERSAL AL TALUD EN LA COTA 0+350	127
V.6	CORTE TRANSVERSAL AL TALUD EN LA COTA 0+290	128
V.7	CORTE TRANSVERSAL AL TALUD EN LA COTA 0+250	129
A.1	UBICACION DE LAS ZONAS DEL TALUD	139
B.1	APLICACION DEL PEGANTE ORGANICO Y DE UNA MANTA	143

LISTA DE TABLAS

TABLA:		PAG:
II.1	CLASIFICACION DE ROCA CON ESTIMACION DE RESISTENCIA	35
II.2	CLASIFICACION DE ROCA CON ESTIMACION DE ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES	36
II.3	SEPARACION DE LAS SUPERFICIES DE DISCONTINUIDAD	37
II.4	CATEGORIAS DE LA RUGOSIDAD	38
II.5	CLASIFICACION DE ROCAS CON ESTIMACION DEL VALOR R.Q.D.	39
III.1	PROCESOS INVOLUCRADOS EN EL INTEMPERISMO QUIMICO	46
III.2	PROCESOS INVOLUCRADOS EN EL INTEMPERISMO MECANICO	48
III.3	GRADOS DE INTEMPERISMO EN MATERIAL ROCOSO	49
III.4	GRADOS DE INTEMPERISMO EN MACIZOS ROCOSOS	50
III.5	PATOLOGIA DE LOS TALUDES EXCAVADOS EN ROCA	67
III.6	MEDIDAS TERAPEUTICAS PARA LA PROTECCION DE TALUDES	71
IV.1	TIPOS DE MANTAS Y ESTRUCTURAS PARTICULARES	88
IV.2	PRUEBA No. 1 EN TALUD	107
IV.3	PRUEBA No. 2 EN TALUD	108
IV.4	PRUEBA No. 3 EN TALUD	109

XVII

LISTA DE FOTOS

FOTO:	PAG:
I.1 CREEP EN LADERA DE PIROCLASTOS	5
I.2 CORTE EN TOBAS VOLCANICAS	6
I.3 FRACTURAMIENTO DE LA ROCA EN UN CORTE EN LUTITAS	7
I.4 UN PATRON ESTRUCTURAL ORDENADO, EN PIZARRAS	9
I.5 PLANOS DE ESTRATIFICACION INCLINADOS EN TALUD DE ROCA SEDIMENTARIA FRACTURADA	10
I.6 GRIETAS DE ORIGEN DIVERSO EN UN CORTE EN GRANITO	13
III.1 CAIDO EN TALUD INESTABLE EN LUTITIAS METEORIZADAS	49
III.2 EROSION EN PIROCLASTOS ARCILLOSOS POCO CONSOLIDADOS	53
III.3 EROSION EN CONGLOMERADOS SEDIMENTARIOS	56
III.4 GRIETAS DE RELAJACION DE LA ROCA, POR DECOMPRESION EN UN CORTE EN CALIZAS MACIVAS FRACTURADAS	62
III.5 LA CAIDA DE FRAGMENTOS EN LA ZONA DE RELAJAMIENTO: FENOMENO SUBITO E IMPREVISIBLE	64
III.6 CAIDO ORIGINADO EN LA ZONA DE DECOMPRESION DE UN CORTE EN LUTITAS	65
III.7 EROSION EN LUTITIAS, EN SUELOS COMPACTOS Y EN CALIZAS	68
III.8 INADECUADO TRATAMIENTO DE UN TALUD	69
III.9 TALUD UBICADO EN EL CONOCIDO "CERRO QUE CAMINA"	70
III.10 INADECUADA PROTECCION DE UN TALUD CON MALLA DE TRIPLE TORSION	73
III.11 INADECUADA APLICACION DE MALLA DE TRIPLE TORSION	73
III.12 APLICACION DE UN MURO DE GAVIONES EN UN TALUD	74
III.13 INADECUADA PROTECCION DE UN TALUD CON CONCRETO LANZADO	75
III.14 CONCRETO LANZADO COLAPSADO	76
III.15 APLICACION INADECUADA DE PASTO EN ROLLO	76
III.16 MALLA ADECUADAMENTE COLOCADA, COMBINADA CON UNA CAPA DE REVEGE- TACION HIDROLANZADA COMO PROTECCION CONTRA LA EROSION Y TRATAMIENTO DE ESTABILIZACION DE LA ZONA DE RELAJAMIENTO	77
III.17 ELEGANTE COMBINACION DE MALLAS E HIDROLANZADO DE REVEGETACION EN UN TALUD EN CONGLOMERADOS EN UN CORTE DE AUTOPISTA	77

FOTO:	PAG:
III.18 ESTABILIZACION DE UN TALUD MEDIANTE MALLA DE TRIPLE TORSION Y ANCLAS CON PROTECCION CONTRA LA EROSION A BASE DE REVEGETACION HIDROLANZADA COMPLEMENTADO CON FILA DE DRENES PENETRANTES	77
IV.1 APLICACION DE LA HIDROSIEMBRA EN TALUD DE PENDIENTE SUAVE	83
IV.2 HIDROLANZADO DEL SISTEMA	83
IV.3 APLICACION DE "MANTA FERTIL, M.R." PARA CONTROLAR LA EROSION DEL TALUD	96
IV.4 DISPOSICION DE ROLLOS DE "MANTA FERTIL, M.R." PARA SU APLICACION	98
IV.5 PROCEDIMIENTO DE ENGRAPADO DE LA MANTA YA EXTENDIDA	98
IV.6 APLICACION EN TERRAPLEN CON SEGURIDAD E INTEGRACION AL ECOSISTEMA	99
IV.7 MITIGACION DEL IMPACTO AMBIENTAL EN ESTRIBOS DE PUENTES	99
IV.8 APLICACION DE "GRIN-ROCK, M.R." EN UN TALUD DE LA AUTOPISTA DEL SOL	102
IV.9 INSTALACION DEL SISTEMA "GRIN-ROCK, M.R." EN TALUDES CON PENDIENTE SUPERIOR A LOS 60°	103
IV.10 CONTROL DE LA EROSION EN TALUD CON EL SISTEMA "GRIN-ROCK, M.R."	103
IV.11 APLICACION DE LA "ECO MALLA, M. R." EN TALUD DE PENDIENTE PRONUNCIADA	105
IV.12 APLICACION DE LOS SISTEMAS CONTRA EROSION EN TALUDES	110
V.1 TRATAMIENTO DE UN TALUD ESTABLE CONTRA EROSION	118
V.2 NOTABLE MEJORAMIENTO DE LAS CONDICIONES DEL TALUD	120
V.3 CUNETA LONGITUDINAL INSTALADA SOBRE LA BERMA DEL TALUD INFERIOR	124
V.4 APLICACION DE MANTAS PARA LOGRAR LA REGENERACION DE LA VEGETACION	125
V.5 MEDIDAS DE PROTECCION ADICIONALES	130
V.6 INSTALACION DE LAVADERO PARA CANALIZAR ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES	131

FOTO:		PAG:
V.7	APLICACION DEL SISTEMA "GRIN-ROCK, M.R."	133
V.8	APLICACION DEL SISTEMA "MANTA FERTIL, M.R."	133
V.9	REVEGETACION INTEGRAL DEL TALUD, PROTEGIDO CONTRA EROSION	134
V.10	DESTRUCCION DEL SISTEMA POR LA QUEMA DEL PASTO	135
V.11	EVIDENTE DESTRUCCION DE LA VEGETACION ESTABLECIDA	136
V.12	EL FACIL ACCESO AL TALUD, CAUSA EL DETERIORO DE LOS SISTEMAS	136

CAPITULO No. I G E N E R A L I D A D E S

- I.1 **Introducción**
- I.2 **Términos esenciales**
 - I.2.1 Control
 - I.2.2 Erosión
 - I.2.3 Taludes
 - I.2.4 Clasificación
 - a) taludes naturales
 - b) taludes artificiales
 - I.2.5 Corte
 - I.2.6 Terraplén
- I.3 **Términos geológicos**
 - I.3.1 Roca intacta
 - I.3.2 Macizo rocoso
 - I.3.3 Roca fracturada
 - I.3.4 Discontinuidades o planos de debilidad
 - I.3.5 Principales discontinuidades de las rocas
 - I.3.6 Zona de discontinuidades
 - I.3.7 Continuidad
 - I.3.8 Estructura geológica
 - I.3.9 Capa o estrato rocoso
 - I.3.10 Formación rocosa
 - I.3.11 Secuencia rocosa
 - I.3.12 Falla
 - I.3.13 Junta
 - I.3.14 Grieta
 - I.3.15 Fisura
 - I.3.16 Diaclasas
 - I.3.17 Plegamiento
 - I.3.18 Crucero o clivaje
 - I.3.19 Esquisto
- I.4 **Términos geométricos**
 - I.4.1 Pendiente
 - I.4.2 Echado
 - I.4.3 Rumbo
- I.5 **Referencias**

I.1 INTRODUCCION.

El presente capítulo contempla la definición de una serie de conceptos básicos que se han analizado dentro del contexto de la tesis, con el propósito de esclarecer términos y fundamentos sobre los cuales nos basamos para lograr un tratamiento efectivo contra la erosión en taludes.

I.2 TERMINOS ESENCIALES.

I.2.1 Control.

Se refiere a la serie de inspecciones y medidas técnicas necesarias que se integran y analizan para obtener un panorama aceptable en la predicción del tratamiento efectivo de la erosión en taludes.

I.2.2 Erosión.

Se conoce como erosión al proceso por el cuál, partículas de diferente tamaño, integradas en una masa de suelo o roca, que son removidas de su situación inicial y transportadas por efecto del agua, de la gravedad y otros agentes. Fig I.1 (Sánchez, 1996-b).

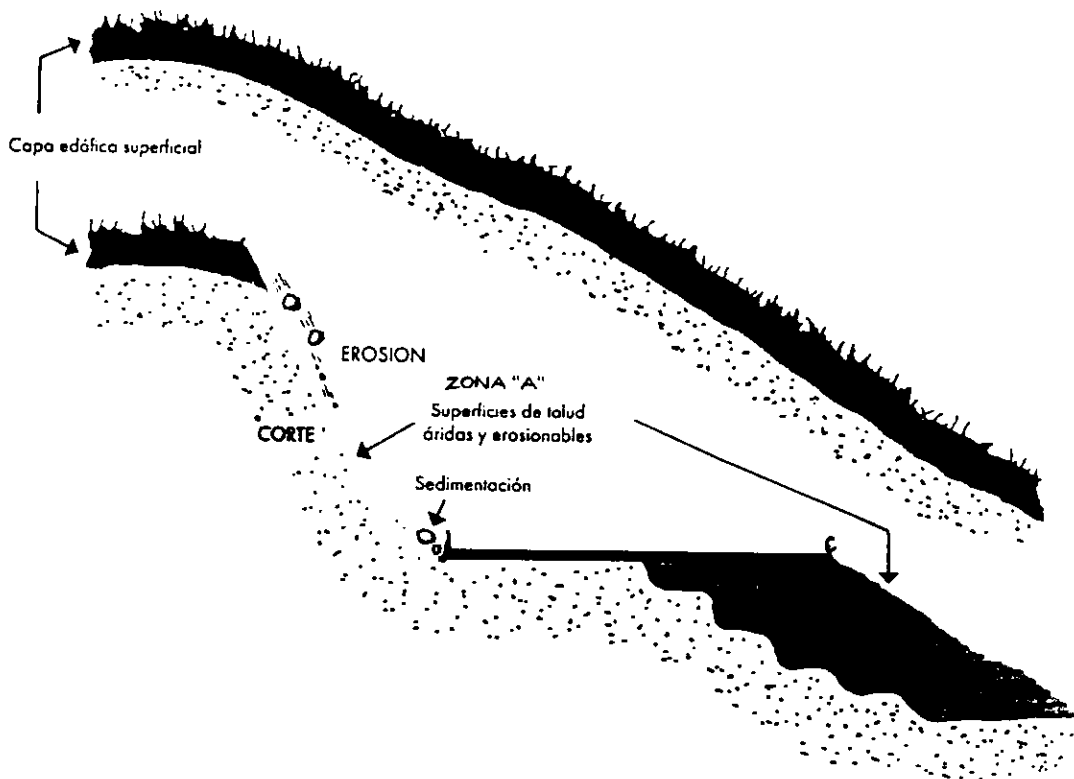


Fig. I.1 Erosión en taludes excavados (Sánchez, 1996-b).

I.2.3 Taludes.

Los taludes son estructuras de tierra, (suelo o roca) que tienen una inclinación con respecto a la horizontal. La inclinación límite que pueden presentar las paredes de las tierras para evitar su desmoronamiento, depende de la naturaleza del terreno. Generalmente, a los taludes los encontramos con muy diversos usos y aplicaciones, tales como: estructuras de protección, conducción y contención en proyectos hidráulicos o como estructuras de soporte en algunas obras de vías terrestres. Sus aplicaciones se ven reflejadas en: presas, escolleras, canales, rellenos, excavaciones, accesos a puentes, en cortes y terraplenes, entre otros.

Las partes que integran un talud son:

- a) **Corona:** parte superior de la estructura de tierra. En esta parte se ubican los principales indicios de inestabilidad (aparición de fisuras y grietas), que más tarde afectarán a la estabilidad del talud.
- b) **Cuerpo:** parte central de la estructura de tierra. En esta zona comúnmente se identifican con facilidad los principales indicios de erosión (aparición de gargantas erosivas), así como la constitución del talud, es decir, el tipo de material(es) que lo integran y la presencia de discontinuidades en el macizo rocoso.
- c) **Pie:** parte inferior de la estructura de tierra. En esta parte es donde generalmente, encontramos ubicada la depositación del sedimento producido por los agentes erosivos.

En la fig. I.2 se ilustran de manera esquemática las partes integrantes de un talud.

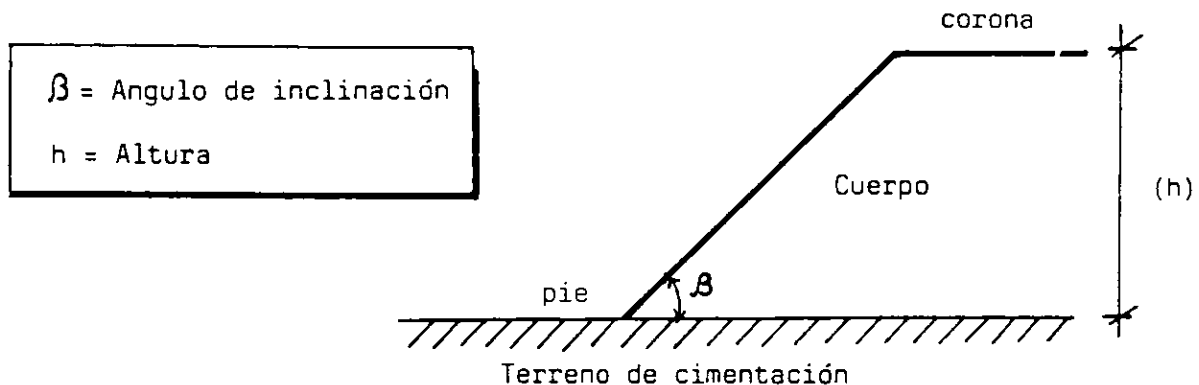


Fig. I.2 Nomenclatura de un talud.

I.2.4 Clasificación.

Desde el punto de vista en que se conforman estas estructuras de tierra, las clasificamos en dos tipos: a) taludes naturales y b) taludes artificiales.

I.2.4.1 Taludes naturales.

Los taludes naturales son aquellos que se forman debido a la constante deformación que sufre la corteza terrestre, teniendo como principales efectos de su formación: hundimientos, levantamientos y plegamientos que conforman la serie de irregularidades topográficas. Ej: lomeríos y laderas.

En las laderas naturales se llegan a plantear problemas que suelen ser de vital importancia, sobre todo cuando nuestras obras civiles son proyectadas o construidas en estas zonas y éstas se ven afectadas por la serie de deslizamientos superficiales que suelen ocurrir en los taludes.

Las pendientes naturales donde han ocurrido deslizamientos superficiales recientes, normalmente tienen una historia geológica de inestabilidad, en un deslizamiento moderno, como el de la fig. I.3; el último movimiento se asocia con la erosión de la pendiente. Los aspectos importantes de la historia de la pendiente son las condiciones previas que afectaron a ésta, a la historia del intemperismo y a la erosión.

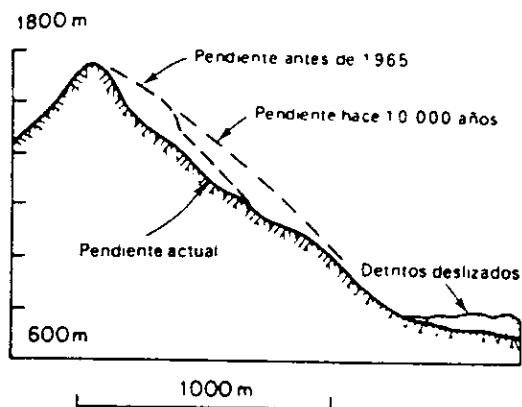


Fig. I.3 Historia de la pendiente para el Pico Johnson, Columbia Británica. Los detritos deslizados consisten en material que cayó desde 1965 y que estratigráficamente se encontraba arriba de un deslizamiento prehistórico (Blyth y Freitas, 1997).

Algunos de los problemas que suelen presentarse en las laderas naturales son conocidos con los nombres de:

- **Creep (o flujo):** consiste en un movimiento imperceptible (con velocidad menor de 10mm por año) y no acelerado de la capa más superficial de suelo, en general meteorizado (2m como máximo). Foto I.1 (Sánchez, 1996).
- **Soliflucción:** consiste en el movimiento repentino y acelerado de la masa de suelo, resultante de ciclos de congelación y descongelación, en terrenos con suficiente pendiente (Kirkby y Morgan, 1984).

- **Licuefacción:** se produce por un efecto dinámico en suelos saturados que reduce los esfuerzos efectivos internos y por tanto la resistencia. Es así como un deslizamiento de tierra puede convertirse rápidamente en un flujo de residuos o de lodo (Kirkby y Morgan, 1984).

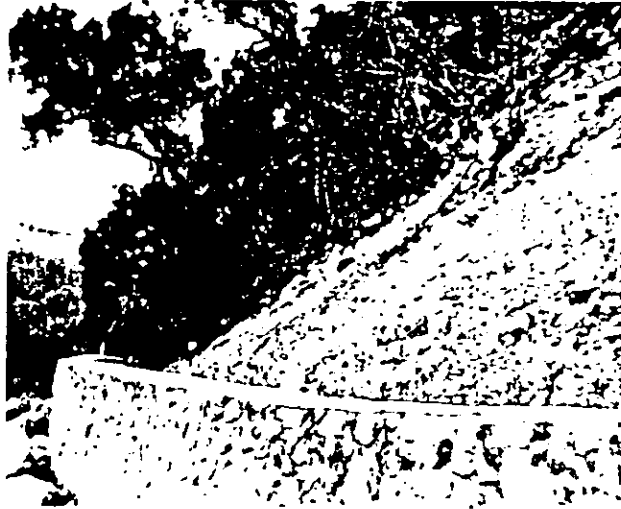


Foto I.1 Creep en ladera de piroclastos (Sánchez, 1996-a).

I.2.4.2 Taludes artificiales.

Los taludes artificiales son los formados como consecuencia de la intervención humana en una obra de ingeniería civil. Ej: cortes y terraplenes.

I.2.5 Corte.

Un corte es una excavación realizada generalmente en una ladera, que se tiene en una o ambas márgenes del trazo de una vía terrestre, según las condiciones del terreno (Nichols, 1979).

Los principales tipos de cortes son:

- a) **Corte abierto:** es el producto de un método de excavación en el que el área de trabajo se mantiene a cielo abierto, en contraposición con los cortes ademados.
- b) **Corte en balcón:** es una excavación larga en una ladera que forma un banco en un costado y en el otro casi coincide con el terreno natural.
- c) **Corte en cajón:** es una excavación con talud en corte en los dos lados (Nichols, 1979).



Foto I.2 Corte en tobas volcánicas (Sánchez, 1996-a).

I.2.6 Terraplén.

El término de terraplén corresponde a un relleno cuya parte superior se encuentra a mayor altura que los terrenos adyacentes (Nichols, 1979).

Los principales tipos de terraplén se encuentran clasificados en base al material que los constituye, teniéndose así tres tipos que son:

- a) Terraplén de material fino.
- b) Terraplén de material grueso.
- c) Terraplén de material mixto.

Los diferentes tipos de terraplenes, están caracterizados por las propiedades mecánicas e hidráulicas de los materiales que los constituyen. Un terraplén de material fino puede manifestar un comportamiento insatisfactorio y de tratamiento complicado, debido a que el material es altamente compresible (limos y arcillas), además de que en ocasiones tiende a reaccionar de manera problemática ante la presencia de agua que afecta la estructura interna del propio material.

El terraplén de material grueso bien graduado se caracteriza generalmente, por su alta resistencia, baja compresibilidad. Es común que se utilice como estructura de protección de obras aledañas.

El terraplén de material mixto, tiene propiedades intermedias que dependen de las proporciones relativas de los distintos materiales.

I.3 TERMINOS GEOLOGICOS.

I.3.1 Roca intacta.

Este término se refiere a la asociación de los procesos de consolidación y cementación de partículas minerales, en bloques intactos situados entre las discontinuidades de la masa rocosa. En la mayoría de las rocas ígneas duras y metamórficas, la resistencia de la roca intacta es una o dos veces mayor en orden de magnitud que la que puede tener la masa de roca y la falla de este material intacto no está involucrada generalmente en el proceso de falla del talud. En rocas sedimentarias suaves, el material intacto puede estar relativamente débil y la falla de este material puede jugar un papel importante en la falla del talud (Hoek y Bray, 1981).

I.3.2 Macizo rocoso.

El macizo rocoso es un agregado de bloques y material sólido rocoso, que contiene fallas estructurales las cuales constituyen discontinuidades mecánicas (Hoek y Bray, 1981).

I.3.3 Roca fracturada.

Una roca fracturada generalmente es parte constitutiva de un macizo que ha sido afectado por algún agente mecánico, tal como: estallido, rompimiento o estrujamiento, por lo que el cerramiento interno natural de la roca in situ ha sido destruido. El comportamiento de la roca fracturada es similar al de la arena limpia o grava, la principal diferencia es debida a la angularidad de los fragmentos de roca (Hoek y Bray, 1981).



Foto I.3 Fracturamiento de la roca en un corte en lutitas (Sánchez, 1996-a).

I.3.4 Discontinuidades o planos de debilidad.

Son aquellas facciones estructurales geológicas que separan entre sí bloques sólidos dentro de la masa rocosa. Muchos ingenieros describen estas facciones colectivamente como juntas pero esto no es más que una simplificación, dado que las propiedades mecánicas de éstas facciones cambian de acuerdo con el proceso de su formación. Por lo tanto, las discontinuidades como: fallas, diques, planos de estratificación, clivaje y juntas de tensión exhibirán distintas características y responderán en diferentes maneras a la aplicación de cargas.

En el presente trabajo, el término discontinuidad será generalmente usado para definir el plano estructural de debilidad según el cual puede ocurrir un movimiento (Hoek y Bray, 1981).

I.3.5 Principales discontinuidades de las rocas.

Son planos estructurales continuos, que pueden ser algo débiles, comparadas con cualquier otra discontinuidad en la masa rocosa y que dominan el comportamiento de un talud en particular, fig. I.4 (Hoek y Bray, 1981).

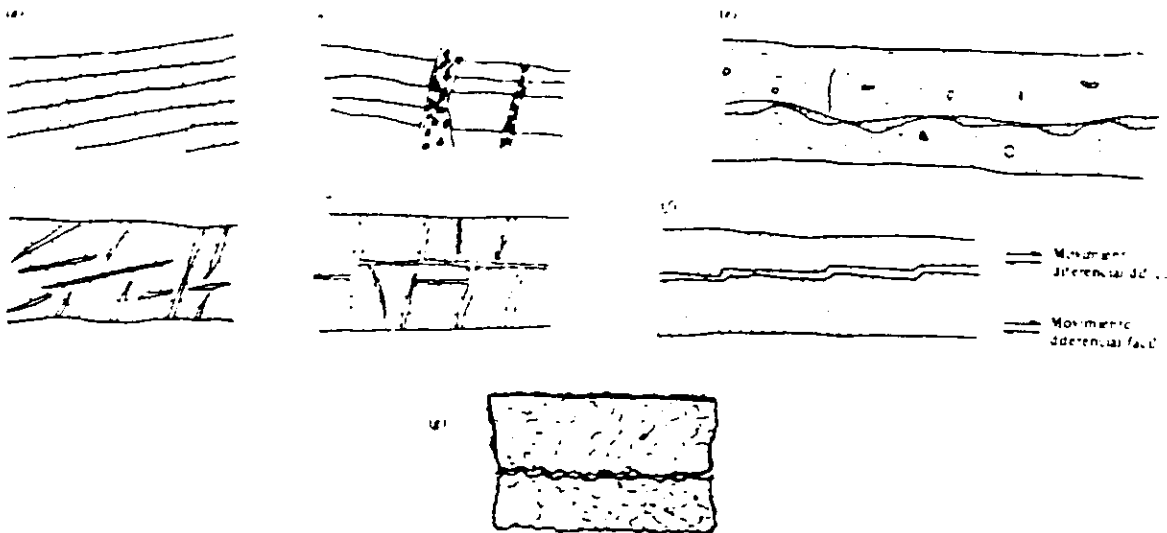


Fig I.4 Principales discontinuidades de las rocas:

- a) planos de estratificación y fracturas;
- b) zona de falla rellena con brecha de falla y arcilla
- c) vetas de cuarzo que representan discontinuidades aisladas en la arenisca;
- d) discontinuidades interconectadas;
- e) detalles de discontinuidades onduladas en las capas;
- f) rugosidad: perfil escalonado;
- g) rugosidad angular en una discontinuidad causada por los granos de los minerales.

(Harve., 1987)

I.3.6 Zona de discontinuidades.

Como resultado del proceso involucrado en su formación, la mayoría de las discontinuidades ocurren en familias o grupos, los cuales tienen direcciones preferentes. En algunos casos, estas zonas son claramente definidas y fáciles de distinguir, mientras que en otros casos, el modelo estructural aparece desordenado (Hoek y Bray, 1981).

I.3.7 Continuidad.

Mientras las principales fallas estructurales, como son las fallas, pueden correr por decenas o hasta cientos de metros de altura, las más pequeñas discontinuidades, como son las juntas, pueden estar muy limitadas en su extensión.

En el caso de un macizo rocoso determinado que presenta un sistema de fallas y fisuras, donde no es posible visualizar la terminación de las discontinuidades, se podrán establecer microfisuras y juntas que funcionen como puentes o ligas de unión entre ellas mismas, que más tarde representarán fallas en el material intacto.

La continuidad también tiene una influencia directa sobre la permeabilidad de la masa rocosa que resulta mayor si las discontinuidades están hidráulicamente conectadas (Hoek y Bray, 1981).



Foto I.4 Un patrón estructural ordenado, en pizarras.
(Hoek y Bray, 1981).

I.3.8 Estructura geológica.

El término estructura geológica se emplea para describir las masas rocosas considerando las tres dimensiones. La corteza terrestre está constituida por una gran diversidad de estructuras geológicas, las cuales varían desde estructuras de grandes dimensiones como, por ejemplo, una placa continental o una cuenca oceánica, hasta elementos pequeños, como un plano de estratificación en un fragmento de roca.

Las principales estructuras están compuestas por un conjunto de otras más pequeñas, las cuales han sido formadas por los procesos de sedimentación, intrusión magmática, así como por el ascenso y descenso del nivel de la superficie terrestre en diferentes lugares. Las estructuras pueden tener límites bien definidos entre sí o pueden pasar gradualmente de un tipo a otro (Harvey, 1987).

I.3.9 Capa o estrato rocoso.

La unidad estructural fundamental de las rocas sedimentarias se denomina capa o estrato. Un estrato es una clase particular de roca, pero aunque el término se aplica estrictamente a las rocas sedimentarias, a veces se utiliza para cualquier tipo de roca con estructura en forma de estratificación (Harvey, 1987).



Foto I.5 Planos de estratificación inclinados en talud de roca sedimentaria fracturada (Hoek y Bray, 1981).

I.3.10 Formación rocosa.

Es el conjunto de capas horizontales conformada por la depositación de sedimentos, a menudo compuesta de distintos tipos de roca como lutitas, areniscas y calizas (Harvey, 1987).

I.3.11 Secuencia rocosa.

Este término se utiliza para designar un grupo de rocas que guardan una relación entre sí (Harvey, 1987).

I.3.12 Falla.

El estado de esfuerzo en la parte exterior de la corteza terrestre es complejo y algunas rocas responden a la compresión por plegamiento. Comúnmente también se forman las fracturas por el escape de esfuerzo que se ha acumulado en las rocas, ya sea independientemente de los pliegues o asociado con ellos. Las fracturas incluyen fallas y juntas: las fallas son el resultado de el rompimiento de una estructura, (suelo o roca) debido al sometimiento de la misma masa a fuerzas de compresión y/o tensión. Se caracteriza por tener cierta abertura, profundidad y escalonamiento.

El movimiento total de una falla puede llegar a ser de miles de metros en fallas muy grandes o del orden de milímetros; en este caso particular recibe el nombre de microfalla. Las fallas tienen estrechos vínculos con las juntas y, con frecuencia, son paralelas. La diferencia entre ambas radica en que en una falla, ha ocurrido un rompimiento y un desplazamiento, mientras que en una junta, no hay un movimiento perceptible a través del plano de discontinuidad.

El plano por donde se rompe la roca, denominado plano de falla, en ocasiones presenta estriaciones que indican la dirección del movimiento de las dos masas de roca. Dichas estriaciones del plano de falla son una de las propiedades de las rocas que sirven para describirlas, empleando el término de rugosidad, descrito en un capítulo posterior.

El plano de falla se puede describir mediante geometría tridimensional; el movimiento total se puede considerar como la resultante de tres vectores mutuamente perpendiculares.

En la fig. I.5 se ilustran estos vectores. El movimiento vertical (vector AB) se llama desplome o salto, el vector horizontal frontal (BC), separación, y el vector horizontal lateral (CA'), desplazamiento horizontal lateral. El caso general se ilustra con componentes de movimiento a lo largo de cada una de las tres direcciones. Las fallas también pueden tener movimientos simples. Así por ejemplo, si el movimiento ha tenido lugar casi por completo en una sola dirección horizontal, se producirá una falla lateral (también llamada desgarre o transcurrente).

Las fallas pueden originar el desprendimiento de rocas en taludes, túneles, etc (Harvey, 1987).

I.3.13 Juntas.

Al estudiar cualquier masa de roca típica, se observa que, aparte de los planos de estratificación visibles (en roca sedimentaria), las fracturas también se presentan en otros planos en ángulos rectos a los planos de estratificación. Estas fracturas dan origen a una estructura de bloque, aunque los bloques no pueden separarse uno de otro. Tales fracturas reciben el nombre de juntas o planos de juntas y resultan de los intensos esfuerzos a los que se encuentra sometida la masa de roca (Legget y Karrow, 1986).

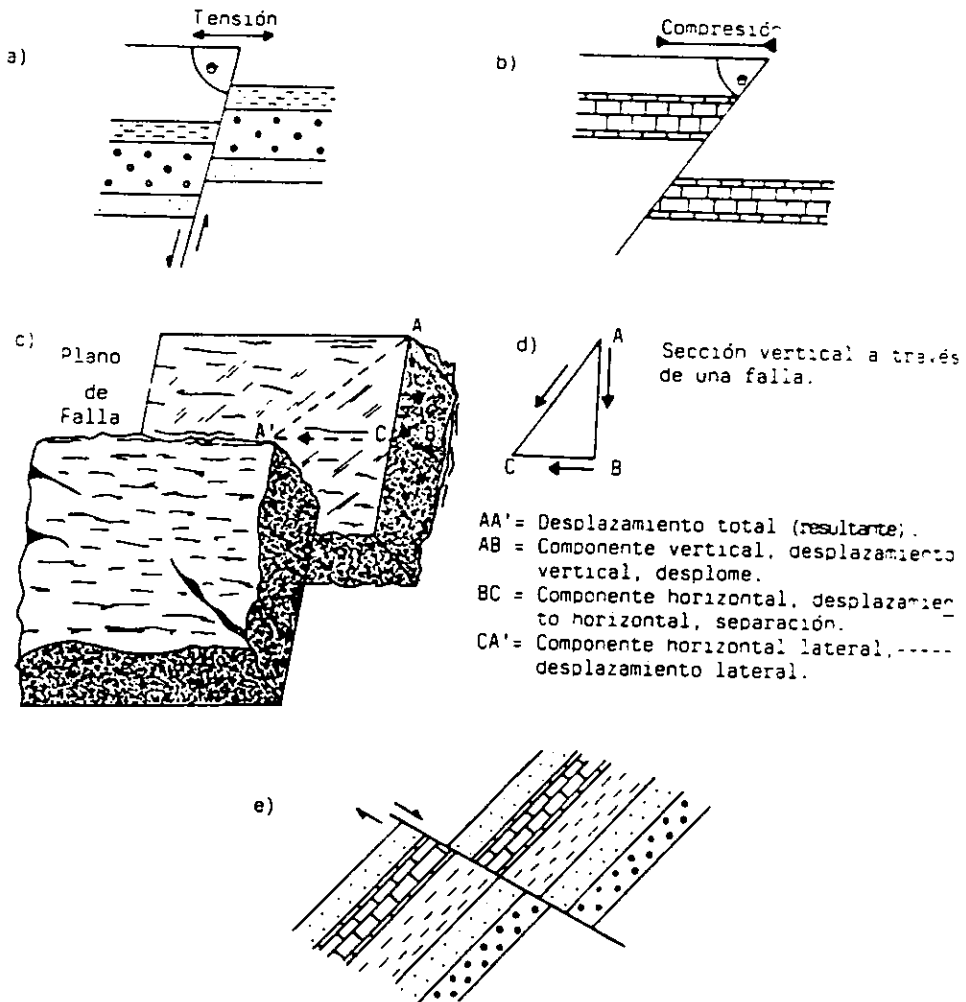


Fig. I.5 Fallas: a) sección vertical a través de una falla normal;
 b) sección vertical a través de una falla inversa;
 c) componentes vectoriales de un movimiento de falla;
 d) sección vertical a través de una falla.
 e) una falla lateral causa desplazamiento de los estratos (Harvey, 1987).

I.3.14 Grieta.

Una grieta es una abertura en el material de un tamaño considerable. Es considerada como la separación de partículas del suelo o roca que no presentan gran separación, ni profundidad, ni escalonamiento y por tanto generalmente se pueden sellar.



Foto I.6 Grietas de origen diverso en un corte en granito (Sánchez, 1996-a).

I.3.15 Fisura.

Las fisuras son pequeñas aberturas debidas al acomodo del material o a un impacto que ocasiona un daño despreciable en la estructura geológica.

I.3.16 Diaclasas.

Las diaclasas son planos de debilidad en las rocas duras; también se pueden encontrar en rocas suaves muy comprimidas. Estos planos generan comúnmente modelos geométricos regulares (fig. I.6), de tal manera que cuando la roca se rompe en el frente, los fragmentos producen formas distintivas que pueden ser: rectangulares, prismas con sección triangular, romboédricas y piramidales.

La diferencia entre una diaclasa y una falla es que en la primera no ha ocurrido un movimiento a lo largo del plano de debilidad.

Estas estructuras pueden formar sistemas paralelos que junto con las fracturas, afectan considerablemente la estabilidad de las rocas cuando se hacen excavaciones en las mismas o cuando la erosión ha dejado pendientes pronunciadas (Harvey, 1987).

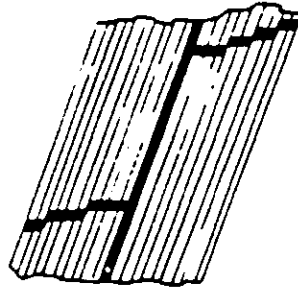


Fig. I.6 Fallas menores y fracturas paralelas a una falla principal (Harvey, 1987).

I.3.17 Plegamiento.

Consiste de la formación de pliegues regulares simples, como se muestra en la fig. I.7. Las porciones son llamadas anticlinales y sinclinales, respectivamente, de acuerdo con el tipo de curva. Los anticlinales son pliegues hacia arriba; los sinclinales son pliegues hacia abajo, convexos y cóncavos hacia arriba respectivamente (Legget y Karrow, 1986).

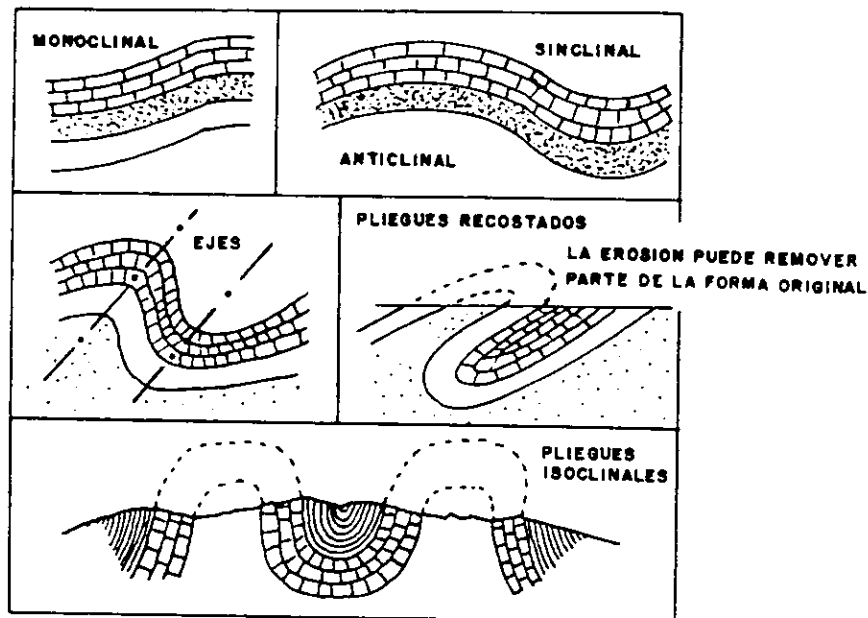


Fig. I.7 Representación esquemática de algunos tipos de pliegues.
(Legget y Karrow, 1986).

I.3.18 Crucero o clivaje.

Es la tendencia de algunos minerales de dividirse a través de planos preferentes, donde existe una débil unión atómica.

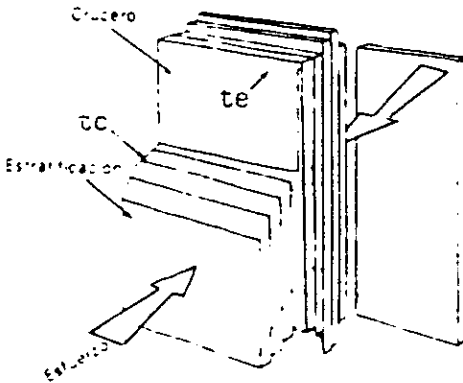


Fig. I.8 Crucero en pizarra formado perpendicularmente a la compresión máxima durante el metamorfismo del sedimento original; **tc**= traza del crucero sobre la estratificación; **te**= traza de la estratificación sobre la superficie del crucero (Blyth y Freitas, 1997).

I.3.19 Esquisto.

Es el nombre comunmente aplicado a la roca foliada. La foliación es característica del principal grupo de rocas metamórficas; la palabra significa que los minerales que integran la roca están arreglados en forma fajeada; cada capa es lenticular y compuesta de uno o varios minerales, pero las varias capas no siempre se pueden separar fácilmente (Legget y Karrow, 1986).

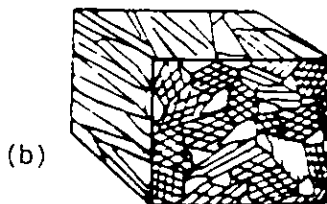
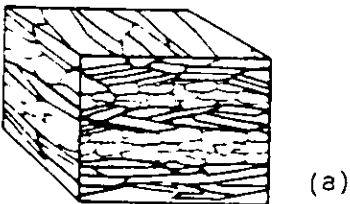


Fig. I.9 Estereodiagramas ilustrativos de esquistosidad.

a) Orientación paralela de cristales de mica en un esquisto de mica.

b) Prismas de hornblenda orientados en un esquisto de hornblenda.

(Blyth y Freitas, 1997).

I.4 TERMINOS GEOMETRICOS.

I.4.1 Pendiente.

Es la máxima inclinación de un plano de discontinuidad estructural con la horizontal, es definido por el ángulo α de la fig. I.10 (Hoek y Bray, 1981).

I.4.2 Echado.

El echado verdadero de una superficie es el ángulo máximo de inclinación con respecto a la horizontal. Se define como el ángulo α , formado entre la capa rocosa o discontinuidad y el plano horizontal imaginario, como se observa en la fig. I.11.

Este ángulo es medido siempre del plano horizontal hacia la capa o estrato rocoso, sobre un plano vertical perpendicular al rumbo. Sus valores oscilan entre 0° y 90° .

El echado se mide con un clinómetro (fig. I.10) con lecturas cerradas a grados, el cual se coloca sobre el plano de estratificación de un afloramiento de roca dura. El objeto de medir el echado, es obtener información sobre la posición tridimensional de las formaciones rocosas que se encuentran bajo la superficie, así como de aquellas partes de las mismas que son visibles (Harvey, 1987).

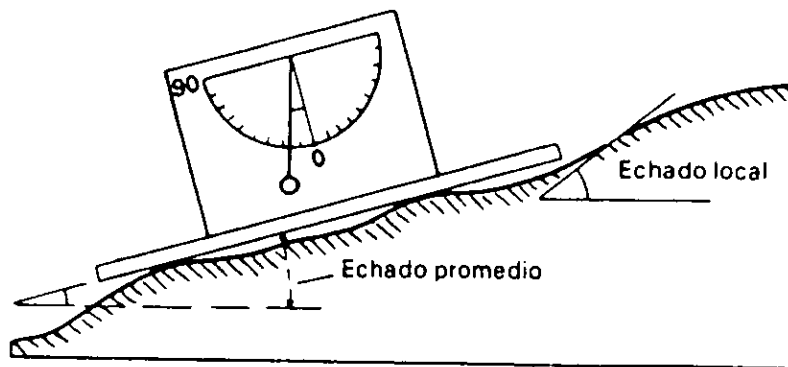


Fig. I.10 Clinómetro con una placa como base para "promediar" los echados (Blyth y Freitas, 1997).

I.4.3 Rumbo.

Es la orientación, respecto al Norte, de la intersección de una capa rocosa o discontinuidad con un plano horizontal imaginario y se define como el ángulo β de la fig. I.11. Los valores del rumbo oscilan entre 0° y 360° .

En las memorias de datos geológicos, para registrar los valores del rumbo y del echado, muchos geólogos utilizan el sistema en el cuál los valores de estos datos son escritos de la siguiente manera: 35/085; donde el valor de dos dígitos (35) corresponde al echado y el de tres dígitos (085) al rumbo, esta convención debe ser adoptada para evitar errores en las memorias de campo ya que, de este modo será fácilmente identificable algún error (Hoek y Bray, 1981).

El rumbo y el echado son las dos concepciones fundamentales en la geología estructural y es el método de la geología para definir la actitud de los estratos inclinados (Blyth y Freitas, 1997).

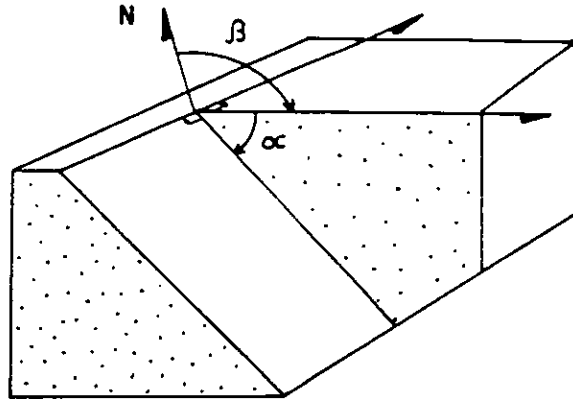


Fig. I.11 Definición de términos geométricos (Hoek y Bray, 1981).

I.5 REFERENCIAS.

- Blyth, F. G. H. y Freitas, M. H. (1997). Geología para ingenieros. Editorial CECSA. México, D.F. Capítulo 7.
- Harvey, J. C. (1987). Geología para ingenieros geotécnicos. Editorial Limusa. México, D.F. Capítulo 4.
- Hoek, E. y Bray, J. W. (1981). Rock Slope Engineering. Institution of Mining and Metallurgy. Londres. Capítulo 3.
- Kirkby, M. J. y Morgan, R. P. C., (1984). Erosión de suelos. Editorial Limusa. México, D.F. Capítulo 3.
- Legget y Karrow. (1986). Geología aplicada a ingeniería civil. Editorial Mc. Graw Hill. México, D.F. Capítulo 4.
- Nichols, H. L., (1979). Movimiento de tierras, manual de excavaciones. Cia. Editorial Continental, S.A. México, D.F. Capítulo 8.
- Sánchez, G. M., (1996-a). Revista técnica No. 1. Traumaterapia de los macizos rocosos. Un nuevo enfoque para el estudio de las excavaciones en rocas. Proc. V Reunión nacional de mecánica de rocas. México, D.F. Editada por la Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas.
- Sánchez, G. M., (1996-b). Revista técnica No. 2. Selección del tratamiento de control de la erosión y estabilización superficial de los taludes excavados en roca, en carreteras y autopistas. Proc. XII Reunión nacional de vías terrestres. Sn. Luis Potosí, México. Editada por la Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres.

CAPITULO No. II GEOLOGIA Y GEOMECANICA DE TALUDES

- II.1 **Introducción**
- II.2 **Importancia de la geología en los taludes**
- II.3 **Clasificación geológica de las rocas**
 - II.3.1 Rocas ígneas
 - II.3.2 Rocas sedimentarias
 - II.3.3 Rocas metamórficas
- II.4 **Fallas de taludes en roca**
 - II.4.1 Desprendimiento de rocas
 - II.4.2 Falla por corte circular
 - II.4.3 Falla por corte plano
 - II.4.4 Falla por flujo de bloques
- II.5 **Propiedades mecánicas de los macizos rocosos**
- II.5 **Fuerzas inducidas en los macizos rocosos**
 - II.6.1 Fuerzas gravitacionales
 - II.6.2 Fuerzas residuales
 - II.6.3 Fuerzas tectónicas
 - II.6.4 Fuerzas de origen térmico
- II.7 **Respuesta del macizo rocoso**
- II.8 **Características geotécnicas de las rocas**
 - II.8.1 Densidad relativa
 - II.8.2 Porosidad
 - II.8.3 Permeabilidad
 - II.8.4 Resistencia del material rocoso
 - II.8.5 Clasificación del espaciamiento de las discontinuidades
 - II.8.6 Orientación de las discontinuidades de roca
 - II.8.7 Apertura
 - II.8.8 Rugosidad
 - II.8.9 Rellenos
 - II.8.10 Designación de la calidad de roca (R.Q.D.)
- II.9 **Investigación general de macizos rocosos**
- II.10 **Muestreo de roca**
- II.11 **Referencias**

II.1 INTRODUCCION.

El segundo capítulo inicia resaltando la importancia de dos ciencias implícitas en el análisis de la erosión de taludes, ellas son: la geología y la mecánica de rocas ya que, ambas ofrecen las bases teóricas y prácticas para otorgar un tratamiento efectivo de protección, a los taludes afectados. Continúa con una breve descripción y clasificación de las rocas, en cuanto a su origen.

La geomecánica de taludes se involucra en el análisis de los cuatro probables tipos de falla de taludes en roca, así como, las propiedades mecánicas de los macizos rocosos. Un nuevo enfoque para el estudio de las excavaciones en roca, ha sido incluido en el presente, realizando un análisis de fuerzas inducidas y de la inminente respuesta que se genera en los macizos rocosos, al ejecutar este tipo de obras. Mediante la aplicación de pruebas índice, podemos establecer un reconocimiento del material que constituye al talud y además, éstas pruebas nos permiten conocer algunas de las características geotécnicas de la roca. En la siguiente sección se analizan las principales características geotécnicas de las rocas y en la parte final del capítulo se integra una investigación general en macizos rocosos y el muestreo en roca, como parte del estudio geológico y geomecánico de los taludes.

II.2 IMPORTANCIA DE LA GEOLOGIA EN LOS TALUDES.

La geología es la ciencia que concierne a la Tierra y a las rocas de las que está constituida, los procesos que las formaron y el modelado de su superficie en el pasado y en el presente. La Tierra no es un cuerpo estático, sino que continuamente está sujeta a cambios, tanto en su superficie como a niveles más profundos.

La importancia de la geología enfocada a los taludes radica en dos aspectos: Primeramente como ciencia pura ya que, trata de determinar las causas de los fenómenos geológicos implicados en los mismos, como en el caso de algún deslizamiento superficial rocoso, y en segundo término como ciencia aplicada ya que, se trata de utilizar sus conocimientos con fines utilitarios, es decir, para evaluar las condiciones geológicas de los terrenos sobre los cuales se cimentaran los futuros proyectos de vías terrestres, o bien para definir los tipos de materiales de construcción disponibles y sus características geotécnicas.

Hay tres grandes grupos de rocas separados en base a su origen y no en relación a su composición o resistencia: rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Cada una de estas rocas posee una estructura mineralógica definida por el proceso de formación de la misma, así como, propiedades ingenieriles particulares.

La corteza terrestre está integrada básicamente por dos tipos de materiales geológicos: suelo y rocas.

El término roca se utiliza para aplicarlo a aquellos materiales de distintos tipos que constituyen la mayor parte de la relativamente delgada corteza exterior de nuestro globo, algunas veces son suaves y fáciles de deformar en tanto que otras son duras y rígidas. Pueden observarse en la superficie, en las minas y en las perforaciones.

El término suelo se refiere a un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas, con bajo grado de coherencia, material regularmente suave y fácil de excavar, producto de un alto grado de intemperismo en roca, representa todo tipo de material terroso y además, se concidera como tal, a todo aquél material parcialmente cementado.

Para propósitos de ingeniería, sin embargo, los términos "roca" y "suelo" han sido adoptados para definir los caracteres mecánicos de los materiales geológicos. "Roca" es un material duro y "suelo" puede ser un sedimento que no ha sido convertido en roca o en algo semejante, o bien un residuo granular de roca que no ha sido completamente intemperizado y al cual se le da el nombre de suelo residual (Blyth y Freitas, 1997).

Una de las condiciones iniciales que debemos atender en el tratamiento de taludes afectados por erosión, queda inscrito por el hecho de efectuar un reconocimiento del tipo de material geológico que constituye al propio talud. Esto se lleva a cabo mediante la realización de pruebas sencillas, efectuadas en campo o laboratorio, las cuales proporcionan valores índice de las características geotécnicas de las rocas y suelos.

Partiendo de esta base, se tiene condición para poder aplicar el tratamiento, implicando algún sistema que en primera instancia, mitigue los efectos de la erosión y en segundo término los erradique, al completarse la regeneración de la vegetación sobre el talud.

Este análisis se justifica en el hecho de que no es lo mismo tratar a un talud constituido por una roca ígnea extrusiva como el basalto, a un talud conformado por un depósito sedimentario pensemos en una arenisca parcialmente cementada, lutitas suaves o un conglomerado ya que, son materiales mucho más susceptibles a ser erosionados, de lo anterior se infiere que, cada talud afectado por erosión constituye un reto distinto a tratar, teniéndose que tomar en cuenta también, los síntomas que se presenten.

II.3 CLASIFICACION GEOLOGICA DE ROCAS.

Una roca es un agregado natural de minerales que no puede ser fácilmente disgregado o roto por una acción manual, es decir, que generalmente presenta un alto grado de coherencia, aunque no siempre. Desde un punto de vista práctico, son duras y difíciles de excavar (se requiere la utilización de cargas explosivas).

Un mineral es un elemento o compuesto sólido formado por un proceso inorgánico. Tiene una composición química definida, con ciertas propiedades físicas y tiende a formar cuerpos geométricos regulares llamados cristales.

II.3.1 Rocas ígneas.

Son las formadas por el enfriamiento y solidificación del material fundido. El enfriamiento puede ocurrir tanto fuera como dentro de la corteza terrestre, de aquí que pueden ser de dos tipos:

- a) Rocas ígneas intrusivas o plutónicas. Ej: granito.
- b) Rocas ígneas extrusivas o volcánicas. Ej: basalto.

II.3.2 Rocas sedimentarias.

Son las formadas por algún proceso de litificación (proceso que consiste en la transformación de los sedimentos a rocas), en la superficie terrestre, son producto generalmente de la destrucción superficial de otras rocas ya existentes. Los materiales formados productos de la destrucción, se llaman sedimentos, estos son llevados a las partes bajas del terreno, donde se depositan y consolidan, formando a las rocas sedimentarias.

Hay tres tipos de rocas sedimentarias:

- a) Rocas sedimentarias clásticas: el término se deriva de la voz griega que significa roto o fragmentado, son las formadas por la consolidación de partículas minerales o fragmentos de roca. Como ejemplo de estas rocas tenemos a la arcilla que por litificación origina a la lutita, la arena a la arenisca y la grava al conglomerado.
- b) Rocas sedimentarias químicas: son las formadas por precipitación química de sales disueltas en un medio acuoso. Así por ejemplo tenemos al carbonato de calcio que conforma el mineral llamado calcita que litifica a la caliza.
- c) Rocas sedimentarias orgánicas: son las formadas por la destrucción y acumulación de restos duros de organismos extintos, o bien por la transformación de restos vegetales. Como ejemplo tenemos a las conchas que, litificadas, forman la coquina.

Existen tres formas de litificación:

- a) **Compactación:** es la presión generada por el peso de los mismos sedimentos lo que proporciona a estos coherencia.
- b) **Cementación:** un cementante natural proporciona la coherencia o unión entre los sedimentos.
- c) **Recristalización:** es una modificación de los minerales existentes, por un aumento de temperatura y el posterior enfriamiento del material, lo cual origina una nueva cristalización que da lugar a otros minerales distintos.

II.3.3 Rocas metamórficas.

Metamorfismo es un término utilizado para indicar la transformación de las rocas en nuevos tipos, por la recristalización de sus constituyentes; el término se deriva del griego, meta que significa un cambio y morfe de forma.

Las rocas metamórficas son producto de la transformación en estado sólido de rocas ya existentes que son alteradas físicamente y algunas veces químicamente o mineralógicamente por la aplicación de intenso calor y/o presión y de esta manera adquieren nuevas características conspicuas, en algún tiempo de su historia geológica.

Esta transformación ocurre bajo la superficie terrestre, dentro de la corteza a varios kilómetros de profundidad. Como ejemplos de estas rocas tenemos a la caliza, que metamorfoseada forma la roca de mármol y la lutita que da origen a la pizarra.

II.4 FALLAS DE TALUDES EN ROCA.

Los grandes bloques de roca son separados por discontinuidades, tales como: planos de estratificación, juntas, fallas y clivajes inducidos por esfuerzos en la roca.

Estas superficies formadas naturalmente constituyen planos de debilidad, los cuales reducen la cohesión del macizo rocoso.

La mayor parte de los problemas de taludes en roca se producen en las explotaciones de minería a cielo abierto y en los cortes que se realizan en la construcción de vías terrestres. El estado tecnológico actual relacionado con el problema de los taludes no es muy satisfactorio. No obstante se pueden estudiar muchos aspectos del mismo, y en el caso de rocas incompetentes, pueden hallarse los ángulos de talud crítico; en cambio en rocas duras no es posible aún prever la rotura o falla de los taludes.

Aunque las fallas de taludes en roca se clasifican a menudo en muchos grupos diferentes con características peculiares, la mayor parte de las roturas pueden clasificarse dentro de uno de estos cuatro grupos, fig. II.1

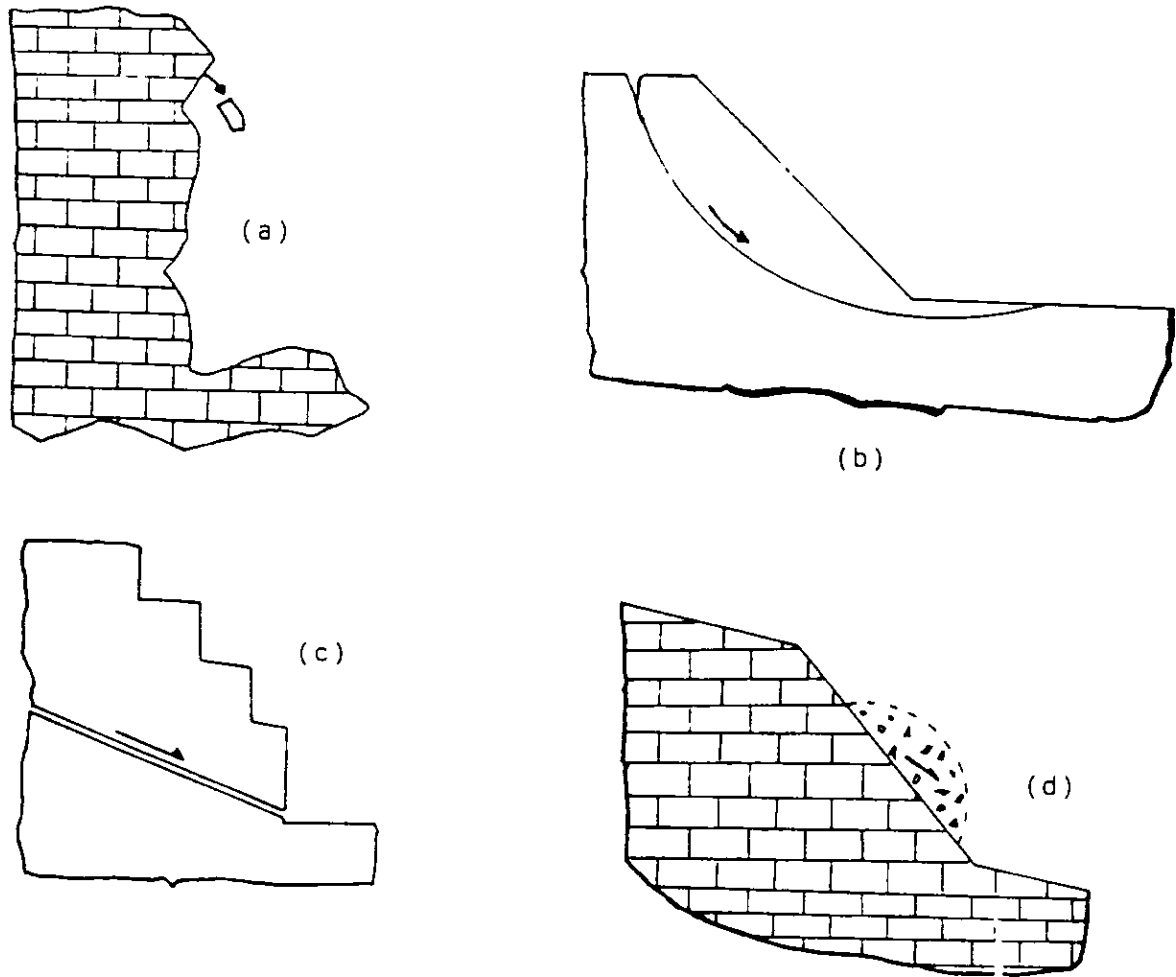


Fig. II.1 Clasificación de las formas de falla en taludes de roca.

- a) Desprendimiento.
- b) Cizallamiento de rotación.
- c) Cizallamiento plano.
- d) Flujo de bloques (Coates, 1970).

Los cuatro tipos de falla siguientes se diferencian fundamentalmente en la mecánica del derrumbamiento; estos son:

- Desprendimientos de rocas.
- Falla por corte de rotación.
- Falla por corte de plano.
- Falla por flujo de bloques.

II.4.1 Desprendimiento de rocas.

Se produce cuando se forma roca suelta en el frente con un ángulo mayor que el ángulo en reposo de este material suelto. Los bloques de roca caen y quedan al pie del talud. Este tipo de rotura de taludes es el resultado de una deficiencia en la resistencia de tracción de la masa rocosa, por ejemplo, la meteorización ataca a la cementación existente entre las superficies de las diaclasas.

Los derrumbes y caídos, son fallas típicas tanto de las laderas naturales como de los cortes practicados en aquellas. Consisten en desprendimientos locales de no muy grande volumen, aunque naturalmente existen desprendimientos de grandes masas fragmentadas que se deben clasificar como derrumbes. En estas fallas no puede hablarse de una superficie de deslizamiento, y el desprendimiento suele estar predeterminado por las discontinuidades y fisuras preexistentes. Suele suceder que éstas se abran al construirse el corte y que su frente quede sin el anterior confinamiento lateral, lo que da ocasión a que se aflojen los fragmentos, actúen presiones hidrostáticas del agua acumulada y otros efectos indeseables (fig. II.1.a).

II.4.2 Falla por corte circular.

Se produce cuando un segmento del talud se rompe por la rotación de una masa, según una superficie más o menos circular. Aquí la causa de la falla se debe a la insuficiencia de la resistencia al corte a lo largo de una superficie de este tipo. Este tipo de falla requiere un reajuste plástico de las concentraciones de tensión (fig. II.1.b).

II.4.3 Falla por corte de plano.

Como se muestra en la fig. II.1.c, esta falla es aquella en la que el deslizamiento se produce a lo largo de un plano de debilidad por razones de su estructura geológica. Esta rotura se dice que es debida a la insuficiente resistencia al corte a lo largo de este plano.

II.4.4 Falla por flujo de bloques.

Se produce en una masa rocosa dura y uniforme que, por no tener planos de debilidad, no permite la rotura por corte plano. La forma de rotura es un derrumbamiento de la masa rocosa como consecuencia de una trituración en las zonas de tensiones más elevadas de los bloques de roca frágil contenidos en la masa rocosa.

En un desprendimiento de flujo por bloques es probable que en los puntos de concentración de las tensiones la cohesión se destruya y se pierda. Un incremento de carga se transfiere a la roca contigua cuya resistencia a su vez es entonces superada.

Se puede pensar que esta acción continua progresivamente hasta que se produce un derrumbamiento general de la masa rocosa.

Este tipo de rotura no da lugar a un segmento de terreno bien delimitado que se mueve, sino que más bien está caracterizada por las deformaciones internas asociadas con la mayor parte de los tipos de flujo.

La superficie inicial de rotura puede ser lo mismo plana que circular, y en el estado actual no se puede prever, fig. II.1.d (Coates, 1970).

II.5 PROPIEDADES MECANICAS DE LOS MACIZOS ROCOSOS.

Los factores químicos, mineralógicos y estructurales de las rocas, determinan el comportamiento mecánico de las grandes masas de roca. Las propiedades mecánicas de las rocas son las características que más deben interesar a los ingenieros geotécnicos. Las propiedades de las rocas se deben estudiar para entender las causas del comportamiento mecánico de las mismas. En las obras, algunas clases de roca tienden a causar más problemas que otras. Que una roca sea dura, por ejemplo caliza, no es garantía de que no causará problemas.

De las descripciones de las masas rocosas analizadas en el capítulo anterior, se puede reconocer que cualquier efecto que induzca una tendencia al desplazamiento relativo entre partes de una masa rocosa, estará regido por la capacidad que tengan las discontinuidades para soportarlo o permitir que ocurra. Es por ello que, el comportamiento mecánico de las masas rocosas, está definido por el número, ubicación y naturaleza de los sistemas de discontinuidades. Desde el punto de vista de dicho comportamiento mecánico, se han establecido como características geométricas y mecánicas de las discontinuidades que definen el comportamiento de los macizos rocosos, a las siguientes:

- a) La calidad del macizo rocoso, desde el punto de vista de la intensidad de su fisuración.
- b) El número de juntas y fisuras que contiene la masa rocosa.
- c) La abertura de las juntas y, en su caso, el espesor del relleno.
- d) La rugosidad de las juntas en cada uno de los sistemas cuando éstos están cerrados, o cuando la abertura es menor que el tamaño de las rugosidades.
- e) El grado de alteración en los sistemas de juntas o fracturas, el espesor de la zona alterada o el espesor del relleno y la consistencia de la alteración

o relleno. Si el espesor del relleno es tal que las caras de la discontinuidad no están en contacto, la resistencia al esfuerzo cortante será igual a la del relleno; si el contacto ocurre, afectará la resistencia pero no la gobernará.

- f) La magnitud de las presiones hidráulicas, existentes en la masa rocosa a estudiar, causada por su posición relativa al nivel del agua en el subsuelo.
- g) El estado de esfuerzos que de manera natural presenta la masa rocosa y que tiene especial influencia en el comportamiento de la misma. Este sistema de fuerzas se analizará en la siguiente subsección en base al nuevo enfoque para el estudio de las excavaciones en roca.

II.6 FUERZAS INDUCIDAS EN LOS MACIZOS ROCOSOS.

El macizo rocoso idealizado como un material continuo, homogéneo e isótropo queda muy lejos de la realidad en las excavaciones en roca, sean éstas superficiales o subterráneas. Tampoco puede llegar a ser analizado en dos dimensiones ya que, forma parte de una estructura geológica tridimensional cuyas características geotécnicas son el resultado de procesos iniciados hace millones de años.

El macizo rocoso generalmente representa una gran estructura geológica inerte, que tan sólo se manifiesta por acciones ocasionales como caídos de material y en otras situaciones mas trascendentes por los problemas que implican una serie de deslizamientos superficiales. Los macizos rocosos conforman una región tridimensional conexas dentro de la capa superior de la corteza terrestre, sobre la cual actúan cuatro campos de fuerzas:

II.6.1 Fuerzas gravitacionales.

Todo punto dentro de un macizo rocoso intacto está sometido al peso de la columna de roca por encima del mismo. A este esfuerzo de compresión se le denomina también litostático y es calculado mediante la siguiente expresión:

$$\bar{\sigma}_z = \gamma z \quad (1)$$

donde: γ es el peso específico del material.

z es la profundidad considerada desde la superficie o frontera con la atmósfera.

Debido a que la mayoría de los materiales y las rocas entre ellos, se expanden lateralmente como respuesta a los esfuerzos verticales, el campo gravitacional de esfuerzos induce un campo de fuerzas horizontales. Cuando se consideran aplicables las hipótesis de la teoría de elasticidad, la magnitud del esfuerzo horizontal es la siguiente:

$$\sigma_h = \frac{\nu}{(1-\nu)} \sigma_z \quad (2)$$

donde: ν es la relación de Poisson, cuyo valor medio está entre 0.2 y 0.3.

Las rocas blandas presentan una relación de Poisson más elevada alcanzando valores cercanos a 0.5 y consecuentemente el esfuerzo (σ_h) es mayor en rocas blandas que en rocas duras por lo que la aparición de grietas generadas por dichos esfuerzos es mayor en las partes cercanas a las superficies excavadas en ese tipo de material. El análisis del campo gravitacional del estado inicial de esfuerzos se ilustra en la Fig. II.2 por medio de un perfil de un corte realizado en una vía terrestre.

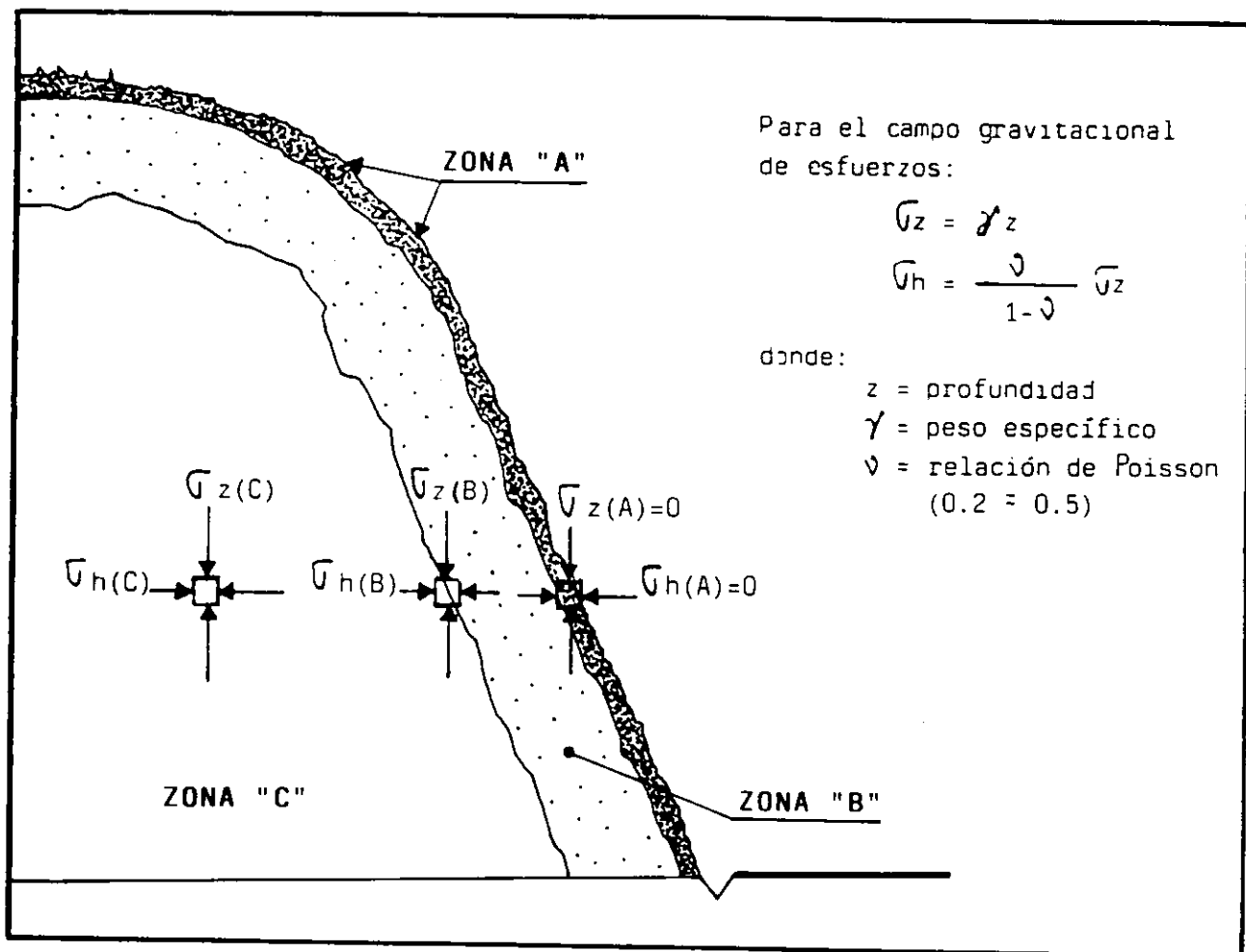


Fig. II.2 Análisis del estado inicial de esfuerzos en un perfil de talud.

(Sánchez, 1996).

II.6.2 Fuerzas residuales.

Los denominados esfuerzos residuales son inducidos en la roca por los procesos de su formación y pueden generarse por presiones debidas a:

- 1) cristalización y/o cambio de estado y consecuentemente de volumen del magma originario, combinados con confinamiento.
- 2) gradientes térmicos elevados.

El macizo rocoso puede en tal caso encontrarse en una situación de aparente equilibrio mientras no existan fuerzas externas que lo desestabilicen.

La desaparición súbita del confinamiento trae consigo la aparición de grietas o bien su propagación si ya existían, así como caída de fragmentos de roca.

II.6.3 Fuerzas tectónicas.

Son las que se originan como consecuencia de movimientos de la corteza terrestre. Dichos movimientos dan lugar a esfuerzos de compresión horizontales que muchas veces exceden los esfuerzos verticales. Por el contrario, en zonas cercanas al salto de una falla directa, puede haberse producido un relajamiento de presiones horizontales de modo que su valor sea casi cero.

II.6.4 Fuerzas de origen térmico.

Estos esfuerzos se generan al impedirse la contracción de un macizo rocoso al cambiar de temperatura. En un elemento homogéneo de roca la relación entre deformación unitaria (ϵ) y cambio de temperatura (Δt) es:

$$\epsilon = \alpha (\Delta t) \quad (3)$$

donde: α es el coeficiente de dilatación térmica en la dirección que se considere.

Al quedar impedida la deformación en el interior del macizo rocoso se generan unos esfuerzos σ_t que, en ausencia de otras fuerzas, se relacionan con el cambio de temperatura (Δt) del siguiente modo:

$$\alpha (\Delta t) = \frac{\sigma_t (1-2\nu)}{E} \quad (4)$$

donde: E es el módulo de elasticidad del material.

Suponiendo que una roca se enfría 30 grados, el cuál representa un cambio de temperatura que puede producirse a lo largo de un día en algunas zonas áridas de México. Para $\alpha = 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $E = 10^5 \text{ MPa}^*$ y $\nu = 0.25$ se obtiene un esfuerzo de tensión por cambio de temperatura $\sigma_t = -6 \text{ MPa}$, esfuerzo que puede llegar a producir microfisuras en partes de la roca o incrementar apreciablemente la apertura de fisuras existentes (Sánchez, 1996).

* $1 \text{ MPa} \approx 10 \text{ kg/cm}^2$

II.7 RESPUESTA DEL MACIZO ROCOSO.

Toda excavación en un macizo rocoso constituye una acción traumática que afecta estructuralmente a todas y cada una de las partes del mismo, cambiando súbitamente el campo de fuerzas gravitacional e induciendo variaciones en los campos de fuerzas residuales, tectónicos y térmicos, cuyos efectos se van a ir manifestando paulatina y determinadamente durante un tiempo no determinado que dependerá de la oportunidad y eficiencia de las medidas terapéuticas adoptadas.

La excavación introduce en el macizo rocoso una nueva frontera que induce un cambio de la función de esfuerzos y afecta de modo continuo a todo el cuerpo del talud, desde la superficie que lo limita y define geoméricamente en su frontera con la atmósfera hasta más allá de cualquier posible superficie de falla considerada en su interior. Esto quiere decir que tanto el graneado como la caída de trozos de roca, de bloques o cuñas así como la desestabilización global o falla del talud son manifestaciones distintas de un mismo fenómeno provocado por el cambio de estado de esfuerzos que se produce en el macizo rocoso como consecuencia de la excavación, o lo que es lo mismo, son síntomas de distinta tipología consecuentes a los cambios de esfuerzos que se dan en cada posible región -discreta o continua- del espacio dentro del macizo rocoso susceptible de sufrir cambios estructurales.

En el cuerpo del talud excavado en roca, existen cuatro tipos de grietas:

a) Las de origen tectónico: conformadas por discontinuidades como; diaclasas, esquistosidades, juntas de estratificación, etc. Estas grietas se encuentran distribuidas más o menos homogéneamente en todo el macizo rocoso y se ven afectadas por la excavación de modo que ésta provoca su apertura con una intensidad tanto mayor cuanto mayor es su proximidad a la superficie del corte y su verticalidad.

b) Las que se generan por la relajación de la roca, debido a la decompresión que se produce por los cambios en los campos de fuerzas gravitacional y térmico. La formación de este tipo de grietas es mayor en las cercanías de la excavación dependiendo también su frecuencia de la estratigrafía y la historia tectónica del macizo rocoso.

c) Las que se originan como consecuencia de las voladuras, si éste es el método de excavación empleado (Sánchez, 1996).

II.8 CARACTERISTICAS GEOTECNICAS DE LAS ROCAS.

El primer requerimiento para fines geotécnicos es un informe sobre las características geotécnicas de las masas rocosas; el nombre geológico de la roca se asienta en las descripciones geotécnicas debido a que la composición química y mineralógica de la roca determina su comportamiento frente al intemperismo bajo diferentes condiciones climáticas. La masa rocosa se describe en términos de índices, algunos de ellos son puramente descriptivos, otros se miden in situ o mediante pruebas de laboratorio, o se basan en las características a gran escala dentro de la masa rocosa como son el fracturamiento, clivaje, planos de debilidad, así como planos de estratificación en las rocas sedimentarias.

Las principales características geotécnicas de las rocas son: resistencia, porosidad, permeabilidad, densidad y el índice R.Q.D. (de las siglas en inglés; Rock Quality Designation), que da idea de la calidad de una roca, respecto a su estado de fracturamiento interno.

La porosidad está relacionada con el potencial de absorción y la resistencia con la capacidad de resistir esfuerzos.

La calidad de un macizo rocoso para propósitos ingenieriles, depende principalmente de la resistencia del material y de aspectos como: espaciamiento, apertura, rugosidad, rellenos, intemperismo y orientación de las discontinuidades.

Como índices descriptivos del material rocoso tenemos: variedad o tipo de roca, dimensiones del grano, textura, color, estructura y grado de intemperismo.

Analizando las propiedades e índices descriptivos de las rocas, junto con un diagnóstico geotécnico completo, es posible predecir en cierta medida el comportamiento de las masas rocosas.

II.8.1 Densidad relativa.

La densidad del material rocoso se define como la masa por unidad de volumen. Depende de la densidad relativa, también llamado peso específico relativo de los diferentes constituyentes minerales de la roca o del suelo, así como de los poros del material, llenos con aire, agua o ambos. La consideración de estos factores conduce a cuatro diferentes especificaciones de la densidad:

1. La densidad del material mineral sólido, su masa por unidad de volumen.
2. Densidad en seco. Los poros de la masa de sólidos están ocupados sólo por aire, por unidad de volumen.
3. Densidad de saturación. La masa del material con los poros llenos de agua, por unidad de volumen.

4. Densidad volumétrica. Esta es la masa por unidad de volumen para el caso general, cuando los poros están llenos parcialmente con aire y parcialmente con agua. Para esta especificación, el contenido de humedad (agua) de la muestra también se puede medir y registrar (Harvey, 1987).

II.8.2 Porosidad.

Esta se define como el porcentaje de espacios vacíos de una roca; es valuada mediante la siguiente expresión.

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_t} \times 100$$

donde: V_v es el volumen de vacíos o espacios, comprende a la fase líquida y gaseosa de la muestra de roca y

V_t es el volumen total de la muestra de roca.

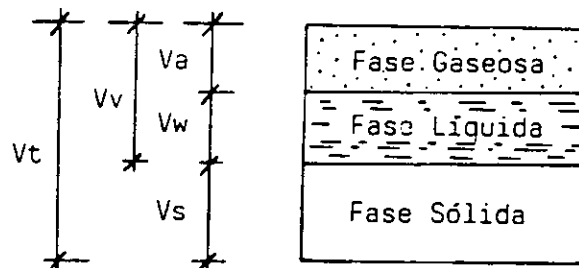


Fig. II.3 Esquema de una muestra de suelo, para indicación de los símbolos usados.

II.8.3 Permeabilidad.

La permeabilidad es la medida de la velocidad del flujo de un fluido a través de una muestra porosa bajo la carga hidráulica que opera dentro de ella, o bien, la facilidad que tiene el agua de moverse a través de los canales o conductos que forman o integran los poros de la muestra de suelo o roca. Así el valor de la permeabilidad obtenida de una prueba está en función tanto del carácter del fluido, es decir, su peso específico y su viscosidad, como de la naturaleza de los espacios porosos del sólido.

La permeabilidad normalmente se calcula con la siguiente relación: $k=Q/iA$ donde $Q=$ a la descarga, $i=$ al gradiente hidráulico $= h/l$, $A=$ área de la sección transversal de la muestra medida perpendicularmente a la dirección del flujo y $k=$ coeficiente de permeabilidad. Esta ecuación se conoce como la Ley de Darcy pero siendo empírica no es estrictamente una ley (Blyth y Freitas, 1997).

Sus dimensiones son longitud sobre tiempo, se determina mediante pruebas de laboratorio (en permeámetros) y pruebas en campo (pruebas de bombeo).

La permeabilidad secundaria se refiere al total de la masa rocosa y está controlada por la cantidad de las discontinuidades (Harvey, 1987).

II.8.4 Resistencia del material rocoso.

Es importante distinguir entre la resistencia de un fragmento de roca y la de la masa de roca, la cual está determinada principalmente por la frecuencia y orientación de las discontinuidades. Para un fragmento de roca, la orientación de los minerales hace que varíe la resistencia con la dirección de la medición, por lo que la roca se describe como anisótropa.

La resistencia se mide mediante pruebas in situ y de laboratorio. Las pruebas comunes son: resistencia a la compresión no confinada, de carga de punto, Schmidt de rebote y del cono dentado.

A continuación se describen brevemente los índices de roca más comúnmente usados:

a) Carga concentrada. Esta mide la fuerza requerida para romper un pedazo de roca entre puntos cónicos convergentes (fig. II.4). El valor índice obtenido se correlaciona bien con la resistencia compresiva uniaxial de la roca (Brock y Franklin, 1972).

b) Martillo de carga o de Schmidt. Este instrumento mide el rebote de un resorte de un pistón metálico cargado que golpea contra una superficie de roca. El rebote es un índice de la resistencia compresiva de la superficie y de aquí que ésta sea su resistencia al esfuerzo cortante (Int. Rock Mechanics, 1977a). También se utiliza en pruebas que valoran la dureza y lo abrasivo de la roca con fines de aplicación en la perforación.

c) Durabilidad producida. En esta prueba la roca se sujeta a la abrasión mecánica, al humedecimiento y al secado. El índice obtenido está relacionado con las propiedades de dilatación y encogimiento de la roca (Int. Soc. Rock Mechanics, 1977b).

La resistencia al cortante de las muestras se puede encontrar introduciendo éstas por medios mecánicos en una caja estándar para medir el cortante que se emplea para pruebas de suelos (fig. II.5). También se puede medir la resistencia al esfuerzo cortante a lo largo de planos de discontinuidades.

Las rocas pueden ser clasificadas por su resistencia a la compresión uniaxial, en un intervalo que va desde extremadamente débil a extremadamente fuerte, para criterios de aproximación en campo se tiene la Tabla II.1. Originalmente la tabla estuvo basada en resultados de pruebas de compresión-resistencia uniaxial para lo cual métodos estándar han sido sugeridos (Brown, 1981).

Casi siempre, resulta tardada y costosa la preparación de muestras de roca para la tolerancia dimensional requerida, para cada prueba, por lo que pruebas simples podrían ser empleadas. El punto de carga índice puede ser obtenido de muestras sin preparar mediante un simple aparato de campo (Broch y Franklin, 1972).

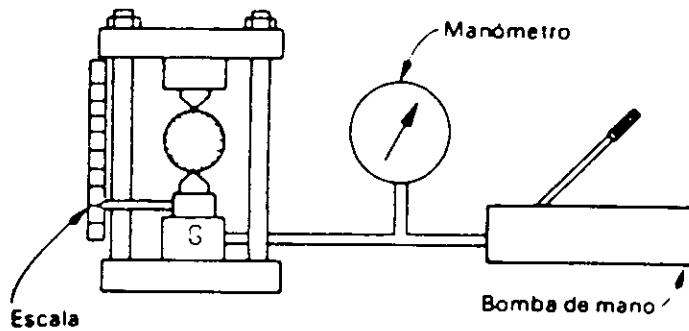


Fig. II.4 Probador de carga concentrada. G= gato, el cual aproxima los conos opuestos a 60° que cruzan el espécimen de un núcleo de roca. El cierre anterior a la ruptura se mide con la escala (Blyth y Freitas, 1997).

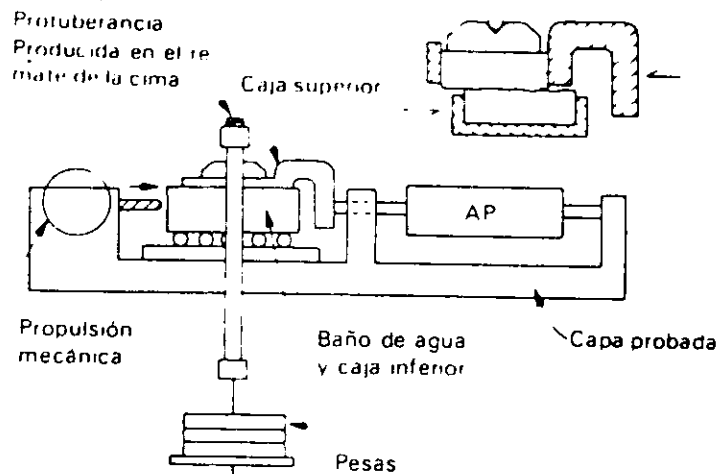


Fig. II.5 Elementos de una caja de esfuerzo cortante directo. AP= anillo de prueba: mide la carga al esfuerzo cortante en la muestra (Blyth y Freitas, 1997).

Tabla II.1 Clasificación de roca con estimación de resistencia (Canadian Geotechnical Society, Technical Committee on Foundations, 1985).

Resistencia Clasificación	Metodo de identificación en campo	Intervalo de resistencia a la compresión, MPa*
R0 Extremadamente débil	Identificado por rayadura de uña.	< 1
R1 Muy débil	Desmoronamientos causados por golpes firmes del martillo de geólogo; puede ser descortezada con una navaja.	1 - 5
R2 Roca débil	Puede ser descortezada con una navaja con cierta dificultad; aparece una grieta superficial hecha por un firme golpe con la punta del martillo de geólogo.	5 - 25
R3 Medio fuerte	No puede ser descortezado con una navaja; la muestra puede ser fracturada con un singular y firme golpe del martillo de geólogo.	25 - 50
R4 Fuerte	La muestra requiere más de un golpe del martillo de geólogo para ser fracturada.	50 - 100
R5 Muy fuerte	La muestra requiere muchos golpes del martillo de geólogo para ser fracturada.	100 - 250
R6 Extremadamente fuerte	La muestra sólo puede ser fragmentada por el martillo de geólogo.	> 250

* 1MPa \approx 10kg/cm²

II.8.5 Clasificación del espaciamiento de las discontinuidades.

El espaciamiento de las discontinuidades puede variar desde extremadamente amplio a extremadamente cerrado, como se muestra en la Tabla II.2. Esto puede ser determinado con mediciones de distancias entre discontinuidades adyacentes sobre una muestra de longitud no más corta que 3m. La longitud de la muestra debe ser preferentemente mayor que diez veces el espacio estimado. Las mediciones pueden ser tomadas de trincheras, zanjas, muestras de perforación o mediante el uso de tecnología como visión a través de perforaciones con cámaras de televisión y periscopios (Brown, 1981).

Tabla No. II.2 Clasificación de roca con estimación de espaciamiento de discontinuidades (Canadian Geotechnical Society, Technical Committee on Foundations, 1985).

Clasificación de espaciamiento	Anchura (m)
Extremadamente cerrado	< 0.02
Muy cerrado	0.02 - 0.06
Cerrado	0.06 - 0.20
Moderadamente cerrado	0.20 - 0.60
Amplio	0.60 - 2.00
Muy amplio	2.00 - 6.00
Extremadamente amplio	> 6.00

II.8.6 Orientación de las discontinuidades de roca.

La resistencia de un macizo rocoso es afectada por la orientación de las discontinuidades con respecto a la aplicación de carga. Un macizo rocoso contiene discontinuidades con muy diversas orientaciones. La resistencia mínima al deslizamiento ocurre cuando la superficie de deslizamiento potencial coincida con las discontinuidades.

Cuando existen discontinuidades reconocibles en muestras extraídas, tal como en estratificaciones o esquistosidades, en la muestra de dos o más perforaciones paralelas, la pendiente y el echado pueden ser encontrados gráficamente (Canadian Geotechnical Society, Technical Committee on Foundations, 1985).

II.8.7 Apertura.

La apertura es la distancia perpendicular que separa las paredes adyacentes de una discontinuidad abierta, por donde se puede infiltrar el agua. Los rellenos alojados en la discontinuidad, deben ser descritos cuidadosamente (II.8.7). Las aperturas son índices de la permeabilidad secundaria de la masa rocosa. Desafortunadamente, las aperturas son usualmente afectadas por las excavaciones, explosiones y el intemperismo. Su influencia se evalúa mediante pruebas de permeabilidad. Los periscopios y cámaras especiales pueden ser usados en penetraciones para el reconocimiento de aperturas. Las muestras integrales también proporcionan datos útiles (Brown, 1981).

Para el reconocimiento de aperturas, se requiere el empleo de un buen calibrador y las aperturas con medidas menores a 0.5mm se clasifican como "cerradas", aquellas situadas entre 0.5 y 10mm como "aberturas" y aquellas amplias de 10mm ó más como "abiertas".

La Tabla II.3 define las descripciones de apertura o separación de discontinuidades. El flujo de agua en las discontinuidades puede tener lugar en las siguientes seis clases:

- Clase 1: flujo de agua imposible.
- Clase 2: no hay evidencia de flujo de agua.
- Clase 3: evidencia de flujo de agua.
- Clase 4: humedad.
- Clase 5: filtración.
- Clase 6: flujo.

Tabla II.3 Separación de las superficies de discontinuidad (Harvey, 1987).

Término	Separación (discontinuidades)	
	Espesor (vetas, fallas)	
Amplia	más	de 200mm
Moderadamente amplia	60	a 200mm
Moderadamente estrecha	20	a 60mm
Estrecha	6	a 20mm
Muy estrecha	2	a 6mm
Extremadamente estrecha	mayor que 0-2mm	
Cerrada	cero	

II.8.8 Rugosidad.

La rugosidad de una discontinuidad aumenta la resistencia al esfuerzo cortante, especialmente cuando las asperezas en una superficie de una discontinuidad se intersectan con aquellas sobre la otra superficie.

La importancia de una superficie rugosa, disminuye con la apertura, el espesor del relleno y los desplazamientos previos a lo largo del incremento de la discontinuidad. La rugosidad puede ser medida en perfiles superficiales, por medio de compases geológicos o fotogrametría (Brown, 1981).

En la Tabla II.4 se definen los grados de rugosidad (Harvey, 1987).

Reconocimientos iniciales y muestreos permiten describir la rugosidad con longitudes de onda de alrededor de 10mm con términos tales como rugoso, liso, y brillante. La rugosidad en una escala métrica es: escalonada, ondulada o plana.

Perfiles típicos dejan la estimación de resistencia cortante máxima a lo largo de una discontinuidad (Brown, 1981).

En cuanto a este concepto se ha enfatizado sobre la importancia de las superficies rugosas sobre la resistencia al esfuerzo cortante de las discontinuidades en roca.

Esta rugosidad ocurre en dos escalas; en una escala corta, se involucran saltos de grano y superficies de falla, y en una escala larga, se involucran pliegues y flexiones en la discontinuidad (Canadian Geotechnical Society, Technical Committee on Foundations, 1985).

Tabla II.4 Categorías de la rugosidad (Harvey, 1987).

Categoría	Grado de rugosidad
1	pulida
2	espejo de falla
3	suave
4	áspera
5	prominencias definidas
6	pequeños escalones
7	muy áspera

II.8.9 Rellenos.

Es el material alojado entre dos caras de una discontinuidad tal como una falla. Este material puede ser escombros resultado del deslizamiento de una superficie sobre otra o puede ser material que ha sido precipitado por procesos químicos como disolución o intemperismo. Cualquiera que sea el origen del material que compone el relleno, en una discontinuidad, su presencia tendrá una importante influencia sobre la resistencia al esfuerzo cortante de esa discontinuidad. (Canadian Geotechnical Society, Technical Committee on Foundations, 1985).

El flujo de agua puede tener lugar en las cinco clases siguientes propuestas por Brown, (1981):

Clase 1: El relleno está seco y tiene baja permeabilidad.

Clase 2: El relleno está húmedo; no presenta agua libre.

Clase 3: El relleno está saturado; presenta gotas de agua libre.

Clase 4: El relleno está sobre-saturado; presenta flujo de agua continuo.

Clase 5: El relleno está localmente lavado exteriormente y existe un considerable flujo de agua a lo largo de canales.

II.8.10 Designación de la calidad de roca (R.Q.D.)

La designación de la calidad de roca (RQD), es una medición indirecta del número de fracturas y del incremento del ablandecimiento o alteración de la masa rocosa. Este índice es obtenido mediante un proceso de muestreo de roca, por cualquiera de los procedimientos convencionales, basándose en la observación del estado de fracturamiento que presentan los corazones obtenidos de los muestreos. Se obtiene valorando el cociente de la longitud que resulta de sumar los trozos de roca mayores a 100mm, entre la longitud de avance del sondeo. El valor del RQD es expresado en porcentaje. La clasificación acorde con el valor del RQD es dada en la Tabla II.5.

Tabla II.5 Clasificación de rocas con estimación del valor R.Q.D. (Canadian Geotechnical Society, Technical Committee on Foundations, 1985).

Clasificación RQD	Valor del RQD (%)
Calidad muy pobre	< 25
Calidad pobre	25 - 50
Calidad aceptable	50 - 75
Calidad buena	75 - 90
Calidad excelente	90 - 100

$$\text{PORCENTAJE DE RECUPERACION} = \frac{\text{RECUPERACION}}{\text{Long. perforada}} \times 100 \quad \text{RQD (\%)} = \frac{\sum \text{TROZOS} > 100\text{mm}}{\text{Long. perforada}} \times 100$$

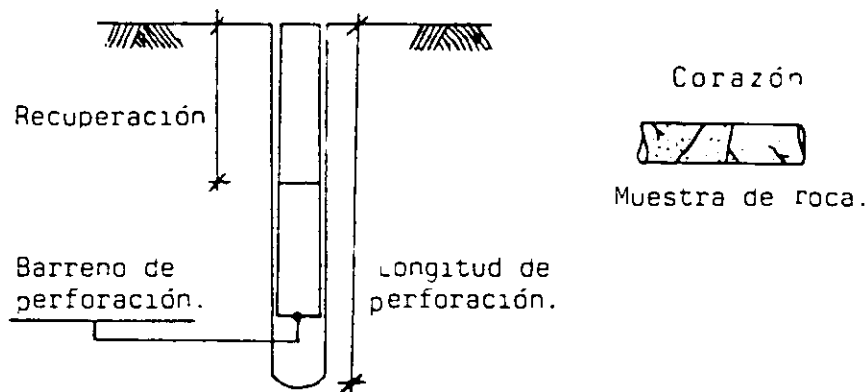


Fig. II.6 Esquema de barrenación para la extracción de una muestra de roca.

Si el corazón es fracturado en su manejo o durante la barrenación, las piezas rotas frescas pueden ser convenientemente juntadas y contadas como una pieza entera. Algún juicio técnico es necesario en los casos de obtener capas delgadas de rocas sedimentarias y rocas metamórficas que presenten foliación, el método no es tan preciso en estos casos como lo sería al tratarse de rocas ígneas, como en capas gruesas de calizas, areniscas, etc. Casi siempre, el sistema ha sido aplicado exitosamente hasta para pizarras, aunque es necesario trozar los corazones inmediatamente al removerlos o sacarlos de la muestra del barreno, antes de que la acción del aire afloje y agriete la muestra.

El procedimiento obviamente penaliza masas de roca en la cual los corazones recuperados son pobres. El uso inadecuado de equipo de perforación puede también causar una pobre recuperación.

Por esta razón, es conveniente recurrir a una barrenación con doble tubo para la extracción de la muestra de al menos una talla NX (54mm de diámetro), y tener una apropiada supervisión en el barrenamiento. Tan simple como parece el procedimiento, ha sido demostrado que, como un indicador general de calidad de roca para propósitos ingenieriles, el valor RQD es sensitivo y consistente. Este valor índice puede utilizarse para establecer comparaciones entre muestras provenientes de diversos sondeos. Los resultados deben considerarse como cualitativos ya que reflejan la condición general del estado de la masa rocosa (Canadian Geotechnical Society, Technical Committee on Foundations, 1985).

II.9 INVESTIGACION GENERAL DE MACIZOS ROCOSOS.

Para la determinación de las propiedades y condiciones de los macizos rocosos, una serie de muestreos o métodos de inspección por penetración serán frecuentemente necesarios. Esto ocurrirá cuando las obras se extiendan en una superficie rocosa o dentro de una capa rocosa (Canadian Geotechnical Society, Technical Committee on Foundations, 1985).

Cuando las investigaciones en algún estrato de roca sean requeridas, la información pertinente a ser determinada puede incluir:

- características geológicas del sitio;
- elevaciones y variaciones de la superficie rocosa, (topografía);
- extensiones y características de alteraciones e intemperismo;
- sensibilidad (o resistencia) al intemperismo;
- discontinuidades tales como; estratificaciones, fallas y juntas;
- orientación estructural y plegamientos;
- foliación o planos de clivaje;
- permeabilidad;
- resistencia y compresibilidad del macizo rocoso; y
- agua subterránea.

II.10 MUESTREO DE ROCA.

Las perforaciones para la investigación de roca, pueden ser realizadas por distintos métodos (Canadian Geotechnical Society, Technical Committee on Foundations, 1985).

Estos pueden incluir:

- perforación giratoria con flujo rápido de aire o agua;
- perforación giratoria con cono triple con flujo rápido de aire o agua;
- corazones barrenados con doble o triple tubo; y
- perforaciones de percusión, etc.

II.11 REFERENCIAS.

- Broch, E. y Franklin, J. A., (1972). The Point-load Strength Test. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 9.
- Brown, E. T., (1981). Rock Characterization, Testing, and Monitoring. International Society for Rock Mechanics, Suggested Methods. Pergamon Press.
- Canadian Geotechnical Society, Technical Committee on Foundations., (1985). Canadian Foundation Engineering Manual. Second Edition.
- Coates, D. F., (1970). Fundamentos de mecánica de rocas. Centro de investigación minera. Dirección de minas. Ministerio de energía, minas y recursos naturales. Editorial Blume. España. Capítulo 6.
- Harvey, J. C. (1987). Geología para ingenieros geotécnicos. Editorial Limusa, México, D.F, Capítulo 6.
- Sánchez, G. M., (1996-a). Revista técnica No. 1. Traumatoterapia de los macizos rocosos. Un nuevo enfoque para el estudio de las excavaciones en rocas. Proc. V Reunión nacional de mecánica de rocas. México, D.F. Editada por la Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas.

CAPITULO No. III EROSION EN TALUDES

- III.1 **Introducción**
- III.2 **El proceso de denudación y sus agentes**
- III.3 **Intemperismo**
 - III.3.1 Intemperismo químico
 - III.3.2 Intemperismo mecánico
 - III.3.3 Intemperismo biológico
 - III.3.4 Grados de intemperismo
- III.4 **Erosión**
 - III.4.1 Erosión eólica
 - III.4.2 Erosión pluvial
- III.5 **El problema de la erosión en taludes**
- III.6 **Factores que contribuyen a la erosión**
 - III.6.1 Impacto de gota de lluvia
 - a) Desprendimiento y dispersión de las partículas de suelo
 - b) Compactación superficial del suelo
 - c) Infiltración por precipitación pluvial
 - d) Erosión laminar
 - III.6.2 Angulo de las pendientes
 - III.6.3 Decompresión o estado de relajación de las rocas
 - III.6.4 Erodibilidad de las superficies
- III.7 **Patología de los taludes excavados en roca**
- III.8 **Diagnóstico de los taludes excavados en roca**
- III.9 **Terapia de los taludes excavados en roca**
- III.10 **Análisis de algunas técnicas utilizadas para el control de la erosión en taludes**
- III.11 **Referencias**

III.1 INTRODUCCION.

Los cambios superficiales pueden ser observados igualmente por los ingenieros y por los geólogos. Entre estos cambios, la erosión es un proceso dominante que desgasta y destruye continuamente los acantilados costeros, reduce la altura de los continentes y transporta el material así removido, ya sea al mar o a las cuencas continentales de depositación o simplemente a las parte bajas del terreno, cuando se trata de erosión en pendientes.

El tercer capítulo comienza con un análisis del proceso de denudación y la acción deteriorante de sus agentes en la superficie de la corteza terrestre, con énfasis en los taludes. Denotando que el aire y el agua, integran las principales acciones erosivas, que afectan a los mismos.

Se analizan los principales factores que contribuyen a la erosión de taludes y además, se presenta una adopción de términos que implican un nuevo enfoque para el estudio de los taludes excavados en roca.

Antes de entrar en otros aspectos interesantes de la erosión de taludes, se ha anexado en la parte final del trabajo (como complemento de la Tabla III.5), un cuadro clínico de los taludes excavados en roca (apéndice A).

En la parte final del capítulo se analizan distintas aplicaciones para el control de la erosión en taludes.

III.2 EL PROCESO DE DENUDACION Y SUS AGENTES.

La Tierra no es un cuerpo rígido ni estático, se encuentra en continuo estado de cambio, tanto en el interior como en la superficie. Fuerzas internas actúan creando rocas nuevas, mientras que en la superficie otras fuerzas, destruyen las ya existentes. Las fuerzas exteriores, como la energía del sol, viento y lluvia atacan las rocas sólidas y las desintegran para convertirlas en fragmentos y partículas de roca suelta que son transportados por la erosión y depositados en niveles más bajos. Como la superficie terrestre continuamente está siendo desgastada y su forma es modificada por la serie de procesos naturales conocidos como el intemperismo y la erosión, a la acción conjunta de estos dos agentes se conoce con el nombre de denudación. A través de las acciones de estos dos agentes, puede formarse un lecho de roca intemperizada sobre la superficie de la tierra. Normalmente los lechos superiores de esta cubierta son eliminados continuamente, exponiendo el material inferior más fresco, a la influencia de los agentes del intemperismo (Blyth y Freitas, 1997).

El ingeniero geotécnico dotado de un buen conocimiento sobre los procesos de intemperismo y erosión, relacionados con el clima y el tipo de roca, estará en posibilidad de observar importantes detalles en el paisaje, en especial los que indican inestabilidad de las rocas (Harvey, 1987).

III.3 INTEMPERISMO.

Intemperismo es el término usado para describir el proceso de desintegración de las rocas situadas en la superficie terrestre. Por lo general este proceso se da por la acción de diversos agentes, tales como: ácidos naturales, humedad, cambios de temperatura y la acción de seres vivos.

De manera general podemos establecer tres tipos de intemperismo que son:

- a) Intemperismo químico.
- b) Intemperismo mecánico.
- c) Intemperismo biológico.

III.3.1 Intemperismo químico.

El intemperismo químico o descomposición, es la rotura de los minerales que conforman al material rocoso en nuevos compuestos, por la acción de los agentes químicos como los ácidos en el aire, en la lluvia y en el agua fluvial.

Aunque su acción es muy lenta, produce efectos notables, especialmente en las rocas solubles.

El intemperismo químico puede verse más fácilmente cuando actúa como solvente sobre algunas rocas, principalmente en las calizas y en aquellas rocas, que contienen minerales como la halita (NaCl), anhidrita (CaSO_4) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Sin embargo, este tipo de intemperismo no está restringido solamente a las rocas fácilmente solubles. Desde luego, las más fácilmente intemperizadas son las calizas; siguen con una mayor resistencia las areniscas y lutitas; las rocas ígneas (excluyendo ciertas rocas volcánicas que se intemperizan fácilmente) y las cuarcitas que son las más resistentes.

En los climas secos, el intemperismo químico es superficial y puede retardarse por la carencia de agua, produciéndose únicamente zonas delgadas de roca intemperizada (Blyth y Freitas, 1997).

Los procesos implicados en el intemperismo químico se describen en la Tabla III.1. Su ritmo de operación depende de la presencia del agua y su intensidad es mayor en los climas húmedos que en los secos.

Tabla III.1 Procesos involucrados en el intemperismo químico (Blyth y Freitas, 1997).

SOLUCION: Consiste en la disociación de minerales en iones que aumenta considerablemente por la presencia de CO_2 en el perfil de suelo y el cual forma ácido carbónico (H_2CO_3) con el agua de lluvia percolante.

OXIDACION: La combinación del oxígeno con mineral para formar óxidos e hidróxidos o cualquier otra reacción en la cual la oxidación aumenta el número de elementos oxidados.

REDUCCION: La liberación del oxígeno de un mineral que pasa a formar parte del ambiente circundante y deja la estructura del mineral.

HIDRATACION: La absorción de moléculas de agua dentro de la estructura interna de un mineral. Este fenómeno normalmente provoca una expansión que alcanza 60% en las arcillas. La admisión de agua acelera los procesos de solución, oxidación, reducción e hidrólisis.

HIDROLISIS: Los iones de hidrógeno en las aguas percolantes reemplazan a los cationes y no ocurre el fenómeno de oxidación-reducción.

LIXIVIACION: La migración de los iones alentada por los procesos antes citados. Nótese que la movilidad de los iones depende de su potencial iónico. El Ca, el Mg, el Na y el K son fácilmente lixiviados por las aguas circulantes. El Fe es el más resistente. El Si es difícil de lixiviar y el Al es casi inamovible.

CAMBIO DE CATIONES: La absorción sobre la superficie de una arcilla cargada negativamente de cationes en solución cargados positivamente, especialmente Ca, H, K, Mg.

III.3.2 Intemperismo mecánico.

El intemperismo mecánico rompe las rocas en partículas más pequeñas por la acción de la temperatura, por el impacto de las gotas de lluvia y por la abrasión de las mismas partículas minerales acarreadas por el viento. En climas extremos, los cambios de temperatura producen la escamación de las superficies expuestas de una roca, proceso conocido con el nombre de exfoliación, la cual disminuye con la profundidad en relación con la superficie, pero que también puede ser causada por efectos de esfuerzos de tensión a los que es sometida la roca por efecto de una descarga o estado de relajación de la misma por lo que se permite una pequeña expansión vertical la cual da lugar a la formación de "hojas" de roca.

Retomando los efectos de los climas calientes, cuando una superficie rocosa está expuesta a una considerable variación de temperatura diaria, como en las regiones áridas y semiáridas, la expansión que ocurre durante el día y la contracción durante la noche, constantemente repetidas, debilitan la estructura de la roca. Las capas exteriores calentadas comienzan a separarse de la roca más fría de abajo en forma de escamas y lascas mediante un proceso conocido como exfoliación. A éste tipo de intemperismo se llama insolación.

Así tenemos que la llamada exfoliación de la roca puede ser producida por efectos tanto de relajación como de insolación.

En contraposición, los efectos de una temperatura demasiado baja, también ocasionan estragos en las rocas. Tenemos así la acción de las heladas; en los climas fríos las repetidas congelaciones separan escamas y fragmentos angulosos de las superficies de roca expuestas, lo cual es un proceso al que se le denomina "acción de cuña de hielo". El cual consiste en la penetración de agua a las rocas por los poros, grietas y fisuras; el hielo formado por congelación ocupa un volumen de casi el diez por ciento y ejerce una presión de alrededor de 13.8×10^6 N/m² si el congelamiento ocurre en un espacio confinado. De esta manera la congelación es semejante a una voladura en miniatura que hace que las capas exteriores de la roca se desintegren.

En las áreas donde las lluvias son intensas, las partículas del suelo son separadas, lo que debilita los suelos debido al goteo continuo. En las tierras áridas, las formas terrestres son modeladas por el golpeo de la arena durante las tormentas (Blyth y Freitas, 1997).

En la Tabla III.2. se encuentran enlistados los procesos implicados en el intemperismo mecánico.

Tabla III.2 Procesos involucrados en el intemperismo mecánico (Blyth y Freitas, 1997).

DESCARGA MECANICA	Expansión vertical debida a la reducción de la carga vertical por la erosión. Este fenómeno ocasionará que se abran las fracturas existentes creándose inclusive nuevas.
CARGA MECANICA	Impacto sobre la roca y abrasión en los desiertos de las partículas arrastradas por el viento del tamaño de arena y limo. El impacto sobre el suelo y las rocas débiles de las gotas de lluvia durante las tormentas intensas.
CARGA TERMICA	Expansión por el congelamiento del agua en poros y fracturas en regiones frías o por el calentamiento de las rocas en regiones calientes. Contracción por el enfriamiento de las rocas en regiones frías.
HUMEDAD Y ARIDEZ	Expansión y contracción asociadas con la repetida absorción y pérdida de moléculas de agua de superficies y estructuras minerales.
CRISTALIZACION	Expansión de poros y fisuras por la cristalización de minerales que estuvieron dentro de ellos en estado de solución. Esta sólo es severa cuando ocurre en el interior de un espacio confinado.

III.3.3 Intemperismo biológico.

El intemperismo biológico incluye los cambios mecánicos y químicos del suelo que están directamente asociados con las actividades de animales y plantas. Cuando éstas están presentes, la actividad microbiana puede cambiar la química del terreno situado al nivel del suelo. Los animales excavadores y las raíces de las plantas penetran el suelo y éstas producen gases que aumentan la acidez del agua de lluvia percolante.

Las plantas retienen humedad y la superficie rocosa sobre la cual crecen permanece húmeda fomentando la acción solvente del agua. El decaimiento químico de la roca es también ayudado por la formación de humus vegetal, que es un producto orgánico derivado de las plantas con la ayuda de la acción de las bacterias y de los hongos. Por lo tanto, los ácidos orgánicos son añadidos al agua de lluvia percolante, lo cual aumenta su poder solvente. Algunas bacterias son activas bajo condiciones reductoras y contribuyen a la formación de sulfuros; otras pueden convertir el nitrógeno a compuestos de NH_4 los cuales afectan el valor del pH de los suelos.

El rompimiento mecánico de las rocas se lleva a cabo cuando las raíces de las plantas penetran en las grietas separando sus paredes por la acción de cuña de la raíz (Blyth y Freitas, 1997).

III.3.4 Grados de intemperismo.

Los diferentes grados de intemperismo, se han clasificado en cuanto a su efecto en el material rocoso y en el macizo rocoso, y se describen a modo de tablas de la siguiente manera:

Tabla III.3 Grados de intemperismo en material rocoso (Harvey, 1987).

Grado	Término	Descripción
1	Fresco	No hay signos visibles de intemperismo en el material de roca.
2	Decolorado	El color del material original de la roca nueva cambia y es evidencia de intemperismo. Se debe indicar el grado del cambio del color original. Se debe mencionar si el cambio de color está restringido a partículas minerales. (*)
3	Descompuesto	La roca se intemperiza hasta llegar a la condición de suelo, donde la trama del material original aún está intacta, pero algunos o todos los granos minerales están descompuestos.
4	Desintegrado	La roca está intemperizada formando suelo, en el cual la trama del material original está aún intacta. La roca se desmorona, pero los granos de mineral no están descompuestos.

(*) El grado de intemperismo descrito arriba se puede subdividir empleando términos calificativos, por ejemplo, "parcialmente decolorado", "totalmente decolorado" y "ligeramente decolorado", en tanto ayude a la descripción del material que se está examinando.

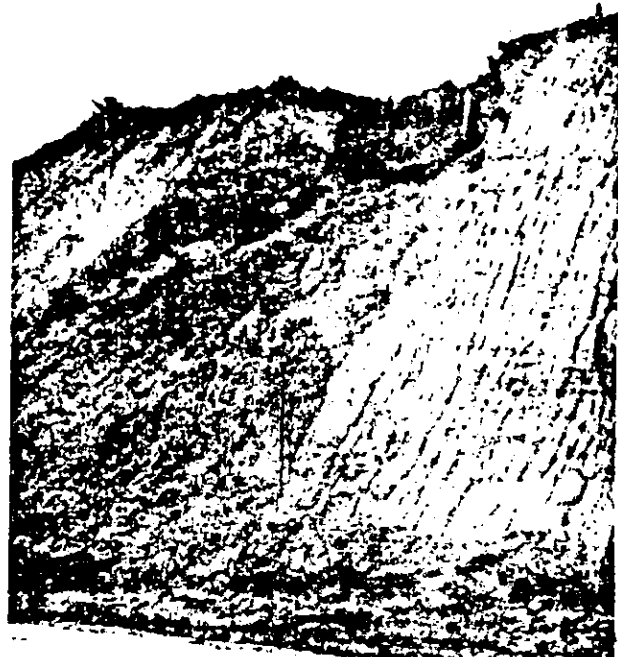


Foto III.1 Caído en talud inestable en lutitas meteorizadas (Sánchez, 1996-a).

Tabla III.4 Grados de intemperismo en macizos rocosos (Harvey, 1987).

Grado	Término.	Descripción.
1	Fresco	No hay señal visible de intemperismo en el material de roca; quizá alguna decoloración en las principales superficies de discontinuidad.
2	Intemperismo ligero	La decoloración indica intemperismo del material rocoso y las superficies de discontinuidad. Todo el material de roca se puede decolorar por el intemperismo.
3	Intemperismo moderado	Menos de la mitad del material rocoso está descompuesto o moderado desintegrado formando el suelo. La roca nueva o decolorada está presente en forma de retícula continua o como núcleos de roca.
4	Intemperismo alto	Más de la mitad del macizo rocoso está descompuesto o desintegrado formando suelo. La roca nueva o decolorada está presente como núcleos de roca.
5	Intemperismo completo	Todo el material rocoso que integra al macizo está descompuesto, desintegrado formando suelo o se encuentra en ambas situaciones. La estructura del macizo original está aún intacta en su mayor parte.
6	Suelo residual	Todo el material rocoso se ha convertido en suelo. La estructura de la masa y la trama del material están destruidos. Hay un gran cambio de volumen, pero no ha ocurrido un transporte importante del suelo.

III.4 EROSION.

Entendemos por erosión al proceso según el cual partículas de diferente tamaño procedentes de la zona más superficial del talud (Zona "A"= suelo o roca, según la fig. I.1), que son desplazadas de su situación inicial y transportadas.

Al material movilizado o erosionado se le denomina sedimento y a su deposición, sedimentación. Los principales agentes de la erosión son el agua y el aire.

La erosión es un proceso degenerativo que facilita la acción del intemperismo o meteorización de los materiales y afecta cada vez a volúmenes mayores de material, que después deberán ser removidos (Sánchez, 1996).

Los tipos de erosión más importantes son:

- a) La erosión eólica que es provocada por la acción del viento. (*)
- b) La erosión pluvial que es provocada por la acción de la lluvia. (*)
- c) La erosión fluvial que es provocada por la acción de los ríos.
- d) La erosión glacial que es provocada por la acción de glaciares.
- e) La erosión marina que es provocada por la acción del oleaje.

De esta clasificación centraremos nuestra atención en aquellas que afecten de manera directa a los taludes formados en la construcción de obras de infraestructura (autopistas y carreteras), tomando en cuenta que los principales agentes de la erosión son el aire y el agua, se describirán únicamente las marcadas con (*).

III.4.1 Erosión eólica.

La erosión eólica es el proceso por el cual el viento recoge y transporta el material superficial suelto, y las partículas llevadas por el viento desgastan la parte más superficial de la corteza terrestre.

La redistribución espacial y el rearrreglo de las partículas causados por la erosión eólica, pueden tener profundos efectos en superficies afectadas y en su microtopografía relativa. El proceso funciona en diversos ambientes naturales que carecen de una cubierta vegetal protectora, y es particularmente importante en los desiertos tanto fríos como cálidos, en áreas de dunas costeras y en regiones montañosas expuestas. Pero sus consecuencias son indudablemente más serias en las áreas sujetas a una precipitación pluvial baja, variable e impredecible, temperaturas y tasas de evaporación altas y elevada velocidad del viento, como es el caso de las áreas semiáridas así como de algunas de las regiones más húmedas que experimentan sequías periódicas.

Realmente podemos establecer que la afectación que puede llegar a producir este tipo de erosión en taludes puede ser considerada como mínima, es decir, no representa un factor al cual se le deba dar una importancia de primer orden sino que lejos de descuidarla se le puede dar el tratamiento efectivo por medio de la implantación de especies (vegetales) acordes con el medio para mitigar su manifestación que es dada por la presencia de polvo y graneos que en algunos casos ocasionarían problemas de visibilidad y de depositación del material suelto en las obras de conducción y desalojo del agua excedente (cunetas y contracunetas) en una vía terrestre.

Tenemos así que la erosión eólica se produce por la acción del aire en movimiento, es decir, por la acción del viento, el cual representa cierta energía capaz de remover partículas sólidas de cierto tamaño, el tamaño dependerá de la energía del viento.

Para la comprensión de este proceso, atenderemos dos zonas principales, ilustradas en la fig. III.1.

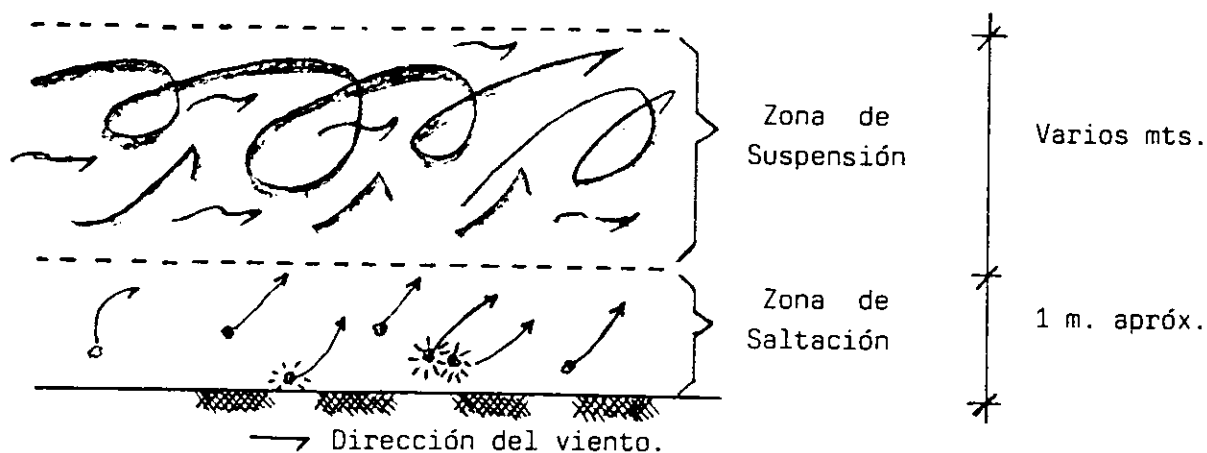


Fig. III.1 Proceso de saltación en erosión eólica.

En la zona de saltación se requiere que el viento sea fuerte para que los granos de arena existentes puedan moverse. En una primera instancia, estos granos ruedan, pero en un momento dado, alguno de ellos golpeará a otro, con lo cual comenzarán a saltar. El movimiento descrito anteriormente se producirá progresivamente entre todos los granos hasta que ocurra una reacción en cadena de multitud de saltos.

En la zona de suspensión se encontrará el movimiento de aquellas partículas muy finas que han sido expulsadas hacia la parte superior tanto por el barrido que efectúa el viento en la superficie del terreno, como el movimiento de las partículas de arena, de ahí dichas partículas son llevadas en suspensión a una distancia mucho mayor de viaje en el caso de una arena. La erosión eólica es evidente en las zonas áridas desprovistas de vegetación.

En investigaciones realizadas se han establecido datos sobre la proporción de material transportado por los mecanismos de saltación, deslizamiento superficial y suspensión, estos varían sobre todo de acuerdo con la velocidad del viento y la distribución de tamaños de las partículas.

Chepil (1945), observó que las proporciones variaban de la manera siguiente: desde 50 a 70 por ciento en la saltación, del 3 al 40 por ciento en la suspensión, y del 5 al 25 por ciento en el deslizamiento superficial; Bagnold (1941), estimó un deslizamiento superficial del 20 al 25 por ciento del movimiento total; y Horikawa y Shen (1960) reportaron una cifra similar del 20 por ciento.

Todos ellos están de acuerdo en que la saltación es cuantitativamente el proceso más importante, ya que en realidad la mayor parte del deslizamiento y la suspensión no ocurrirán sin él.

Existen una serie de investigaciones aparte y propuestas realizadas a este respecto un cuanto más profundas que proponen y manejan ecuaciones que involucran una serie de variables tales como: velocidad de viento, densidades de aire y granos, diámetros de grano, constante gravitacional, etc, las cuales para el propósito del presente trabajo saldrían del contenido del mismo y quedarían para una investigación más detallada al respecto. Se proporcionan las debidas referencias bibliográficas al final del capítulo para poder ser consultadas por el lector interesado. Sin embargo, podemos estar seguros de que existe un gran interés por efectuar una investigación vigorosa acerca de la naturaleza y proceso de la erosión eólica, así como el desarrollo de métodos para su control, muy a pesar de que el hecho de vigilar su comportamiento, resulta tardado, costoso y se requiere inventar equipo adecuado a las necesidades (Kirkby y Morgan, 1984).



Foto III.2 Erosión en piroclastos arcillosos poco consolidados.
(Sánchez, 1996-b).

III.4.2 Erosión pluvial.

La erosión pluvial afecta principalmente a los taludes cuando estos están desprovistos de vegetación y el material que los conforma queda expuesto a la acción de las lluvias.

Los taludes potencialmente erosionables pueden identificarse en base a su pendiente y por las características geotécnicas del material que lo compone ya sea suelo o roca. La acción desgastante de este tipo de erosión, está en función directa del tipo de clima que prevalezca en la región donde se encuentre situado nuestro talud a tratar, así tenemos que en las regiones semiáridas con una precipitación pluvial anual de entre 250 y 366mm y vegetación escasa, las tasas de erosión geológica (Lowdermilk, 1934) pueden ser altas si las lluvias torrenciales son frecuentes y cubren un área extensa (Langbein y Schumm, 1958). En las regiones áridas la precipitación pluvial es muy escasa como para que la erosión sea generalizada y las cantidades de partículas desprendidas son muy pequeñas, en regiones más húmedas bajo una cubierta vegetal natural, las plantas evitan que las salpicaduras de la lluvia o el flujo del agua remuevan las partículas del suelo. En cuanto al proceso de este tipo de erosión, tenemos que, las gotas de lluvia se encargan de compactar la porción más superficial del talud (suelo), las salpicaduras y el flujo del agua desprenden partículas del mismo; estos procesos pueden sellar las superficies con lo que se disminuye la tasa de infiltración del agua en el suelo, y como además tenemos una pendiente, entonces se producen escurrientías. Los deslaves laminares (o flujo de interarroyuelos) ocurren cuando el agua corre libremente excepto entre los terrones del suelo y cubren una gran superficie, y no se forman canales continuos. A medida que aumenta la velocidad del flujo, el agua incide en el suelo y se forman arroyuelos. Los arroyuelos son canales continuos de anchura reducida y escasa profundidad que quedan marcados como huellas por su acción desgastante en las paredes de los taludes, representados por la aparición de las conocidas gargantas superficiales, también llamados canales erosivos.

El proceso en pendientes completamente cubiertas por vegetación se caracteriza por que los escurrimientos son bajos, debido a que las tasas de infiltración son altas en comparación con las de superficies desnudas (Woodward, 1943), ya que las superficies cubiertas con vegetación con frecuencia tienen una mejor estructura y agregados más estables. Cuando las gotas de lluvia chocan contra la vegetación, la energía de las gotas se disipa y no hay impacto directo sobre la superficie del talud. Si la escurrientía tiene lugar, las hojas y las raíces de las plantas inhiben el movimiento de las partículas del suelo. Las hojas forman una superficie burda, impiden y reducen la velocidad del agua corriente y las raíces consolidan el suelo.

El proceso en pendientes sin vegetación se caracteriza por que la escurrentía y la erosión aumentan en proporción directa con la cantidad de superficie desnuda.

Los factores que determinan la pérdida del suelo son la intensidad y la duración de la lluvia, la distribución del tamaño de las partículas del suelo y las propiedades relacionadas con esto como son la textura y la estructura superficial, así como la forma de la pendiente (Kirkby y Morgan, 1984).

Por lo tanto, una de las más efectivas protecciones de los taludes de un corte o un terraplén o del terreno natural contra la acción erosiva del agua superficial es la plantación de especies vegetales; éstas retardan el escurrimiento, disminuyendo mucho la energía del agua y contribuyen a fomentar una condición de equilibrio en los suelos en cuanto a contenido de agua (Rico y Del Castillo, 1990).

III.5 EL PROBLEMA DE LA EROSION EN TALUDES.

Como se ha analizado anteriormente, el proceso de denudación de la corteza terrestre involucra dos agentes (intemperismo y erosión), cuyos síntomas y mecanismos de sus acciones ya han sido también explorados. Tenemos así que comprender que estos agentes actúan de modo continuo en el tiempo y espacio, y lejos de poderse considerar como constantes, estos pueden incrementar sus acciones dañinas en los materiales (suelo-roca) que constituyen a los taludes proyectados en una vía terrestre, de acuerdo con el tipo de clima que prevalezca en la región, y atendiendo también a una serie de factores que se analizarán más adelante, factores que representan variables importantes en los efectos que pueden llegar a representar.

La acción conjunta de estos dos agentes, es manifestada en una primera instancia por la desintegración de los materiales (suelo-roca) que integran al talud y en un segundo lugar por la remoción y depositación de pequeñas partículas de material, producto de la desintegración. Al material transportado se le denomina sedimento y a su deposición sedimentación.

Atendiendo al cuadro sinóptico siguiente tenemos:

AGENTES DE	1) INTEMPERISMO: - desintegración de materiales (suelo-roca). - producción de sedimentos (partículas de distintos tamaños).
DENUACION	2) EROSION: - remoción de partículas de material suelto. - depositación del producto del intemperismo (sedimentación).

La interacción de las acciones del intemperismo y erosión son importantes ya que, ésta representa al producto final de su efecto, traduciéndose en la producción de pequeñas partículas de material conocidas como sedimento. Este material representa el principal problema de la erosión superficial y que enfrentan la mayoría de los taludes excavados en las vías terrestres.

La producción de sedimento se traduce en problemáticas que van desde un continuo y costoso mantenimiento en obras de infraestructura (carreteras y autopistas) hasta la ocurrencia de lamentables accidentes que en ocasiones llegan a costar pérdidas humanas. La inadecuada protección superficial de los taludes excavados en carreteras y autopistas, construidos en zonas montañosas produce: un accidente por día cada 100km; dos toneladas de sedimento por kilómetro y año, y la desaparición de dos hectáreas de capa edáfica por kilómetro.

Los correspondientes costos reales en imagen y mantenimiento, son conocidos con precisión por las compañías operadoras y pueden ser abatidos si se toman las adecuadas acciones de estabilización y control de la erosión de las superficies de los cortes y de regeneración del suelo edáfico perdido por la excavación de los mismos (Sánchez, 1996).

Así pues, a continuación se analizarán otra serie de factores implícitos en el proceso de la erosión en taludes, factores que lejos de estar mencionados en el presente trabajo por orden de importancia, contribuyen en gran medida con su acción desgastante, a la cual se pretende controlar mitigando sus efectos.



Foto III.3 Erosión en conglomerados sedimentarios (Sánchez, 1996-a).

III.6 FACTORES QUE CONTRIBUYEN A LA EROSION.

Los principales factores considerados en este trabajo que contribuyen a la erosión en taludes son:

- a) Impacto de gota de lluvia.
- b) Pendientes.
- c) Decompresión.
- d) Erodibilidad.

III.6.1 Impacto de gota de lluvia.

Las interacciones del tamaño, velocidad y forma de las gotas de lluvia, la duración de la tormenta y la velocidad del viento controlan la fuerza erosiva de la precipitación pluvial, a medida que las gotas de lluvia aumentan en tamaño su velocidad terminal aumenta, fig. III.2. Por consiguiente, el impulso o cantidad de movimiento de una gota de lluvia, que es igual a su masa por su velocidad, también aumenta rápidamente con un tamaño de las gotas de hasta aproximadamente 4mm de diámetro.

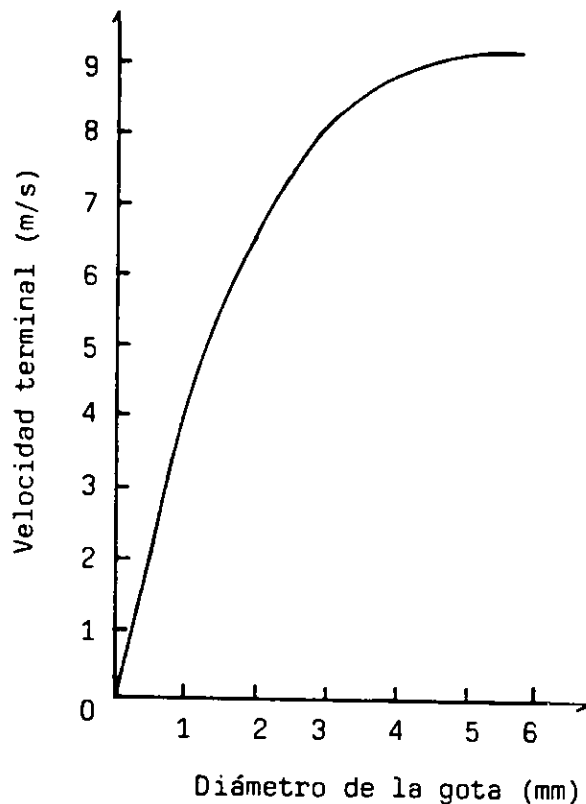


Fig. III.2 Gráfica: velocidad final de las gotas de agua, en aire estático (Gunn y Kinzer, 1949).

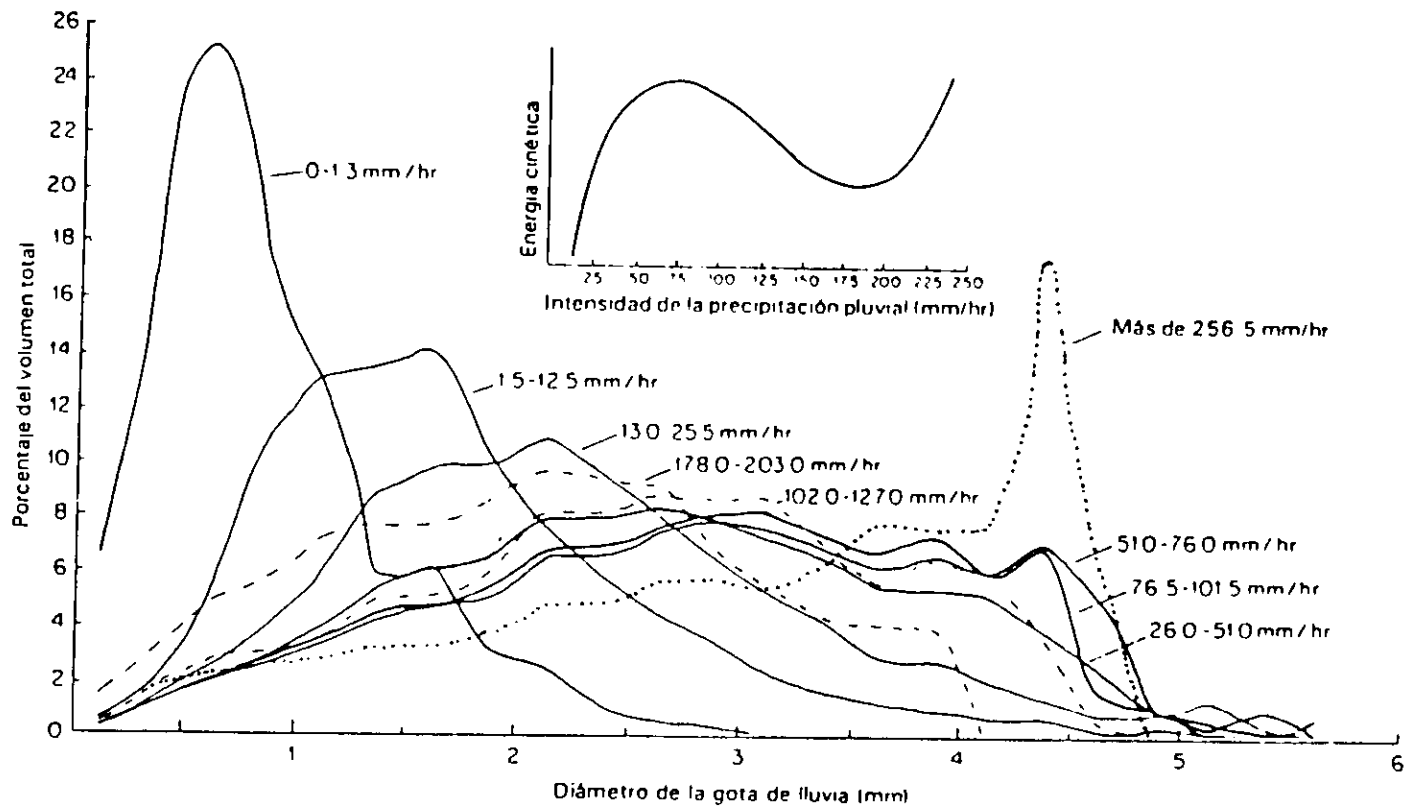


Figura III.3 Grafica: distribución de tamaños de gotas e intensidad de la precipitación.
 (Carter et al, 1974).

La energía cinética de la precipitación pluvial, es la energía del número total de gotas de lluvia a una intensidad determinada y se calcula a partir de la distribución del tamaño de las gotas de lluvia para una intensidad dada. Carter y colaboradores (1974) y Hudson (1963) han demostrado que la distribución del tamaño de las gotas de lluvia incluye una mayor proporción de gotas grandes por encima del diámetro de los 4mm a intensidades de entre 50 y 100mm por hora y más de 200mm por hora (fig. III.3); en otras intensidades hay muchas gotas más pequeñas (<2.5mm). Las gotas mayores que 5.5-6.0mm son inestables debido a la turbulencia del aire (Blanchard, 1950) y se rompen; sin embargo, a intensidades de más de 200mm por hora ocurre nuevamente la coalescencia de las gotas pequeñas. Por tanto la energía cinética de la precipitación pluvial se halla en un nivel máximo a intensidades de precipitación pluvial entre 50 y 100mm por hora y mayores de 250mm por hora (fig. III.3). Wischmeier y Smith (1958), no dieron margen para este cambio en la distribución de la energía cinética, y sobreestimaron la energía cinética para las precipitaciones pluviales superiores a los 100mm por hora.

Wischmeier (1959) y Wischmeier y Smith (1958), observaron que, entre los factores de precipitación pluvial que se estudiaron, la energía cinética explicaba la mayor parte de la pérdida del suelo. Hudson (1971) hace notar que la medida de energía es la que ocurre en un umbral erosivo, de 25mm de lluvia por hora, y que solamente las precipitaciones pluviales de más de esta cantidad son de importancia para producir erosión (Kirkby y Morgan, 1984).

a) Desprendimiento y dispersión de las partículas del suelo.

Cuando una gota de lluvia hace impacto en el suelo, las partículas de suelo se esparcen (Laws, 1940); y mientras mayor sea la velocidad del impacto, mayor será la cantidad de suelo esparcido (Bisal, 1960). A medida que caen las gotas de lluvia, se aplanan en su extremo más bajo debido a su resistencia a la fricción (Blanchard, 1950); este efecto es mayor cuanto más grandes sean las gotas, por lo que aumenta la zona del impacto de la gota. Dos terceras partes de la energía de la gota de la lluvia se consumen en la formación de un cráter de impacto y en el movimiento de las partículas de suelo, y el resto en la formación de rocío (Mihara, 1951). El impacto de las gotas es más efectivo cuando una película delgada de agua cubre la superficie del suelo y la máxima dispersión de las partículas del suelo se presenta cuando la profundidad del agua es casi la misma que el diámetro de la gota de lluvia (Palmer, 1963).

La acción dispersante de la lluvia se convierte en un proceso más efectivo a medida que la pendiente es más pronunciada (Ellison, 1944) y conforme aumenta la velocidad del viento. La velocidad del viento imparte una fuerza horizontal a las gotas de lluvia que caen, de manera que cuando la gota toca la superficie hay un efecto más grande para dispersar las partículas del suelo (Free, 1952; Lyles et al, 1974). Sin embargo, aunque la erosión por dispersión puede ser un proceso importante, especialmente en los suelos arenosos finos (Free, 1960; Adams et al, 1958), las partículas del suelo no son transportadas lejos, pero el proceso es sobre todo importante para proporcionar material de acarreo (Kirkby y Morgan, 1984).

b) Compactación superficial del suelo.

El impacto de las gotas de lluvia y la dispersión de las partículas del suelo compactan este último y forman una costra superficial (Duley, 1939; Ellison y Slater, 1945). Esta costra a menudo consta de dos partes, una muy delgada (más o menos 0.1mm) en forma de estrato no poroso y una zona de hasta 5mm de partículas finas no deslavadas (McIntyre, 1958; Kirkby y Morgan, 1984).

c) Infiltración por precipitación pluvial.

La costra superficial es mucho menos permeable que el suelo subyacente y las tasas de transmisión del agua pueden ser entre 200 y 2000 veces menor para los estratos compactos y los lavados, en relación a capas más profundas (McIntyre, 1958), por tanto, la infiltración de la precipitación pluvial en los suelos con costras es muy baja. Se formarán charcos de agua permanente y por coalescencia se da principio al escurrimiento del agua (Kirkby y Morgan, 1984).

d) Erosión laminar.

La interacción de la acción dispersante de la lluvia y de la erosión laminar es importante ya que, si actúa separadamente cada proceso es menos eficiente para remover las partículas del suelo que cuando los procesos actúan combinados (Young y Wiersma, 1973). Esto se debe a que las partículas de suelo se ponen en suspensión bajo la acción dispersante de las gotas de lluvia y luego son transportados por las escurrentías. Así mismo, la acción dispersante de las gotas de lluvia imparte turbulencia al flujo laminar. Se requieren velocidades de 16cm por segundo para erosionar las partículas del suelo de 0.3mm de diámetro (Hjulstrom, 1935), y velocidades tan bajas como 2cm por segundo llevarán la partícula en suspensión (Kirkby y Morgan, 1984).

III.6.2 Angulo de las pendientes.

La pendiente es un factor importante que determina la eficacia de la erosión por fragmentación; a medida que el ángulo de la pendiente aumenta una mayor cantidad de suelo se esparce cuesta abajo (Ellison, 1944). Sin embargo no todos los estudios han demostrado un aumento en la erosión a medida que el ángulo de la pendiente aumenta (Lillard y colaboradores, 1941; Neal, 1938), aunque a menudo hay un notable aumento en la erosión en pendientes de 5 a 10 por ciento en comparación con la erosión en pendientes más suaves. Pero en pendientes mayores a menudo la erosión es menor (Kirkby y Morgan, 1984).

III.6.3 Decompresión o estado de relajación de las rocas.

Entendemos por decompresión el fenómeno según el cual se forman grietas, fisuras y microfisuras, o bien, se abren más las ya existentes, debido a los esfuerzos de tensión generados como consecuencia de la excavación del talud (Sánchez, 1996).

De acuerdo a la teoría del estado inicial de esfuerzos analizada en el capítulo anterior, al presentarse una alteración de esfuerzos debida a un deconfinamiento obligado por la excavación de un corte en un macizo rocoso, el estado inicial de esfuerzos que se tenía hasta el momento anterior en que se verifica la acción traumática del corte, se ve afectada y podemos considerar que el macizo rocoso se encuentra en un estado de equilibrio estático (sin movimiento aparente) a lo que se denomina estado litostático, como se ilustra en la fig. III.4, mientras no existan fuerzas externas que lo desestabilicen.

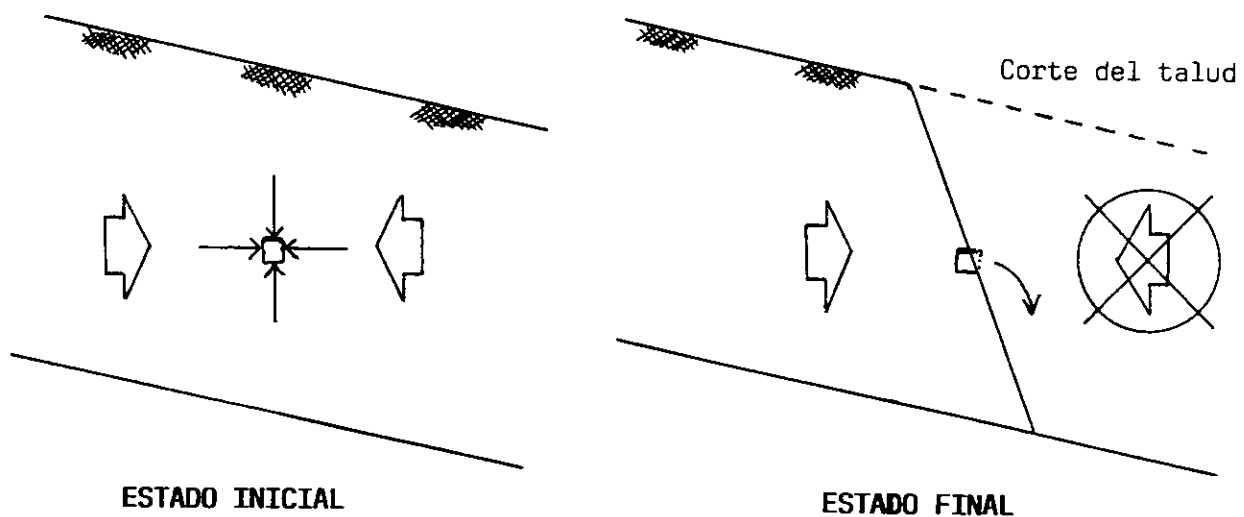


Fig. III.4 Equilibrio inestable de un elemento diferencial de roca por efecto de la excavación de un talud.

Hasta este momento (previo a la excavación del corte), no se presentan esfuerzos extraordinarios (salvo los ya analizados como: térmicos, gravitacionales, tectónicos y residuales, que pueden ser considerados como continuos y constantes en su afectación al macizo rocoso), debido al propio estado de confinamiento al que ha sido sometido el material rocoso por millones de años desde su propia formación.

Sin embargo, al realizar el corte del talud, estamos afectando al macizo rocoso en forma traumática y al mismo tiempo se induce un cambio o alteración en el estado de esfuerzos que se manifiesta en la porción más superficial del talud como se observa en la fig. III.4, por la aparición o incremento de grietas y fisuras, este hecho debe ser "compensado", debido a la falta de equilibrio estático, con una adecuada terapia estructural dinámica, por medio de la utilización de anclajes y mallas resistentes o pegantes que funcionen de tal modo que le proporcionen a la estructura natural una situación similar a la inicial, (todo ello bajo el soporte del correspondiente análisis matemático, debidamente adecuado a la situación que se presente en la obra), es decir, para que la estructura rocosa no resienta el cambio o alteración en su estructura interna, debida a esta acción traumática ya que, como se ha mencionado anteriormente, la desaparición súbita del confinamiento trae consigo la aparición de grietas o bien su propagación si ya existían, así como caída de cuñas, fragmentos de roca, etc.



Foto III.4 Grietas de relajación de la roca, por decompresión en un corte en calizas masivas fracturadas (Sánchez, 1996-a).

Estos fenómenos ocasionan constantemente problemas de mantenimiento y lamentables accidentes a operadores y usuarios en la mayoría de las vías terrestres, con lo que se incrementan los costos de operación y mantenimiento de las mismas.

La zona en la que se manifiestan de un modo determinante con mayor intensidad las alteraciones estructurales debido a la decompresión de la roca, afecta a un espesor de la misma, que depende de las características geotécnicas de la roca y que medido horizontalmente desde la superficie del talud para fines prácticos, varía entre un 10 y un 20 por ciento de la altura del mismo, esta se considera localizada aproximadamente en la zona B del perfil del talud.

A esta zona se le denomina franja de relajamiento (fig. III.5; Sánchez, 1996).

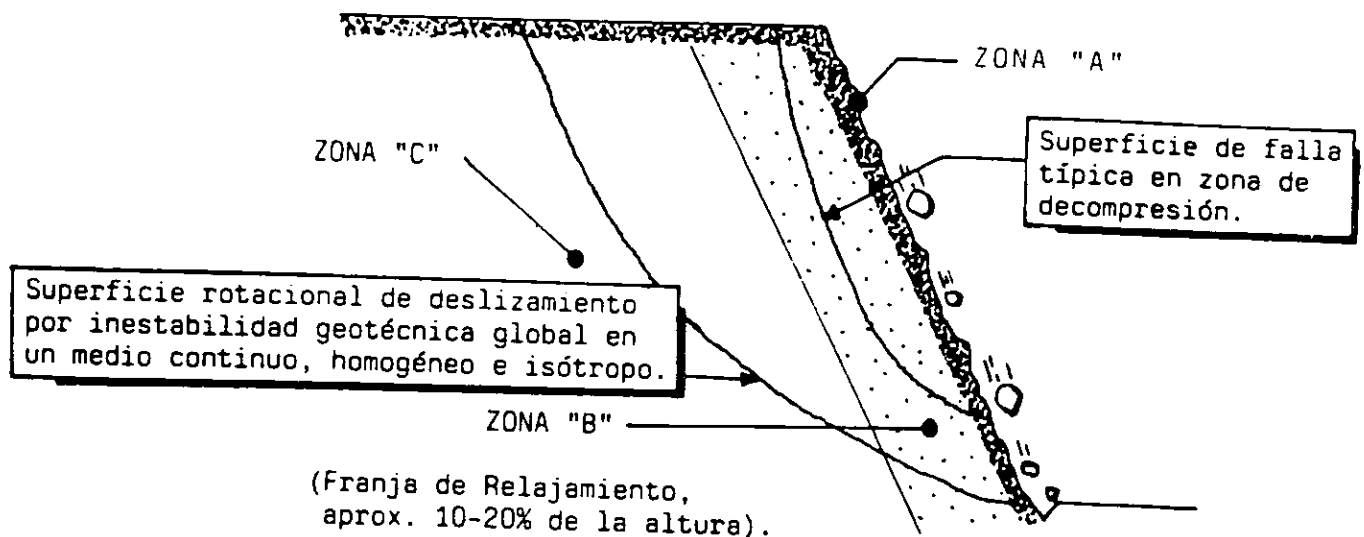


Fig. III.5 Ubicación de la franja de relajamiento en el perfil de un macizo rocoso por efecto de la excavación del talud. (Sánchez, 1996).

Existe una estrecha relación entre la erosión y la relajación, de modo que la erosión de la superficie aumenta la intensidad de la relajación y el incremento de ésta da a su vez más posibilidades al fenómeno de la erosión. Del mismo modo, la relajación también facilita el intemperismo de los materiales, permitiendo que la acción de los agentes atmosféricos penetre hacia el interior de la roca y como consecuencia de ello: la caída de fragmentos de roca, exfoliaciones, pequeños deslaves y graneos en general.



Foto III.5 La caída de fragmentos en la zona de relajamiento: fenómeno súbito e imprevisible (Sánchez, 1996-a).

III.6.4 Erodibilidad de las superficies.

La erodibilidad de un talud depende del tipo de roca, de la cantidad de fracturas que afloran en superficie y del procedimiento de excavación realizada.

Para taludes excavados en un mismo tipo de roca y con similares circunstancias climáticas la erodibilidad cambia de acuerdo a los siguientes factores:

- a) Angulo del talud. Cuanto mayor es la pendiente, mayor es la velocidad del agua de lluvia y consecuentemente más intensa su acción mecánica de remoción de las partículas.
- b) Decompresión de la roca. Cuanto mayor es el gradiente de cambio en el estado de esfuerzos, mayor cantidad de fisuras se van a producir.
- c) Procedimiento de excavación. Un inadecuado diseño de las voladuras puede incrementar fuertemente la generación de grietas, fisuras y microfisuras que facilitan la desintegración del material rocoso.

El aumento de la erosión a lo largo del tiempo tiene un incremento exponencial, pues la superficie inicialmente erosionable va acrecentando su área por la aparición de gargantas y escurrimientos; al mismo tiempo el agua incrementa su capacidad erosiva al cargarse con parte del sedimento (Sánchez, 1996).

El arrastre de sedimentos es uno de los aspectos más importantes de la erosión de la parte más superficial del talud. Sigue su curso por efecto de procesos como: la salpicadura, el desprendimiento de partículas, escurrimientos, deslizamientos superficiales o deslaves y excavaciones.

Los procesos actúan sobre un substrato que puede comprender ya sea un lecho rocoso débilmente consolidado o suelo residual producido por intemperismo. La erodibilidad del material es un proceso dinámico en el sentido que puede alterarse por efecto de una tormenta. Se relaciona con las propiedades de los materiales, de la vegetación y con las condiciones climáticas.

La erodibilidad del suelo se relaciona esencialmente con la estabilidad de los agregados del mismo y no tanto con su composición o textura, aunque estos dos aspectos no están inconexos, también se relaciona con las fuerzas cohesivas que mantienen unidos a los agregados. Sin embargo, la densidad de los agregados y su forma es tan importante o más que el tamaño. Con agregados grandes y estables, la infiltración del agua puede ocurrir más fácilmente reduciendo el volumen neto de escurrimiento superficial. Los agregados que se dispersan, o se disuelven en agua, tendrán una escasa estabilidad (Kirkby y Morgan, 1984).



Foto III.6 Caído originado en la zona de decompresión de un corte en lutitas (Sánchez, 1996-b).

III.7 PATOLOGIA DE LOS TALUDES EXCAVADOS EN ROCA.

Toda excavación en un macizo rocoso constituye una acción traumática que afecta a todas y cada una de las zonas del talud del modo siguiente:

- a) Cambio súbito en su estado gravitacional de esfuerzos y al mismo tiempo variación en los campos de esfuerzos residuales, tectónicos y térmicos, lo que genera la aparición de grietas, fisuras y microfisuras.
- b) Incremento de los mismos, debido a los esfuerzos de origen dinámico generados por las voladuras, cuando éste es el sistema de excavación empleado.
- c) Drástica denudación de la capa de suelo edáfico superficial.

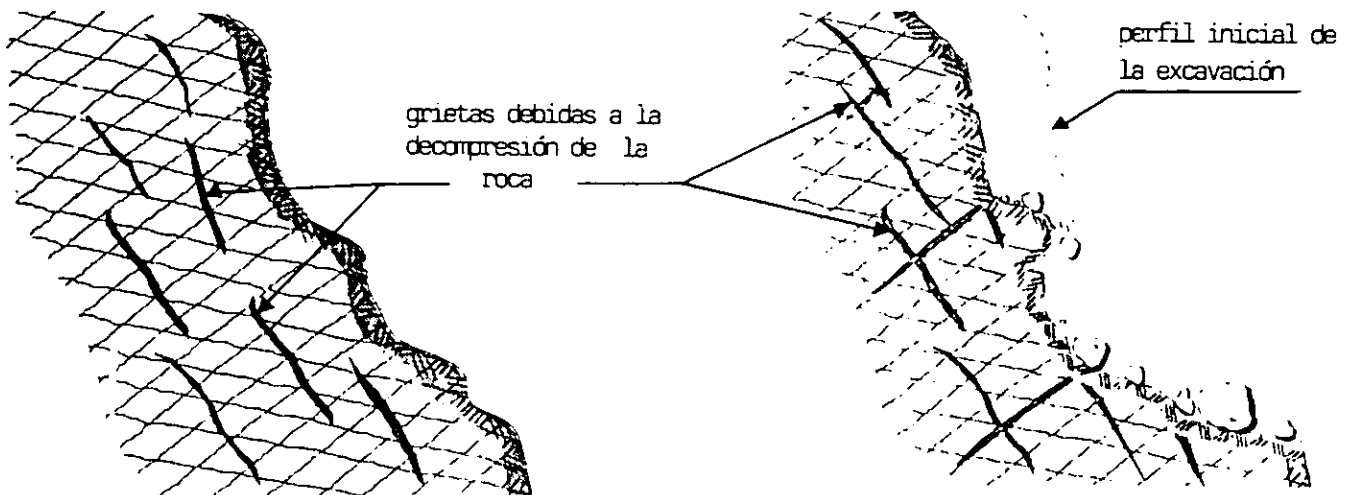


Fig. III.6 Proceso de degradación de la superficie de un talud excavado en roca fracturada (Sánchez, 1996-b).

En la Tabla III.5. se presenta de manera esquemática el cuadro sintomático de la patología de los taludes excavados en roca, con las afectaciones que se tienen en cada una de las zonas del talud, así como la serie de factores patógenos que se presentan en los mismos (Sánchez, 1996).

Tabla III.5 Patología de los taludes excavados en roca (Sánchez, 1996).

Alteraciones geoestructurales que se presentan en cada zona a consecuencia de la situación traumática originada por la excavación.	Factores añadidos(**) que originan la situación patológica y Factores naturales(*) relacionados.
ZONA "A" SUPERFICIAL (La mayoría de los taludes excavados presentan alteraciones en esta zona).	
<ul style="list-style-type: none"> - Erosión - Graneo 	<ul style="list-style-type: none"> - Características geotécnicas (*) - Composición mineralógica (*) - Denudación (**) - Meteorización (**) - Valores índice (*) - Voladuras (**)
ZONA "B" FRANJA DE RELAJAMIENTO (La mayor parte de los problemas que sufren los taludes excavados se manifiestan en esta zona).	
<ul style="list-style-type: none"> - Caída de fragmentos rocosos - Deslaves superficiales - Deslizamientos de cuñas - Desprendimientos de piedras y bloques - Erosión de partículas de tamaño medio (3-10cm) - Graneo 	<ul style="list-style-type: none"> - Características geotécnicas - Composición mineralógica (*) - Decompresión (**) - Discontinuidades (*) - Fracturación natural (*) - Juntas de estratificación (*) - Presencia de agua (*) - Valores índice (*) - Voladuras (**)
ZONA "C" MACIZO ROCOSO (Analizar situaciones de inestabilidad por métodos de equilibrio límite o bien de elementos finitos teniendo en cuenta los factores geotécnicos).	
<ul style="list-style-type: none"> - Deslizamientos de grandes masas con superficies bien definidas de deslizamiento (rotacionales, traslacionales, cuñas, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cambio en el estado de esfuerzos (**) - Características geotécnicas (*) - Composición mineralógica (*) - Condiciones hidrogeológicas (*) - Decompresión (**) - Estratificación, esquistosidad, etc. (*) - Fallas geológicas (*) - Plegamientos (*) - Valores índice (*)

III.8 DIAGNOSTICO DE LOS TALUDES EXCAVADOS EN ROCA.

El diagnóstico tiene como objeto identificar el tipo de alteración o daño que se está produciendo en la estructura geotécnica a partir de los síntomas o signos que se manifiestan. La generación de sedimento, el graneo y, en general, la caída de material es un fenómeno continuo -principalmente durante la temporada de lluvias- que representa, un alto costo anualmente en mantenimiento y en accidentes, foto III.7.

Es por ello mismo que resulta fundamental la diferenciación conceptual entre sedimento y erosión, entre erosión y desestabilización. La confusión existente entre los conceptos mencionados da lugar a que en muchos casos se utilicen productos y sistemas que controlan -solo temporalmente- el sedimento pero no resuelven el problema de la erosión que continúa produciéndose y otros en que los productos se ven sometidos a esfuerzos para los que no fueron concebidos o diseñados ya que, a veces se colocan protecciones contra la erosión en taludes con problemas de estabilidad.

Son contados por cientos los taludes que causan este tipo de problemas en carreteras y autopistas y peor aún, son también cientos de miles de metros cuadrados de supuestas protecciones a los mismos, que no funcionan y que además lejos de ofrecer un panorama perceptiblemente agradable, en la totalidad de estos casos se presenta una imagen gravemente deteriorada del paisaje (hasta el grado de aparentar tiraderos en forma de taludes) y lo que es aún peor, el hecho de llegar a percibir una tendencia a algo que es realmente inseguro, fotos III.8 y III.9.

Cuando en un talud excavado no se toman las medidas de protección superficial oportunas, se inicia en él un proceso patológico con desarrollo progresivo que continua a lo largo de los años. La importancia de las alteraciones depende naturalmente de las características geométricas del mismo -altura y ángulo de inclinación-, de las características geotécnicas de la roca y de la erosividad de los agentes actuantes (Sánchez, 1996).



Foto III.7 Erosión en lutitas, en suelos compactos y en calizas.



Foto III.8 Inadecuado tratamiento de un talud, ubicado en la supercarretera Tehuacán - Oaxaca. Denotándose la apariencia de un tiradero, por la presencia de los restos del sistema aplicado.



Foto III.9 Talud ubicado en el conocido "cerro que camina" (supercarretera Tehuacán - Oaxaca), este tramo en particular denota una alta inseguridad, mal aspecto al entorno natural del ecosistema y un deficiente tratamiento aplicado al mismo.

III.9 TERAPIA DE LOS TALUDES EXCAVADOS EN ROCA.

Debemos entender por terapia, el conjunto de acciones y tratamientos encaminados a mantener la integridad parcial y total del talud una vez que se ha producido el trauma (del gr.= herida) de la excavación.

Conocido el fenómeno que da origen a la erosión, graneado, caída de bloques y material, deslizamientos de grandes masas, etc., no es difícil determinar y aplicar el tratamiento o terapia que remedie los problemas inherentes a las alteraciones mencionadas (Sánchez, 1996).

En la Tabla III.6, se ilustra a modo de cuadro sinóptico la serie de medidas terapéuticas que se han desarrollado para la protección de taludes. Esta tabla constituye además, una guía básica para la selección del tipo de tratamiento adecuado para cada situación.

Para la identificación de cada una de las zonas que se mencionan en ella, es recomendable observar la fig. III.5 o bien, la del apéndice A.

Tabla III.6 Medidas terapéuticas para la protección de taludes.

(Sánchez, 1996).

MEDIDAS TERAPEUTICAS.		1) Intervención de especialistas en Mecánica de Rocas y de control de la erosión con reconocidos conocimientos geotécnicos y con experiencia.		
		2) Tipo de tratamiento	ZONA "A" (Superficial) *Control de la erosión *Reposición de la capa vegetal	ZONA "B" (Franja de relajamiento) *Control de la erosión *Control de la zona de decompresión *Estabilización superficial
3) Productos, sistemas y procedimientos.		- Pegantes inorgánicos - Pegantes orgánicos - Pasto en rollo - Hidrosiembra - Mallas compuestas - Mallas técnicas - Redes de refuerzo de vegetación - Sistemas mixtos	- Redes de cable - Estructura reticular de concreto adosada al talud y anclas de tensión - Concreto lanzado estructural (mín. 8cm) con anclas de fricción - Gaviones adosados al talud - Soluciones mixtas	
CONTRACUNETAS Y DRENES PENETRANTES SI HAY AGUA				

III.10 ANALISIS DE ALGUNAS TECNICAS UTILIZADAS PARA EL CONTROL DE LA EROSION EN TALUDES.

El objetivo del presente sub-tema, no implica realizar una crítica de las diversas aplicaciones técnicas en el control de la erosión en taludes, sino más bien, alentar las infinitas posibilidades ingenieriles y geotécnicas.

Tomando como punto de partida el hecho de realizar una valoración de daños y afectaciones sufridas en un talud particular, se deben identificar los indicios reales que provocaron el problema, así como analizar las distintas opciones en cuanto a aplicaciones se refiere, es decir, que efectivamente mitiguen los efectos ocasionados.

En los taludes se pueden presentar casos que impliquen síntomas superficiales como lo es la erosión o bien el caso de tener un problema de carácter profundo como lo es una desestabilización parcial o total del talud, causado por algún tipo de falla. Inclusive hay casos en los que se pueden llegar a identificar afectaciones mixtas, es decir, taludes que presentan severos problemas tanto de inestabilidad superficial como profunda, e inclusive además, con afectaciones de tipo hidráulico interno.

En éste último caso se pueden llegar a tener situaciones conocidas como saturación o infiltraciones a través de grietas o fisuras e inclusive una probable existencia de algún nivel freático alojado en el propio cuerpo del talud.

Atendiendo a los síntomas que presente el talud, estaremos en condiciones de establecer un diagnóstico apropiado para estar en condiciones de poder aplicar una terapia adecuada, que se fundamente en el conocimiento del tipo de patología que se presente, es decir, por medio de la identificación real del padecimiento en el talud, se evitarán gastos innecesarios y se procederá a la aplicación de un tratamiento efectivo.

Apegados a los casos de desestabilización superficial tenemos que las **mallas de triple torsión** son excelentes elementos estructurales de reparto de esfuerzos, el muro de gaviones es un sistema eficaz y funcional, el concreto lanzado es un procedimiento oportuno para proporcionar un elemento estructural resistente, y el pasto en rollo es un buen sistema de control de la erosión. Luego entonces, ¿por qué fallan en muchas de sus aplicaciones? La respuesta es que fallan porque no se usan adecuadamente y sin un criterio técnico, desaprovechando así sus posibilidades funcionales y utilizándose mas bien como analgésicos tópicos para aliviar los síntomas, esto es: la retención temporal de los sedimentos. Ello, ocurre muchas veces como consecuencia de pretender abatir costos comprando a vendedores de productos sin preparación geotécnica en vez de solicitar los servicios de empresas especializadas con responsabilidad técnica de la aplicación.

Las **mallas** deben ser fijadas a la superficie del talud mediante anclas cementadas, distribuidas homogéneamente y sujetas con placa de reparto. La longitud y diámetro de las anclas, así como su patrón de distribución deberán ser definidos tomando en cuenta las características geotécnicas de la roca en la que esté excavado el talud. De éste modo, la malla estará ejerciendo un cierto esfuerzo en gran parte de la superficie del talud, y así se evitarán los primeros desprendimientos de las partículas que son los que desencadenan los caídos de volúmenes mayores. El costo en una etapa inicial de la aplicación puede resultar mayor, pero la diferencia de costo se recupera en la primera temporada de lluvias. Cuando las mallas simplemente se sujetan con un cable en la parte superior (corona del talud) y otro al pie del talud, ambos debidamente tensados y entrelazados a la malla para ejercer una correcta función de sujeción y unos pocos clavos de varilla en forma en "T" diseminados sin más criterio que el de la fácil accesibilidad, para adherir el sistema al terreno, el control de la erosión y su efecto estabilizante son nulos, funcionando solamente como retenedores de sedimentos que requieren mantenimiento, reparación y/o cambio, continuos.



Foto III.10 Inadecuada protección de un talud con malla de triple torsión.

(Sánchez, 1996-b).



Foto III.11 Inadecuada aplicación de malla de triple torsión.

(Sánchez, 1996-b).

El **muro de gaviones** es un sistema eficaz y versátil al cual no se le está sacando el provecho -bajo el punto de vista técnico- que ofrecen sus grandes posibilidades. Su aplicación debe ser prevista desde la etapa de proyecto aprovechando al máximo su gran funcionalidad, integración, flexibilidad, facilidad de montaje y capacidad resistente a empujes. Como muros alcancía, controlan los sedimentos y el material caído pero no resuelven el problema de la erosión, ni aportan al talud acción estabilizante alguna.

Como tal, hay que darles un mantenimiento continuo y, en muchas ocasiones, deben ser cambiados periódicamente pues fallan al encontrarse sometidas a los esfuerzos dinámicos de los impactos de bloques para los que no fueron calculados.

En otros casos se instalan en taludes cuyos problemas superficiales se hubieran resuelto de un modo mucho más económico por otros sistemas que no causan impacto ambiental.



Foto III.12 Aplicación de un muro de gaviones en un talud; que anteriormente había sido tratado con una aplicación de concreto lazado en la supercarretera de Tehuacán, Pue.-Oaxaca, Oax, 1996.

El concreto lanzado es un procedimiento con dos grandes cualidades de rapidez de aplicación y adaptación topográfica. Sus características resistentes son muy buenas cuando se le hace trabajar como estructura de reparto combinando con anclas, dimensionando su espesor y armado de refuerzo como consecuencia de un correcto análisis estructural como puede ser el de deformación continua por elementos finitos, lo cual la gran mayoría de las veces no se hace. Su utilización como protección no tiene fundamento técnico alguno ya que su comportamiento estructural no responde a los esfuerzos a los que se ve sometido. La diferencia de módulos de elasticidad y de dilatación térmica entre el concreto y la mayoría de las rocas sobre las que se aplica es la causa de que se origine una separación entre la cáscara del concreto lanzado y el talud, alteración que se acentúa por los empujes horizontales debidos a la relajación y difundidos en la superficie de contacto.



Foto III.13 Inadecuada protección de un talud con concreto lanzado.

Una vez separada la mencionada costra de concreto, se va escurriendo y agrietando y en el caso frecuente de pendientes elevadas no es capaz de resistir los esfuerzos de tensión producidos por la situación de pandeo y se colapsa, la mayoría de las veces de un modo súbito.

Esto hace que en muchas ocasiones además de ser una solución ineficaz constituye un peligro latente.



Foto III.14 Concreto lanzado colapsado.
(Sánchez, 1996-b).

El **pasto en rollo** es una de las soluciones más económicas para controlar la erosión en taludes con pendientes inferiores a 1.75(h):1.00(v), con la condición de que la superficie sea granular, con presencia de limos y arcillas. Colocarlos en taludes con más de 45° de inclinación excavados en roca, es enmascarar temporalmente la situación patológica, desperdiciando recursos económicos y adicionalmente pasar un problema de mantenimiento a la operadora de la obra.

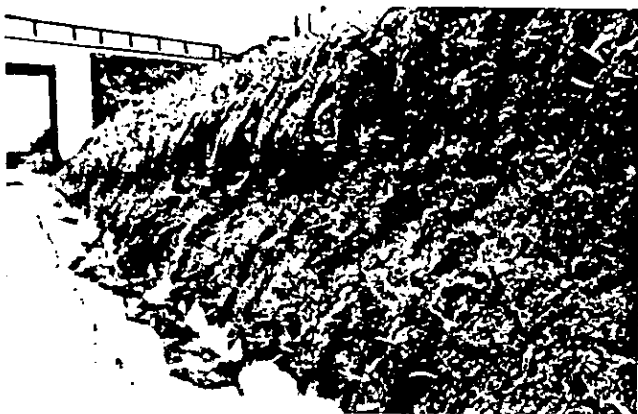


Foto III.15 Aplicación inadecuada de pasto en rollo (Sánchez, 1996-b).

Una terapia adecuada a los problemas de erosión e inestabilidad superficial de los taludes es aquella que logra mitigar totalmente las alteraciones patológicas de estas estructuras geotécnicas -no solamente sus síntomas-, mediante tratamientos eficaces que no lleguen a causar algún impacto ambiental severo o crítico y que incluyan un estudio con enfoque geotécnico de los mismos así como el análisis de los productos, sistemas y procedimientos existentes en el mercado.

Una muy buena solución es proporcionar a la roca una pequeña compresión a base de mallas y anclas de fricción que frenan en parte la aparición de nuevas grietas y detienen la apertura de las existentes.

Este procedimiento debe combinarse con el lanzado hidráulico, sobre la superficie, de productos pegantes (naturales o artificiales) que aglomeran los finos y evitan su caída y/o con mantas de regeneración edáfica o de refuerzo de suelo a base de fibras vegetales o artificiales (Sánchez, 1996).



Foto III.16 Malla adecuadamente colocada, combinada con una capa de revegetación hidrolanzada como protección contra la erosión y tratamiento de estabilización de la zona de relajamiento (Sánchez, 1996-b).

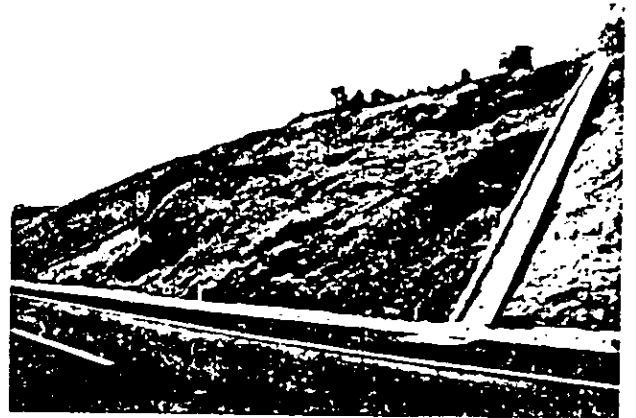
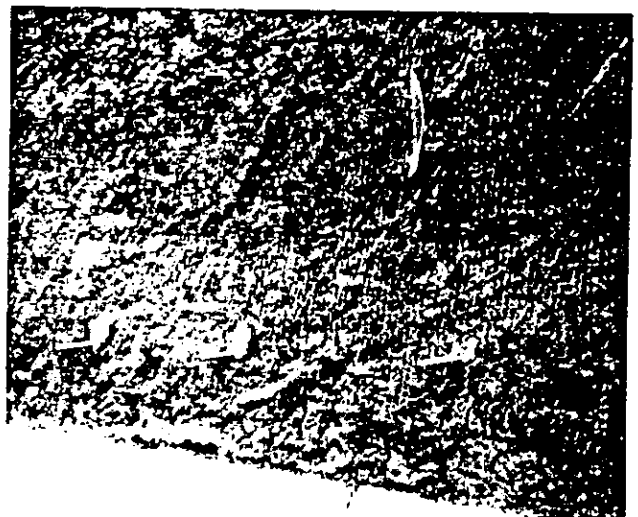


Foto III.17 Elegante combinación de mallas e hidrolanzado de revegetación en un talud en conglomerados en un corte de autopista (Sánchez, 1996-b).

Foto III.18 Estabilización de un talud mediante malla de triple torsión y anclas con protección contra la erosión a base de revegetación hidrolanzada complementado con fila de drenes penetrantes (Sánchez, 1996-b).



III.11 REFERENCIAS.

- Blith, F. G. H. y de Freitas, M. H. (1997). Geología para ingenieros. Editorial CECSA. México, D.F. Capítulo 3.
- Folleto: Geotecnología ambiental aplicada. Grupo CICONSA.
- Harvey, J. C., (1987). Geología para ingenieros geotécnicos. Ed. Limusa. México, D.F. Capítulo 6.
- Kirkby, M. J. y Morgan, R. P. C., (1984). Erosión de suelos. Ed. Limusa. México, D.F. Capítulos: 1, 4, 5 y 7.
- Rico, R. A. y del Castillo, H. (1990). La ingeniería de suelos en vías terrestres. Ed. Limusa. México, D.F. Vols. 1 y 2.
- Sánchez, G. M., (1996-a). Revista técnica No. 1. Traumaterapia de los macizos rocosos. Un nuevo enfoque para el estudio de las excavaciones en rocas. Proc. V reunión nacional de mecánica de rocas. México, D.F. Editado por la Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas.
- Sánchez, G. M., (1996-b). Revista técnica No. 2. Selección del tratamiento de control de la erosión y estabilización superficial de los taludes excavados en roca, en carreteras y autopistas. Proc. XII reunión nacional de vías terrestres. México, D.F. Editado por la Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres.

CAPITULO No. IV NUEVOS SISTEMAS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL CONTROL DE LA EROSION EN TALUDES

- IV.1 **Introducción**
- IV.2 **Nuevos sistemas y procedimientos**
- IV.3 **Hidrosiembra; "Hidromulching, M.R."**
 - a) Partes integrantes del sistema
 - b) Procedimiento constructivo
 - c) Aplicaciones
- IV.3.1 **El pegante orgánico**
 - a) Análisis de resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio
 - b) Protocolo de las pruebas aplicadas
- IV.4 **Mantas Compuestas**
- IV.4.1 **La "Manta Fértil, M.R."**
 - a) Partes integrantes del sistema
 - b) Procedimiento constructivo
 - c) Aplicaciones
- IV.5 **Mallas Compuestas.**
- IV.5.1 **El "Grin-Rock, M.R."**
 - a) Partes integrantes del sistema
 - b) Procedimiento constructivo
 - c) Aplicaciones
- IV.5.2 **La "Eco-Malla, M.R."**
 - a) Partes integrantes del sistema
 - b) Procedimiento constructivo
 - c) Aplicaciones
- IV.6 **Pruebas y diseño de mantas para la protección de taludes**
- IV.6.1 **Protocolo de las pruebas ensayadas en taludes**
 - a) Resumen de la prueba No. 1
 - b) Resumen de la prueba No. 2
 - c) Resumen de la prueba No. 3
- IV.7 **Resultados globales de los sistemas y procedimientos aplicados en taludes**
- IV.8 **Guía patrón para el engrapado de mantas**
- IV.9 **Guía de instalación práctica**
- IV.10 **Referencias**

**ESTA TESTS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

IV.1 INTRODUCCION.

Después de haber analizado las diversas técnicas y procedimientos que se han aplicado en los taludes formados en las principales vías terrestres de nuestro país, tanto para su estabilización superficial, como para el control de la erosión en los mismos, es conveniente presentar una novedosa serie de sistemas y procedimientos diseñados y evaluados con la más alta tecnología en control de erosión, para obtener una alta calidad en mantas y mallas compuestas con un alto perfil de regeneración ecológica y que además, en alguna de sus aplicaciones, pueden llegar a controlar la relajación de la roca. Cabe hacer mención que su aplicabilidad ha sido sometida a prueba no sólo en taludes con problemas de erosión, sino también en canales hidráulicos, rellenos sanitarios, líneas costeras, etc., que de alguna manera presentan síntomas característicos de erosión.

De cada sistema, procederemos a analizar aspectos como son: sus partes integrantes, procedimiento constructivo y principales aplicaciones atendiendo siempre a las condiciones geotécnicas preestablecidas en el lugar en que se ubique el talud, para determinar la aplicabilidad del tipo de tratamiento con el fin de obtener el mejor funcionamiento del mismo.

IV.2 NUEVOS SISTEMAS Y PROCEDIMIENTOS.

Han surgido una gran variedad de productos diseñados específicamente para controlar la erosión en taludes, además de una serie de accesorios y herramientas de diseño para cumplir con las más estrictas normas tanto de control de erosión como en calidad de materiales. Como en la actualidad se tienen lugares de construcción con taludes empinados y/o con vías de drenajes superficiales sin vegetación, que representan blancos claves para erosión y liberación de grandes cantidades de sedimento, la agencia de protección al medio ambiente de los E.U.A. (EPA), ha incluido el control de la erosión y de la sedimentación como una estipulación importante en el sistema de eliminación de descarga de la polución nacional (NPDES), en tal país. El NPDES es una provisión dentro del acto de limpieza del agua establecido en 1990, que requiere un planteamiento conveniente del control de la erosión/sedimento y la utilización de las mejores prácticas de organización en proyectos de construcción.

Existen sistemas consistentes en una amplia variedad de mantas para el control de la erosión apoyados por recomendaciones asistidas por computadora para un planteamiento del control de la erosión.

Cada manta es diseñada para una serie específica de aplicaciones de control de erosión y revegetación: desde taludes con problemas severos que requieren protección contra la erosión con aplicación de fibras de paja y/o coco a canales de alta velocidad y líneas costeras de impacto moderado que requieren un refuerzo de césped permanente, con aplicación de fibras sintéticas degradables.

IV.3 HIDROSIEMBRA; "Hidromulching, M.R."

La hidrosiembra es el procedimiento que consiste en lanzar sobre los taludes una mezcla de fibras orgánicas finamente divididas, fertilizante, semillas y agua. Foto IV.1.

A diferencia de la hidrosiembra común, existe un novedoso sistema, el cuál incluye un substrato o aditivo que permite que la misma quede adherida perfectamente a la superficie, alimentando y protegiendo a la semilla hasta la germinación, al cuál se le ha denominado: "Hidromulching, M.R."*

De un modo rápido y sencillo se proporciona al terreno una base de vegetación que junto con la semilla apropiada y un clima favorable, se logra al cabo de un tiempo, el restablecimiento del ecosistema en el talud tratado.

a) Partes integrantes del sistema.

La hidrosiembra o "Hidromulching, M.R.", también llamada siembra por riego, resulta de la combinación de fibras naturales (madera, paja y/o coco), fertilizante orgánico, semillas de pasto debidamente seleccionadas y tratadas (según la región, se establece la variedad de la misma u otro tipo de especies), ya que, por tratarse de una especie rastrera se desarrollan bien en el terreno a tratar, por un pegante orgánico cuya función es la de adherir y proteger al material orgánico (mulch) y a la semilla hasta su germinación en el terreno, todo ello mezclado con un hidrante (agua).

Así tenemos que el sistema se compone de:

Una parte constituida por; fertilizante orgánico, semillas de alguna especie rastrera (preferentemente pasto), agua y otra parte protectora, constituida por; fibras naturales debidamente tratadas (coco, paja o madera) y un pegante orgánico natural, el cuál se analizará en los siguientes párrafos.

(* **Hidromulching, M.R.** es un producto patentado por la empresa encargada de su distribución en el país, de aquí las siglas: M.R.= marca registrada.

b) Procedimiento constructivo.

Antes de comenzar con los trabajos propios del control de la erosión se tienen que tratar las superficies a proteger, mediante la limpieza superficial del talud, según el tipo de material que lo constituye, esto es, se realiza el saneo del talud, quitando fragmentos de rocas que representen un peligro eminente y aquellas que hayan quedado sueltas sobre las irregularidades superficiales del talud.

Después del respectivo análisis, diseño, valoración y cuantificación de los sistemas y materiales a utilizar como parte integral del tratamiento del talud y en base a las características geotécnicas de la roca que integra al talud, se procede, en el mismo lugar de la obra, a la elaboración de la hidrosiembra.

En base a una apropiada combinación de todos los componentes que la integran, se crea una mezcla homogénea con alto nivel de viscosidad, debido a las propiedades de los mismos integrantes, con lo que se logra la adherencia de la misma al terreno, la cuál es dispersada a modo de riego uniforme sobre toda la superficie del talud a tratar.

Los componentes se integran y mezclan con la debida dosificación de diseño, directamente en una máquina de bombeo especial, con la cuál se procede a esparcir el riego sobre el talud, foto IV.2.

c) Aplicaciones.

Este novedoso sistema en el control de la erosión se aplica en taludes con cierta pendiente, en climas calurosos y secos. Dependiendo del nivel de erosión y de las condiciones que se presenten en el talud tratado, una vez lanzada la mezcla se puede proteger con otras fibras vegetales también lanzadas o extendidas en forma de alfombras.

A pesar de que no es recomendable su aplicación directa en rocas, preferentemente se aplica en terrenos con alto porcentaje de material de finos para su mejor desarrollo. El sistema se presta por tanto a la revegetación de taludes de terraplenes y cortes en rocas blandas o suelos finos con pendientes inferiores a 1.0 (h) : 1.0 (v) con objeto de que el riego no se escurra y se adhiera perfectamente al terreno.

Se ha usado para revestir campos de golf y depósitos de residuos de suelos arenosos y/o limoso-arcillosos. Además de controlar la erosión se logra regenerar el ecosistema y se mejora el paisaje.

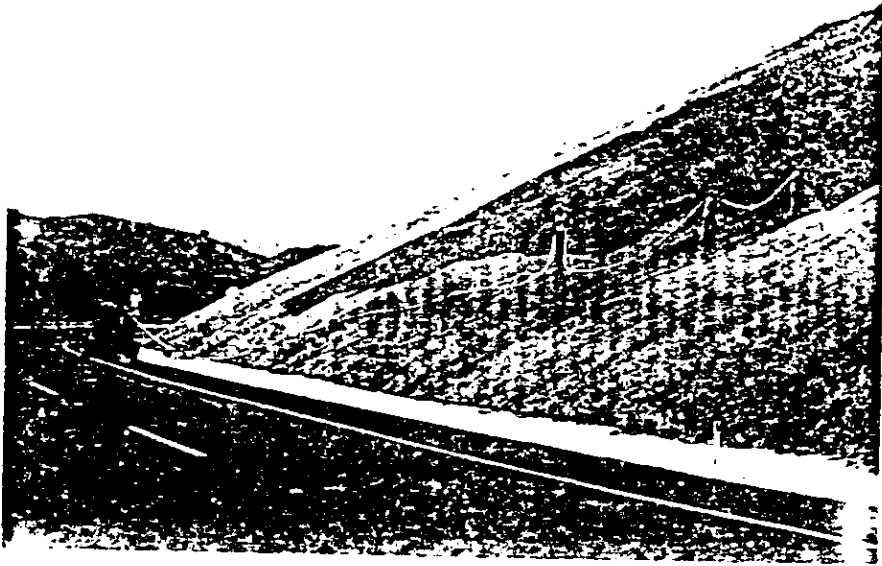


Foto IV.1 Aplicación de la hidrosiembra en talud de pendiente suave.



Foto IV.2 Hidrolanzado del sistema.

IV.3.1 El pegante orgánico.

Este sistema representa el primer paso en sistemas de control de erosión que revoluciona la práctica de la conservación del suelo. Es el resultado de una fuerte investigación en campo, para el desarrollo de la vegetación. Es el único de entre los sistemas de control de erosión que entrega la funcionalidad de una manta combinada con economía de tiempo y trabajo de aplicación, además es hidráulicamente aplicado para conformar en el terreno una matriz de unión de fibras que se integran perfectamente al contorno de la superficie en la que se ha aplicado. Una vez seca, la matriz puede ser rehumedecida repetidamente y mantendrá al suelo y a la semilla protegidos, de cualquier deslave. Cuando surge la vegetación, esta matriz de fibras, una vez cumplida su misión, lentamente se descompone y enriquece el suelo. Su aplicación resulta altamente efectiva al ofrecer una protección ambiental superior, para virtualmente cualquier talud ya que, se tienen aspectos como:

- Engrandecer la germinación, debido a que mantiene a la semilla y al fertilizante en un lugar fijo, permite la filtración de la humedad natural y de la luz solar, permitiendo además que las plantas existentes en el lugar de aplicación, se desarrollen conjuntamente, sin robarle el nitrógeno al suelo, de lo cuál resulta un estado ideal para el desarrollo de la semilla.
- Reducir la erosión del suelo debido a la acción mecánica del agua de lluvia. Al secarse la matriz de fibras a manera de una alfombra flexible, se minimiza el impacto de la gota de lluvia y lentamente eleva la humedad que penetra fácilmente a través de ella hacia el suelo. Cuando esto ocurre la matriz de fibras ofrece al mismo tiempo, nutrientes y cohesión al suelo.
- Constituir un sistema completamente biodegradable y no tóxico, ya que está elaborado por una mezcla de fibras de madera, un agente de unión natural (como pegante), y una mezclanza de activadores orgánicos y minerales. Sus elementos constitutivos naturales ofrecen más seguridad al medio y a la vida salvaje al no quedar integrado por materiales plásticos (redes) y no dejar residuos dañinos.

Entre las ventajas de su aplicación hidráulica tenemos que:

- En un solo paso se obtiene la cobertura total de la superficie a tratar.
- No requiere de ninguna preparación especial en el sitio de la obra.
- La semilla y el fertilizante se pueden agregar a éste para obtener excelentes resultados de germinación.

- Su integración total al contorno de la superficie, reduce problemas de fijación y presencia de huecos (entre el terreno y el sistema) que se tendrían con una deficiente instalación de cualquier tipo de manta (apéndice B).

En el apéndice B se analiza de manera esquemática la comparación entre la aplicación del sistema de mantas y el del pegante orgánico, además de enfatizar otras ventajas de su aplicación.

a) **Análisis de resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio.**

Las pruebas efectuadas confirmaron la funcionalidad del pegante orgánico, bajo condiciones controladas por un alto nivel nacional de control de la erosión en laboratorio.

Las mismas bases de prueba del laboratorio universitario fueron corridas para evaluar otros tipos de materiales diseñados para el control de la erosión. En un corto tiempo, los resultados de estas pruebas manifestaron que el pegante orgánico funcionaba con un alto rendimiento ante una lluvia simulada, la cual causó fallas en otros materiales.

Después de la duración estándar de las pruebas realizadas, el pegante no mostró signos de falla, así que, la prueba tuvo que ser duplicada (en cuanto a periodo de duración), ya que el pegante no mostró ninguna pérdida de suelo apreciable.

b) **Protocolo de las pruebas aplicadas.**

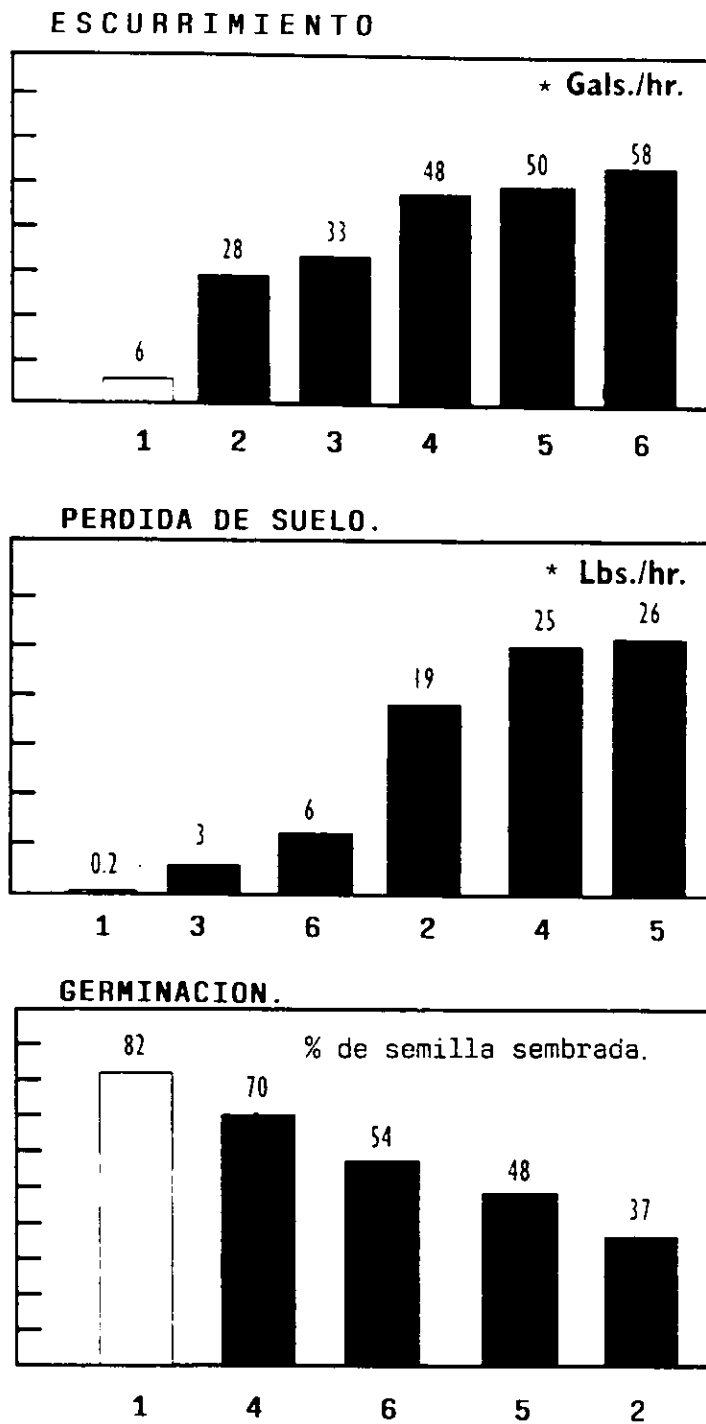
Una marca líder de cada tipo de material de control de la erosión fue evaluada usando equipo de prueba y protocolos estándares, incluyendo tipos de suelo, intervalos de temperatura, iluminación e inclinación del talud.

Los materiales sometidos a prueba fueron los siguientes:

- | | |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 1. Pegante orgánico. | 4. Manta de fibras de madera. |
| 2. Polímero de látex. | 5. Materia orgánica (mulch). |
| 3. Manta de fibras de coco/paja. | 6. Cementante de unión. |

Las proporciones de aplicación y simulación de caída de lluvia fueron los siguientes:

1. 1/4 hr @ 4 in/hr; 3/4 hr @ 6 in/hr.
2. 100 gals/acre; 1/2 hr @ 4 in/hr.
3. 1/2 hr @ 6 in/hr.
4. 1/2 hr @ 6 in/hr.
5. 2000 lbs/acre; 1/2 hr @ 4 in/hr.
6. 6000 lbs/acre con 1675 lbs/acre de materia orgánica; 1/2 hr @ 6 in/hr.



Conversiones:

* 1 galón= 3.785 litros

* 1 pulg (in)= 2.54cm

* 1 libra= 0.4536 kg

* 1 acre = 4046.9m²

Fig. IV.1 Gráfica: resultados de pruebas comparativas entre el pegante orgánico y otros materiales. Prueba a) medición del escurrimiento
b) medición de pérdida de suelo
c) porcentaje de germinación

IV.4 MANTAS COMPUESTAS.

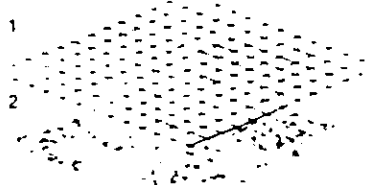
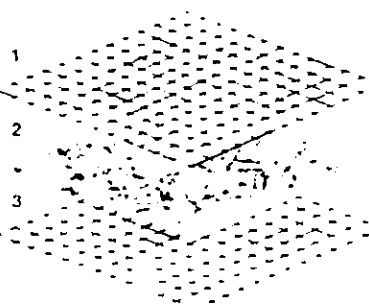
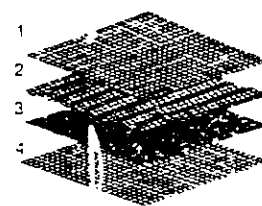
En la elaboración de las mantas compuestas se utilizan materiales sintéticos con una alta tecnología ecológica y materiales vegetales que se integran perfectamente al ecosistema.

La diversidad de mantas surgen de las distintas condiciones naturales que se presentan en los taludes y del tipo de tratamiento que cada caso particular requiere. Es entonces que cada manta es diseñada para una serie específica de aplicaciones de control de erosión y revegetación.

Tenemos así, que en la Tabla IV.1 se presentan los principales tipos de mantas y la manera en que puede estar integrada su estructura.

En las siguientes páginas se describen brevemente algunas de las características más importantes de las mantas analizadas en la Tabla IV.1., se ilustran algunas de las matrices que integran la estructura de las mantas y algunas de sus principales aplicaciones.

Tabla IV.1 Tipos de mantas y estructuras particulares.

Tipo:	No.	Estructura:	Diagramas:
Fotodegradable	1	1. Red de polipropileno fotodegradable. 2. Fibra de paja e hilo degradable.	
	2	1. Red de polipropileno fotodegradable. 2. Fibra de paja. 3. Red de polipropileno fotodegradable.	
	3	1. Red de polipropileno estabilizado contra la UV.* 2. Fibra de paja/coco. 3. Red de polipropileno fotodegradable e hilo degradable.	
	4	1. Red de polipropileno estabilizado contra la UV.* 2. Fibra de coco. 3. Red de polipropileno estabilizado contra la UV, e hilo de polipropileno estabilizado contra la UV.	
Protección a largo plazo	5	1. Fibra orgánica natural biodegradable. 2. Fibra de paja e hilo biodegradable.	
	6	1. Fibra orgánica natural biodegradable. 2. Fibra de paja. 3. Fibra orgánica natural e hilo biodegradable.	
	7	1. Fibra orgánica natural biodegradable. 2. Fibra de paja/coco. 3. Fibra orgánica natural e hilo biodegradable.	
	8	1. Fibra orgánica natural biodegradable. 2. Fibra de coco. 3. Fibra orgánica natural e hilo biodegradable.	
Biodegradables	9	1. Red de polipropileno estabilizado contra la UV.* 2. Red de polipropileno estabilizado contra la UV (ondulada y de mayor peso) 3. Fibra de coco. 4. Red de polipropileno estabilizado contra la UV e hilo de polipropileno estabilizado contra la UV.	
	10	1. Red de polipropileno estabilizado contra la UV.* 2. Fibra de polipropileno estabilizada contra la UV. 3. Red de polipropileno estabilizado contra la UV e hilo de polipropileno estabilizado contra la UV.	
Permanente refuerzo del csped			

UV*= radiación ultra violeta.

Especificaciones del rollo: ancho=2m; largo=25.4m; peso=13.6-19.1kg; área=50m²

Manta No. 1 Esta manta ofrece un control de erosión en taludes 3:1 (taludes 33% o 19°), aunque puede ser usada en taludes con mayor pendiente y es recomendable su aplicación en áreas canalizadas de bajo flujo. Su longevidad funcional es aproximadamente de 10 meses.



Fig. IV. 2 Manta temporaria fotodegradable con matriz de fibras de paja.

Manta No. 2 Esta manta presenta características similares a la anterior. Ofrece un control de erosión en taludes 33-50% o de 19-27° y es recomendada su aplicación en áreas canalizadas de descarga moderada.



Fig. IV.3 Manta temporaria fotodegradable con matriz de fibras de paja y algunas aplicaciones.

Manta No. 3 La estructura de la manta permite una durabilidad por largo tiempo (18 meses), además de controlar la erosión en taludes más severos 2:1-1:1 (taludes de 50%-100% o de 27-45°), en canales de descarga media y en áreas donde se necesite protección por más de una temporada de crecimiento.



Fig. IV.4 Manta temporaria con protección a largo plazo y matriz de fibras de paja/coco.

Manta No. 4 La resistencia y durabilidad de las redes que integran su estructura permiten ofrecer un control de erosión en taludes 1:1 y mayores (taludes mayores de 100% o mayores de 45°), y en canales de descarga alta donde la vegetación natural permanente resistirá descargas de diseños, o en lugares que requieren protección hasta por tres años.

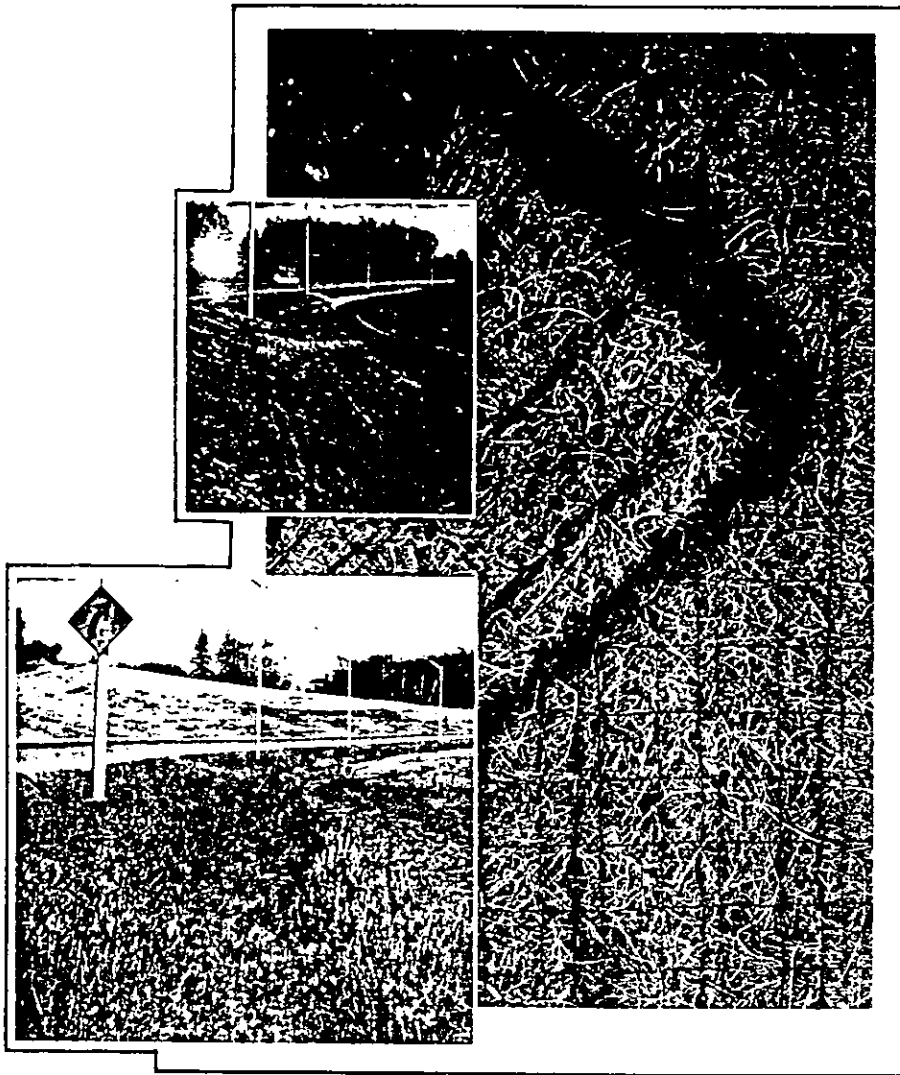


Fig. IV.5 Manta temporaria con protección a largo plazo y matriz de fibras de coco.

La característica principal de las mantas biodegradables (mantas 5, 6, 7 y 8), radica en que el entrelazado es a base de fibra natural en lugar del entrelazado sintético. Su biodegradabilidad al 100% significa que no quedará en el lugar sometido a tratamiento absolutamente ningún residuo del entrelazado después del crecimiento de la misma. Esta no es la única característica ventajosa para el medio ambiente, la flexibilidad y la absorción de agua características del entrelazado de fibra natural aumenta el rendimiento del control de la erosión de la manta. La construcción tejida de la manta permite que las fibras se entrelacen y muevan independientemente, reduciendo así el riesgo de entrapamiento de la vida salvaje, lo que hace a su aplicabilidad una necesidad en áreas ecológicamente susceptibles que requieren un alto funcionamiento en el control de la erosión. Su longevidad funcional y características de aplicación en taludes es similar a las cuatro primeras (mantas; 1, 2, 3 y 4), respectivamente.

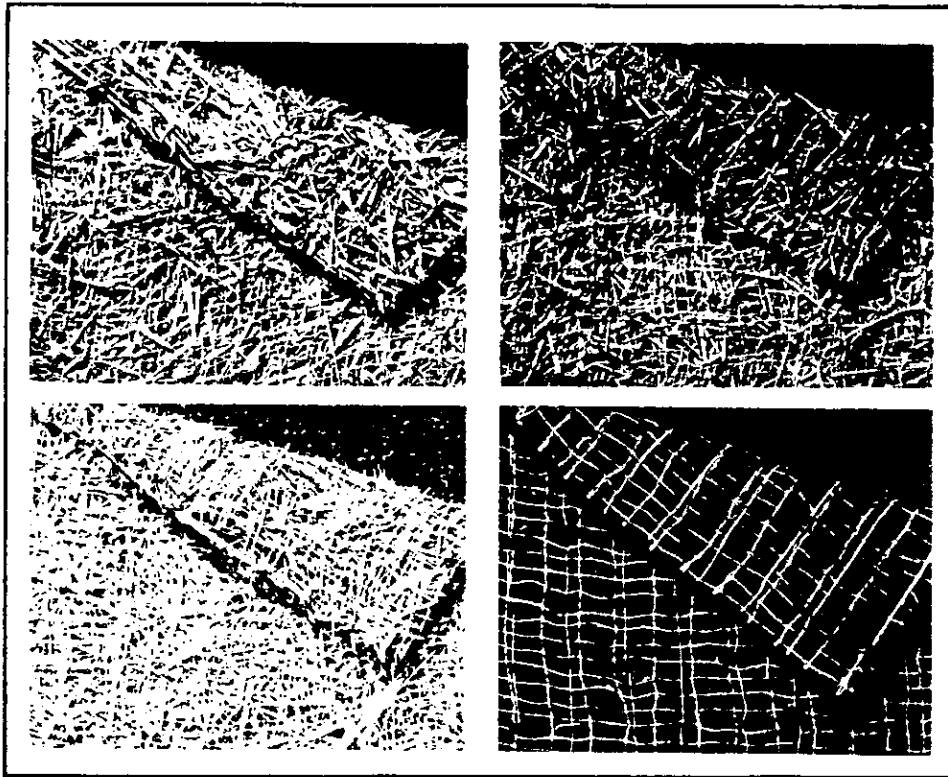


Fig. IV.6 Estructura de distintos tipos de mantas.

Manta No. 9 Esta construcción única de red triple forma crestas salientes a través del entretejido para atrapar sedimento y proporcionar una estructura tridimensional permanente para el refuerzo del tallo y la raíz del césped. Proporciona control de la erosión de larga duración en taludes severos con escorrentías fuertes, canales con velocidad de flujo super críticas y líneas costeras con oleaje elevado.



Fig. IV.7 Manta con permanente refuerzo de césped y matriz de coco y polímero.

Manta No.10 Proporciona control de erosión y refuerzo de vegetación permanentes en taludes severos, canales de descarga alta y líneas costeras con oleaje. Está diseñada para ser usada donde la vegetación natural no resista las condiciones del diseño de flujo.

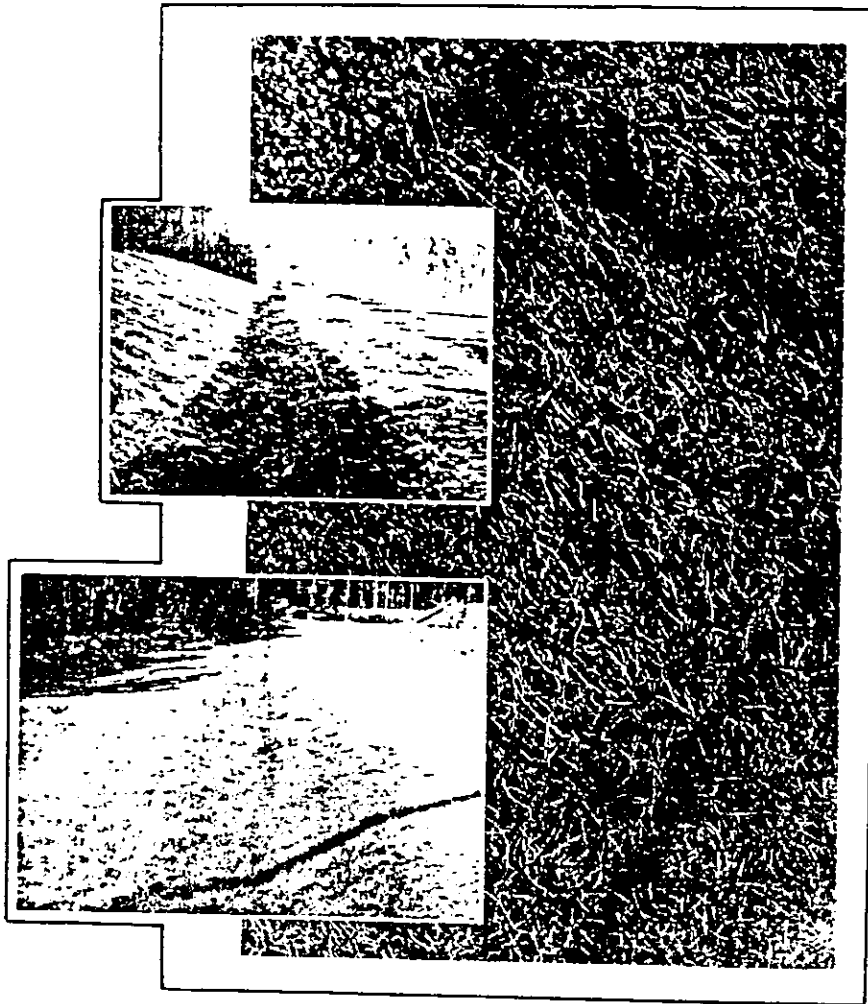


Fig. IV. 8 Manta con permanente refuerzo de césped y matriz de polipropileno.

IV.4.1 La "Manta Fértil, M.R."

La "Manta fértil, M.R."* es una alfombra compuesta de fibra de coco mexicano con paja, homogéneamente distribuida y sujeta entre dos mallas, pudiendo ser, según el caso, metálicas, de plástico o de otras fibras vegetales.

Al extenderla y fijarla adecuadamente sobre la superficie de un talud, reduce el impacto de la gota de lluvia sobre el suelo y al mismo tiempo disminuye la velocidad superficial, eliminando así, (desde el momento en que se instala), la acción de los dos agentes que originan la erosión, foto IV.3.

Este sistema permite regular la humedad del suelo que protege, ya que disminuye la infiltración cuando hay mucha agua y mantiene la humedad durante tiempo prolongado cuando cesa la lluvia. Una vez colocada, se le añaden las semillas y el fertilizante adecuado, a las características climatológicas del lugar, utilizando para ello la técnica del sistema analizado anteriormente denominado: "Hidromulching, M.R."* lográndose en poco tiempo la germinación y el crecimiento de la vegetación; a la vez, las raíces se van entrelazando con las fibras que componen la manta, consiguiéndose una protección permanente contra la erosión.

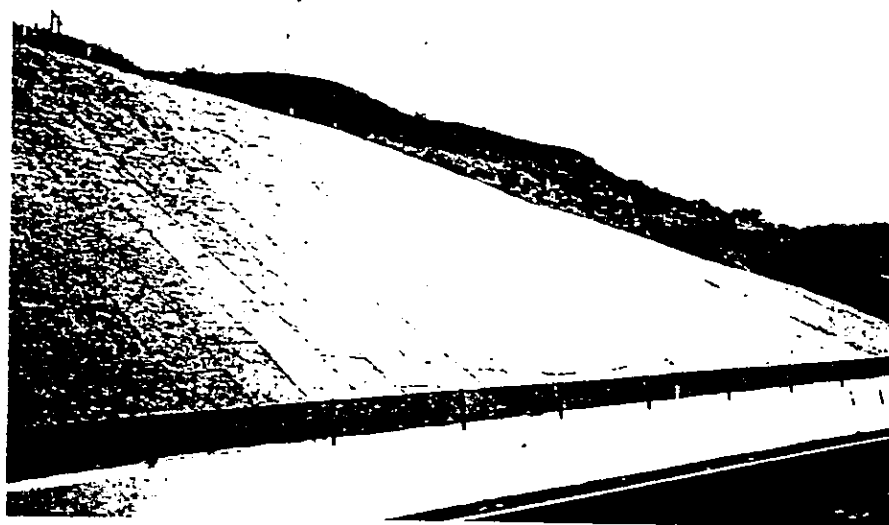


Foto IV.3 Aplicación de "Manta Fértil, M.R." para controlar la erosión del talud.

* Todos los sistemas han sido patentados por una empresa encargada de su distribución en el país, de aquí las siglas M.R.= marca registrada.

a) **Partes integrantes del sistema.**

El sistema queda integrado para su instalación como sigue: la alfombra compuesta de fibras naturales finamente divididas queda sujeta entre dos mallas (una superior y otra inferior), que según el caso pueden ser metálicas, de plástico degradable o bien de otras fibras vegetales. Como medio de sujeción del sistema al terreno se utilizan una serie de grapas que pueden ser metálicas o de madera (de 15 a 20cm de longitud), uniformemente distribuidas y sobre ella se esparce el riego de hidrosiembra con todos sus componentes analizados anteriormente.

b) **Procedimiento constructivo.**

Este sistema presenta una aplicación más compleja que el anterior ya que requiere de una fijación a la superficie así como, alinear y entrelazar los tramos de la misma. Primeramente se tiene que afinar y efectuar el saneo del talud, dependiendo del tipo de superficie a tratar resulta altamente recomendable el contar con un pequeño espesor de tierra vegetal humedecida y tratada con fertilizante, uniformemente distribuida por toda la superficie. Posteriormente se disponen y extienden los rollos que componen la manta integrada por fibras vegetales (paja/coco), en tramos longitudinales conforme a la pendiente del talud, nunca debe ser colocada transversalmente a la línea de pendiente del talud por razones funcionales, traslapando los tramos (5-10cm), con todos los elementos que la integran, foto IV 4. Una vez efectuados los traslapes se procede al anclaje de todo el sistema por medio de un conjunto de grapas dispuestas uniformemente a manera de que quede bien sujeta al terreno (foto IV.5), una guía patrón de engrapado se describe en párrafos subsecuentes.

Por último, se procede con la aplicación de la hidrosiembra para integrar a la semilla y aditivos al sistema. Cabe resaltar que éste último procedimiento puede o no ser efectuado, es decir, si en el proceso de elaboración de la manta se incluye el "Hidromulching, M.R."* y se mezcla perfectamente con las fibras, tendremos que la manta quedará integrada totalmente y estará en condiciones de ser instalada sin necesidad del posterior riego de la hidrosiembra.

Dependiendo de las condiciones climáticas del lugar es importante efectuar un primer riego que imprima un grado de humedad al sistema apropiado para insitar el inicio del proceso de germinación de la semilla.



Foto IV.4 Disposición de rollos de Manta Fértil, M.R. para su aplicación.



Foto IV.5 Procedimiento de engrapado de la manta ya extendida.

c) Aplicaciones.

Las principales aplicaciones de este sistema las tenemos en:

- Cortes y terraplenes
- Canales
- Estribos de puentes
- Depósitos de residuos urbanos
- Depósitos de residuos mineros
- Presas de materiales sueltos
- Presas de jales
- Desarrollos turísticos
- Campos de golf
- Revegetación
- Paisaje



Foto IV.6 Aplicación en terraplén con seguridad e integración al ecosistema.

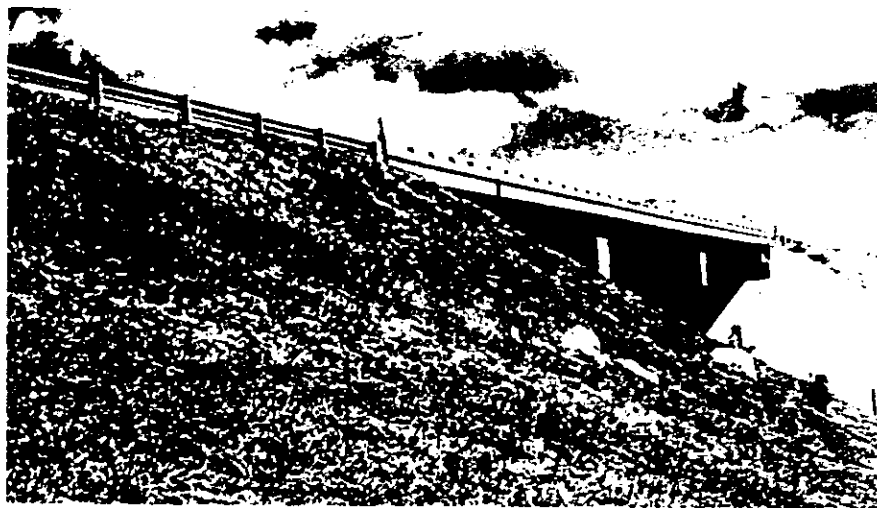


Foto IV.7 Mitigación del impacto ambiental en estribos de puentes.

IV.5 MALLAS COMPUESTAS.

Las mallas compuestas representan una opción realmente eficaz en el control de la erosión de taludes, al eliminar el graneo, polvo, sedimento y caída de rocas ya que, al mismo tiempo regeneran el ecosistema en las más difíciles condiciones.

Como se ha analizado en el capítulo anterior, de poco sirven las mallas colgadas instaladas en cientos de taludes ya que, no controlan la erosión ni la relajación de la roca en los mismos. No obstante, comparando este sistema con la aplicación del concreto lanzado, tiene la ventaja de que en general no falla, mientras no se rompa la malla debido al peso del material que se acumula en ellas en forma de "alcancías". En estos casos específicos, el mantenimiento resulta costoso, al no detenerse la erosión ni la relajación, con el subsecuente graneo y caída de rocas que continúa sobrecargando a la malla que se rompe en la mayoría de los casos y que de cualquier modo requiere del retiro del material retenido en ellas y de los finos que pasan a través de la malla y se depositan en las partes bajas.

Es por todo esto que los dos siguientes sistemas a analizar representan hoy día la opción más eficiente en el control de la erosión y de la relajación en taludes rocosos.

Conceptualizados por ingenieros preocupados por la ineficiencia de los sistemas hasta ahora aplicados, proponen como una nueva alternativa, estos dos sistemas: "Grin-rock, M.R."* y la "Eco malla, M.R."* los cuales analizaremos en los párrafos subsecuentes.

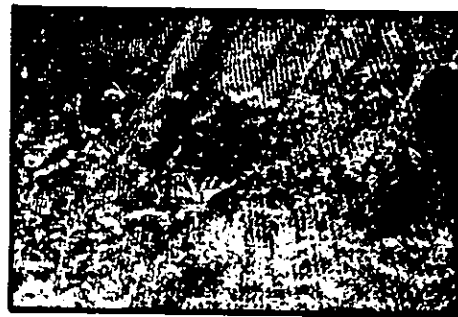


Fig. IV.9 Mallas compuestas.

* Todos los sistemas han sido patentados por una empresa encargada de su distribución en el país, de aquí las siglas M.R.= marca registrada.

IV.5.1 El "Grin-Rock, M.R."

Existen muchos tipos de terreno y es por ello que se han desarrollado muchos tipos de soluciones. El "Grin-Rock, M.R." resulta de la combinación de dos sistemas analizados anteriormente: hidrosiembra o "Hidromulching, M.R." y el de "Manta fértil, M.R.", con el implemento de una malla de alta resistencia forrada con PVC, sistema que se sujeta por medio de un anclaje más profundo para otorgar una mayor estabilidad superficial a los taludes, el sistema se adapta a las irregularidades del terreno, protegiendo del graneado y la caída de rocas desde el primer momento, dando inmediatamente un agradable aspecto de seguridad que se complementa con la belleza de lo natural cuando crece la vegetación.

Este es un sistema eficaz para evitar el graneado y la caída de rocas en taludes de cortes en rocas blandas, tobas volcánicas, conglomerados, etcétera.

a) Partes integrantes del sistema.

El sistema queda integrado como sigue:

- Malla de alta resistencia forrada con PVC, o del tipo ciclónica solamente.
- Hidrosiembra o "Hidromulching, M.R."
- "Manta fértil, M.R."
- Grapas de anclaje y fijación al terreno.

b) Proceso constructivo.

Su proceso constructivo, es similar al de los procedimientos anteriores ya que, se basa en ellos, con la variante de que en su red superior es colocada una malla de alta resistencia la cuál puede ser del tipo ciclónica forrada con PVC para otorgarle mayor durabilidad y protección al mismo sistema. Cuando se presentan casos en que sobresalen fragmentos rocosos de considerable tamaño y que se encuentran alojados en el talud, se procede a realizar los debidos cortes de modo que el fragmento rocoso resalte y no sea un impedimento para la correcta instalación del sistema, como se observa en la foto IV.10. Este procedimiento se realiza con la intención de que no se formen huecos (que se generan entre la saliente de la roca y el terreno), y se mantenga al máximo el contacto entre el sistema y el terreno, además de que no se impida del gose estético de la formación natural del propio talud.

c) Aplicaciones.

Además de controlar la erosión en taludes en rocas blandas y con pendiente superior a los 60°, se aplica en distintas obras como depósitos de residuos sólidos, presas de jales, mejorandose notoriamente el paisaje al regenerarse la vegetación.



Foto IV.8 Aplicación de "Grin Rock", M.R." en un talud de la autopista del sol (Cuernavaca-Acapulco), 1996.

En la foto se observa que la parte tratada con la instalación del sistema, la cuneta está libre de sedimento, en cambio las zonas sin tratamiento, las cunetas presentan azolves considerables.



Foto IV.9 Instalación del sistema "Grin-rock, M.R." en taludes con pendiente superior a los 60°

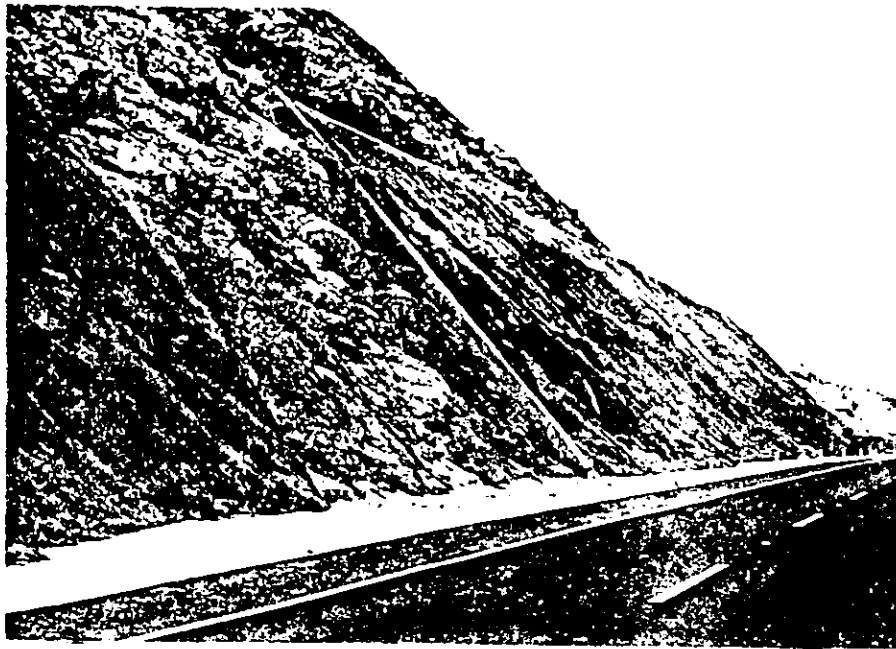


Foto IV.10 Control de la erosión en talud con el sistema "Grin rock, M.R."

La fotografía muestra claramente la presencia de sedimento, en la zona intermedia del talud que no ha sido tratado, hay fragmentos rocosos en la cuneta de ésta zona afectada, en cambio, el tramo donde ha sido aplicado el sistema contra erosión, permanecen limpias y sin presencia de fragmentos de roca en la cuneta y en la carpeta asfáltica.

IV.5.2 La "Eco-Malla, M.R."

La "Eco-malla M.R." es una solución integral para todo tipo de taludes en roca ya que, su aplicación implica un tratamiento que incluye la regeneración del ecosistema, el control de la erosión y una estabilización superficial estructural al mismo tiempo.

Es una solución geotécnica que no tiene color gris y que protege el medio ambiente estética y biológicamente.

Este sistema resulta de la combinación de los sistemas analizados anteriormente con una nueva adecuación de materiales que permiten su correcta instalación en el terreno rocoso, por medio de una malla de alta resistencia y anclas que se fijan al sistema por medio de placas metálicas, las cuales proporcionan al talud una situación que contraresta el fenómeno de la decompresión en el mismo, además, cuenta con la integración de la hidrosiembra y/o manta fértil. Representa una solución adecuada para taludes rocosos con pendientes elevadas y problemas de caída de bloques o estabilidad superficial ya que, disminuye drásticamente el efecto negativo de la decompresión de la roca en la zona más somera del corte.

a) Partes integrantes del sistema.

Las partes que integran al sistema son: una malla de alta resistencia, del tipo ciclónica o de triple torción, un sistema de anclaje diseñado de acuerdo al proyecto de estabilización superficial o profunda que se trate, que funciona como anclas de fricción y que se fijan a unas placas metálicas de reparto, ambas partes mencionadas hasta ahora, funcionan como elementos de sujeción del sistema al terreno, otorgándole una pequeña compresión al talud.

Además cuenta con unos cables galvanizados forrados con PVC, que funcionan como lazos de unión entre las mallas, es decir, sirven para unir los distintos tramos de malla y por último, el sistema tradicional que integra a la hidrosiembra.

b) Proceso constructivo.

El procedimiento constructivo es similar en cuanto a la instalación de las mantas y mallas ya analizadas, con la variante de que a este último se le adiciona una malla superior de alta resistencia que puede estar forrada con PVC o bien simplemente con una malla de tipo ciclónica o de triple torsión. Además este sistema cuenta con anclas que, de acuerdo al proyecto que se trate, se disponen de manera uniforme en la superficie a tratar y sujetan a la malla por medio de placas metálicas que fijan aún más el sistema y funcionan como medio de estabilización superficial al talud.

Además, debe contar con una serie de cables que funcionan a manera de uniones entre los tramos de malla (especie de cosido) para sujetarla bien, dispuestos longitudinalmente a lo largo de la pendiente del talud (sin tensión) y otros cables dispuestos de manera transversal, uno ubicado en la parte superior del talud y otro en la parte inferior los cuales se tensan para fijarla mejor al terreno, como se muestra en la fig. IV.10.

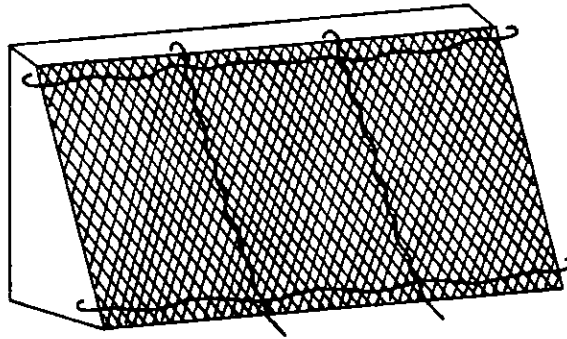


Fig. IV.10 Cables de fijación para mallas colgantes.

c) Aplicaciones.

Las principales aplicaciones de este sistema las tenemos en:

- Taludes en cualquier tipo de terreno y con pendientes pronunciadas.
- Estabilización superficial con máxima mitigación del impacto ambiental.
- Taludes con problemas de graneo y caída de fragmentos rocosos.

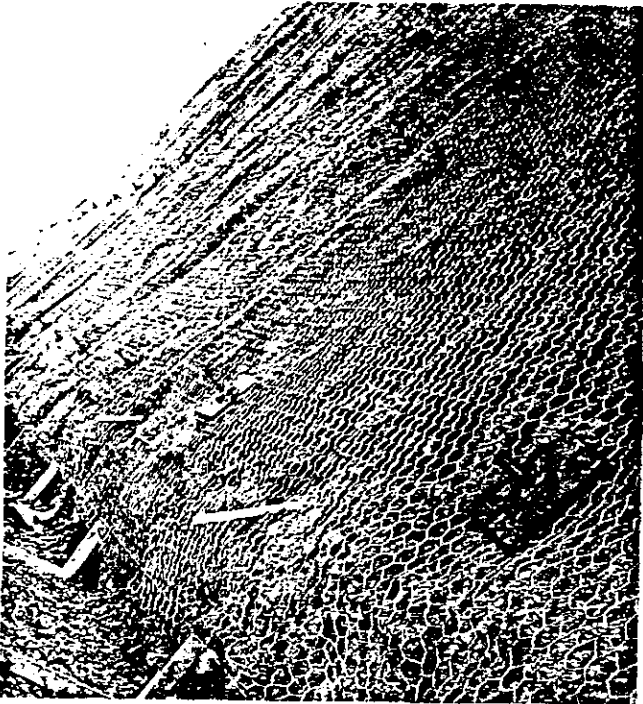


Fig. IV.11 Detalle del elemento de sujeción.

Foto IV.11 Aplicación de la "Eco malla, M.R." en talud de pendiente pronunciada.

IV.6 PRUEBAS Y DISEÑO DE MANTAS PARA LA PROTECCION DEL TALUD.

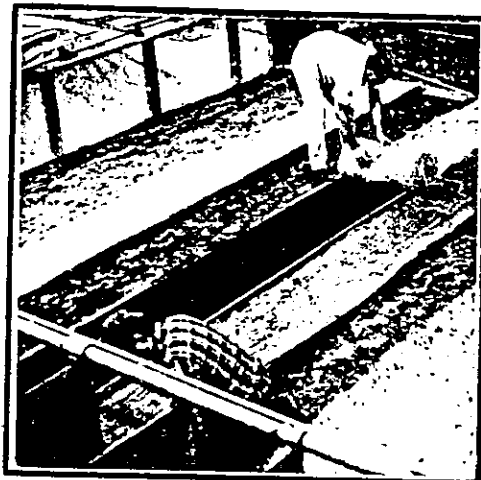
En cuanto a las pruebas y el diseño de mantas para el control de la erosión podemos establecer que se encuentran respaldadas por una extensa investigación, así como en la efectividad de cada producto para la disminución de la pérdida de suelo, bajo varias condiciones de terreno. El ensayo más reciente se realizó en el laboratorio de investigación de erosión en una universidad superior usando una pendiente variable, con una plataforma de ensayo rellena de suelo y un simulador de lluvia controlado por computadora. Los resultados de estas pruebas se exponen en los siguientes párrafos, confirmando los resultados de otros estudios para el control de la erosión, podemos afirmar que las mantas analizadas en los epígrafos anteriores son extremadamente efectivas en el control de erosión y de pérdida de sedimento sobre taludes leves a muy empinados bajo la acción de una fuerte lluvia.

IV.6.1 Protocolo de las pruebas ensayadas en taludes.

Todos los ensayos se realizaron instalando cada tipo de mantas (ya analizadas, ver tabla IV.1), en 2-3 parcelas separadas sobre una plataforma de ensayo de limo arenoso de 20 pies fijada a una de tres gradientes de talud (3:1 - 1.5:1).

Después de la instalación, las parcelas de ensayo se sometieron a un evento de tormenta simulada con una intensidad de lluvia de 10cm/hr (4pulg/hr).

Toda la escorrentía, agua filtrada y sedimento, se recogió al final de cada ensayo, se midió volumétricamente y se pesó. Las siguientes gráficas muestran los resultados de las pruebas en pérdida de suelo por hora de las parcelas con el material respectivo y de control de suelo sin protección.



a) **Resumen de la prueba No. 1.**

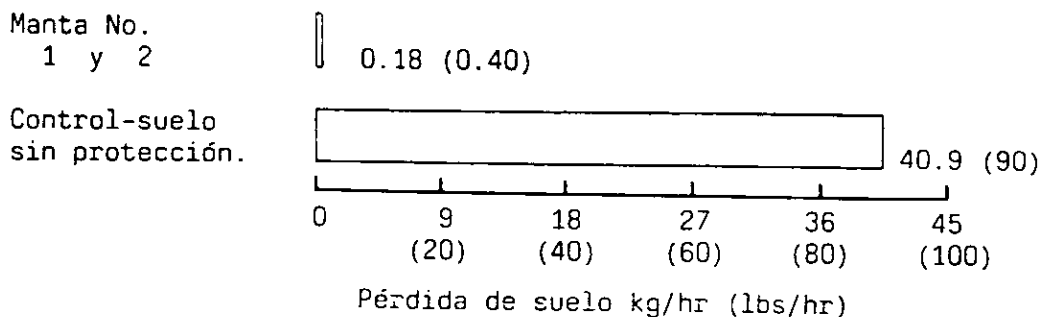
Las mantas conformadas por fibra de paja proporcionaron un control de erosión excepcional sobre el talud de prueba 3:1, mostrando 99.5% de efectividad comparado con la parcela control de suelo sin protección.

Un funcionamiento comparable se puede esperar en aplicaciones de taludes similares cuando las mantas sean propiamente instaladas.

Sin embargo, taludes mayores de 3:1 pueden requerir un aumento en protección debido a un aumento en los volúmenes y las velocidades de flujo de la escorrentía.

Tabla IV.2 **Prueba No. 1 en talud.**

Condiciones de la prueba: Pendiente del talud = 3:1
 Tipo de suelo = limo arenoso.
 Longitud del talud = 6m (20').
 Intensidad de la lluvia = 10cm/hr (4pulg/hr).

b) **Resumen de la prueba No. 2.**

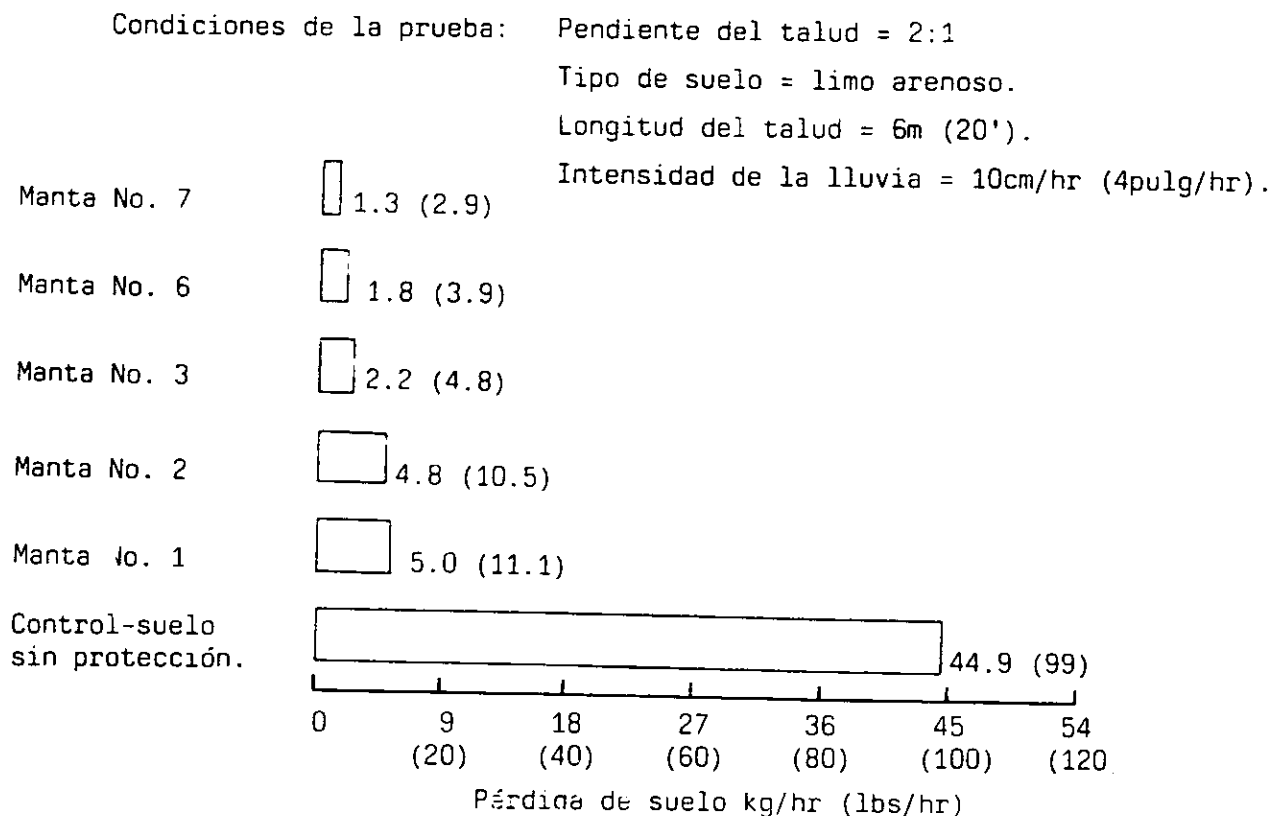
Las mantas de paja 100% con entrelazado simple o doble ofrecen una protección adecuada para el talud 2:1. Sin embargo, debido al aumento de esfuerzos en los materiales durante la instalación, las mantas de entrelazado doble se recomiendan ampliamente.

La manta de fibra de paja/coco proporcionó el doble de la efectividad que la de paja-fotodegradable. Además, es ideal para aplicaciones que requieren un grado más alto o de mayor duración de protección contra la erosión.

Las mantas biodegradables probaron ser los materiales más efectivos en la reducción de pérdida de suelo. El aumento en rendimiento de los productos biodegradables sobre los materiales poli-entrelazados parece ser una función de absorción del agua y de la naturaleza fibrosa de los entrelazados de las biodegradables.

Cuando estas se saturan, el entrelazado de fibra natural ayuda a fijar la manta a la superficie del suelo. Además, las fibras de pelo fino que sobresalen de los filamentos del entrelazado de abajo, se adhieren a la superficie del suelo y ayudan en la resistencia al movimiento de las partículas del suelo. Las mantas biodegradables están recomendadas para aplicaciones que requieren el grado más alto de protección contra la erosión.

Tabla IV.3 Prueba No. 2 en talud.



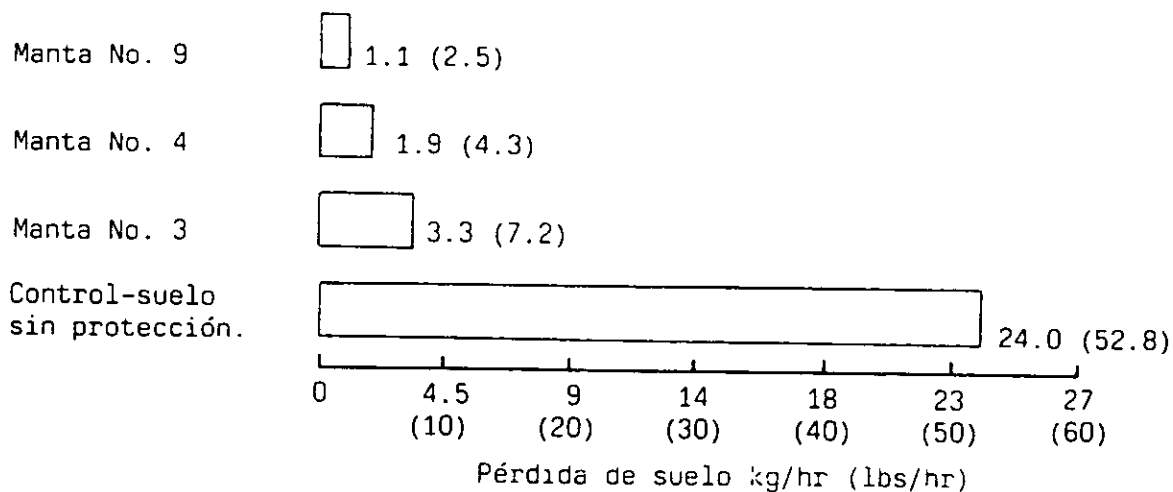
c) Resumen de la prueba No. 3.

La manta de protección a largo plazo con matriz de paja/coco, resultó muy efectiva al reducir al pérdida de suelo del talud de prueba de 1.5:1.

Las mantas de protección a largo plazo con matriz de coco y la reforzada con polimeros ondulada, mostraron aún mayor funcionamiento por encima del 90% de efectividad. La primera está recomendada para la protección temporaria a largo plazo de taludes críticos, donde se espera que la vegetación permanente establecida soporte los eventos de tormenta diseñados. La segunda se recomienda para taludes severos con escorrentía fuerte que necesiten protección contra la erosión tanto temporaria como a largo plazo y refuerzo permanente del césped.

Tabla IV.4 Prueba No. 3 en talud.

Condiciones de la prueba: Pendiente del talud = 1.5:1
 Tipo de suelo = limo arenoso.
 Longitud del talud = 6m (20').
 Intensidad de la lluvia = 10cm/hr (4pulg/hr).



IV.7 RESULTADOS GLOBALES DE LOS SISTEMAS Y PROCEDIMIENTOS APLICADOS EN TALUDES.

Los resultados logrados con la aplicación de los sistemas y procedimientos han sido bastante satisfactorios. En taludes con problemas de erosión y de estabilización superficial se ha logrado corregir y regenerar el ecosistema en periodos de tiempo realmente cortos, tomando en cuenta el tiempo promedio de germinación de la semilla (que es variable según el tipo de la misma), así como del tipo de clima prevaleciente en la región en que se ubique el talud sometido a tratamiento.

Prueba de ello son los más de 500,000 m² tratados con estos sistemas y procedimientos y los más de 200 taludes tratados en la República Mexicana.

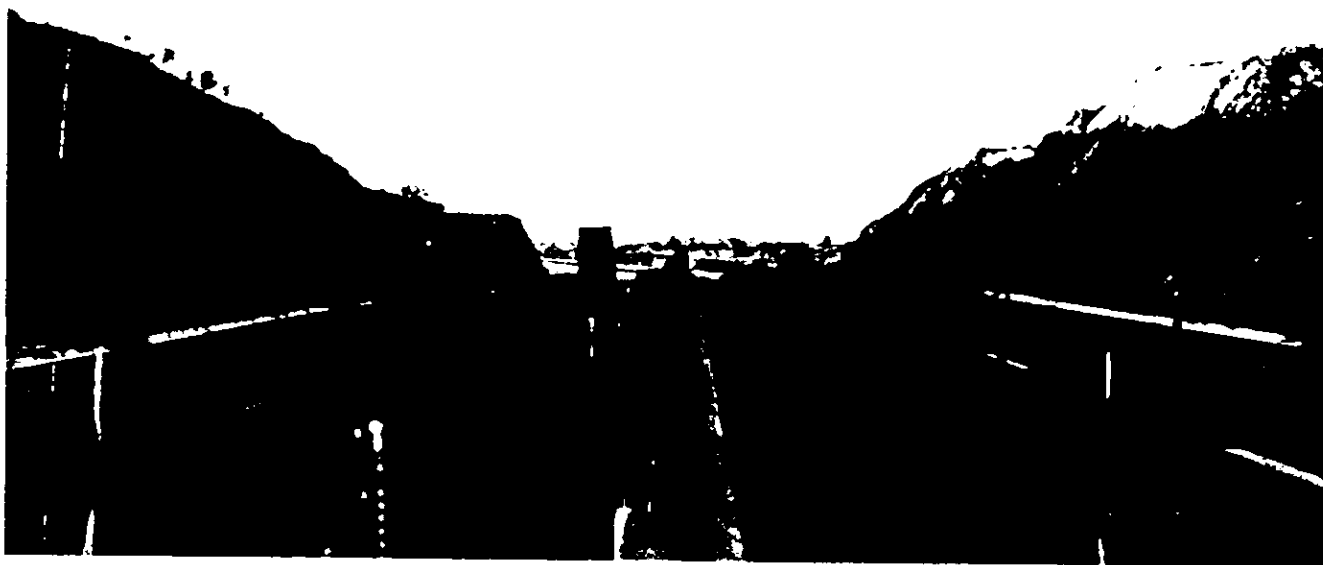
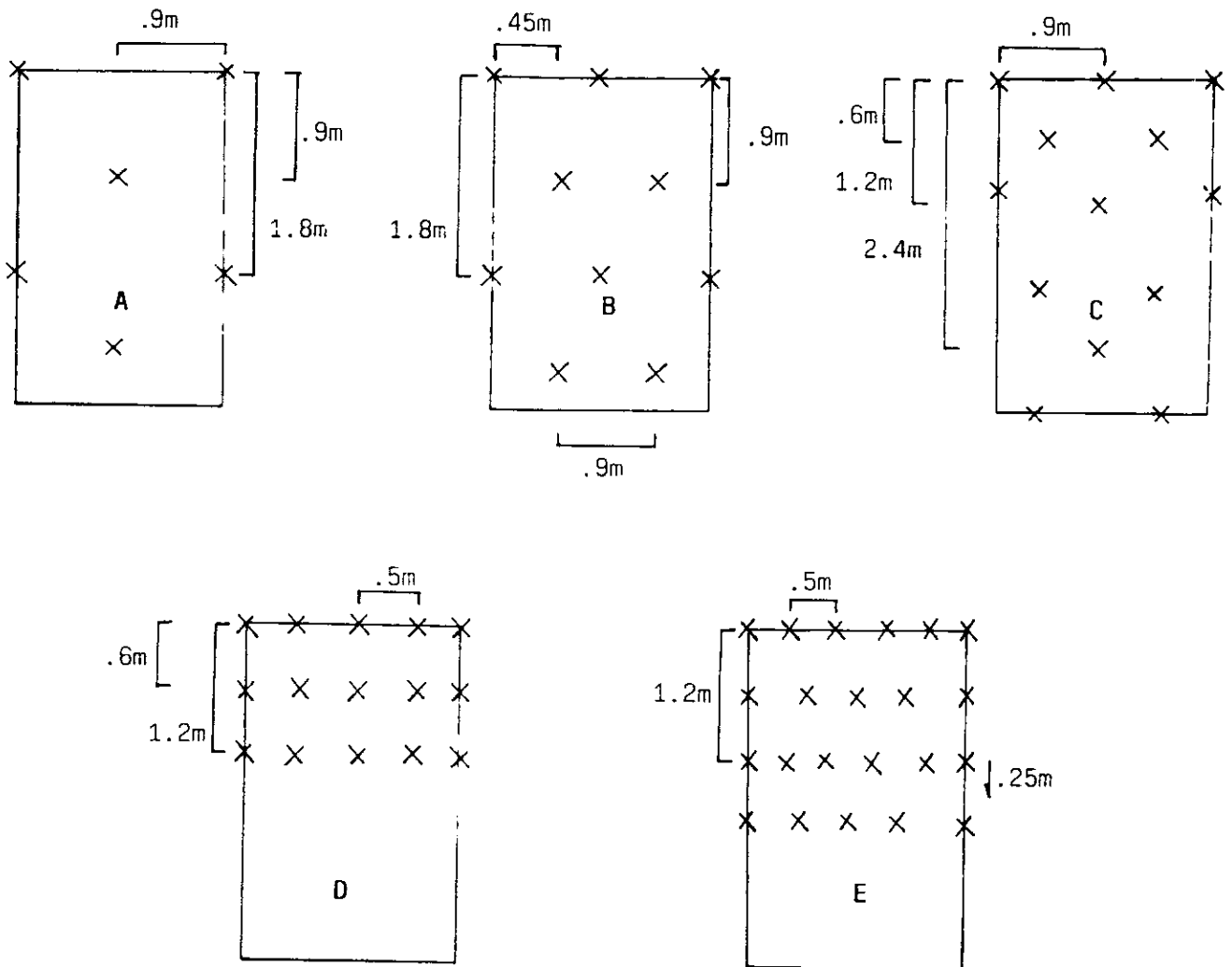


Foto IV.12 Aplicación de los sistemas contra erosión en taludes.

La fotografía resalta la efectividad de los sistemas, en la margen izquierda el talud ha sido tratado con uno de los sistemas contra erosión y se ha logrado la regeneración de la vegetación, además de solventar problemas de mantenimiento constante al tramo de la autopista, por efecto de los sedimentos depositados tanto en cunetas como en parte de la carpeta asfáltica. En cambio en la margen derecha se observa al talud sin tratamiento y con ello los subsecuentes problemas que acarrea la erosión en taludes, esto es, la presencia de sedimento al pie del talud (que ocasiona el azolve de cunetas), y de fragmentos rocosos en una parte de la carpeta asfáltica (que ocasionan lamentables accidentes a los usuarios).

IV.8 GUIA PATRON PARA EL ENGRAPADO DE MANTAS.

Los patrones para engrapado son aplicables a todas las mantas para el control de la erosión. Dichos patrones van a variar dependiendo del tipo de aplicación, longitud y grado del talud, tipo de material (suelo o roca) que lo constituya y lluvia anual. Las siguientes son recomendaciones generales de engrapado basadas en la longitud, el grado del talud y en la esorrentía estimada. Patrones de colocación de grapas específicos se ilustran en los diagramas A, B, C, D y E de la fig. IV. 12. En ocasiones es necesario aumentar la proporción de grapas dependiendo de las condiciones del lugar.



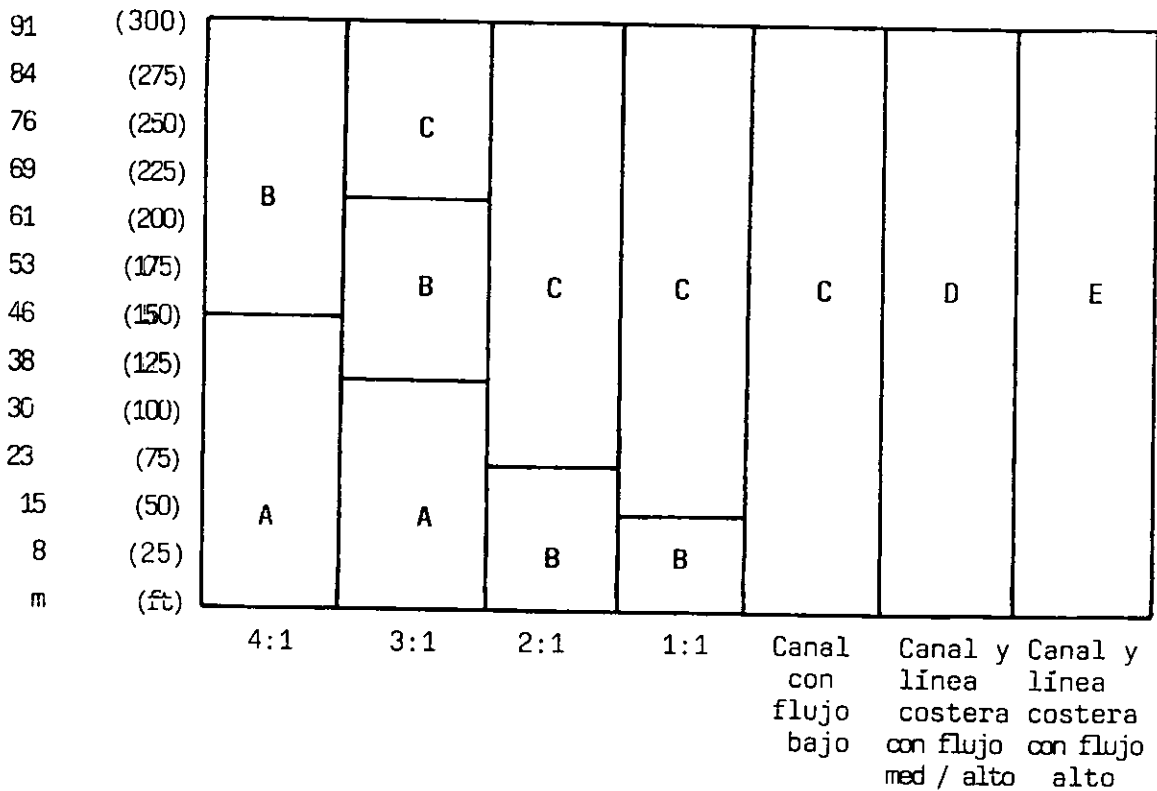
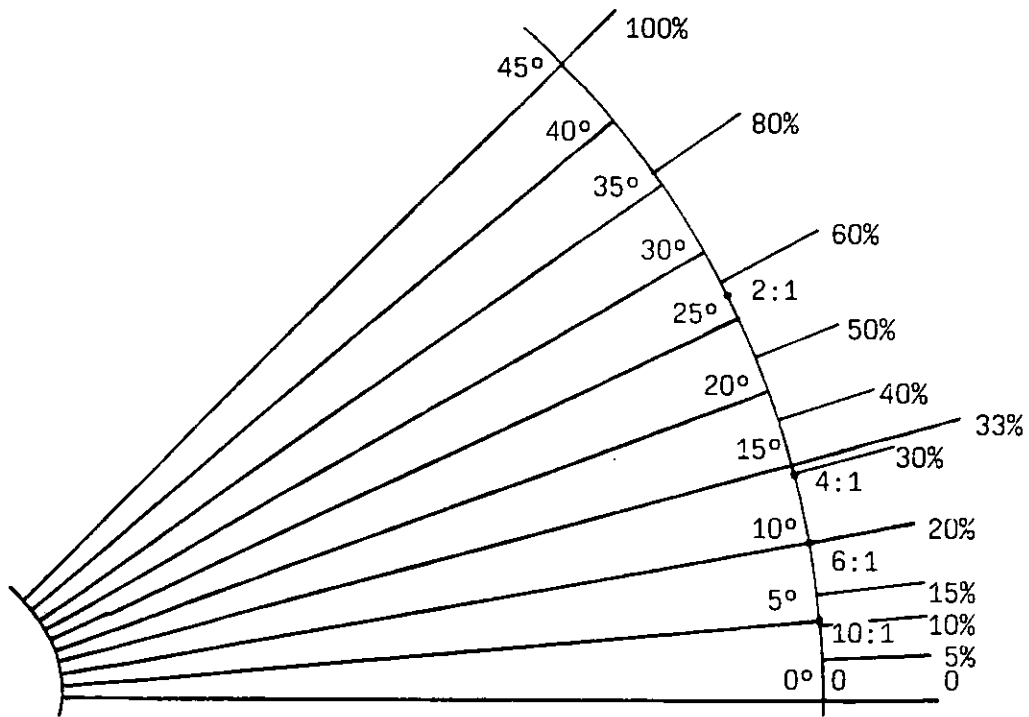


Fig. IV.12 Guía patrón para engrapado de mantas (folleto 2).

IV. 9 GUÍA DE INSTALACION PRACTICA.

Complementando la serie de procedimientos constructivos antes analizados para cada tipo de manta, se siguen de manera general los siguientes pasos:

1. Se prepara el terreno antes de instalar las mantas, incluyendo la aplicación de cal, fertilizante y semilla, o en su caso se procede con el lanzamiento del sistema de hidrosiembra, descrito anteriormente.

Nota: Los pasos a seguir dependen del tipo de manta a usar, es decir, pueden o no omitirse según el caso y tipo de tratamiento.

2. Se comienza en la corona del talud, sujetando la manta en una zanja de 15cm (6") de profundidad por 15cm (6") de ancho. Se rellena y compacta la zanja después del debido engrape, para su fijación.

3. Se desenrollan las mantas (A) hacia abajo o (B) horizontalmente sobre el talud, esto según la pendiente que se tenga.

4. Los bordes de mantas paralelas deben engraparse con un traslape de aproximadamente 5cm (2").

5. Cuando sea necesario unir las mantas en la pendiente de los taludes, se deben colocar orilla sobre orilla (tipo escalonado) con un traslape de aproximadamente 10cm (4"), esto es, en sentido vertical. Se engrapa el área traslapada con una separación de aproximadamente 30cm (12").

Esta guía práctica se expone como un medio generalizado para la instalación de mantas diseñadas para el control de la erosión, atendiendo a la fig. IV.13.

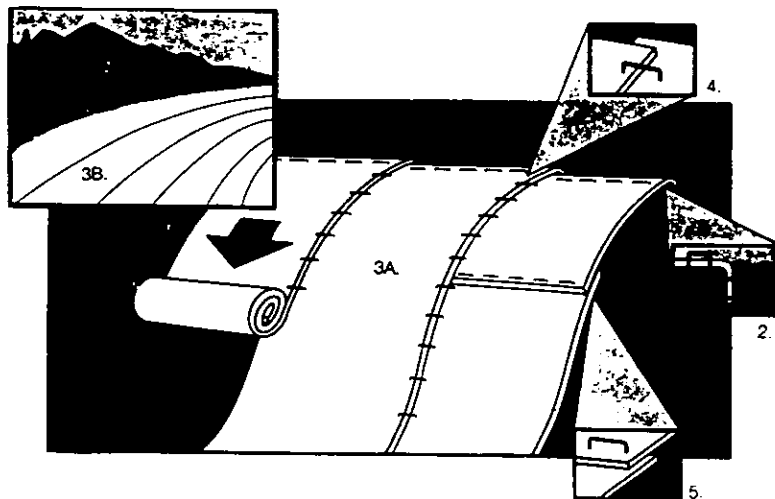
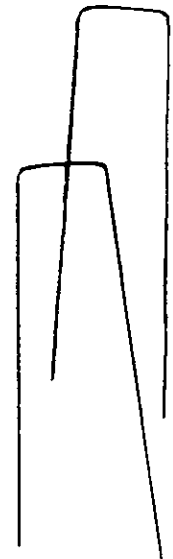
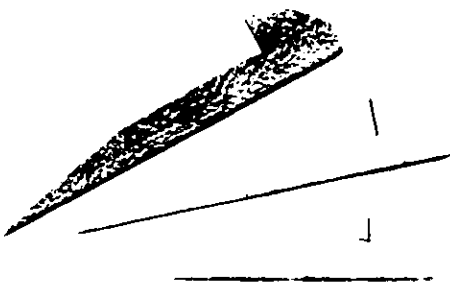
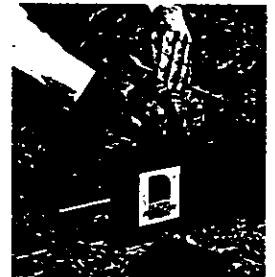
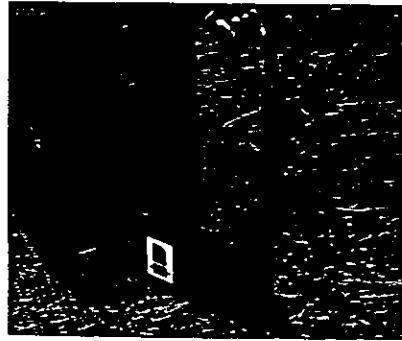
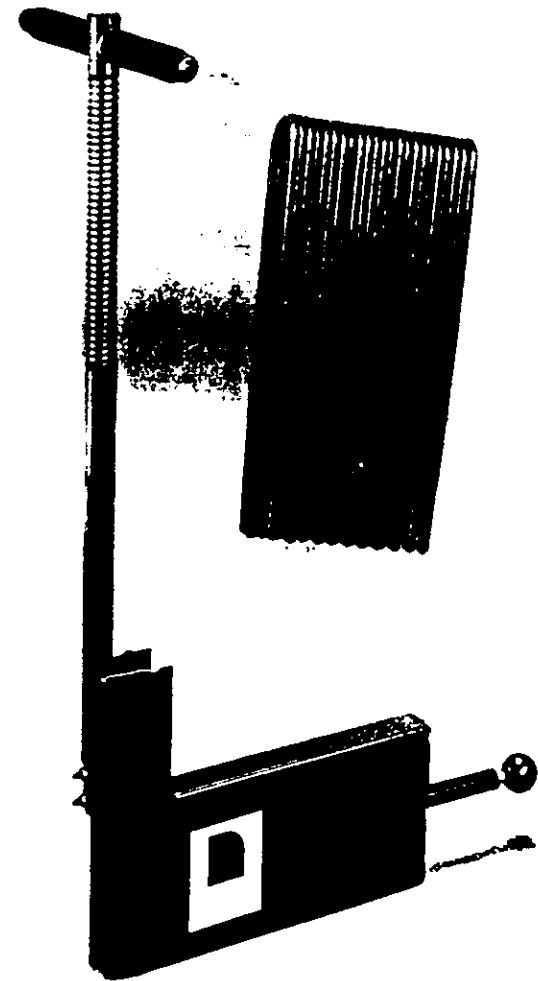


Fig. IV.13 Guía de instalación práctica (Folleto 2).

La pistola de grapas para la instalación de manta reduce el costo y tiempo de instalación, su cámara de grapas está completamente sellada para protegerla de la tierra y el lodo. Los cartuchos de grapas son fáciles de transportar y económicos, este accesorio es una útil herramienta para la instalación de mantas, geotextiles, césped y otros materiales diseñados para el control de la erosión, que deben sujetarse al terreno firmemente.



Estacas de madera dura de 15cm (6") y 30cm (12"), biodegradables.

Clavijas para mantas biodegradables 100%. Disponibles en 10cm (4") y 15cm (6").

Grapas de alambre de 15cm (6") y 20cm (8").

Fig. IV.14 Accesorios para instalación de mantas que controlan la erosión de taludes.

IV.10 REFERENCIAS.

Folleto 1: Geotecnología ambiental aplicada. 1996. Grupo CICONSA.

Folleto 2: Manual de mantas para el control de la erosión. North American Green (R). International. 1996. Grupo CICONSA.

Recopilación de comentarios efectuados durante asesorías por el director general de las empresas del Grupo CICONSA, M. en I. Manuel Sánchez G.

CAPITULO No. V TRATAMIENTO DE UN TALUD

- V.1 **Introducción**
- V.2 **Antecedentes**
- V.3 **Localización**
- V.4 **Descripción física del sitio**
- V.5 **Condiciones geotécnicas**
- V.6 **Medidas técnicas correctivas aplicadas al talud**
 - a) Tratamiento superficial
 - b) Cambios geométricos
 - c) Protección del fraccionamiento al pie del talud
- V.7 **Sistemas aplicados para el control de la erosión del talud**
- V.8 **Conclusiones**
- V.9 **Referencias**

V.1 INTRODUCCION.

Este capítulo ilustra la aplicación de los sistemas de control de la erosión en taludes, con un caso real.

En el desarrollo del presente capítulo se analizaron aspectos como son los antecedentes, la localización del sitio, datos y métodos geotécnicos empleados en la rehabilitación del talud, la justificación de los sistemas de control de erosión aplicados, estudios y recomendaciones preliminares al tratamiento efectivo del mismo, así como la inclusión de un diagnóstico geotécnico completo y la serie de conclusiones obtenidas de los trabajos de rehabilitación efectuados en el talud.

La serie de estudios y diagnósticos preliminares a ésta obra, fueron elaborados en Mayo de 1996, a raíz de la preocupación de las autoridades del Edo. de México debido a los acontecimientos ocurridos en Agosto de 1995; el tratamiento contra erosión fué aplicado a partir de Septiembre de 1996, por motivos diversos que implicaron la misma rehabilitación del talud ya que, los trabajos efectuados en la zona del talud, no sólo implicaron la protección superficial del talud contra erosión sino también la adecuación e instalación de obras requeridas para asegurar su propia estabilidad.

V.2 ANTECEDENTES.

La Dirección General de Obras Públicas del Municipio de Tlalnepantla, Edo. de México, realizó obras de reparación de un terraplén, que fue severamente dañado por escurrimientos de agua excepcionales el 23 de Agosto de 1995.

De acuerdo con la información proporcionada, el talud poniente del terraplén tenía inicialmente una inclinación media de 1.75:1. La longitud aproximada del terraplén es de 200m y su altura varía de 7 a 17m. El terraplén soporta una vialidad de 9m de ancho con pendiente ascendente hacia el noroeste. Al pie del talud, se localiza el fraccionamiento "El Copal" constituido principalmente por casas de dos niveles.

Los daños que se presentaron el 23 de Agosto de 1995, son atribuibles a lluvias extraordinarias que provocaron una acumulación de agua importante en las pequeñas cuencas que existen en la parte alta de la zona de cerros vecina.

Se generaron escurrimientos voluminosos, especialmente en las calles localizadas pendiente arriba, a una distancia de aproximadamente 800m del terraplén en estudio.

Estas aguas no siguieron su cauce natural hacia la barranca contigua y se canalizaron en casi su totalidad hacia el terraplén alcanzando un tirante de hasta 30cm sobre el pavimento.

Los volúmenes importantes de agua que se presentaron provocaron una fuerte erosión de la orilla de la corona del talud y de algunas partes del talud poniente del terraplén, en el cual se encontraba en construcción un muro de contención. Se presentó acumulación de lodo proveniente del deslave, al pie del talud y en la proximidad de las casas del fraccionamiento.

Si bien los efectos erosivos resultaron aparatosos, no deben confundirse con una falla de talud por cortante. En efecto, a pesar de que los materiales constitutivos del terraplén son mediocres, no se observaron indicios de una falla de este tipo. La presencia de arboles que no presentan evidencias de movimientos en la parte inferior del talud sugiere que éste se encuentra estable, aún cuando, su factor de seguridad debe ser escaso (Auvinet, 1996).



Foto V.1 Tratamiento de un talud estable contra erosión.

V.4 DESCRIPCION FISICA DEL SITIO.

Como se observa en la fig. V.2, la avenida atraviesa al talud de manera longitudinal en la parte superior del mismo.

Después de efectuados los trabajos de rehabilitación del terraplén, en el año de 1996, se ha notado una mejoría extrema en el sitio de la obra en cuanto a seguridad se refiere, esto se logró implementando una serie de medidas técnicas (las cuales se describirán más detalladamente en líneas posteriores), que cubren aspectos en cuanto a la instalación de un apropiado drenaje superficial, un cambio en la geometría del talud y una debida protección del fraccionamiento ubicado al pie del talud.

Estas condiciones técnicas implementadas al talud se describen esquemáticamente en la fig. V.3.



Foto V.2 Notable mejoramiento de las condiciones del talud.

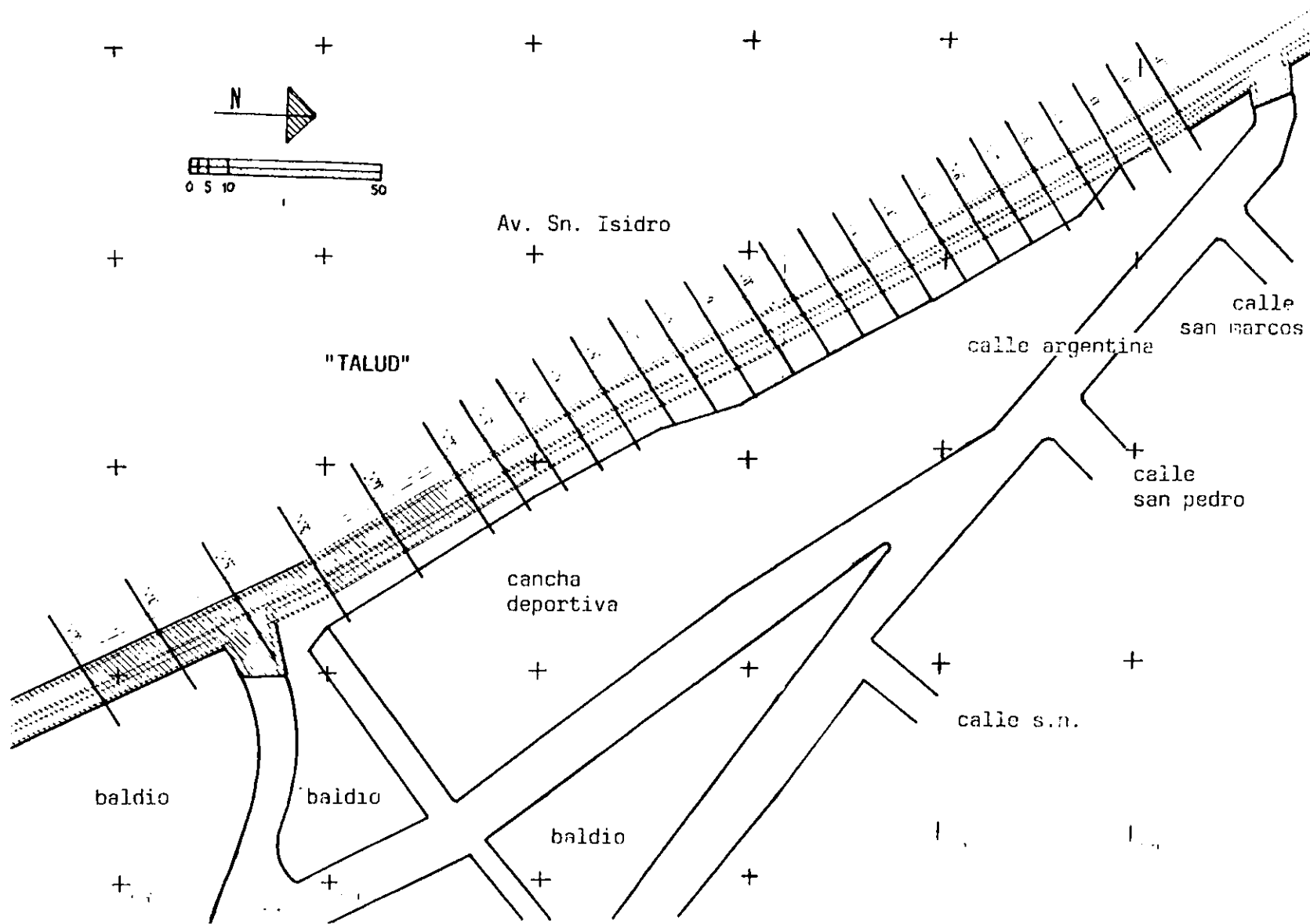


Fig. V.2 Croquis de ubicación del talud.

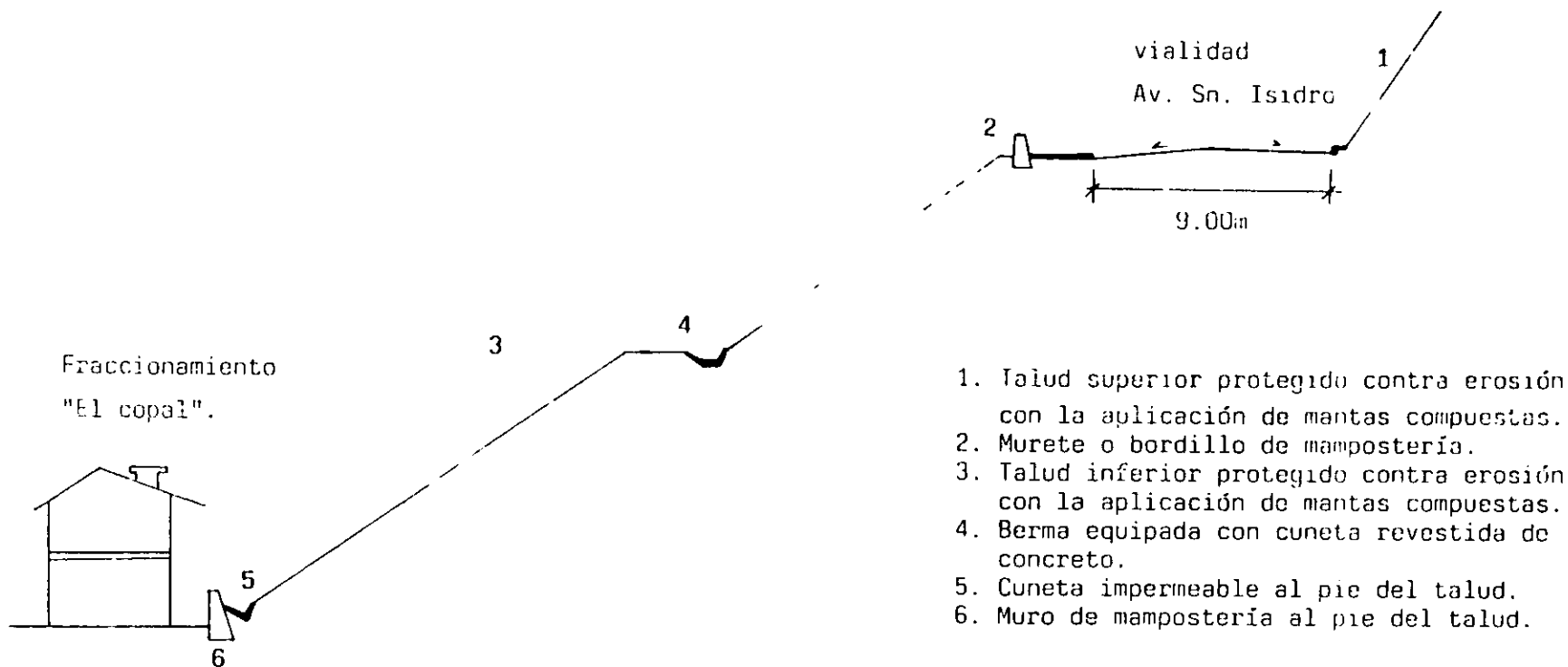


Fig. V.3 Esquematzación de los elementos instalados en el talud para su protección superficial contra erosión.

V.5 CONDICIONES GEOTECNICAS.

El terraplén está cimentado sobre depósitos de toba que se aprecian en el extremo norte del mismo. Está constituido por rellenos no controlados de materiales heterogéneos arcillosos y limo-arenosos no orgánicos que contienen cascajo y diversos productos de demolición. La pavimentación de la vialidad consiste en una capa de aproximadamente 40cm de espesor de material areno-limoso compactado y de una carpeta asfáltica.

Según la información proporcionada, el terraplén, aparentemente construido con material producto de la excavación del metro, ya tenía más de 10 años de existencia cuando se construyó la vialidad por corte y relleno dentro del mismo.

Para estimar las propiedades del material, supuesto puramente cohesivo, se hicieron unos análisis de estabilidad por el método de Bishop modificado*. Tomando uno de los casos más críticos, correspondiente a la sección 0+390, se encontró que para obtener un factor de seguridad de 1.0, es necesario que el material de relleno presente una cohesión de 4.32t/m^2 . Dada la apariencia del material, es probable que su cohesión real no rebase por mucho este valor. Se recomendó aprovechar las obras de rehabilitación para mejorar el factor de seguridad del talud (Auvinet, 1996).

V.6 MEDIDAS TECNICAS CORRECTIVAS APLICADAS AL TALUD.

Las medidas técnicas correctivas, fueron propuestas por un especialista consultor en Mecánica de Suelos, para lograr la rehabilitación integral del terraplén en cuestión y además aplicar el tratamiento óptimo de control de erosión en el talud ya que, como se mencionó en líneas anteriores, no se presentó una falla por cortante en el talud. Del diagnóstico analizado anteriormente, se definió un tratamiento con las líneas siguientes:

A. TRATAMIENTO SUPERFICIAL

Se tomaron acciones para limitar los escurrimientos que llegan hacia el terraplén, canalizándolos y protegiendo al talud contra la erosión.

- 1) Se prestó una atención especial a la canalización adecuada de los escurrimientos superficiales que se presentan durante la época de lluvia en las zonas altas localizadas pendiente arriba del terraplén.
- 2) Previendo que, aún con las precauciones anteriores podrían llegar al terraplén volúmenes significativos de agua, se construyó un sistema de protección superficial contra erosión que incluye los elementos siguientes:

* Método de análisis de estabilidad de taludes que mediante iteraciones permite determinar el factor de seguridad que se tiene en el talud.

- a) Una cuneta longitudinal localizada en la cresta del terraplén, del lado poniente de la vialidad, fig. 3.
- b) Un murete de mampostería longitudinal localizado paralelamente a la cuneta que permita evitar escurrimientos directos sobre el talud en caso de que se rebase la capacidad de la cuneta o de que ésta se azolve, fig. 3.
- c) Una cuneta y un bordillo en la berma existente a la mitad de la altura del talud. Esta cuneta canalizará los escurrimientos locales sobre el talud hacia la zona de las canchas deportivas, fig. 3 y foto V.3.
- d) Una protección de los taludes superior e inferior contra erosión por lluvia directa a base de vegetación. Esto, por medio de la instalación de una manta fértil (alfombra compuesta de fibra vegetal con semillas sujeta entre dos mallas de soporte), foto V.4.

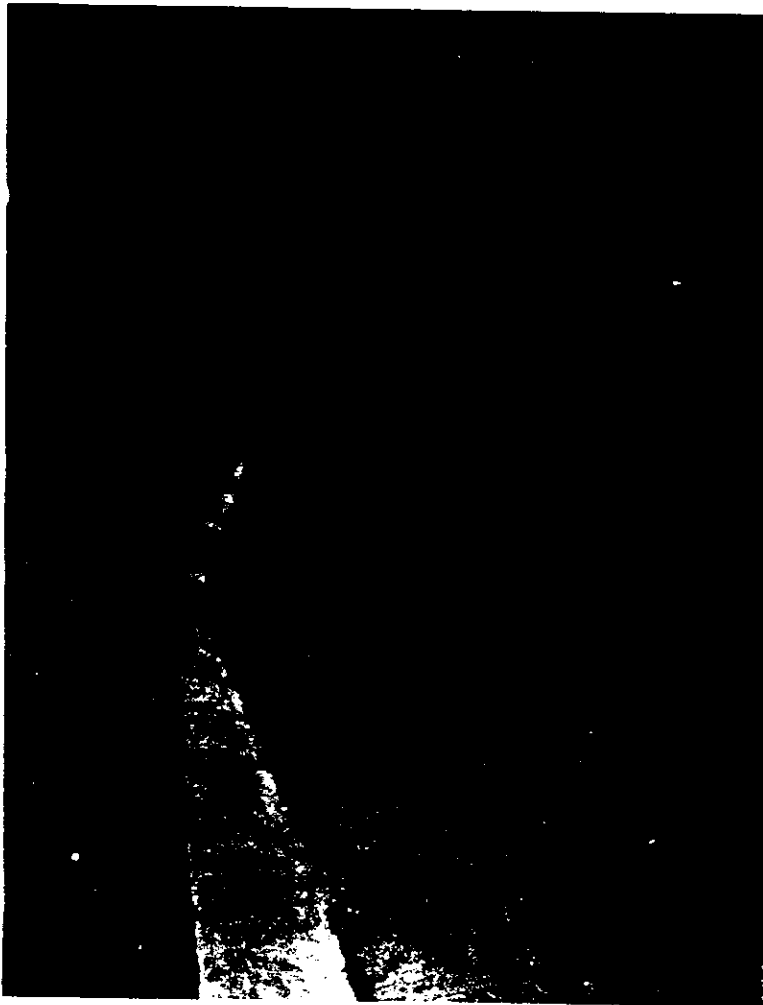


Foto V.3 Cuneta longitudinal instalada sobre la berma del talud inferior.



Foto V.4 Aplicación de mantas para lograr la regeneración de la vegetación

B. CAMBIOS GEOMETRICOS

Los cambios geométricos sugeridos tuvieron como objetivo principal restablecer la continuidad de la vialidad y como objetivo secundario mejorar en todo lo posible el factor de seguridad global del terraplén, atendiendo todo ello a la menor afectación de los habitantes de la zona ubicada al pie del talud. Para ello, se procedió a:

1) Desplazar la vialidad hacia el oriente para librar la franja que fue erosionada del lado poniente. La vialidad se trasladó aproximadamente 4m perpendicularmente a su eje longitudinal actual entre las secciones 0+120 y 0+420. Esto implicó la reconstrucción del pavimento en un ancho del orden de 4m, siguiendo un criterio similar al usado en el diseño del pavimento previamente existente.

2) Modificar los taludes superior e inferior congruentemente con el cambio anterior, inclinándolos para aumentar la seguridad y dejar la berma intermedia existente a la mitad de la altura del talud. Dando una inclinación a los taludes no mayor de 35° , se logró, con la nueva configuración geométrica propuesta, aumentar el factor de seguridad global en forma significativa (1.27 en vez de 1.0 para la sección 0+390).

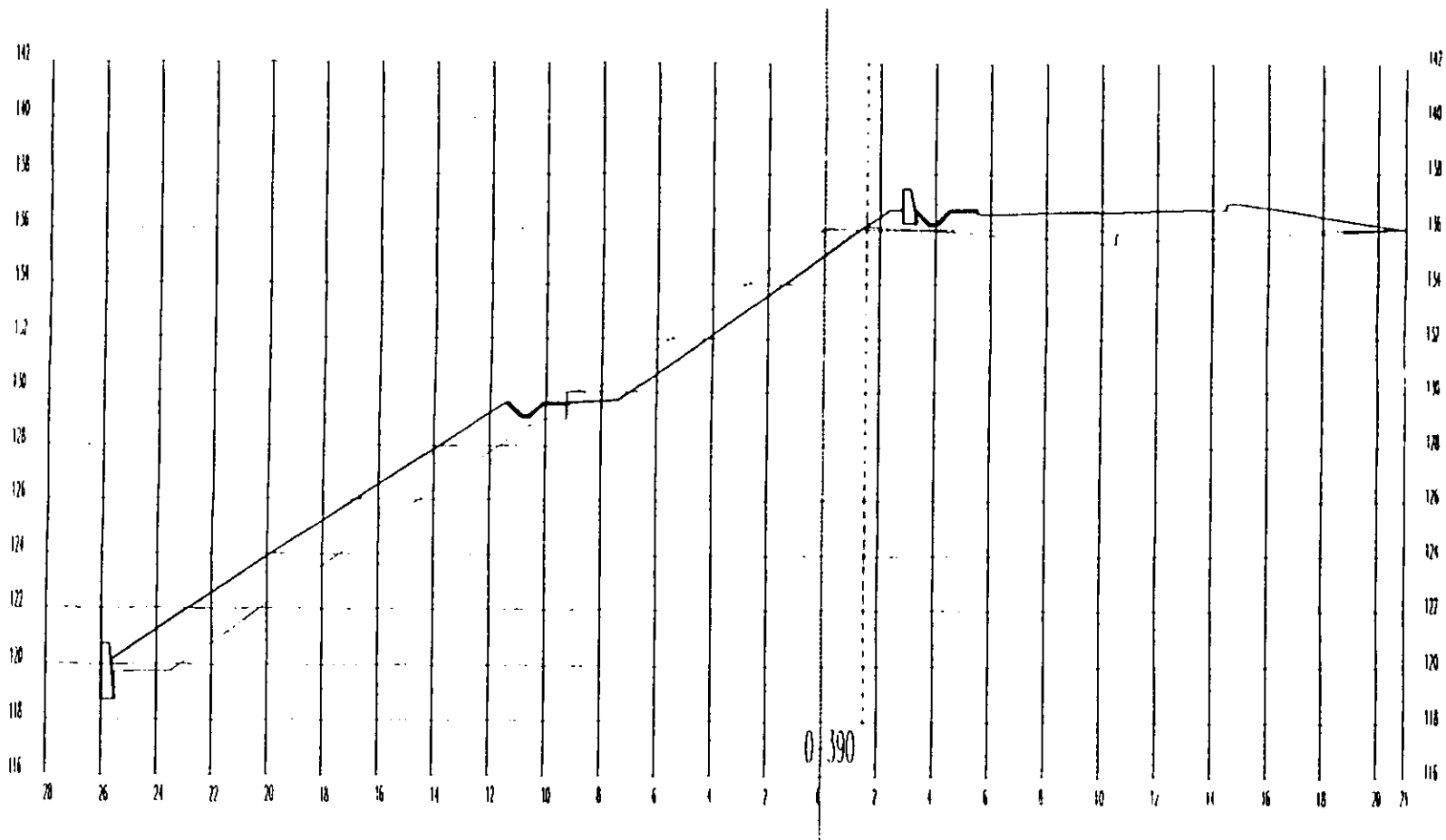


Fig. V.4 Corte transversal al talud en la cota 0+390.

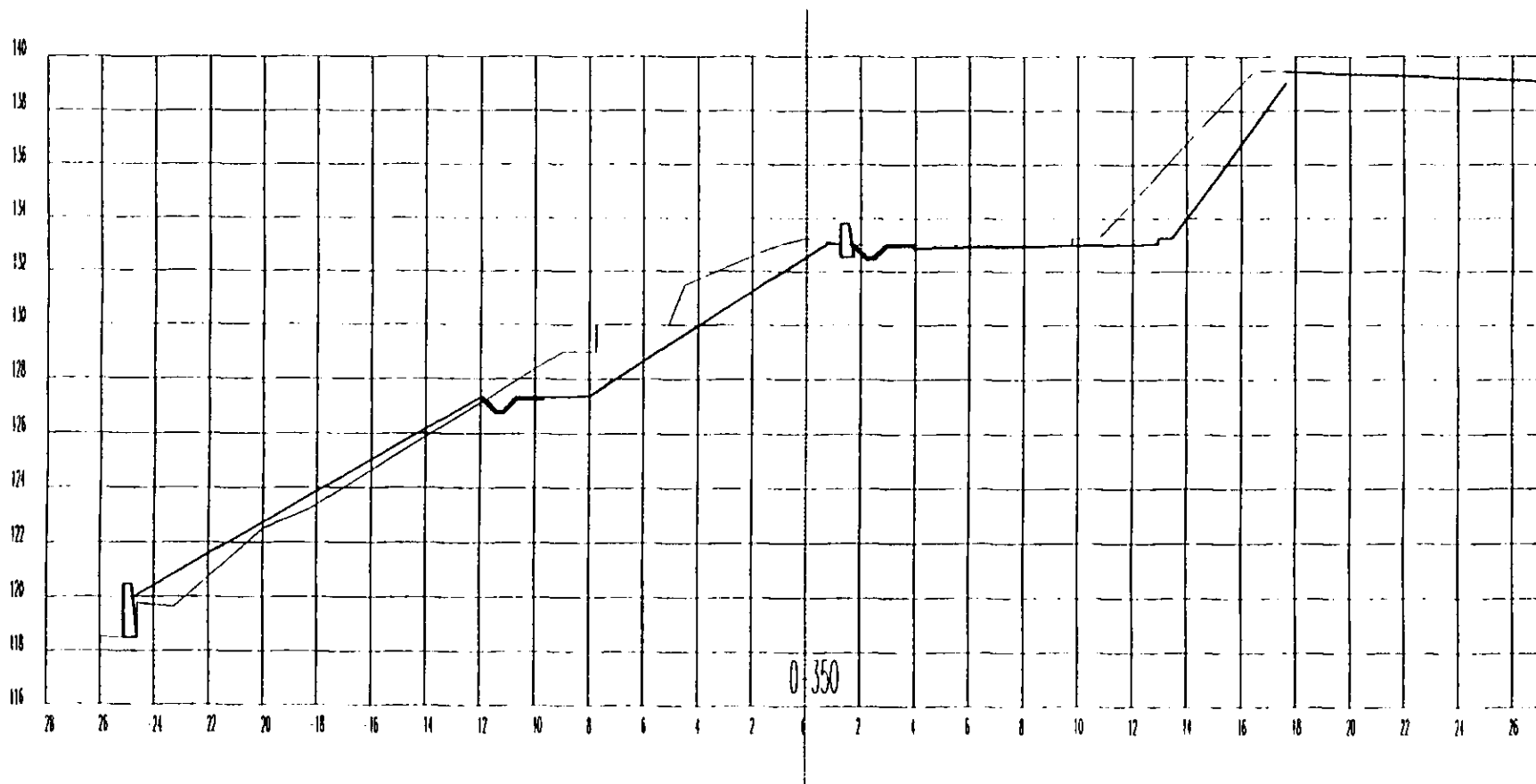


Fig. V.5 Corte transversal al talud en la cota 0+350.

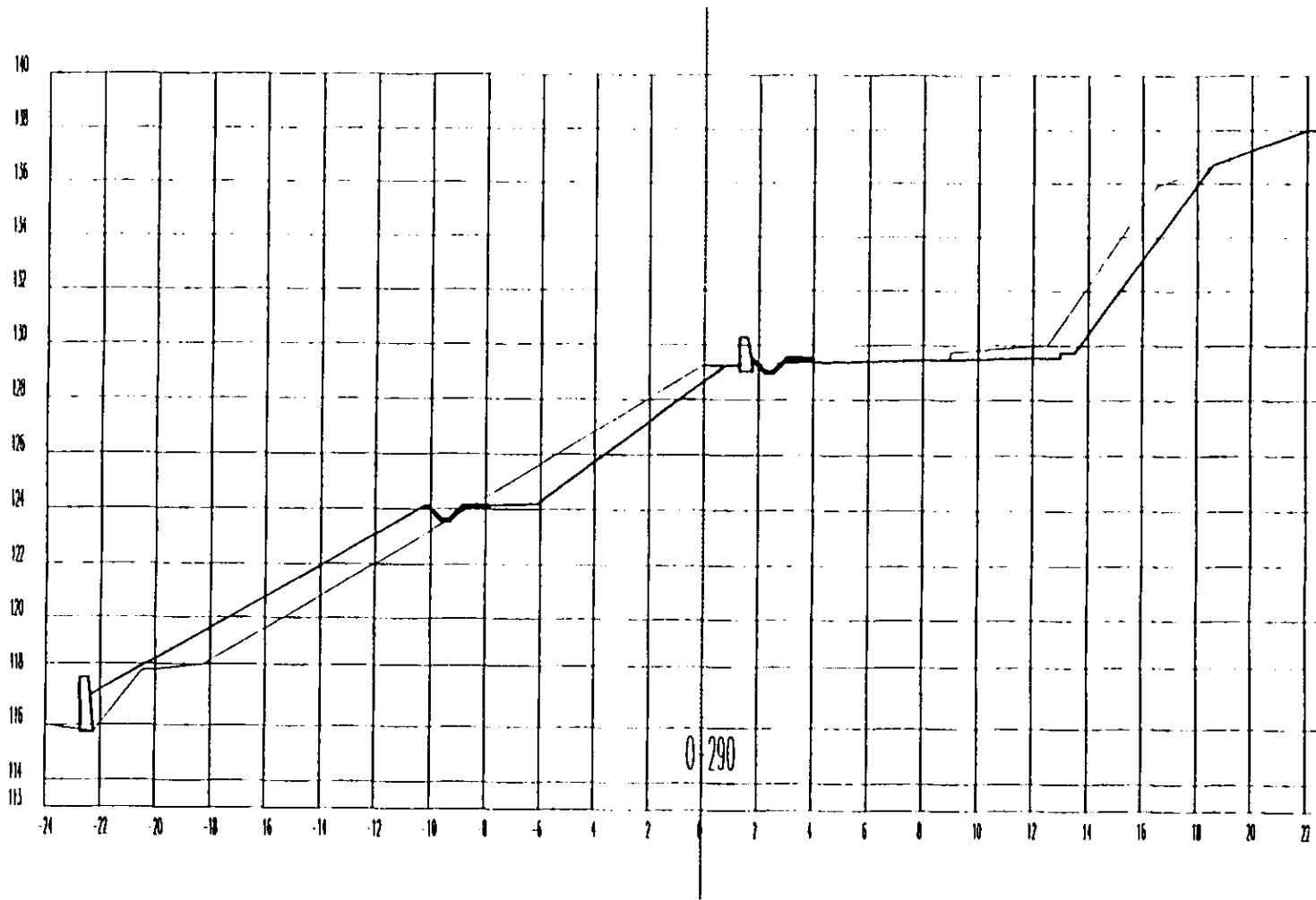


Fig. V.6 Corte transversal al talud en la cota 0+290.

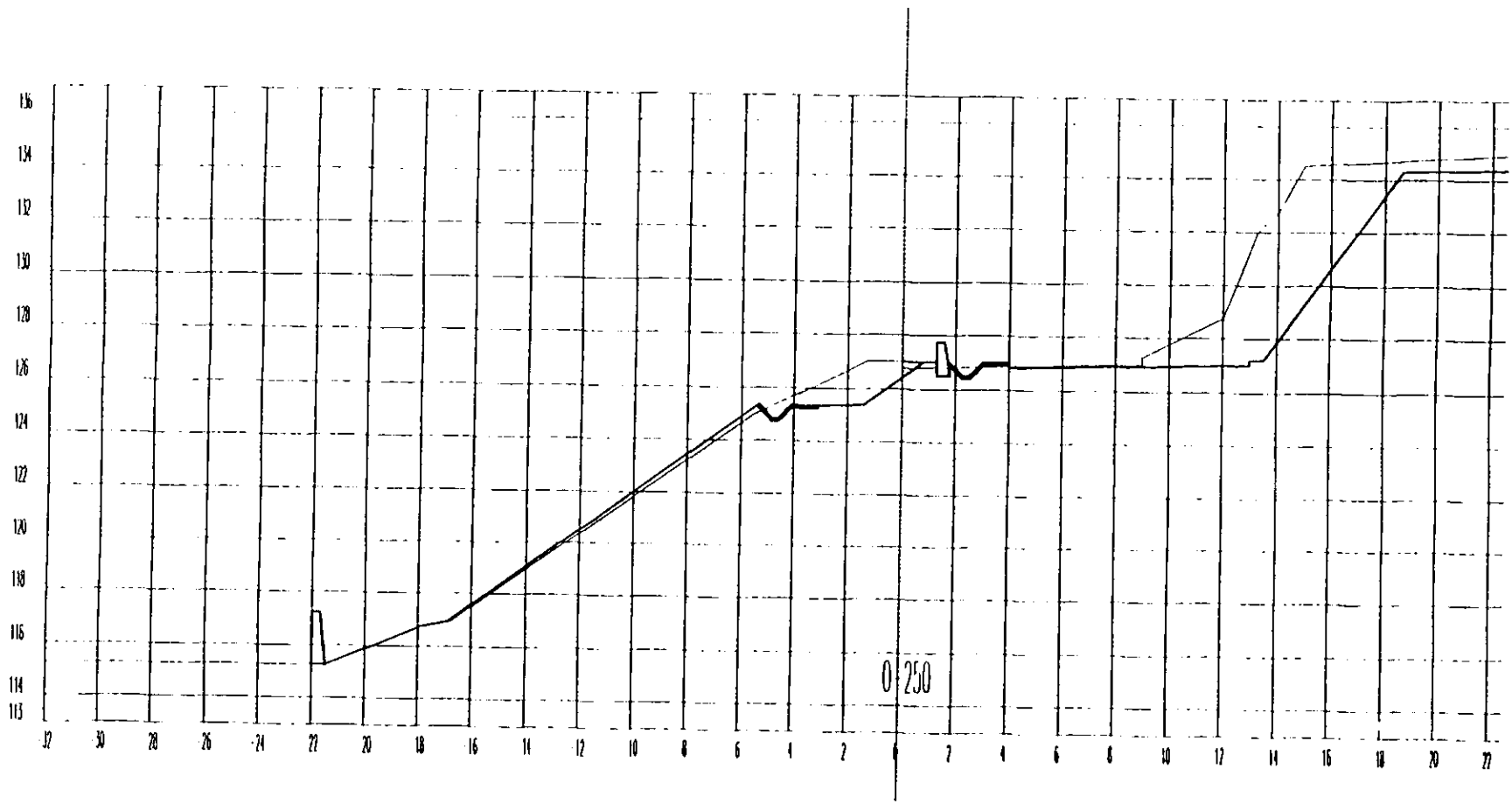


Fig.V.7 Corte transversal al talud en la cota 0+250.

Lo anterior implicó afectaciones en la parte superior del corte en los extremos del tramo en estudio, pero éstas se consideran indispensables para la propia seguridad de los moradores de los predios existentes en la cresta del talud superior. Toda esta serie cambios en la geometría del talud se pueden observar en los análisis de las gráficas presentadas anteriormente.

C. PROTECCION DEL FRACCIONAMIENTO AL PIE DEL TALUD

Como medida de seguridad adicional, que resulta muy necesaria si se considera el impacto psicológico del incidente del 23 de Agosto de 1995, que provocó deslaves de gran magnitud pero que no afectaron la estabilidad general del talud, se construyó al pie del talud un muro de mampostería (foto V.5), que pudiera funcionar como alcancía en caso de desprendimientos locales en el talud (Auvinet, 1996).

Como parte de las medidas técnicas de protección superficial, éste muro fue provisto con una cuneta longitudinal (al pie del talud), que canaliza los escurrimientos a una caja colectora de aguas pluviales de dimensiones apropiadas y debidamente conectada al sistema de drenaje. Otro aditamento instalado fue la construcción de un lavadero canalizado también a ésta caja colectora, foto V.6.

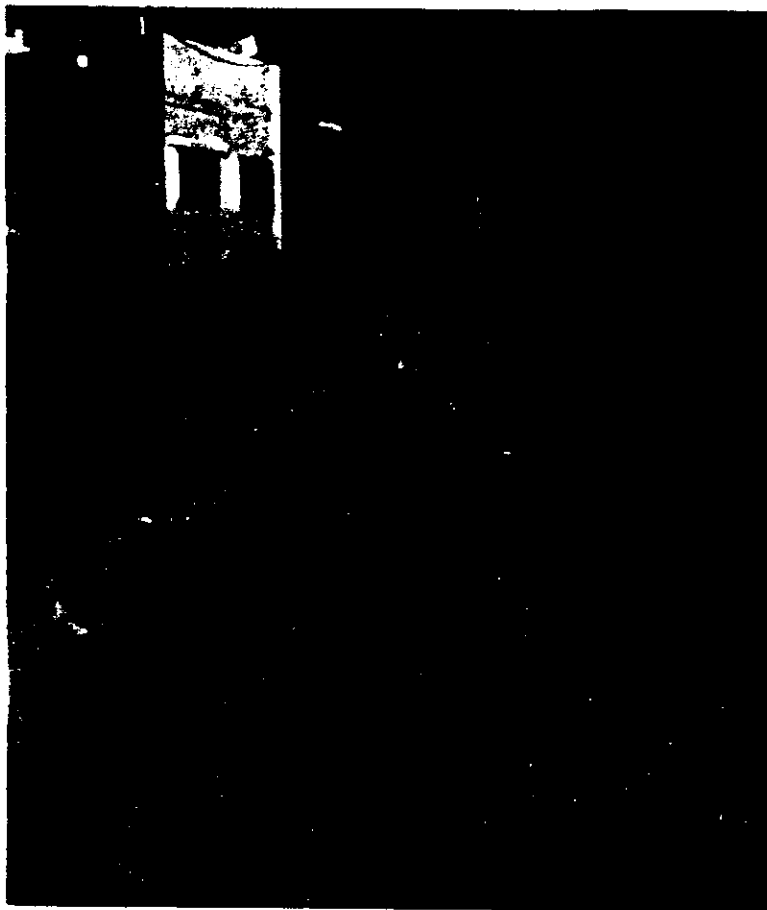


Foto V.5 Medidas de protección adicionales.

1. Muro de mampostería.
2. Cuneta impermeable.

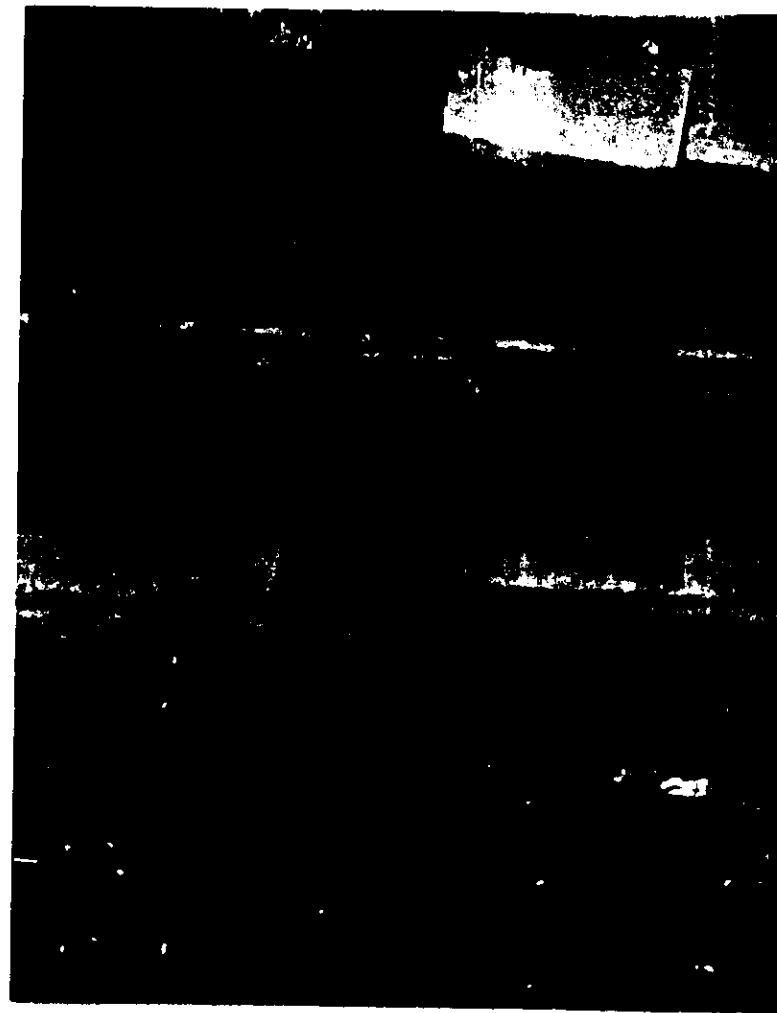
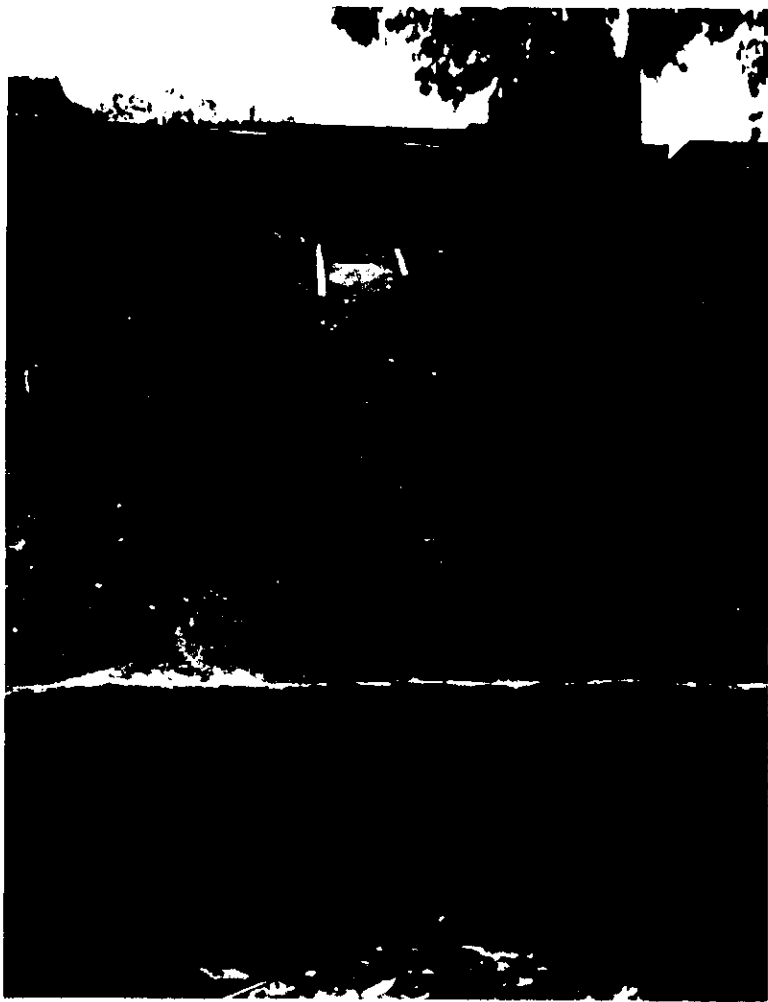


Foto V.6 Instalación de lavadero para canalizar escurrimientos superficiales.

V.7 SISTEMAS APLICADOS PARA EL CONTROL DE LA EROSION DEL TALUD.

Analizando la serie de estudios y diagnósticos geotécnicos realizados respecto a los daños ocasionados por escurrimientos de agua excepcionales en Agosto de 1995, que provocaron deslaves de magnitud considerable, pero que no afectaron la estabilidad general del talud, se aplicó un tratamiento de protección superficial contra erosión, mediante la instalación de dos sistemas (analizados en el capítulo anterior).

Se cubrió una superficie total de 3,745.34m² con el sistema tradicional de "Manta Fértil, M.R."* y se trataron 807m² de superficie, con el sistema conocido como "Grin Rock, M.R."* con el fin de regenerar la vegetación en el lugar y de mitigar los efectos de la erosión en el talud.

El tiempo de aplicación de los sistemas fue aproximadamente de un mes debido a la superficie por tratar y a los nunca faltantes pormenores técnicos, económicos, administrativos, etc. Se respetaron los lineamientos técnicos sugeridos para una correcta aplicación de los sistemas.

Aproximadamente de la cota 0+160 a la 0+230 el talud fue tratado con el sistema "Grin rock, M.R." en base a las características geotécnicas de la roca que constituye al mismo, en los fragmentos de roca sobresalientes en la pendiente, se aplicó un sistema de fijación con una resistencia mayor, esto por medio de una malla de tipo ciclónica y su apropiado anclaje al terreno, foto V.7.

El resto del talud conformado por el mismo relleno de material arcilloso y limo arenoso no orgánico con cascajo y diversos productos de demolición, fue tratado con la instalación de una manta fértil (alfombra de fibras vegetales con semillas sujetas entre dos mallas de soporte, foto V.8).

Así la integración de ambos sistemas aplicados al talud conforman una revegetación integral, que evita la erosión del mismo causada por escurrimientos superficiales, foto V.9.

(*) "Manta Fértil, M.R." y "Grin rock, M.R." son sistemas de control de erosión patentados por una empresa de consultoría geotécnica, de aquí las siglas: M.R.= marca registrada.



Foto V.7 Aplicacion del sistema "Grin-Rock, M.H."

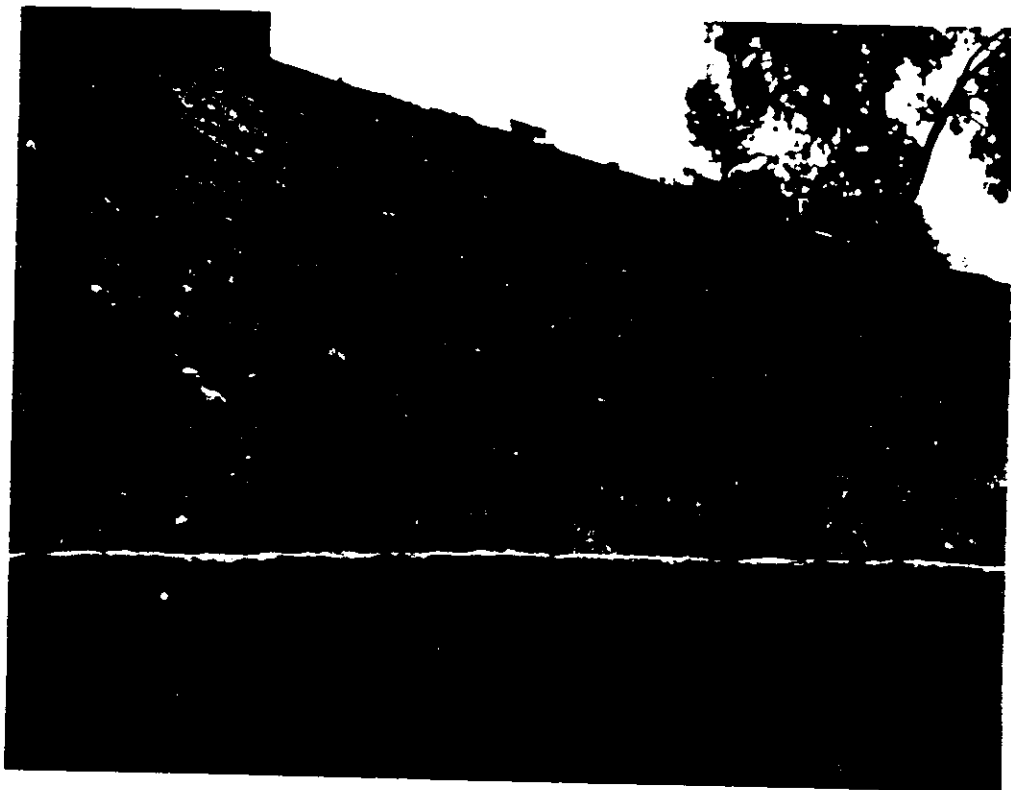


Foto V.8 Aplicación del sistema "Manta Fértil, M.R."



Foto V.9 Revegetación integral del talud, protegido contra erosión.

V.8 CONCLUSIONES.

El terraplén ubicado en la Av. San Isidro, al que se ha tratado con fines de ejemplificar una aplicación real, de los sistemas y procedimientos analizados en el contenido de la tesis, presentó un comportamiento bastante satisfactorio desde el momento en que se instalaron los sistemas (Sept. 1996) hasta fechas posteriores.

Y en cuanto a las medidas técnicas recomendadas, éstas se han aplicado y han funcionado. Lamentablemente, cabe resaltar el hecho de que en la mayoría de las intervenciones perjudiciales para el medio ambiente sobresaltan en primer lugar las acciones humanas. Este caso no fue la excepción ya que, en los primeros meses, luego de haber sido aplicados los sistemas superficiales y haberse tenido una revegetación completa del lugar, algunos habitantes de la zona en la que se encuentra ubicado el talud optaron por la quema del pasto establecido, y el desmantelamiento de la malla de refuerzo aplicada al mismo en distintas zonas. Estos actos pueden ser calificados como vandalismo y son lamentablemente incontrolables, debido a la ubicación del talud y a la fácil accesibilidad que se tiene en el lugar. Sin embargo este hecho, lejos de considerarse como un fracaso de los sistemas, constituye un nuevo reto y una nueva variable a considerar en posteriores tratamientos superficiales de taludes ubicados en zonas urbanas, fotos V.10, V.11 y V.12.



Foto V.10 Destrucción del sistema por la quema del pasto.

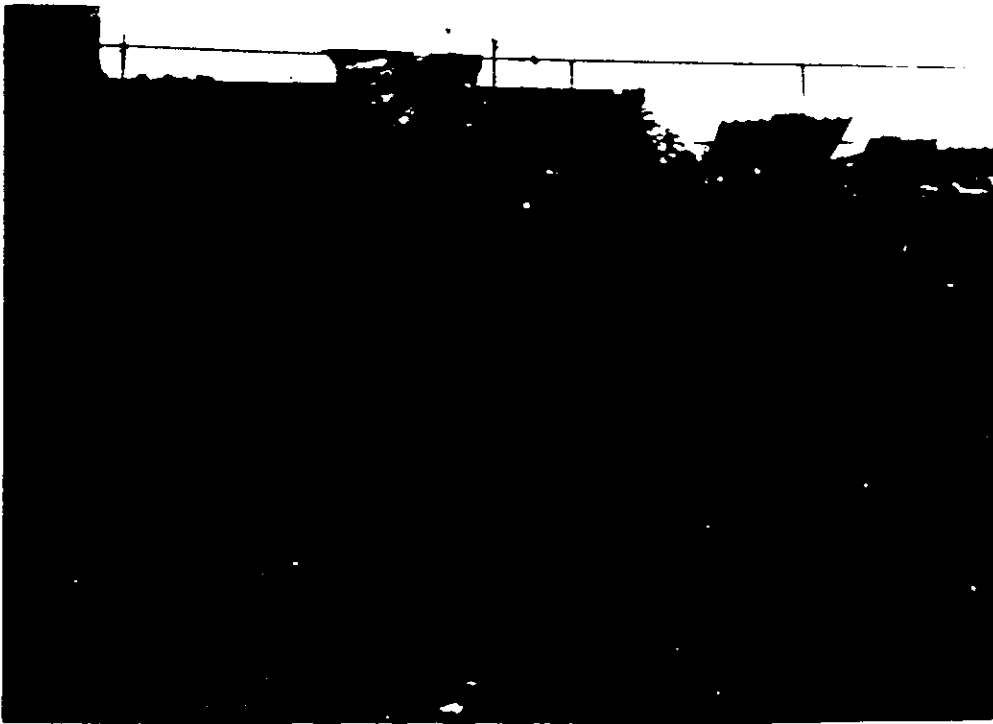


Foto V.11 Evidente destrucción de la vegetación establecida.

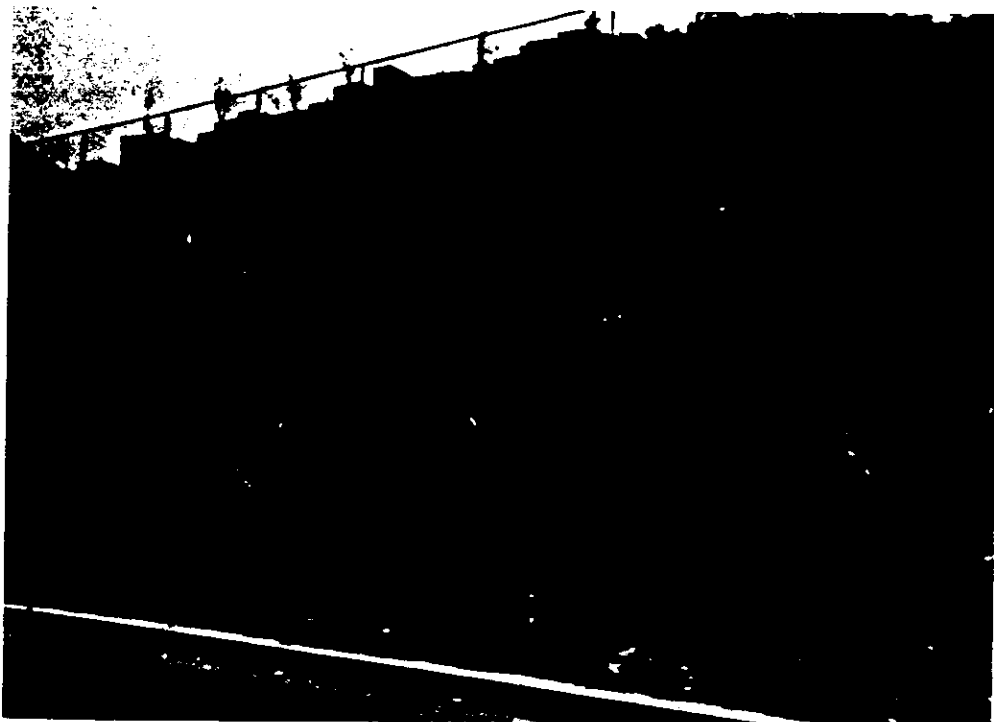


Foto V.12 El fácil acceso al talud, cusa el deterioro de los sistemas.

V.9 REFERENCIAS.

Auvinet, G. (1996). Terraplén ubicado en la Av. San Isidro, Col. San José Ixhuatepec, Tlalnepantla, Edo. de México. Diagnóstico geotécnico y recomendaciones preliminares.

A P E N D I C E A. CUADRO CLINICO DE LOS TALUDES EXCAVADOS EN ROCA

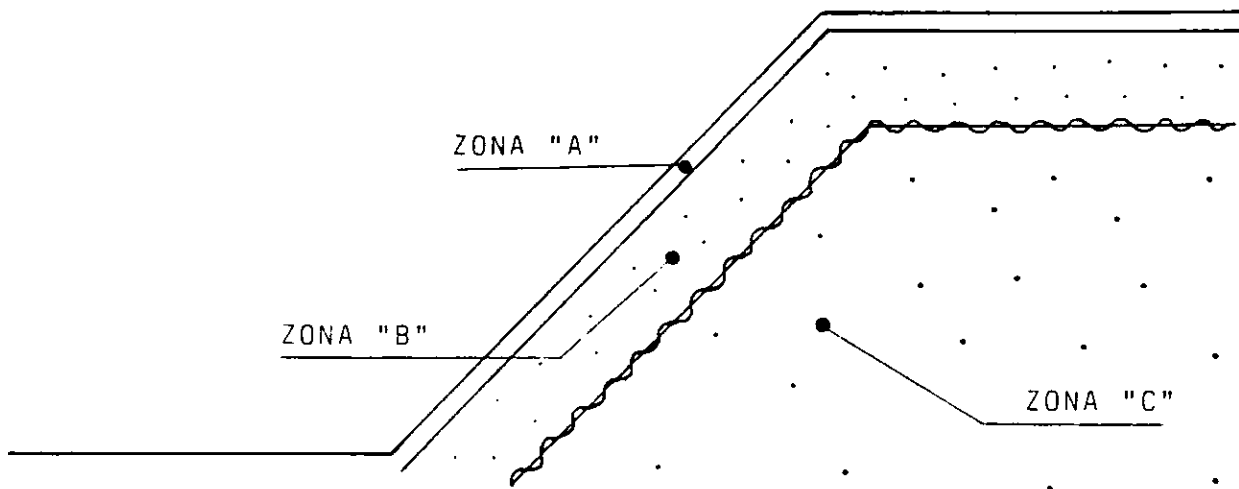


Fig. A.1 Ubicación de las zonas del talud.

A) FACTORES PATOGENOS: atendiendo e identificando los factores que generan la enfermedad en el talud, se definen los tratamientos adecuados y aplicables al mismo. Cuando el proceso de construcción del talud involucra un diseño de voladuras pueden generarse discontinuidades superficiales o profundas (dependiendo de la magnitud de la carga explosiva utilizada), tales como grietas, fisuras y potenciales. Que inicialmente representan evidencias traumáticas y posteriormente acrecentarán la situación patógena del talud.

B) DIAGNOSTICO: para conocer los signos de las enfermedades se requieren ciertos valores índices que alentarán el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas del talud en estudio y que también servirán para definir el tipo de tratamiento aplicable al talud.

C) SINTOMAS: son el conjunto de indicios que nos revelan un cierto estado de las cosas o bien, de la situación en que se encuentra el talud.

D) TERAPIA: se refiere a la serie de cuidados o medidas técnicas implementadas en un tratamiento del talud.

* En el siguiente cuadro los datos incluidos en el recuadro punteado pueden ser referidos a las zonas B y C del talud.

CUADRO CLINICO DE LOS TALUDES EXCAVADOS EN ROCA.

ZONAS DEL T A L U D	A) FACTORES PATOGENOS (del gr. pathos, enfermedad y gennân, engendrar).	B) SINTOMAS (del gr. symptôma, indicio).	C) DIAGNOSTICO (del gr. diagnôsis, conocimiento).	D) TERAPIA (del gr. therapeueia, cuidar).
<p>ZONA "A" SUPERFICIAL (La mayoría de los taludes excavados presentan alteraciones en esta zona).</p>	<p>DENUDACION. Provocada por sus dos agentes: a) Intemperismo y b) Erosión</p> <p>DISEÑO DE VOLADURAS</p>	<p>Generación y presencia de: graneo polvo sedimentos canales erosivos escurrimientos y deslizamientos superficiales decoloración de rocas</p> <p>grietas fisuras y equipotenciales</p>	<p>Características geotécnicas Mediante pruebas in situ y de laboratorio, se obtienen valores índice para el material rocoso.</p> <p>Indices descriptivos: Variedad de roca (especie petrológica). Dimensiones del grano Textura Estructura Grado del intemperismo</p> <p>Resistencia: Dureza Durabilidad Porosidad Relación de vacíos Densidad relativa Permeabilidad primaria</p>	<p>Objetivo del tratamiento: Control de la erosión.</p> <p>Aplicación e instalación de productos, sistemas y procedimientos, tales como: Pegantes inorgánicos Pegantes orgánicos Pasto en rollo Hidrosiembras Mantas compuestas Mallas compuestas Redes de refuerzo de la vegetación</p> <p>Ouncas y contracunetas Desagües o lavaderos</p>

<p>ZONA "B" INTERMEDIA (En esta zona se ubica la llanada "franja de relajamiento" y la mayor parte de los problemas que sufren los taludes excavados se manifiestan en esta zona).</p>	<p>DECOMPRESION. Generada por la excavación del talud</p>	<p>Caída de fragmentos rocosos Deslizamientos de cuñas Desprendimientos de bloques y rocas Presencia de grietas, fisuras y potenciales.</p>	<p>Características geotécnicas Densidad relativa Permeabilidad Resistencia Compresibilidad Grado de intemperismo</p> <p>Valores índice para la masa rocosa:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fracturación natural - Juntas de estratificación - Discontinuidades registradas como sigue; <ul style="list-style-type: none"> - tipo - frecuencia de orientación - localización y orientación - frecuencia del espaciamiento - apertura - relleno - persistencia y extensión - rugosidad - tamaño y forma de bloques 	<p>Objetivo del tratamiento: Control de la zona de decompresión. Estabilización superficial</p> <p>Aplicación e instalación de productos, sistemas y procedimientos, tales como:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Estructura reticular de concreto adosada al talud por medio de anclajes. - Concreto lanzado estructural (mín. 8cm de espesor), debidamente anclado al talud. - Gaviones adosados al talud - Mallas resistentes con un anclaje y estructura de reparto.
<p>ZONA "C" PROFUNDA (Está conformada en sí, por el macizo rocoso, en esta zona se analizan situaciones de inestabilidad básicamente).</p>	<p>DECOMPRESION. Generada por un cambio en el estado de esfuerzos.</p>	<p>Aparición de grietas en la corona del talud. Deslizamientos de grandes masas y bloques, con superficies de deslizamiento bien definidas (plana, circular y en forma de cuña).</p>	<p>Composición mineralógica Condiciones hidrogeológicas Estratificación, esquistosidad Fallas y plegamientos Además de las cinco características geotécnicas mencionadas para la zona "B"</p>	<p>- Drenes penetrantes</p> <p>Objetivo del tratamiento: Obtener un factor de seguridad aceptable.</p> <p>Análisis de estabilidad de taludes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ángulo de la pendiente - factor de seguridad - bermas - muros de contención

A P E N D I C E B. CUADRO COMPARATIVO DE LA APLICACION DIRECTA DEL
PEGANTE ORGANICO Y LAS MANTAS COMPUESTAS

Aquí se muestra una amplificación a 40x (microscópio), de las fibras que integran al aditivo especial para suelos, que conforman una matriz que sostiene al suelo y a la semilla en su lugar.

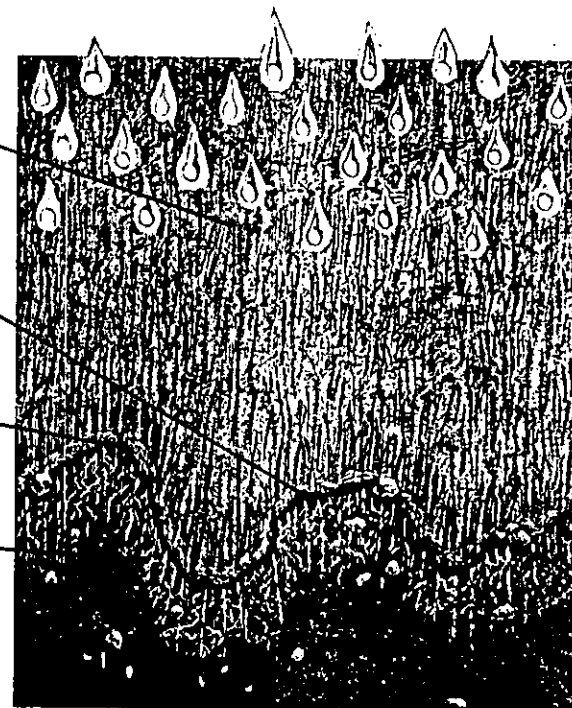


La superficie tratada es completamente cubierta, con un gran alcance y en un sólo paso constructivo. (Hidrolanzado).

Las plantas fácilmente pasan a través de la matriz que conforma el aditivo.

La matriz se adhiere al suelo y lo mantiene en un sitio de modo permanente.

La lluvia penetra uniformemente en el suelo.



Se requiere de una intensiva labor de aplicación y engrapamiento.

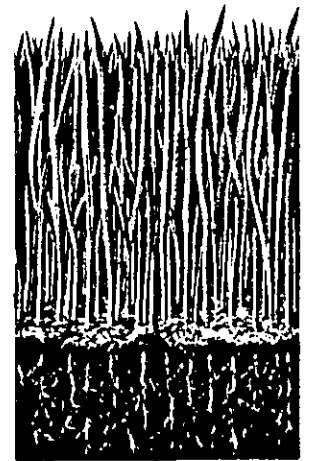
Las plantas y los escombros causan problemas de contacto efectivo entre la manta y el terreno.

Al no apegarse al contorno natural del terreno se permite la acción de los inter-canales erosivos.



Blanket

Fig.B.1 Aplicación del pegante orgánico y de una manta.



C O N C L U S I O N E S

Las definiciones de términos expuesta al inicio del trabajo, representan una condición inicial para el análisis del control de la erosión en taludes.

Todos los taludes expuestos en la corteza terrestre, independientemente del tipo de material que los constituye (suelo o roca), son vulnerables a sufrir en mayor o menor grado las constantes e inminentes afectaciones que la naturaleza y las condiciones climáticas le imponen. Con ello los principales agentes de erosión incrementan sus acciones nocivas en los taludes que no han sido sometidos a un tratamiento de protección superficial, teniéndose con ello la posibilidad de desencadenar en un corto y mediano plazo, la desestabilización global de los taludes ya que además, todos los factores químicos, mineralógicos y estructurales de las rocas, determinan el comportamiento mecánico de las grandes masas de roca. De lo anterior se infiere la importancia de otorgar una protección superficial a los taludes que se construyen en las principales carreteras y autopistas del país, para su correcto funcionamiento.

El control de la erosión en taludes implica la realización de diferentes inspecciones, mediante pruebas que arrojen valores significativos, así como la aplicación de modernos sistemas y procedimientos que han sido diseñados para aliviar los síntomas característicos de éste agente patógeno. Ambas situaciones se deben analizar e integrar con el fin de obtener un reconocimiento aceptable de las condiciones que prevalecen en el talud para aplicar un tratamiento efectivo que mitigue sus efectos ya que, al proceso por el cual, partículas de diferente tamaño, integradas en una masa de suelo o roca, que son removidas de su situación inicial y transportadas por efecto del agua, viento, gravedad y otros agentes involucrados, en estructuras de tierra, que presentan una inclinación con respecto a la horizontal, se conoce como: erosión en taludes.

La Geología y la geomecánica de taludes, aportan un conocimiento amplio de las propiedades y características mecánicas que determinan el comportamiento de los taludes formados y construidos en la superficie terrestre.

La Geología representa una condición importante en el tratamiento de taludes ya que, influye en la determinada región en que se encuentre ubicado el talud y actúa en tres sentidos importantes. En primer lugar, controla el relieve por la susceptibilidad que presentan las rocas a los procesos de intemperismo. En segundo lugar, los productos

de estos procesos, son profundamente afectados por el tipo de roca. En tercer lugar, la macroestructura de la roca misma determina de manera general las contribuciones relativas del flujo de agua subterránea y superficial.

La influencia del agua en la resistencia del material (suelo o roca), representa una reducción considerable en la misma por su presencia en poros y fracturas del suelo y de la roca perdiendo los enlaces que dan lugar a la cohesión. Además, la presión del agua dentro de los vacíos del suelo y de la roca, controlan el esfuerzo efectivo sobre sus cristales y partículas y la resistencia friccional que son capaces de generar en sus puntos de contacto. Por estas razones el agua debilita al material, cuya resistencia, cuando se encuentran saturados generalmente es menor que cuando se encuentran secos.

Con el análisis y evaluación de las características geotécnicas del material (suelo o roca) que constituyen a los taludes, así como de las fuerzas inducidas en los macizos rocosos y su inevitable reacción ante los esfuerzos a que son sometidos, estaremos en una mejor posición para comprender y prevenir el comportamiento de los taludes afectados no sólo por erosión sino también por algún otro agente patógeno que se presente.

Los dos agentes que contribuyen con la denudación terrestre son: el intemperismo y la erosión. El primero se caracteriza por la desintegración de los materiales y el segundo por la remoción de partículas de material suelto, teniendo ambos en común la producción de sedimentos.

Los taludes constituidos por rocas suaves o suelos, son propensos a sufrir una severa erosión durante una fuerte lluvia y algunos taludes en roca sufren una deteriorización debido al intemperismo cuando son expuestos a las acciones del medio ambiente tales como: una lluvia ácida, cambios de temperatura, etc., estas situaciones se acentúan principalmente al efectuarse los cortes implícitos en el trazo de una vía de comunicación terrestre.

La erosión de los taludes excavados en roca, en carreteras y autopistas, es un problema que afecta a la economía y a la sociedad en general. Por otro lado, es un fenómeno geotécnico y como tal debería ser clasificado haciendo intervenir en sus análisis a especialistas con reconocidos conocimientos geotécnicos y experiencia.

Una vez que las pendientes alcanzan gradientes estables con respecto a los movimientos y deslizamientos superficiales de masas, los procesos más lentos de intemperismo y erosión, se vuelven dominantes.

Al material erosionado se le denomina sedimento y a su deposición, sedimentación. Cada tipo de terreno representa una cierta resistencia a la erosión. La susceptibilidad de una superficie de suelo o roca frente a la acción de los agentes erosivos se denomina erodibilidad. Así podemos decir en términos generales que una toba piroclástica tiene mayor erodibilidad que un conglomerado sedimentario y éste a su vez es más erosionable que un granito. Por otro lado, erosividad es la capacidad de erosionar del agente erosivo de que se trate. El agua de lluvia es más erosiva que el viento, sin embargo éste ejerce una acción más intensa que el agua en ciertas cenizas volcánicas (tezontle) de granulometría fina si no se encuentran bien cementadas. Las rocas de estructura granular son frecuentemente más erosionables que las estratificadas, sin embargo hay lutitas y calizas formadas por estratos de pequeño espesor (1 a 5cm) en las que puede producirse una paulatina y acelerada desintegración en forma de partículas de tamaño del espesor del estrato, debido al proceso conocido como decompresión o relajación de la roca y que consiste en el cambio que se produce en el estado inicial de esfuerzos en la superficie del talud, como consecuencia de la excavación y/o de las voladuras, que también pueden incrementar el número de discontinuidades existentes, tales como planos de estratificación, esquistosidad, diaclasas, etc. o potenciales, como las fisuras. Esto hace muy elevado el número de análisis de los posibles caídos y deslizamientos. La gran cantidad de superficies excavadas en cualquier carretera o autopista multiplica hasta el infinito las posibles situaciones de inestabilidad que surgen de las distintas combinaciones de geometría, discontinuidades, y características geotécnicas consideradas a lo largo de la obra en el tiempo y en el espacio. Así pues, el punto de partida en la búsqueda de soluciones debe tener un enfoque distinto de los planteamientos habituales.

La excavación de taludes introduce en el macizo rocoso un nuevo límite físico que induce un cambio de la función de esfuerzos y afecta de un modo continuo a todo el cuerpo del talud, desde la superficie que lo separa y define geoméricamente en su frontera con la atmósfera hasta más allá de cualquier posible superficie de falla considerada en su interior. Esto quiere decir que tanto la erosión, como el graneo y la caída de trozos de roca, de bloques o cuñas, así como la desestabilización global o falla del talud, son todas ellas alteraciones que se producen en un cuerpo con

atributos de unidad pero de comportamiento complejo, de modo que una perturbación que se produce en un punto y momento determinados es susceptible de ampliarse fortuitamente y desencadenar una alteración global de mayor importancia y consecuencias imprevistas.

En la franja más superficial del talud, la erosión inicial de pequeñas partículas desencadena la caída de piezas cada vez mayores de roca, cuya determinación en el tiempo y en el espacio no puede ser explicada solamente a partir de las propiedades mineralógicas del material rocoso, desencadenando así un problema de inestabilidad superficial cuya consecuencia es una avalancha de material que cae al camino, siempre con la posibilidad de causar un accidente.

Como lo demuestra la experiencia, estos eventos que lamentablemente afectan de un modo continuo la operación de carreteras y autopistas, son de carácter determinista porque se tiene la certeza de que suceden, e impredecibles debido a que no se sabe el momento en que van a ocurrir.

Los dos agentes erosivos que fundamentalmente afectan a los taludes son: el agua y el aire.

La erosión de taludes por acción del agua, es más activa donde la disolución es menor. Donde la precipitación pluvial no se puede infiltrar en la masa rocosa, sino que fluye sobre la superficie siguiendo la trayectoria de la pendiente, el agua viaja a una velocidad relativamente rápida, y es capaz de desprender partículas materiales sueltas por medio de la fuerza hidráulica de su flujo, incluso con pendientes moderadas, los efectos de una erosión hídrica extrema en taludes, se aumentan visiblemente por medio de la formación de sistemas de gargantas a lo largo de las cuales se concentra la erosión.

La erosión de taludes por acción del viento, se basa en la fuerza con que el fluido (en este caso el aire), puede actuar sobre las partículas de suelo o roca.

Para cualquier fluido, esta fuerza depende hasta cierto punto en el grado de aspereza de la superficie, pero en el caso del viento la aspereza desempeña un papel especialmente crítico debido a su baja densidad y por ende, la capacidad de transporte del mismo. Donde la superficie es muy áspera, como por ejemplo en el caso de plantas o rocas grandes que no pueden ser removidas por el aire, entonces la velocidad del viento cerca de la superficie es baja y se presenta poca erosión.

Sin embargo, cualquier superficie relativamente lisa, es susceptible a la erosión eólica. Por tanto una cubierta de vegetación protege a la superficie afectada de los efectos inmediatos del impacto de lluvia y del viento.

Una variable importante a considerar en el estudio de la erosión en taludes a escala regional, es el clima, que controla tanto el desarrollo de la vegetación natural como la erosión del suelo. Su significado radica principalmente en determinar el equilibrio hidrológico en la superficie por efecto de la precipitación y la evaporación. Esto debido a que la lluvia es el elemento esencial que promueve la germinación y el crecimiento de las plantas.

En el tratamiento superficial de taludes se tienen que valorar y tomar en cuenta aspectos climáticos como son: la humedad relativa, la temperatura y la frecuencia de las precipitaciones en la zona en que se ubique el talud para poder obtener el establecimiento de la vegetación.

En base a las condiciones climáticas de la zona geográfica del país (norte, centro o sur), en que se encuentre ubicado el talud, y el tipo de suelo o roca que lo integre, se procede a seleccionar el tipo de semilla adecuada para ser integrada al sistema (normalmente es pasto por tratarse de una especie rastrera), y en ocasiones si el clima es extremo, se pueden seleccionar hasta dos o tres tipos de semillas cuyos períodos de germinación y vida efectivos, se puedan alternar.

El establecimiento del césped u otra especie vegetal representa una de las dificultades en el control de la erosión en taludes, debido a que prácticamente el éxito o fracaso de los sistemas depende en gran medida del clima y por otra parte de la correcta instalación del mismo.

La presencia de fallas en taludes acarrearán el consecuente deslizamiento masivo de fragmentos rocosos, la mayoría de las veces esto ocurre de manera súbita e impredecible, generándose accidentes de lamentables consecuencias y representando actualmente un reto para la ingeniería debido a que, resulta difícil la aplicación de un análisis matemático que se apegue a las condiciones que se presentan en un desprendimiento masivo de rocas.

Por otro lado para emitir un diagnóstico geotécnico completo y detallado se debe contar con la mayor cantidad de datos posibles que reflejen el estado sintomático de la patología involucrada en el talud afectado, en estas condiciones se determinará si se trata de un posible caso traumático profundo (como una desestabilización del talud), o simplemente se trate de la presencia de algún agente patógeno alojado en la parte más superficial del talud, que tan sólo requiera un tratamiento de control y protección superficial.

El cuadro clínico de los taludes excavados en roca representa una inquietud e interés personal por analizar las causas reales que originan los deslizamientos en los taludes ya que, al identificar los síntomas que generan los agentes patógenos involucrados en el talud afectado, se pueden emitir diagnósticos correctos y además proceder a aplicar la terapia adecuada en el caso que se presente.

Analógicamente podemos establecer que la aplicación de los nuevos sistemas y procedimientos descritos, constituyen una terapia superficial comúnmente denominada como "curita", aliviando el síntoma característico que en términos generales se manifiesta con la producción de sedimentos y funcionando como una protección superficial. En cambio una compleja intervención quirúrgica quedaría representada mediante un completo análisis de estabilidad de taludes ya que, en este caso se tendría la intervención de los análisis matemáticos respectivos y una mayor técnica ingenieril aplicada.

Las técnicas más difundidas y aplicadas últimamente en la práctica, para el tratamiento superficial de los taludes han sido: pegantes inorgánicos, mallas colgantes, gabiones y pasto en rollo. Los resultados de su aplicación en un corto plazo han sido satisfactorios, sin embargo su comportamiento en un mediano y largo plazo, lejos de considerarse como aceptables han dejado un sentido de insatisfacción e inseguridad a operadores y usuarios respectivamente. Esto se debe básicamente a que por un lado han sido técnicamente mal aplicados y por otro han sido aplicados en situaciones para las cuales no han sido concebidos, así por ejemplo: el concreto lanzado no se adhiere permanentemente a la superficie rocosa, debido a que ambos materiales (roca y concreto) poseen distintos coeficientes de dilatación térmica, esto hace que con los primeros cambios de temperatura, el concreto se desprenda, agriete y colapse. También ambos materiales presentan distintos módulos de elasticidad, y al presentarse empujes horizontales debidos a la relajación de la roca provocada por la misma excavación del talud, se incrementan y difunden en la

superficie de contacto entre ambos, separándose y ocasionando caídas de fragmentos del sistema de manera súbita, representando este hecho un peligro latente. Por otro lado las mallas colgantes no detienen el proceso de erosión y al sobrecargarse se rompen y el mantenimiento no cesa, el uso inadecuado de gabiones ha representado una mala aplicación en los taludes afectados, ya que no fueron concebidas como estructuras de retención, instalados al pie del talud y al sufrir un impacto extraordinario provocado por algún fragmento rocoso de considerables dimensiones, se rompen y no alivian la situación sino que la empeoran, al quedar esparcido su contenido en el camino. Y la aplicación del pasto en rollo resulta altamente restringido su uso ya que, prácticamente se aplica en taludes con pendiente inferior a los 30° y en países como Norteamérica, su aplicación representa un altísimo costo.

La diversidad de técnicas aplicadas en el tratamiento superficial de taludes, denota con demasiada frecuencia fuertes contrastes en distancias relativamente cortas, que tan sólo reflejan inquietudes por mitigar temporalmente los síntomas de una patología existente.

En el campo de la erosión en taludes, existen ya nuevos sistemas y procedimientos específicamente diseñados para otorgar la adecuada protección a los mismos.

a) Hidrosiembra: procedimiento que consiste en lanzar a modo de riego sobre los taludes con cierta pendiente y rocas blandas, una mezcla de fibras finamente divididas y debidamente mezcladas con proporciones de fertilizante, semillas y agua.

b) Pegante orgánico: aditivo que se integra a la hidrosiembra y cuya función es la de nutrir y proteger a la semilla durante el período de su germinación. Con su aplicación, la matriz de fibras queda adherida perfectamente al contorno de la superficie y al secarse puede ser rehumedecida. Tiene aplicaciones en taludes con pendiente suave y también es usado como complemento en sistemas que han sido diseñados para ser aplicados en pendientes más pronunciadas. A la integración de este sistema con el anterior procedimiento se le ha llamado "Hidromulching, M.R."

c) "Manta fértil, M.R.": sistema que consiste en integrar una alfombra a base de fibras naturales, sujeta entre dos mallas de soporte que alojan a la semilla. Desde el momento en que se instala, se eliminan las acciones desgastantes de los dos agentes que originan la erosión, regulando la humedad del terreno que protege ya que, disminuye la infiltración cuando hay mucha agua y manteniendo la humedad durante un

tiempo prolongado cuando cesa la lluvia. Al establecerse la vegetación, las raíces se van entrelazando con las fibras que componen la manta, consiguiéndose una protección permanente contra la erosión. Existen varios tipos de mantas que se aplican según las condiciones del terreno.

d) "Grin-rock, M.R.": sistema que últimamente ha venido a sustituir el uso del concreto lanzado, constituyendo así una solución verde que realmente controla la erosión en su origen, solucionando problemas de graneos y deslizamientos superficiales de fragmentos rocosos en taludes con pendientes superiores a los 60°, en rocas blandas, tobas volcánicas, conglomerados, etc. Este sistema resulta de la combinación de la hidrosiembra, una manta fértil y una malla resistente.

e) "Eco-malla, M.R.": sistema de malla ecológica que constituye una solución integral para todo tipo de taludes en roca y consiste en la combinación de una manta fértil y/o hidrosiembra, una malla de alta resistencia y anclaje, se aplica en taludes rocosos con pendientes elevadas y problemas de caída de bloques o estabilidad superficial, disminuyendo drásticamente el efecto de la decompresión de la roca en la zona más somera del corte del talud.

Las ventajas que se obtienen con sus aplicaciones son:

Los sistemas y procedimientos con base de mantas fértiles se adhieren permanentemente a la superficie gracias a la acción de sujeción que en primera instancia, las mallas que integran su estructura proporcionan al sistema y en una segunda etapa, una vez establecida la vegetación, las raíces se encargan de entrelazarse en las fibras e imprimir el carácter de sujeción del sistema al terreno.

El espesor de materia orgánica (mulch), que es suministrado en la aplicación de los sistemas, sirve para el desarrollo de las plantas.

Económicamente resulta más costeable la aplicación de las mantas y mallas compuestas que integran soluciones ecológicas, por el costo de la materia prima implicada en el proceso de cada uno de ellos, así como en su manufactura, además analizando el comportamiento de los tratamientos a base de mantas y mallas ecológicas, resultan a largo plazo una mejor solución ya que, regeneran eficazmente el ecosistema y resaltar el valor estético que se imprime en una solución de aplicación verde, en lugar de una gris (que se obtiene con la aplicación del concreto lanzado), denotándose claramente con su aplicación, el disfrute de lo natural del paisaje, en una autopista.

La protección de taludes con afectaciones de erosión implica un tratamiento superficial a base de mantas o mallas compuestas de revegetación con implementos de refuerzo de alta resistencia y estructura de reparto que proporcionan un alto nivel de control de erosión y pueden llegar a controlar también la relajación de la roca.

Los sistemas y procedimientos analizados se caracterizan por su aplicabilidad a nivel internacional, es decir, tienen un comportamiento aceptable a nivel mundial (exceptuando las regiones en que el clima es lo suficientemente agresivo como para evitar el desarrollo esencial de los mismos), esto es debido a que, siguen procedimientos constructivos estándares y los componentes que integran a las mantas se pueden obtener fácilmente en cualquier parte, así como su manufactura.

Una manta de refuerzo del césped instalada en un talud, no sólo evitará la remoción del material superficial existente, si no que también inhibirá el acceso de agua en el interior del talud.

El sistema absorbe el agua suficiente, para mantener el terreno húmedo y con el tiempo, el agua es aprovechada por la vegetación establecida. Además en un momento determinado, no representan un obstáculo para la instalación de elementos de drenaje superficial en los taludes tratados, debido a la estructura fundamental de los sistemas, es decir, puede ser permitida la instalación de drenes penetrantes que alivien presiones internas en el talud.

La cubierta superficial protectora de taludes afectados por erosión, debe ser instalada sobre una capa de tierra vegetal mezclada con abono, que sustituya a la desaparecida capa edáfica, con un espesor de 5 a 10cm y que sustente las propiedades nutritivas del suelo. Esta capa con el aditamento de las mantas y mallas compuestas, cumple un papel similar al de la arcilla reteniendo el agua, las sustancias nutritivas inorgánicas y los materiales nutritivos orgánicos, principalmente el nitrógeno.

Al someter a un talud en roca a tratamiento, se debe tener en cuenta que los materiales de textura gruesa contienen una alta proporción de sustancias nutritivas inorgánicas a partir de la roca madre, pero éstas no son fácilmente disponibles para las plantas. Por lo tanto, resulta recomendable esparcer un contenido adecuado de arcilla o tierra vegetal para hacer que los minerales de las rocas estén disponibles para las plantas, ligar químicamente las sustancias nutritivas en los fertilizantes y

evitar su rápida lixiviación al drenar el agua. Este aspecto queda plenamente cubierto con la instalación de las mantas y mallas fértiles analizadas.

La vegetación constituye formalmente la mejor manera de protección de taludes que presentan afectaciones por erosión.

Los síntomas característicos de erosión en taludes son: la presencia del constante graneado, polvo y alojamiento de sedimentos al pie del talud, con el consecuente azolvamiento de obras de drenaje superficial así como la presencia de canales o gargantas erosivas alojadas en el cuerpo del talud y deslizamientos superficiales de fragmentos rocosos de considerable tamaño que pueden alojarse más tarde en el pavimento e implicar un constante mantenimiento para las compañías operadoras de vías terrestres.

Como recomendaciones generales en tratamientos y operaciones que deben ser aplicados en todos los casos y situaciones tenemos:

a) Efectuar una minuciosa limpieza de todos los fragmentos de roca que hayan quedado sueltos sobre las irregularidades superficiales del talud, así como el retiro de trozos de roca de considerable tamaño que sean fáciles de desprender con una barra de acero realizando una acción a modo de palanca, es decir, efectuar el saneo del talud.

b) La ejecución de cunetas al pie del talud y contracunetas en bermas o niveles intermedios cuando la altura del talud sea considerable, cuya sección debe ser definida de acuerdo al gasto calculado para cada situación y que discurra más o menos paralela al hombro del talud, separada de entre 2.00 y 5.00 metros hacia el interior en terreno natural, además ambos elementos deben ser impermeables para evitar infiltraciones en el talud.

c) La construcción de desagües o lavaderos cuando el talud atraviese una cañada.

d) Finalmente, cuando exista presencia de agua en el interior del macizo rocoso deberá diseñarse un sistema de drenes penetrantes con el fin de aliviar presiones intersticiales que puedan acentuar las situaciones de inestabilidad ya consideradas.

Los comentarios anteriores resultan del análisis de los diversos tratamientos que se han venido aplicando en los taludes, estos se ofrecen como una guía generalizada y se debe tomar en cuenta que las condiciones locales y la disponibilidad de los materiales son los que generalmente determinan la serie de medidas técnicas implementadas y aplicables en cualquier tratamiento particular.

En el desarrollo del trabajo se han analizado tablas que constituyen elementos para una correcta selección del tratamiento de control de erosión y estabilización superficial de los taludes construídos en carreteras y autopistas.

Analizando la integración de los sistemas y procedimientos descritos, se puede establecer una relación mutua entre ellos, es decir, los sistemas se van acoplando a las necesidades y en cierta forma a las dificultades que presentan los terrenos que requieren de su aplicación.

Con la aplicación de los sistemas y procedimientos analizados en este trabajo se obtiene un beneficio a corto plazo al reducir y mitigar los efectos de la erosión en taludes y a mediano y largo plazo al regenerarse la vegetación estableciéndose una solución ecológica con aplicación geotécnica.