



01162 15
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DISEÑO FUNCIONAL DE REVESTIMIENTOS
COMO ESTRUCTURA DE PROTECCIÓN
COSTERA**

T E S I S

**PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
(HIDRÁULICA)**

**P R E S E N T A :
HUMBERTO YÁÑEZ GODOY**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN**

CIUDAD UNIVERSITARIA



MÉXICO, D.F.

NOVIEMBRE, 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Humberto Yáñez Godoy

FECHA: 18/NOV/02

FIRMA: Humberto Yáñez Godoy

DISEÑO FUNCIONAL DE REVESTIMIENTOS COMO ESTRUCTURA DE PROTECCIÓN COSTERA

HUMBERTO YÁÑEZ GODOY
MÉXICO, D.F., NOVIEMBRE 2002.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

a la memoria de mi má

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la UNAM por la valiosa educación impartida en sus aulas y a todos mis profesores que a lo largo de la maestría me brindaron sus invaluable conocimientos y experiencia.

Hago patente mi reconocimiento y agradecimiento al Dr. Rodolfo Silva Casarín, cuya magnífica dirección, asesoría y clases impartidas han sido fundamentales para el presente trabajo y lo que sigue.

Los más sinceros reconocimientos a mi familia por el apoyo brindado y por sus grandes valores.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

INTRODUCCIÓN

ESTRUCTURA DE LA TESIS

JUSTIFICACIÓN

OBJETIVOS

CAPÍTULO 1. ASPECTOS DE MORFOLOGÍA DE COSTAS

- 1.1. INTRODUCCIÓN
- 1.2. ZONA COSTERA
- 1.3. TIPOS DE COSTAS
- 1.4. TIPOS DE SEDIMENTOS
- 1.5. FUERZAS HIDRODINÁMICAS
- 1.6. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
- 1.7. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS A LO LARGO DE LAS COSTAS
- 1.8. ESCALAS
- 1.9. EROSIÓN DE PLAYAS

CAPÍTULO 2. REVESTIMIENTOS

- 2.1. INTRODUCCIÓN
- 2.2. REVESTIMIENTOS
 - 2.2.1. DEFINICIÓN
 - 2.2.2. FUNCIONES
 - 2.2.3. LIMITACIONES
 - 2.2.4. CLASIFICACIÓN
 - 2.2.5. ASPECTOS ESTRUCTURALES
 - 2.2.5.1. CAPA DE ACORAZAMIENTO
 - 2.2.5.2. CAPA FILTRO
 - 2.2.5.3. PROTECCIÓN LOCAL
 - 2.2.5.4. OTROS MÉTODOS DE PROTECCIÓN
 - 2.2.6. MATERIALES DE LA CORAZA
 - 2.2.7. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES DE LOS REVESTIMIENTOS
 - 2.2.8. IDENTIFICACIÓN DE LOS MODOS PROBABLES DE FALLA DE LOS REVESTIMIENTOS
 - 2.2.8.1. PRESIONES ELEVADAS
 - 2.2.8.2. DESLIZAMIENTO
 - 2.2.8.3. IMPACTO DEL OLEAJE

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

- 2.2.8.4. EROSIÓN
- 2.2.8.5. REBASE DE LAS OLAS –OVERTOPPING–
- 2.2.8.6. FALLA GEOTÉCNICA

CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

- 3.1. INTRODUCCIÓN
 - 3.1.a. ASPECTOS GENERALES
 - 3.1.b. INTERACCIÓN OLEAJE-ESTRUCTURA
- 3.2. CHECKLIST DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE REVESTIMIENTOS
- 3.3. DISEÑO DE LOS NIVELES DE AGUA
- 3.4. ESTIMACIÓN DE LA OLA DE DISEÑO
- 3.5. VARIACIÓN EN LAS ALTURAS Y PERIODOS DE OLAS Y OLAS SIGNIFICANTES
- 3.6. MEDICIÓN DE OLAS Y OBSERVACIONES VISUALES
- 3.7. PREDICCIÓN DE OLEAJE
- 3.8. OLAS ROMPIENTES
- 3.9. ALTURA DE PROTECCIÓN
- 3.10. RUN UP DEL OLEAJE
- 3.11. REBASE DEL OLEAJE
- 3.12. ESTABILIDAD Y FLEXIBILIDAD
- 3.13. ESTABILIDAD DE LAS PIEZAS DEL ACORAZAMIENTO
- 3.14. ESPESOR DEL ESTRATO
- 3.15. ESTABILIDAD DE RESERVA
- 3.16. PROTECCIÓN LOCAL
- 3.17. FILTROS
- 3.18. PROTECCIÓN DE FLANCOS

CAPÍTULO 4. DISEÑO FUNCIONAL

- 4.1. INTRODUCCIÓN
- 4.2. DISEÑO DEL REVESTIMIENTO
 - 4.2.1. CONDICIONES DEL SITIO
 - 4.2.2. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES DEL ACORAZAMIENTO
 - 4.2.3. CRITERIOS DE LA ROTURA DEL OLEAJE
 - 4.2.4. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE LA CORAZA
 - 4.2.5. REQUISITOS DEL FILTRO
 - 4.2.6. ESTIMACIÓN DEL RUN UP DEL OLEAJE
 - 4.2.7. EROSIÓN LOCAL
 - 4.2.8. SUMARIO DEL DISEÑO
 - 4.2.9. EVALUACIÓN DE COSTOS
 - 4.2.10. ACCIONES DE INSPECCIÓN, MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN

CONCLUSIONES

FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXO 1. TIPOS DE REVESTIMIENTOS

- A1.1. ENROCAMIENTO UNIFORME Y RIPRAP GRADUADO
- A1.2. SOBRECUBIERTA DE ROCA
- A1.3. ROCA DE CAMPO



- A1.4. FRAGMENTOS DE CONCRETO
- A1.5. ASFALTO
- A1.6. PIEZAS GEOMÉTRICAS DE CONCRETO
- A1.7. PLANCHAS DE CONCRETO
- A1.8. BLOQUES DE CONCRETO
- A1.9. BLOQUES GOBI (ERCO), BLOQUES JUMBO Y COLCHONETAS (MAT)
- A1.10. BLOQUES TIPO LOSA (TURFBLOCKS)
- A1.11. ANILLOS NAMI
- A1.12. BLOQUES DE CONSTRUCCIÓN ESTÁNDAR DE CONCRETO
- A1.13. BLOQUES DE CONTROL DE CONCRETO
- A1.14. BLOQUES TIPO FALDÓN
- A1.15. BLOQUES LOK-GARD
- A1.16. BLOQUES TERRAFIX
- A1.17. CONTENEDORES
- A1.18. COLCHONETAS DE CONCRETO
- A1.19. BULTOS
- A1.20. GABIONES
- A1.21. TONELES DE ACERO DE COMBUSTIBLE
- A1.22. TEXTILES
- A1.23. TABLETAS DE CONCRETO
- A1.24. SUELO-CEMENTO
- A1.25. COLCHONETAS DE LLANTAS
- A1.26. ALFOMBRILLAS
- A1.27. HILADAS DE ROCA EN REPISA
- A1.28. VEGETACIÓN

ANEXO 2. DETALLES TÍPICOS DE CRESTAS

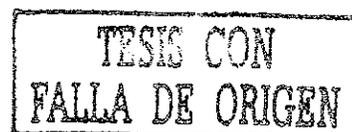
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

RESUMEN

Las playas se erosionan cuando pierden más sedimento, a lo largo de la costa o fuera de ella, de lo que reciben. Los procesos que conducen a la erosión de las playas incluyen la acción destructiva del oleaje durante las tormentas, los efectos de las mareas de tormenta y la reducción drástica de los sedimentos de la playa por erosión y selección. Las causas por las que una playa puede erosionarse son de tipo natural o provocadas por el hombre.

Dentro de las diversas soluciones estructurales que se pueden emplear contra la erosión se tienen los revestimientos, que son estructuras colocadas paralelas o casi paralelas a la línea de costa sobre una superficie inclinada o en el talud de una estructura estable.

En este trabajo se brinda una guía práctica para el diseño funcional de revestimientos como estructura de protección costera y se ilustra con una aplicación práctica para un caso real de erosión que se presenta en la línea de costa adyacente a la obra de toma superficial de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos, cerca del Puerto de Tuxpan, Veracruz.



ABSTRACT

The beaches are eroded when they lose more silt, along the coast or outside of it, what they receive. The processes that lead to the erosion of the beaches include the destructive action of the wave during the storms, the effects of the storm tides and the drastic reduction of the silts of the beach for erosion and selection. A beach can be eroded either natural type or caused by the man.

Inside the diverse structural solutions that can be used against the erosion are the revetments, these structures are placed parallel or almost parallel to the coast line on an inclined surface or in the bank of a stable structure.

In this work is given a practical guide for the functional design of revetments as a structure of coastal protection and it is illustrated with a practical application for a real case of erosion that is presented in the line of adjacent coast to the work of superficial intake of the Thermoelectric Power Station Adolfo López Mateos, near the Port of Tuxpan, Veracruz.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

- Figura 1.1. Sección transversal de la margen continental.
- Figura 1.2. Descripción gráfica de los términos utilizados en la zona costera.
- Figura 1.3. Aporte y pérdida de sedimentos en la playa.

Capítulo 2

- Figura 2.1. Clasificación de revestimientos.
- Figura 2.2. Sección transversal de un revestimiento tipo.
- Figura 2.3. Revestimiento de roca cantera.
- Figura 2.4. Revestimiento de gaviones.
- Figura 2.5. Revestimiento de bloques de concreto.
- Figura 2.6. Revestimiento de bultos rellenos de grout.
- Figura 2.7. Falla por erosión ocasionada por el rebase del oleaje.
- Figura 2.8. Falla por erosión al pie de talud.
- Figura 2.9. Falla de la pantalla al pie de talud.
- Figura 2.10. Falla por presión subyacente de los bloques.

Capítulo 3

- Figura 3.1. Relación rompiente, H_b/d_s , como función de $d_s/(gT^2)$.
- Figura 3.2. Tipo de rotura del oleaje.
- Figura 3.3. Protección local o al pie usada en los revestimientos.
- Figura 3.4. Uso de filtro de textil bajo revestimientos y protección local.

Capítulo 4

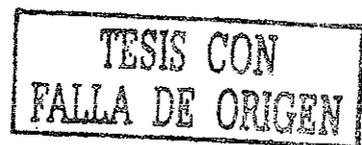
- Figura 4.1. Ubicación geográfica del Puerto de Tuxpan, Veracruz.
- Figura 4.2. Vista Sur-Norte de la zona de escolleras de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos.
- Figura 4.3. Vista Este-Oeste del sitio de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos.
- Figura 4.4. Panorámica de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos, vista de Norte a Sur.
- Figura 4.5. Corte transversal con las condiciones del sitio.
- Figura 4.6. Sección transversal de diseño del revestimiento de roca uniforme.
- Figura 4.7. Sección transversal de diseño del revestimiento de bloques de concreto de control.
- Figura 4.8. Sección transversal de diseño del revestimiento de gaviones.

Anexo 1

- Figura A1.1. Revestimiento de roca uniforme.
- Figura A1.2. Revestimiento con sobrecubierta de roca.
- Figura A1.3. Revestimiento con roca de campo.
- Figura A1.4. Revestimiento con fragmentos de concreto.
- Figura A1.5. Revestimiento con concreto asfáltico.
- Figura A1.6. Revestimiento con tribars de concreto.
- Figura A1.7. Revestimiento con plancha de concreto.
- Figura A1.8. Tipos de bloques de concreto.
- Figura A1.9. Revestimiento de bloque-Gobi.
- Figura A1.10. Revestimiento de bloque-Turbblock.
- Figura A1.11. Revestimiento de anillos Nami.
- Figura A1.12. Revestimiento de bloques de construcción estándar.
- Figura A1.13. Revestimiento de bloques de control de concreto.
- Figura A1.14. Revestimiento de bloques tipo faldón.



- Figura A1.15. Revestimiento de bloques Lok-Gard.
- Figura A1.16. Revestimiento de bloques Terrafix
- Figura A1.17. Revestimiento de colchonetas de concreto.
- Figura A1.18. Revestimiento de bultos.
- Figura A1.19. Revestimiento de gaviones
- Figura A1.20. Revestimiento de toneles de acero.
- Figura A1.21. Revestimiento de filtros textiles
- Figura A1.22. Revestimiento de tabletas de concreto.
- Figura A1.23. Revestimiento de suelo cemento.
- Figura A1.24. Revestimiento de colchoneta de llantas.
- Figura A1.25. Revestimiento de alfombra.
- Figura A1.26. Revestimiento formado por el proceso de erosión.



LISTA DE TABLAS

Capítulo 1

Tabla 1.1. Clasificación de las playas en base al tamaño de sus granos.

Capítulo 2

Tabla 2.1. Clasificación de los problemas de ingeniería de costas.

Capítulo 3

Tabla 3.1. Relaciones entre T_p , T_s y T_z .

Tabla 3.2. Factores de corrección para run up por pendiente rugosa.

Tabla 3.3. Valores sugeridos para el uso en la determinación del peso de la coraza (con condiciones de rotura de oleaje).

Tabla 3.4. Coeficientes de estrato y porosidad para diferentes piezas de la coraza.

Tabla 3.5. $H/H_{D=0}$ para diversos niveles de daño en la capa de acorazamiento con diferentes tipos de material ($H/H_{D=0}$ para el nivel de daño en por ciento).

Capítulo 4

Tabla 4.1. Taludes máximos para diferentes materiales.

Tabla 4.2. Coeficiente para el espesor de la coraza.

Tabla 4.3. Coeficiente S_b para diferentes construcciones de revestimiento

Tabla 4.4. Run up estimado y elevación de cresta requerida para las diferentes opciones de revestimiento.

Tabla 4.5. Profundidades estimadas de socavación local para las diferentes opciones de revestimiento.

Tabla 4.6. Sinopsis con los datos de diseño para las diferentes opciones de revestimiento.

Tabla 4.7. Modelo de tabla de los costos de preparación del sitio para las diferentes opciones de revestimiento.

Tabla 4.8. Modelo de tabla de los costos de materiales para las diferentes opciones de revestimiento.

Tabla 4.9. Modelo de tabla con los costos iniciales para las diferentes opciones de revestimiento.

Anexo 1

Tabla A1.1. Pesos de los bloques tipo faldón.



LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|--|
| A | Área |
| a, b | Coefficientes de regresión |
| C_0, C_1, C_2 | Coefficientes de regresión |
| C, S_b | Coefficientes de coraza (aplicados en revestimientos de bloques de concreto) |
| d | Profundidad (el subíndice "o" indicará aguas profundas) |
| d_s | Profundidad de la estructura a partir de la superficie del agua |
| D_{15} | Diámetro de las partículas en que 15% de la muestra, dado en peso, es menor que ese tamaño |
| D_{85} | Diámetro de las partículas en que 85% de la muestra, dado en peso, es menor que ese tamaño |
| F | Bordo dimensional |
| F' | Bordo adimensional |
| F_s | Factor de seguridad |
| g | Aceleración de la gravedad |
| H | Altura de ola (si lleva subíndice "o", indicará aguas profundas) |
| H_b | Altura máxima de rompiente |
| $H_{D=0}$ | Altura de ola de daño cero |
| H_{m0} | Altura de ola basada en el momento de orden cero |
| H_s | Altura de ola significativa |
| H_1 | Promedio del 1% de las alturas de ola más grandes |
| H_2 | Altura de ola excedida por el 2% de las olas |
| H_{10} | Promedio del 10% de las alturas de ola más grandes |
| k_Δ | Coefficiente del acorazamiento |
| K_D | Coefficiente de estabilidad |
| K_s | Altura por arriba del talud |
| L | Longitud de onda (si lleva subíndice "p", indicará que se calcula usando el T_p) |
| m | Pendiente del fondo |
| m_T | Cotangente del talud del revestimiento |
| n | Número de piezas del acorazamiento que cabrían en el espesor del estrato |
| N | Número de olas |
| N_r | Número de piezas del acorazamiento |
| N_s | Número de estabilidad (condiciones de oleaje regular) |
| N_{sz} | Número de estabilidad (condiciones de oleaje irregular) |
| Q | Rebase dimensional |
| Q' | Rebase adimensional |
| r | Espesor del acorazamiento |
| r_u | Factor de corrección |
| R_c | Resistencia de la estructura |

| | |
|------------|--|
| R_{\max} | Run up máximo |
| S | Nivel de daño |
| s_p | Pendiente pico del mar |
| t_a | Espesor de coraza para revestimientos de bloques de concreto |
| T | Periodo |
| T_p | Periodo pico |
| T_z | Periodo medio |
| W | Peso requerido por pieza de la coraza |
| W_D | Carga de diseño |
| W_{50} | El 50% de las rocas individuales pesando más que W (el 100%, tratándose de W_{100}) |
| β | Ángulo de la pendiente del revestimiento con respecto a la horizontal |
| γ_r | Peso específico por pieza de la coraza |
| γ_w | Peso específico del agua |
| ξ | Número de Iribarren |

INTRODUCCIÓN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INTRODUCCIÓN

Los problemas en ingeniería de costas pueden clasificarse en cuatro categorías: estabilización de la línea de costa, protección en la parte posterior de la playa (de olas y mareas), estabilización de ensenadas y protección de puertos. Un problema costero puede caer en más de una categoría. Una vez clasificado, hay varias soluciones disponibles para el ingeniero en costas; algunas son estructurales.

Dentro de las alternativas en la protección costera se tiene la solución estructural conocida como revestimientos.

Los revestimientos son estructuras colocadas paralelas o casi paralelas a la línea costera, a fin de separar una zona de tierra de una zona marina. El propósito principal de un revestimiento es proteger el terreno y las propiedades de las zonas elevadas contra la acción del oleaje.

Los revestimientos deben ser construidos para proveer protección contra la erosión de acciones naturales y del efecto de otras estructuras realizadas por el hombre o bien para reducir el run up de las olas o la reflexión de las mismas.

Un revestimiento consiste de tres componentes. El componente primario, el cual determina las características de los otros dos, es la capa de acorazamiento; el segundo componente es la capa filtro; y el tercer componente es la protección al pie de talud o protección local.

Se puede usar una diversidad de materiales para la construcción de los revestimientos, desde materiales locales, importados o sistemas especialmente desarrollados para este propósito.

El diseño funcional de los revestimientos implica la conjunción de factores técnicos junto con restricciones económicas, ambientales, políticas (sociales) y estéticas de la zona.

En la tesis se desarrolla un procedimiento de diseño de los revestimientos como estructura de protección costera y se ejemplifica con una aplicación, para el caso de erosión que se presenta en la línea de costa adyacente a la obra de toma superficial de la Central Termoelectrónica Adolfo López Mateos, cerca del Puerto de Tuxpan, Veracruz.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

En el *capítulo 1* se explican aspectos de morfología de costas. Se realiza una descripción de la zona costera, los tipos de costas, los tipos de sedimentos y los procesos morfodinámicos y las fuerzas hidrodinámicas que los producen.

En el *capítulo 2* se da una visión general de los revestimientos usados como protección costera. Se describen las aplicaciones funcionales, limitaciones, clasificación, aspectos estructurales, materiales e identificación de los modos probables de falla de los revestimientos.

En el *capítulo 3* se explica paso a paso el procedimiento de diseño de los revestimientos.

En el *capítulo 4* se ilustra el uso de los revestimientos como estructura de protección costera contra la erosión provocada por el oleaje o las corrientes. Se ejemplifica con una aplicación, para el caso de erosión que se presenta en la línea de costa adyacente a la obra de toma superficial de la Central Termoelectrónica Adolfo López Mateos, cerca del Puerto de Tuxpan, Veracruz.



Se presentan las conclusiones y se recomiendan las futuras líneas de trabajo.

En el *anexo 1* se presentan diversas alternativas de revestimientos; se da un bosquejo general del revestimiento y los factores a considerar en el diseño.

En el *anexo 2* se muestran los detalles típicos de cresta en revestimientos.

JUSTIFICACIÓN

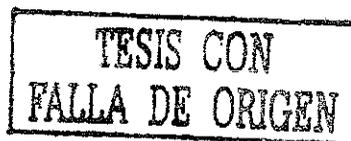
Existe una variedad de respuestas estructurales que se pueden dar a un problema de ingeniería de costas, (e.g. protección de la playa y los asentamientos humanos que se encuentren en las zonas más elevadas contra los daños del oleaje) lo cual ha generado amplias y variadas investigaciones sobre la metodología a seguir en su diseño.

Teniendo seleccionada la alternativa de protección costera, es conveniente el tener una serie de pasos ordenada –una guía práctica– que permita guiar al diseñador para un diseño funcional y confiable.

En este trabajo se brinda una guía práctica para el diseño funcional de revestimientos como estructura de protección costera, la cual está basada en otros estudios e investigaciones realizados.

OBJETIVOS

- a. Brindar una guía de diseño práctica para el diseño funcional de revestimientos como estructura de protección costera.
- b. Permitir una selección adecuada del o los materiales apropiados para el diseño de los componentes del revestimiento.
- c. Ilustrar con una aplicación práctica –en un caso real de erosión–, el diseño de los revestimientos como estructura de protección costera.



Se presentan las conclusiones y se recomiendan las futuras líneas de trabajo.

En el *anexo 1* se presentan diversas alternativas de revestimientos; se da un bosquejo general del revestimiento y los factores a considerar en el diseño.

En el *anexo 2* se muestran los detalles típicos de cresta en revestimientos.

JUSTIFICACIÓN

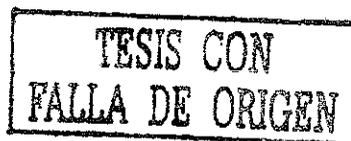
Existe una variedad de respuestas estructurales que se pueden dar a un problema de ingeniería de costas, (e.g. protección de la playa y los asentamientos humanos que se encuentren en las zonas más elevadas contra los daños del oleaje) lo cual ha generado amplias y variadas investigaciones sobre la metodología a seguir en su diseño.

Teniendo seleccionada la alternativa de protección costera, es conveniente el tener una serie de pasos ordenada –una guía práctica– que permita guiar al diseñador para un diseño funcional y confiable.

En este trabajo se brinda una guía práctica para el diseño funcional de revestimientos como estructura de protección costera, la cual está basada en otros estudios e investigaciones realizados.

OBJETIVOS

- a. Brindar una guía de diseño práctica para el diseño funcional de revestimientos como estructura de protección costera.
- b. Permitir una selección adecuada del o los materiales apropiados para el diseño de los componentes del revestimiento.
- c. Ilustrar con una aplicación práctica –en un caso real de erosión–, el diseño de los revestimientos como estructura de protección costera.



Se presentan las conclusiones y se recomiendan las futuras líneas de trabajo.

En el *anexo 1* se presentan diversas alternativas de revestimientos; se da un bosquejo general del revestimiento y los factores a considerar en el diseño.

En el *anexo 2* se muestran los detalles típicos de cresta en revestimientos.

JUSTIFICACIÓN

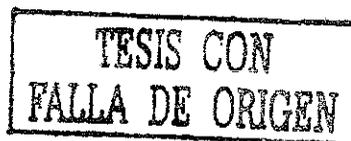
Existe una variedad de respuestas estructurales que se pueden dar a un problema de ingeniería de costas, (e.g. protección de la playa y los asentamientos humanos que se encuentren en las zonas más elevadas contra los daños del oleaje) lo cual ha generado amplias y variadas investigaciones sobre la metodología a seguir en su diseño.

Teniendo seleccionada la alternativa de protección costera, es conveniente el tener una serie de pasos ordenada –una guía práctica– que permita guiar al diseñador para un diseño funcional y confiable.

En este trabajo se brinda una guía práctica para el diseño funcional de revestimientos como estructura de protección costera, la cual está basada en otros estudios e investigaciones realizados.

OBJETIVOS

- a. Brindar una guía de diseño práctica para el diseño funcional de revestimientos como estructura de protección costera.
- b. Permitir una selección adecuada del o los materiales apropiados para el diseño de los componentes del revestimiento.
- c. Ilustrar con una aplicación práctica –en un caso real de erosión–, el diseño de los revestimientos como estructura de protección costera.



CAPÍTULO 1
ASPECTOS DE MORFOLOGÍA DE COSTAS

1.1. Introducción

Desde tiempos antiguos, los hombres han navegado en el mar en una gran variedad de embarcaciones a fin de obtener alimentos y transportar cargamentos y pasajeros a puertos distantes. Para navegar de forma segura, los marineros necesitaban un conocimiento estrecho del aspecto de la costa de un lugar a otro.

Por naturaleza, la costa es un ambiente complejo, increíble y diverso. No obstante, la búsqueda de un entendimiento de como las líneas costeras se formaron y como las actividades humanas afectan estos procesos ha requerido que se diseñen esquemas de clasificación. La mayor agrupación de las zonas costeras se ha hecho en clases que tienen características similares, debido a que se han desarrollado en condiciones geológicas y ambientales similares.

1.2. Zona costera

La línea de costa es la demarcación entre las plataformas subaéreas y subacuáticas de los continentes, a lo largo de las cuales reside una mayor parte de la población mundial. La costa es la región en donde interactúan las fuerzas del mar con tierra. El sistema se compone de la energía que transmite el mar a través de su movimiento y que es absorbida por tierra firme.

La transición entre el continente y el fondo marino se conoce como margen continental y consiste de tres zonas (ver *figura 1.1*):

- Inmersión continental (zona nerítica).
- Talud continental (zona batial).
- Descenso continental (zona abisal).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

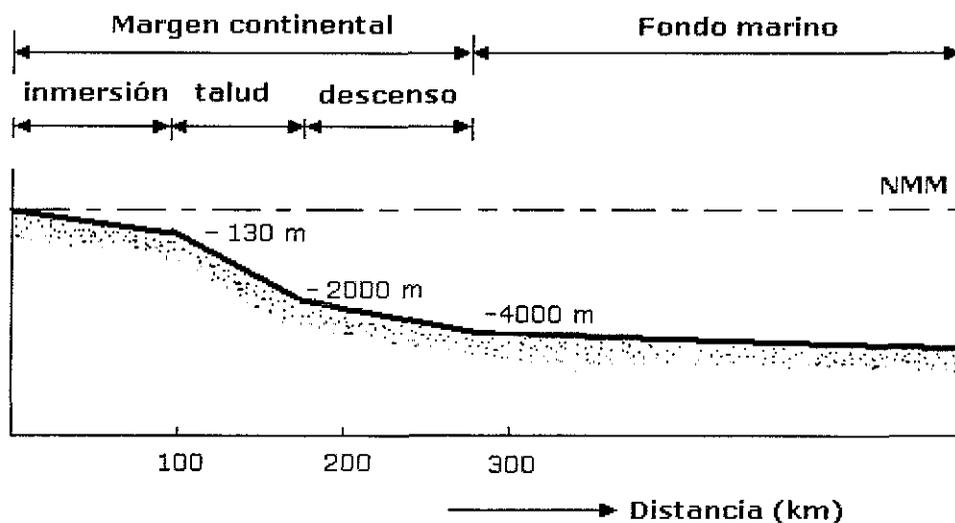


Figura 1.1. Sección transversal de la margen continental.

Las clasificaciones más recomendadas de las costas son:

- Genéticas (de naturaleza).
- Descriptivas (composición de sedimentos, fuerzas morfológicas o hidrodinámicas)

En la sección 1.3 se retoma el tema de estas clasificaciones.

Para una mayor claridad de los términos manejados en las secciones subsecuentes se muestra en la *figura 1.2* los más comunes en la zona costera.

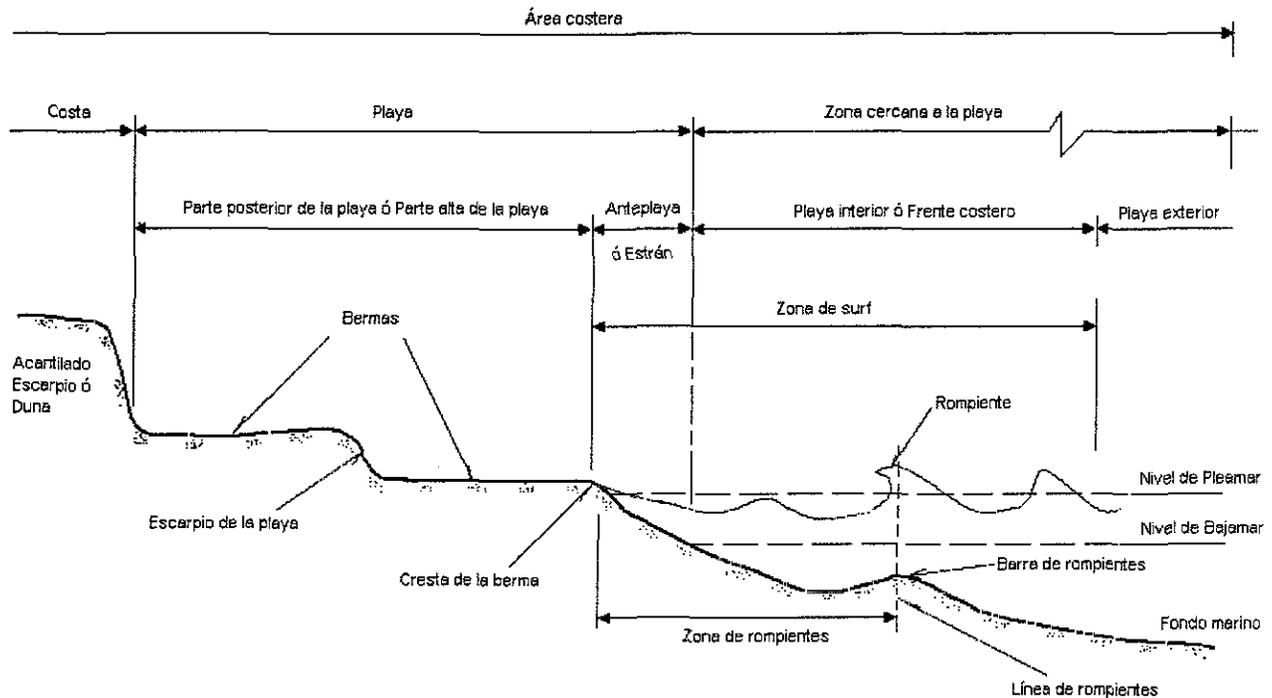


Figura 1.2. Descripción gráfica de los términos utilizados en la zona costera.

La forma que adquiere el litoral es diferente de un lugar a otro, y así por ejemplo, en la costa del Pacífico mexicano las playas son de pendiente fuerte, se presentan acantilados y montañas muy próximas al mar; en cambio, del lado del Golfo, las playas son más tendidas y difícilmente se encuentran acantilados.

Es importante mencionar que la zona costera reviste una gran importancia desde diferentes puntos de vista y de cualquiera de ellos se debe de cuidar de su conservación y preservación.

Las zonas costeras son aprovechadas como zonas de desarrollo turístico, comercial pesquero y en algún caso industrial. Por lo que los especialistas involucrados en el estudio de las zonas costeras deben tener presente lo siguiente para el desarrollo de su trabajo:

- Entendimiento de los fenómenos involucrados y sus efectos en la zona costera.
- Diseño de las obras necesarias para resolver la problemática planteada sin afectar en lo posible el medio ambiente.
- Supervisión y monitoreo de las obras durante su construcción y vida posterior a fin de observar que el comportamiento sea acorde con el objetivo planteado.



1.3. Tipos de costas

Las márgenes que bordean los mares y océanos constan de grandes masas de sedimentos provenientes de los suelos erosionados de los continentes y los cuales son depositados en la playa y el frente costero. Se estima que los continentes se erosionan a razón de 30 mm cada 1000 años. Los sedimentos son depositados en el mar por los ríos (aproximadamente de 1 a 10 km³ por año; 90% del total aportado), los glaciares (en las regiones polares), el viento, la acción volcánica, la erosión de dunas y acantilados por la acción del oleaje, y finalmente por la producción biogénica. Los sedimentos del frente costero pueden transportarse a océanos profundos a través de cañones submarinos enclavados dentro de la margen continental y también por vía de corrientes turbulentas y corrientes por gravedad.

Toda la tierra arriba del nivel del mar está expuesta a fuerzas erosivas como la lluvia, el viento, los escurrimientos, etc. Los ríos depositan los sedimentos (limos, arenas, sales) cerca de sus desembocaduras al mar, los cuales forman deltas e isletas de arena. Los limos son atrapados por la vegetación en ambientes de baja energía y forman extensivas marismas costeras o zonas tropicales de manglares. Los materiales arenosos y limosos pueden moverse también a lo largo de la costa por la acción de la marea y el oleaje. Una categoría especial de plataforma costera es la que se crea con depósitos biogénicos de animales marinos superficiales como los corales los cuales forman arrecifes que bordean o protegen la línea costera de la erosión producida por el oleaje.

Los materiales de las playas pueden mostrar un amplio rango de variación de tamaño, desde limos finos y sales hasta guijarros y cantos rodados; en ciertos extremos las playas consisten de esferas regulares de granito de 1 a 2 m de diámetro como las que se presentan a lo largo de algunas partes de la costa de Rusia (Murmansk) e Islandia. Las playas que consisten en mezclas de materiales finos y gruesos son clasificadas debido a los procesos de transporte selectivo. Las playas también varían de acuerdo al tipo de material: limo, cuarzo, arena, yeso, compuesto de carbonato (conchas) y materiales de coral. En la *tabla 1.1* se tiene una clasificación de las playas en base al tamaño de sus granos (Bird 1996).

| Tabla 1.1 | | |
|---|-------------------------------|----------------------------|
| Clasificación de las playas en base al tamaño de sus granos. | | |
| Categoría de la escala Wentworth ¹ | Diámetro de la partícula (mm) | Escala ϕ ² |
| Cantos rodados | >256 | Mínimo-8 ϕ |
| Guijarros | 64-256 | -6 ϕ a -8 ϕ |
| Rocas pequeñas | 4-64 | -2 ϕ a -6 ϕ |
| Gránulos | 2-4 | -1 ϕ a -2 ϕ |
| Arena muy gruesa | 1-2 | 0 ϕ a -1 ϕ |
| Arena gruesa | 1/2-1 | 1 ϕ a 0 ϕ |
| Arena media | 1/4-1/2 | 2 ϕ a 1 ϕ |
| Arena fina | 1/8-1/4 | 3 ϕ a 2 ϕ |
| Arena muy fina | 1/16-1/8 | 4 ϕ a 3 ϕ |

¹La clasificación Wentworth es una escala de diámetro de partículas.

²La escala ϕ está basada en el logaritmo negativo (de base 2) del diámetro de las partículas en milímetros ($\phi = \log_2 d$), de forma que las partículas más gruesas tienen valores negativos

Basada en la composición de sedimentos del material de las playas, se puede realizar la siguiente clasificación (van Rijn 1998):

- Costas limosas.
- Costas arenosas (cuarzo, arena de coral).
- Costas de grava/guijarros.
- Costas de roca y costas con acantilados.

Cerca del 5% al 10% de las costas mundiales consisten en costas limosas; del 10% al 15% son costas arenosas y del 75% al 85% son costas con acantilados, rocas y gravas.

Se puede realizar aún otra clasificación basada en las características típicas de las costas (fenomenológicas o morfológicas):

- Costas con islas barrera.
- Costas con delta.
- Costas con dunas.
- Costas con acantilados.
- Costas con arrecifes.
- Costas con manglares.
- Costas con pantanos.

Basándose ahora en las descargas de los ríos (agua y sedimento), en la agitación del oleaje y la intensidad relativa de las fuerzas inducidas por la marea y el oleaje, se puede hacer la siguiente clasificación:

- Costas con dominio ribereño.
- Costas con dominio de la acción del oleaje ($TR/H = 0.5$ a 1).
- Costas con dominio de la acción de la marea ($TR/H > 3$).
- Costas con dominio mixto de oleaje y marea ($TR/H = 1$ a 3).

donde: H = altura de ola media anual cerca de la costa

TR = rango de la marea

La desventaja principal de las clasificaciones descriptivas es la ausencia de un orden sistemático, como aquel que se da en los métodos de clasificación genética. Estos métodos recientes se basan en controles genéticos, tales como:

- La configuración del suelo
- El movimiento vertical relativo del suelo y el mar (aparición o sumergimiento con el tiempo)
- Los procesos físicos que modifican la línea costera (erosión o sedimentación con el tiempo en relación con la aparición o el sumergimiento)

Por simplicidad se describirá únicamente la clasificación de las costas basada en el tamaño de los sedimentos: **costas de roca y costas con acantilados, costas de grava o gujarros, costas arenosas y costas limosas.**

Las costas de roca y costas con acantilados son costas con frentes altos y escarpados (costas de tipo reflectivo) sin una playa apreciable delante de ellas y componiéndose de materiales consolidados e in consolidados de resistencia mecánica arbitraria, cuyo rango va desde granito y basalto hasta arena y limo de un origen diferente. Un aspecto característico de muchas costas de roca es la presencia de una plataforma costera en la base del acantilado, que es un

banco de roca plano (en la zona de intermareas) relativamente erosionable con un descenso muy marcado en su extremo que da al mar. Las plataformas costeras pueden ser cubiertas con estratos delgados de arena gruesa y depósitos de grava (provenientes de ríos o corrientes de montañas) a todo lo largo. La roca descubierta está presente generalmente en costas erosionables, porque sus productos clásticos pueden pulverizarse completamente por la interacción grano a grano de las partículas finas, los cuales son arrastrados fuera de la costa.

Las costas de roca y costas con acantilados son las costas del norte típicamente glaciares a lo largo del límite glaciar. Estas costas se caracterizan por su diversidad tal como las zonas montañosas escarpadas con acantilados de roca expuestos, promontorios, bahías con playas, islas, colinas, ensenadas, deltas en abanico (por el transporte de sedimentos de las corrientes provenientes de las montañas) y estuarios. Los materiales gruesos y la roca (gravas, guijarros y cantos rodados) acumulados en depósitos glaciares son los materiales típicos de la costa.

Las líneas costeras subtropicales se caracterizan generalmente por farallones costeros de sedimentos de carbonato consolidado (con un secado del agua excedente) en forma de playas irregulares de roca.

Las costas de grava o guijarros son costas que consisten de gravas (de 2 a 64 mm), guijarros y cantos rodados (de 64 a 256 mm) y generalmente se conocen como playas clásticas gruesas. Las costas de grava se pueden encontrar en muchas zonas del mundo de media y alta latitud (antiguamente glaciares). Estas áreas se extienden desde más allá de los límites de los últimos avances de hielo importantes hasta las capas presentes de hielo e incluyen la mayoría de las costas del noroeste de Europa, el este de América del Norte y las costas lejanas del Pacífico norte. Generalmente, estas líneas costeras son intrincadas e irregulares, caracterizadas por promontorios y acantilados. La variedad de formas depositadas incluyen: las barreras y playas de grava, las barreras formadas con bancos de arena, las bahías y los bancos persistentes de arena transversales. Las playas de grava también se encuentran a lo largo de costas con acantilados inconsolidados (mezclas de limo, arena y grava) que son erosionados por la acción del oleaje y a lo largo de costas tectónicas donde las corrientes pronunciadas depositan material grueso a la playa.

Las costas arenosas son costas donde la aportación principal es el oleaje (los granos de sedimento varían en el rango de 0.063 a 2 mm). Las acumulaciones de arena son depositadas, en su mayoría, a través de los procesos de la acción del oleaje y las corrientes inducidas por el oleaje, que por las corrientes inducidas por las mareas o los vientos. Generalmente, las costas arenosas son costas abiertas expuestas al oleaje generado por el viento y pueden variar desde costas playeras planas y rectas de baja energía a costas playeras empinadas de alta energía con deficiencia de sedimentos, con promontorios irregulares en forma de bahías. Las playas arenosas pueden estar bordeadas por acantilados, riscos escarpados y rocas. Los elementos morfológicos más básicos de las costas planas donde domina la acción del oleaje son las dunas, las playas, las playas barrera, las barreras formadas con bancos de arena y las islas barrera. La mayoría de las playas arenosas planas han sido formadas hace unos cuantos miles de años, cuando los niveles del mar comenzaron a bajar lentamente.

Las costas limosas son costas que consisten predominantemente de sedimentos inorgánicos de tamaño mediano menor a 63 micras (0.063 mm) y se conocen también como costas planas en cordillera. Este tipo de costas se pueden encontrar por todo el mundo desde las regiones tropicales a las regiones subárticas. El desarrollo de las cordilleras se estimula a lo largo de líneas costeras con sedimentación, donde la acumulación de los limos se interrumpe temporalmente. El predominio de los procesos marinos sobre los procesos fluviales (hay un abastecimiento reducido) es más favorable para la formación de las cordilleras (existen condiciones erosivas débiles). Los sedimentos limosos finos se originan predominantemente de fuentes terrestres (por una erosión

de suelos) transportados aguas abajo por los ríos (el río Amazonas en Brasil, los ríos Huanghe y Yangtze en China), pero los finos también pueden provenir de la erosión de acantilados o de la acción volcánica (como el archipiélago de Indonesia). Los limos se pueden transportar a lo largo de la costa por miles de años (como en la costa de la Guyana o la costa oeste de la India). Las concentraciones más grandes de limos se encuentran en los países asiáticos como China, India, Malasia, Tailandia y Corea. Usualmente las costas limosas son replegadas por las costas con zonas pantanosas, ya sea por las marismas o por los manglares.

Las características típicas de las costas limosas abiertas son: la presencia de frentes costeros con pendientes suaves (de 1 a 500/2000), el agua con un color café y la ausencia de rotura de olas grandes. La llegada del oleaje es atenuado por los limos flexibles (esto es un comportamiento visco-elástico que disipa la energía del oleaje), de tal forma que las olas nunca alcanzan la línea costera. Estos limos flexibles son generalmente conocidos como limos líquidos.

1.4. Tipos de sedimentos

La mayoría de los sedimentos marinos se derivan del desgaste de las rocas en tierra por la acción del viento, el agua y el hielo bajo la influencia de la temperatura, la presión y las reacciones químicas. Los tipos de sedimentos que pueden distinguirse son:

- Litogenosos; sedimentos (cuarzo y arcillas minerales) que ingresan al mar como partículas discretas (cantos rodados, piedras, gravas, arenas y arcillas).
- Hidrogenosos; sedimentos que se forman por la precipitación de agua marina (sedimentos de sales, nódulos manganésicos).
- Biogenosos; sedimentos formados por organismos (arenas de coral y conchas).

Muchas playas y frentes costeros constan de materiales de cuarzo. Los minerales pesados se encuentran algunas veces como depósitos concentrados en la playa o frente costero y pueden ser erosionados y ser expuestos durante las tormentas.

Algunas playas en zonas volcánicas constan de materiales provenientes de fuentes volcánicas. Ejemplos bien conocidos son las playas de arena negra de Hawai e Islandia.

Las playas también pueden constar de materiales provenientes de naturaleza biogénica como carbonatos (arenas blancas) provenientes de arrecifes de coral. Los carbonatos (como los oolitos) también se pueden formar por precipitación directa proveniente del agua marina saturada con carbonato de calcio.

Las conchas y fragmentos de conchas se encuentran en muchas playas, especialmente en los trópicos. Generalmente, se concentran en la playa por la acción del viento y el oleaje.

Numerosos organismos pueden transformar las partículas de sedimento en materiales más sólidos, que producen estratos protectores de fondo resistentes a la erosión. Las playas que anteriormente constaban de materiales sueltos han cambiado a materiales rocosos resistentes por medio de una cementación.

1.5. Fuerzas hidrodinámicas

La evolución costera es un producto –no lineal, tridimensional y dependiente del tiempo–, de los procesos morfodinámicos que ocurren en respuesta a condiciones externas (en parte estocástico) hidrodinámicas y aerodinámicas.

Las fuerzas hidrodinámicas más básicas en la zona costera son:

- Rotura de oleaje y corrientes inducidas por el oleaje en la zona de surf, con una variación a través de las estaciones; bajo condiciones de calma la zona de surf se puede reducir a una zona estrecha de precipitación en la playa, pero bajo condiciones de tormenta se puede extender lejos de la costa a profundidades de 8 a 10 m, donde comienza un rompimiento inicial de las olas.
- Oleaje irregular sin rotura combinado con la marea y las corrientes inducidas por el viento en el frente costero de la zona de surf.

La zona cercana a la costa con profundidades arriba de los 10 m es una zona controlada por la fricción con una mezcla turbulenta del agua; el frente costero más bajo con profundidades mayores a 20 m es una zona geostrófica controlada por la marea y flujos densos y afectada por las fuerzas de Coriolis.

El oleaje en las zonas de surf y en el frente costero se caracterizan por los diferentes tipos de movimientos en varios tipos de escalas. Los movimientos de oleaje básicos asociados con esas escalas son olas generadas por viento y mareas.

Las olas inducidas por el viento con periodos típicos de 5 a 15 segundos que se propagan en aguas someras son afectadas por reflexión, refracción, someramiento y fricción de fondo y finalmente por la rotura del oleaje en la zona de surf. El ambiente del oleaje se caracteriza generalmente como: oleaje de baja energía, si la altura de ola significativa media anual en el borde de la zona de surf (profundidad de 6 m) es $H_s < 0.6m$, oleaje de energía moderada, si H_s está entre 0.6 y 1.5 m y oleaje de gran energía, si $H_s > 1.5m$.

Las olas pequeñas incidentes acarrear un pequeño flujo de masa en la cresta hacia la costa, incrementándose en magnitud a través de la zona de rompimiento y finalmente acumulándose en la playa. La configuración de los gradientes de la sección transversal de la costa generan una corriente de retorno cercana al fondo (corriente subyacente), que equilibra el flujo de masa en tierra. Las olas incidentes en forma oblicua también generan una corriente media a lo largo de la costa. La variabilidad a lo largo de la costa de las barras rompientes pueden dar lugar a la generación de corrientes que dan hacia el mar, conocidas como corrientes tipo rip o corrientes de retorno, las cuales son alimentadas por las corrientes que circulan a lo largo de la costa. La combinación de las corrientes superficiales que van hacia tierra (transporte de masa) y las corrientes tipo rip que van hacia el mar se pueden interpretar como células horizontales de circulación cerradas, que se mueven gradualmente a lo largo de la costa.

Los movimientos de olas de baja frecuencia con periodos en el rango de 15 a 100 segundos están presentes fuera y dentro de la zona de surf, especialmente durante las condiciones de clima agitado. Su importancia se incrementa a través de la zona de surf como resultado de la rotura del oleaje. Los modos de propagación del oleaje a lo largo de la costa y transversal a esta han sido identificados en la zona costera. Los modos transversales a la costa se asocian con las olas largas forzadas las cuales se aglutinan a grupos de olas pequeños o a variaciones de largo periodo en las zonas rompientes de olas irregulares. Los modos a lo largo de la costa se conocen como olas de borde.

Las olas de marea tienen periodos típicos en el rango de 12 a 24 horas; el movimiento de la marea se relaciona con la interacción gravitacional entre el Sol, la Tierra y la Luna. Las olas de marea en los litorales se originan a partir de las fuerzas de marea generadas en los océanos profundos. Los fenómenos como la reflexión, la refracción, la fricción de fondo y el someramiento

afectan las olas de marea durante la propagación a la costa lo cual resulta en variaciones del rango de las mareas y en la generación de sistemas amfidrómicos. El oleaje se amortigua por la fricción de fondo y por la deformación de las olas debido a las diferencias en las velocidades de propagación de las crestas y los valles llegan a ser más importantes en el frente costero somero conduciendo a una asimetría y diferencias de fase entre la marea vertical (elevación superficial) y la marea horizontal (corriente). Las fuerzas geostróficas relacionadas con la rotación de la Tierra (efecto de Coriolis) son de gran importancia en áreas lejanas de la costa (frente costero inferior, profundidades mayores a 20 m). En la zona cercana a la costa las corrientes de marea tienden a ser paralelas a la costa. Las corrientes residuales generalmente son pequeñas (del orden de 0.1 m/s) y se pueden acentuar por las corrientes inducidas por viento, por las corrientes inducidas por densidad y por los efectos topográficos locales. Las mareas se clasifican como micro-mareas, si el rango de la marea (TR) < 2 m, meso-mareas para TR entre 2 y 4 m y macro-mareas para TR > 4 m.

Además de los efectos de las mareas, también hay circulaciones en el frente costero de gran escala, conducidas por fuerzas inducidas por viento y densidad con fricción de fondo como el principal parámetro de control.

La acción del viento en una cierta dirección inducirá corrientes en dicha dirección y en algunas otras debido a la fuerza de Coriolis lo que resulta en un giro de tipo espiral del vector velocidad a diferentes elevaciones por encima del fondo; se le conoce como espiral Ekman. En aguas someras cercanas a la costa las corrientes responden rápidamente a las presiones del viento y tienden a alinearse con la dirección de éste. La componente normal a la costa de la presión del viento causa una configuración (o desconfiguración) de la superficie del agua en la costa. Las grandes fuerzas en tierra inducidas por el viento y el oleaje producen oleadas de tormenta, las cuales pueden ser de una altura de 3 a 4 m en cuencas marinas marginales. En combinación con la marea de primavera esto resulta en una erosión masiva de la línea costera del orden de 100m^3 por unidad de longitud de playa en aproximadamente 10 horas. Las grandes corrientes de fondo que van hacia el mar son generadas por los gradientes de la oleada de tormenta que arrastran los sedimentos a aguas más profundas. Los vientos paralelos a la orilla y las corrientes asociadas a lo largo de la costa también inducen corrientes normales a la costa por la acción de las fuerzas de Coriolis produciendo una configuración o desconfiguración de la superficie del agua próxima a la orilla y las correspondientes corrientes de fondo normales a la costa, dependiendo de la dirección del viento.

Las corrientes inducidas por densidad se relacionan con gradientes de densidad espacial de la mezcla de fluido-sedimento debido a las variaciones de salinidad, temperatura y/o concentración de sedimentos. Generalmente, la densidad de fluido relacionado con las variaciones de salinidad se reduce en dirección hacia tierra como resultado de la desembocadura de los ríos (agua dulce). El efecto de gradiente-densidad es más pronunciado en la región adyacente al fondo produciendo grandes velocidades relativas en tierra cercanas al fondo durante la crecida de la marea y pequeñas velocidades relativas lejanas de la costa durante la bajada de la marea. Como consecuencia se genera la corriente residual adyacente al fondo (hacia tierra), la cual puede causar un transporte de sedimentos neto hacia tierra.

1.6. Transporte de sedimentos

La arena puede ser transportada por viento –oleaje, marea– y por corrientes conducidas por densidad (transporte relacionado con corrientes), por el movimiento oscilatorio del agua (transporte relacionado con el agua) debido a la deformación de pequeñas olas bajo la influencia de la reducción de la profundidad del agua (asimetría de onda) o por una combinación de corrientes y pequeñas olas. Las olas de baja frecuencia que interactúan con olas pequeñas pueden contribuir también al transporte de sedimentos. En la zona de surf de playas arenosas el

transporte generalmente es dominado por las olas a través de la rotura del oleaje y las corrientes inducidas por oleaje a lo largo de la costa y normales a ésta. El transporte a lo largo de la costa en la zona de surf también se conoce como transporte litoral. Los procesos de rotura además de los movimientos oscilatorios del agua adyacente al fondo pueden traer grandes cantidades relativas de arena en suspensión, la cual puede ser transportada como aquella carga suspendida por las corrientes netas tales como marea y corrientes conducidas por oleaje. El movimiento de la arena por viento en la zona de dunas es un proceso básico de transporte.

En aguas más profundas fuera de la zona de rotura (zona de surf) el proceso de transporte es generalmente concentrado en un estrato cercano al fondo marino y se lleva a cabo principalmente como transporte de fondo en una interacción específica con formas pequeñas de fondo (rizos) y grandes estructuras de fondo (dunas, barras). El transporte de fondo domina en zonas donde las corrientes medias son relativamente débiles en comparación con el movimiento del oleaje. La suspensión de sedimentos puede ser causada por los vórtices relacionados con los rizos. El transporte en suspensión se incrementará de forma importante con el aumento de la resistencia de las corrientes medias conducidas por la marea –y el viento– debido a la capacidad de mezcla relacionada con la turbulencia de la corriente media (cizallamiento en estrato frontera). Por este mecanismo los sedimentos se mezclan a partir de la capa de la carga del fondo hasta los estratos superiores del flujo.

Las muestras de la playa y del frente costero generalmente muestran subpoblaciones truncadas, las cuales pueden ser interpretadas como indicadores de un cierto modo de transporte: la fracción más fina es transportada en suspensión, la fracción más gruesa es arrastrada en el fondo (grandes rodantes) y las fracciones intermedias se transportan por saltación.

Las playas arenosas abiertas generalmente consisten de materiales relativamente gruesos en lugares donde la energía del oleaje es grande; los materiales más finos son transportados a zonas protegidas (normal y a lo largo de la costa). Las playas protegidas (playas en cavidades) pueden contener sedimentos "ajenos" originarios de fuentes adyacentes a lo largo de la costa, los cuales son atrapados en ambientes de oleaje de energía baja.

A lo largo de las costas limosas los procesos de transporte son más complejos. Hay una fuerte interacción entre el oleaje y el fondo limoso, lo que resulta en una fluidización de los estratos superiores de limo y la atenuación de las olas debido a la energía intercambiante entre el movimiento del oleaje y el fondo limoso. El limo entra a la columna de agua por medio del movimiento oscilatorio del oleaje, cuando la presión aplicada en el fondo excede el valor crítico de la erosión y conduce un sistema de estratos múltiples con concentraciones diluidas cercanas a la superficie y agua y altas concentraciones en un estrato delgado cercano al fondo (capa de fluido limoso). Se dará la sedimentación cuando la presión aplicada en el fondo caiga por debajo del valor crítico para la sedimentación. La sedimentación en condiciones de marea es máxima alrededor de agua de poco movimiento dado que la destrucción de los flóculos generada por las presiones turbulentas es mínima y el desarrollo de flóculos debido al asentamiento diferencial es máxima (los flóculos grandes caen en flóculos pequeños produciendo otros más grandes).

1.7. Características morfológicas a lo largo de las costas

Las características morfológicas de pequeña y gran escala se pueden distinguir en regímenes costeros y se relacionan con procesos de sedimentación y erosión actuando a lo largo de la costa bajo la influencia del oleaje y las corrientes. Las características de pequeña escala son formas de playa tales como playas en cúspide, barras rompientes, canales de retorno, ondas de arena. Las características de gran escala son formas de línea costera como playas en planicie, promontorios, bahías, tomolos, cordones y puntas de arena.

Muchas costas consisten de playas relativamente rectas y planas (con bajo gradiente). Las costas con playas planas pueden diferir notablemente de las costas originalmente sumergidas. La forma más básica de costas es la costa dentada (costa con varias bahías). El ataque del oleaje en una costa dentada dará como resultado una concentración de la energía del oleaje en los promontorios (debido a la refracción) y una reducción de la energía del oleaje en las bahías, lo cual puede conducir a una erosión de los promontorios y a una sedimentación de las bahías, si este tipo de costas constan de materiales erosionables. Las corrientes acelerantes o desacelerantes a lo largo de la costa acentuarán la erosión de los promontorios o la sedimentación en la bahía. Así, los promontorios son recortados y las bahías son llenadas. Este proceso, dominado por el transporte litoral, continuará hasta que la línea costera se componga de una serie de curvas suaves a lo largo de la playa (arcos). Las olas dominantes girarán las playas hasta encarar la dirección del oleaje dominante por medio de un movimiento del sedimento a la parte más baja del arco lo que resultará en una costa de tipo arco (cavidad). Los arcos bulbos pueden observarse a lo largo de los depósitos aluviales de los deltas.

Otros procesos morfológicos a gran escala son las formaciones de cordones barrera y cordones en bocas de bahía, de cordones en promontorios (promontorios con alas), de islas barrera, de salientes, puntas y tombolos (salientes en el mar) en islas lejanas de la costa, estructuras, bancos de arena, etc. La mayoría de estas sedimentaciones a gran escala son móviles, mostrando una migración neta anual o un patrón cíclico de erosión y sedimentación.

La morfología de playas a pequeña escala durante las etapas de acreción es determinada por características como las bermas, barras rompientes, barras intermareas y surcos, los cuales se forman por los procesos de rompiente (run up del oleaje) durante las condiciones de oleaje moderado. Las fluctuaciones del nivel del mar a largo periodo juegan un rol importante en la formación de la berma y los surcos. Las bermas y los surcos también pueden ser formadas por la unión de las barras cercanas a la costa. Las barras rompientes son las más altas (con forma asimétrica) en la zona de rompientes entre la línea de agua baja y la alta. La cresta de la barra rompiente se sitúa cerca del nivel de pleamar y es formada o mantenida por los procesos de rompiente hacia tierra que se dan a partir de la línea de rompientes. Las bermas son terrazas en la playa justo arriba en la parte más alta del nivel de la zona de rompientes del nivel de pleamar y se forman por el proceso de rompientes. Las cordilleras de las playas son surcos lineales aproximadamente paralelos a la línea costera que perduran durante las condiciones de buen tiempo, pero generalmente desaparecen durante las tormentas. Las cordilleras de las playas son características semi-permanentes construidas por el oleaje en, o ligeramente por encima de, el nivel de marea alta en el límite de la zona de rompientes. Las barras rompientes de la submarea cubiertas por los rizos en las zonas de cresta y por los mega rizos en las zonas de valle son las características morfológicas dominantes en la zona de surf. Los rizos pueden ser desbaratados durante las fuertes condiciones de rompimiento del oleaje (tormentas), característica del régimen laminar en fondo plano.

Las barras rompientes con sus crestas paralelas a la línea costera se encuentran en zonas con roturas del oleaje de los tipos decrestamiento y voluta. El mecanismo común básico es la generación de transporte neto de sedimentos hacia tierra relacionado con el oleaje proveniente de la zona de surf y transporte neto de sedimentos hacia la zona de rompientes relacionado con las corrientes que se alejan de la costa.

Los bancos y surcos de arena son las características sedimentarias más grandes (con un ancho del orden de 1 km y una longitud del orden de 10 km) que se pueden encontrar en la zona media y la más baja del frente costero. Su separación interlineal paralela es del orden de la anchura. Generalmente, estas características consisten de arena gruesa media y son grandes fuentes de sedimentos. Los bancos y surcos de arena son características bastante estables con las ondas de

arena más pequeñas y los rizos migrando sobre la superficie del fondo a regiones donde las velocidades de la corriente son lo suficientemente grandes para generar un movimiento de las partículas. Los rizos generalmente son el tipo dominante de formas de fondo de pequeña escala en la zona baja y media del frente costero. Los rizos simétricos inducidos por el oleaje y los rizos asimétricos inducidos por las corrientes se pueden generar dependiendo de la fuerza del oleaje y el movimiento de las corrientes. Así como el componente de la corriente gana en fuerza, los rizos llegan a ser más asimétricos y más grandes en altura y longitud (mega rizos), especialmente en el caso de una corriente contraria.

Los bancos limosos son características de sedimentación de submareas que ocurren a lo largo de las costas limosas, produciendo una banda de agua llena de sedimento debido a la acción de las corrientes y las olas. Las aguas turbias están presentes de forma abundante sobre los bancos de fluido limoso, donde las profundidades son más pequeñas y la acción del oleaje puede erosionar los sedimentos.

1.8. Escalas

La zona costera puede ser considerada como un sistema geomórfico consistente de varias subzonas (celdas o compartimientos), cada una con su propia escala espacial y temporal. En cada subzona la morfología se conduce por los movimientos del agua y del sedimento, basada en la entrada de energía proveniente de la llegada del viento, las olas y las corrientes. Los gradientes en el transporte de sedimentos dan como resultados cambios morfológicos, los cuales influyen en el movimiento del agua en un ciclo continuo. Las escalas características morfológicas en la zona costera arenosa fluctúan desde eventos en suspensión, rizos, hasta características de gran escala. La escala temporal de las características morfológicas involucradas generalmente es considerablemente más grande que la del movimiento del agua, lo cual implica que los efectos del movimiento del agua y los cambios morfológicos puedan ser desacoplados (aproximación casi continua).

En un sistema costero dinámico hay un equilibrio casi instantáneo entre los procesos de escalas más pequeñas (formas de fondo como los rizos) y uno de casi equilibrio en escalas más grandes (barras, surcos y bancos), porque estas últimas características están ajustándose continuamente para cambiar las condiciones hidrodinámicas (desarrollo de barras, migración y degeneración).

Básicamente, el comportamiento morfodinámico se puede expresar como:

- Fluctuaciones alrededor de un estado de equilibrio dinámico estable.
- Transición gradual a un estado de equilibrio nuevo.
- Un cambio repentino progresivo a un estado de equilibrio nuevo debido a eventos catastróficos tales como: huracanes, tifones, tsunamis, erupciones volcánicas, (exceso de valores extremos).

Las fluctuaciones son aceptables mientras el sistema se mantenga inalterado; los sistemas resistentes estables muestran pequeñas respuestas a fuerzas externas; los sistemas flexibles pueden ser alterados fácilmente, pero también retornarán rápidamente a un estado de equilibrio. Esto puede verse como una retroalimentación negativa, porque el sistema se está autorregulando como respuestas a las perturbaciones. Los sistemas inestables cambian a un estado de equilibrio nuevo después de la perturbación. Esto se puede ver como una retroalimentación positiva que conduce a un desarrollo y a una ampliación.

Las celdas y los compartimientos se pueden distinguir en la dirección a lo largo y normal a la costa. En la dirección normal a la costa el sistema costero entre la orilla y la zona de inmersión se puede subdividir en las siguientes zonas (celdas):

- Frente costero superior; zona de surf con barras rompientes entre la línea costera y un perfil de -8 m de profundidad con pendientes de fondo medias variando entre 1 a 50 y 1 a 200.
- Frente costero medio; zona con perfiles entre -8 m y -20 m de profundidad con pendientes de fondo medias variando entre 1 a 200 y 1 a 1000; los surcos de arena pueden estar presentes.
- Frente costero bajo; zona con un perfil de -20 m y el fondo con una pendiente media de aproximadamente 1 a 1000 y aún más baja; los surcos y bancos de arena pueden estar presentes.

En las zonas baja y media del frente costero los índices de transporte son relativamente pequeños y por lo tanto el tiempo de respuesta de la morfología es generalmente lento (comportamiento pasivo). En la zona de surf los índices de transporte son relativamente grandes y el tiempo de respuesta de la morfología es más rápido, casi a la escala de los eventos (comportamiento activo).

En la dirección a lo largo de la costa se pueden distinguir las siguientes zonas (celdas):

- Micro celdas con cambios fluctuantes a pequeña escala debido a variaciones estocásticas y determinísticas a lo largo de la costa de las cimas de las playas y de las barras de la zona de rompientes (0 a 1 km; 0 a 1 año).
- Meso celdas con cambios cíclicos a meso escala debido al comportamiento cíclico de las características morfológicas tales como los bancos de arena, las ondas de arena y los canales de retorno (1 a 10 km, 1 a 10 años); también puede ocurrir un ajuste a meso escala de la línea costera a un equilibrio nuevo (1 a 10 km, 1 a 10 años).
- Celdas litorales a gran escala separadas por ensenadas, promontorios y estructuras con cambios lentos de gran escala debido a fenómenos naturales (mareas migrantes, bahías en espiral formadas bajo condiciones de swell oblicuo, persistente y celdas cordones mantenidas por el choque de olas y corrientes); también puede ocurrir un ajuste a gran escala a un nuevo equilibrio debido a estructuras artificiales (10 a 100 km, 10 a 100 años).

La mayoría de las celdas están abiertas a la entrada de energía, pero algunas celdas están relativamente cerradas a intercambios de sedimentos a corto plazo. Por grandes periodos debe haber, sin embargo, un pequeño pero continuo intercambio de sedimentos entre las celdas, así como los sedimentos se transfieren gradualmente de sistemas terrestres a sistemas marinos.

1.9. Erosión de playas

Las playas se erosionan cuando pierden más sedimento, a lo largo de la costa o fuera de ella, de lo que reciben. Los procesos que conducen a la erosión de las playas incluyen la acción destructiva del oleaje durante las tormentas, los efectos de las mareas de tormenta y la reducción drástica de los sedimentos de la playa por erosión y selección. En la *figura 1.3* (Bird 1996) se muestra el proceso de aporte y pérdida de sedimentos en la playa.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

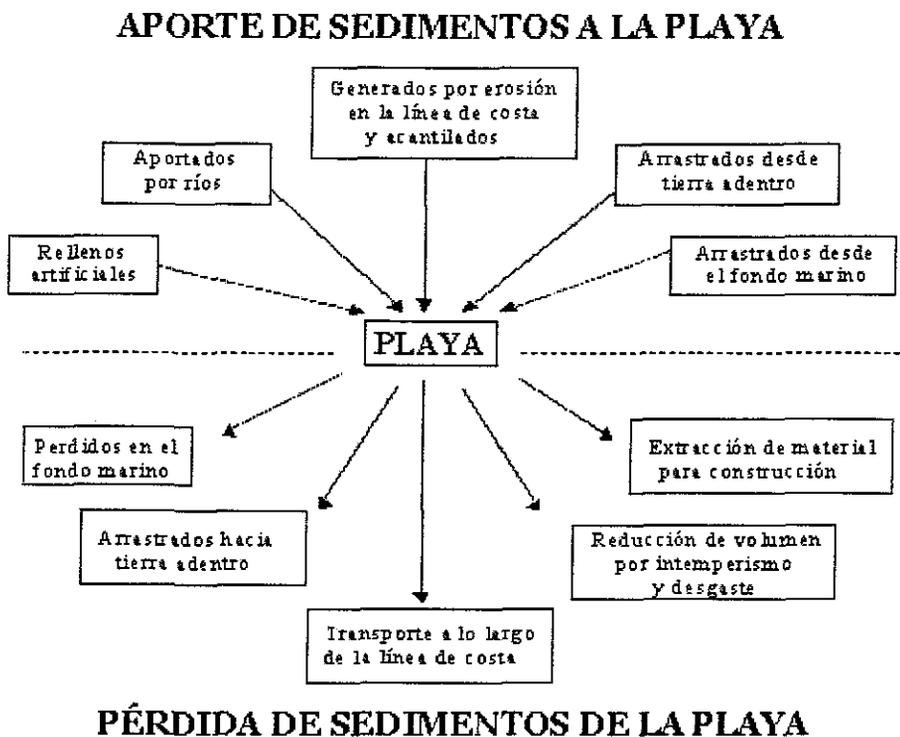


Figura 1.3. Aporte y pérdida de sedimentos en la playa.

Las causas por las que una playa puede erosionarse son de tipo natural o provocadas por el hombre.

Las causas naturales son:

- Incremento en el nivel del mar. En virtud de que en muchas partes del mundo está cambiando el nivel del mar, se produce entonces una recesión de la línea de costa.
- Variaciones en el aporte de sedimentos a la zona litoral. Los cambios que ocurren a nivel mundial en lo relativo a patrones de clima, provocan sequías, lo cual tendrá como consecuencia menor aporte de sedimentos de los ríos al mar.
- Oleaje extremal (de tormenta). Las olas con relación H/L grandes producirán transporte hacia el mar, creando las erosiones de la berma.
- Relleno en la playa provocada por olas y ondas pulsantes. El fenómeno del relleno en la playa se refiere a que el material playero, por efecto de las olas de tormenta o pulsantes, brinca hacia la parte posterior de ella, depositándolo en esta zona.
- Erosión eólica. Este fenómeno consiste en el transporte de la arena de la playa hasta la parte posterior en donde generalmente se acumula formando dunas, que en algunos casos pueden tener alturas muy considerables.
- Transporte longitudinal. La erosión ocurre cuando la cantidad de transporte longitudinal excede a los aportes naturales de sedimento.
- Selección del material playero. La acción del oleaje sobre una playa produce una selección y redistribución de los tamaños de las partículas de arena, ya que generalmente se pierden los granos finos haciendo con esto que varíe la pendiente de la playa.

Las causas provocadas por el hombre son:

- Hundimiento del terreno por remoción de recursos superficiales. Tal es el caso por ejemplo de extraer del subsuelo gas, petróleo, carbón o agua, lo cual origina en las zonas de influencia, si son costeras, el hundimiento general de ellas.
- Captación del acarreo natural. Esta es una de las principales causas de erosión en las playas, ya que el hombre realiza obras para proteger localmente una zona y el efecto de dicha protección influye en las zonas circunvecinas al alterar el equilibrio del transporte litoral que se tiene.
- Reducción de aportes de sedimentos a la zona litoral. En algunas ocasiones, las obras que se construyen aguas arriba de los ríos, como es el caso de las presas, retienen los azolves que normalmente son llevados hasta la desembocadura. De esta manera, al existir menos material para ser acarreado por el oleaje en la zona litoral, la energía del oleaje toma el material de la playa misma, originando las erosiones sobre ella.
- Concentración de energía sobre la playa. Cuando se construyen obras marítimas verticales y paralelas a la playa, se produce el fenómeno de reflexión del oleaje que a su vez origina erosiones al pie de la estructura.
- Incremento en la variación del nivel del mar. En el caso de realizar obras de dragado muy importantes en una boca o en una bahía, al profundizar estas zonas, la penetración de la marea astronómica puede sufrir modificaciones y el oleaje podrá incidir con mayores alturas, provocando así erosiones en la interfaz tierra-agua.
- Cambios en las protecciones naturales. El realizar dragados de arrecifes artificiales o barras, induce a que el oleaje de mayor altura pueda hacer sentir sus efectos sobre la playa.
- Remoción de arena de las playas. En algunas ocasiones y dado que no existen bancos de material para arena, se toma este material de la playa, con la consecuente pérdida de material de abastecimiento al transporte litoral.

Se debe hacer una distinción entre la erosión transitoria de la berma de una playa durante una tormenta y la erosión de largo plazo debido a la falta de abastecimiento de arena. La remoción repetitiva de material de la playa por el oleaje en una tormenta tiene que aceptarse como un hecho natural. Esta excesiva entrada de energía, generalmente por un corto periodo de un día o dos, requiere un entendimiento físico, de cómo en la naturaleza se van construyendo barras para disipar la entrada de olas altas. Posteriormente, después de unos cuantos días, se continua con el desmantelamiento natural de la barra y la renovación de la berma de la playa que estará lista para el siguiente evento extremo. Si la barra aún no se ha removido completamente debido a la falta de marejada, entonces habrá una remoción mediante el rompimiento de olas. No se puede brindar una mejor defensa para esos eventos transitorios de erosión que la playa misma.

CAPÍTULO 2
REVESTIMIENTOS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.1. Introducción

La interfase de la tierra y el agua siempre ha jugado un rol importante en las actividades humanas; los asentamientos generalmente son localizados en las costas, en las orillas o deltas de ríos. Cuando la interfase consiste de roca, la erosión generalmente es despreciable, pero los materiales más finos pueden hacer que sea necesaria una protección. En una situación natural, la interfase se mueve libremente con la erosión y la sedimentación. En realidad nada es inapropiado respecto a la erosión, a menos que ciertos intereses sean amenazados. La erosión es algo así como la mala hierba: mientras que esta no dañe algún cultivo o otra vegetación, no se necesita ni se quiere alguna acción. Siempre debe haber un balance entre el esfuerzo de proteger contra la erosión y del daño que de otra forma ocurriría.

Además de la erosión como un fenómeno natural, la naturaleza en sí puede ofrecer cierta protección. Los arrecifes de coral son excelentes reductores del oleaje. La vegetación ofrece también protección: por ejemplo los manglares a lo largo de las costas reducen las velocidades de las corrientes y el oleaje y conserva el sedimento en su lugar. La remoción de estas protecciones naturales generalmente marca el inicio de un gran problema de erosión y por consiguiente debe ser evitado en lo posible. Así como primera medida contra la erosión, debe conservarse la vegetación en la interfase. Finalmente, se debe tener en mente que una vez que un sitio, que haya sido erosionado a gran escala, esté protegido a lo largo de una costa, no induzca una erosión extra la parte protegida y conduzca a una protección total de toda la costa.

Los problemas en ingeniería de costas pueden clasificarse en cuatro categorías: estabilización de la línea de costa, protección en la parte posterior de la playa (de olas y mareas), estabilización de ensenadas y protección de puertos. Un problema costero puede caer en más de una categoría. Una vez clasificado, hay varias soluciones disponibles para el ingeniero en costas. Algunas son estructurales; sin embargo, se pueden emplear otras técnicas tales como zonificación y administración del uso de suelos.

En la *tabla 2.1* se indican aquellas estructuras o trabajos de protección que se adaptan a las cuatro clasificaciones de problemas generales y los factores que deben considerarse en el análisis de los problemas. Las consideraciones hidráulicas incluyen viento, olas, corrientes, mareas, oleadas de tormenta y la batimetría básica del lugar. Las consideraciones de sedimentación incluyen los materiales del litoral y los procesos (i.e., dirección del movimiento; índice de transporte, neto y bruto; y la clasificación y características de los sedimentos) y cambios en el alineamiento de la costa. Las consideraciones de navegación incluyen los datos de diseño de embarcaciones y barcos, líneas de tránsito, profundidades de canal, anchura, longitud y alineación. Las consideraciones en las estructuras de control incluyen la selección de los trabajos de protección, tipo de evaluación, uso, efectividad, economía e impacto ambiental. Al seleccionar la forma, tamaño y localización de los trabajos de protección costera, el objetivo no debe ser solamente el diseño y el trabajo ingenieril con los cuales se cumplirá los resultados deseados más económicos, sino también considerar los efectos en las zonas adyacentes. La evaluación económica incluye los costos de mantenimiento e intereses y la amortización del primer desembolso. Si cualquier plan considerado diera como resultado un acrecentamiento del problema extendiendo sus efectos a un tramo más grande la costa o que evitara tal acrecentamiento, el efecto económico de cada una de tales consecuencias deber ser evaluado. Un criterio conveniente para comparar varios proyectos sobre una base económica es el costo total por año por metro de costa protegida.

Tabla 2.1
CLASIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE INGENIERÍA DE COSTAS

| | | | |
|--|--|--|--|
| ESTABILIZACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA | PROTECCIÓN EN LA PARTE POSTERIOR DE LA PLAYA | ESTABILIZACIÓN DE ENSENADAS | PROTECCIÓN DE PUERTOS |
| DIQUES MARINOS | DIQUES MARINOS | DRAGADO | ESCOLLERAS |
| MUROS VERTICALES | PROTECCIÓN DE ARENAS (CON O SIN RESTAURACIÓN) | ESCOLLERAS | ROMPEOLAS CONECTADOS A LA COSTA |
| REVESTIMIENTOS | DUNAS DE ARENA | NAVEGACIÓN | ROMPEOLAS DESCONECTADOS DE LA COSTA |
| REABASTECIMIENTO ARTIFICIAL DE PLAYAS (CON O SIN RESTAURACIÓN) | REVESTIMIENTOS | CONSIDERACIONES: HIDRÁULICAS SEDIMENTACIÓN ESTRUCTURAS DE CONTROL LEGALES AMBIENTALES ECONÓMICAS | CONSIDERACIONES: HIDRÁULICAS SEDIMENTACIÓN ESTRUCTURAS DE CONTROL LEGALES AMBIENTALES ECONÓMICAS |
| ESPIGONES | MUROS VERTICALES | CIRCULACIÓN EN BAHÍAS | |
| ARENA BORDEANDO EN ENSENADAS | CONSIDERACIONES: HIDRÁULICAS SEDIMENTACIÓN ESTRUCTURAS DE CONTROL LEGALES AMBIENTALES ECONÓMICAS | CONSIDERACIONES: HIDRÁULICAS SEDIMENTACIÓN ESTRUCTURAS DE CONTROL LEGALES AMBIENTALES ECONÓMICAS | |
| CONSIDERACIONES: HIDRÁULICAS SEDIMENTACIÓN ESTRUCTURAS DE CONTROL LEGALES AMBIENTALES ECONÓMICAS | | | |

Los efectos en zonas adyacentes son considerados al grado de proporcionar la protección requerida con la menor cantidad de disturbio al uso actual y futuro del suelo, a los factores ambientales y a la antiestética del lugar. Se deben considerar la forma, textura y color de los materiales seleccionados para el diseño además de como es usado el material. Un adecuado análisis de planeación también requiere la consideración de las consecuencias legales y sociales donde se prevea que las medidas de protección costera den como resultado efectos significantes en la apariencia física o ecológica del entorno.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Dentro de las alternativas en la protección costera, se describió la solución estructural conocida como revestimientos.

2.2. Revestimientos

2.2.1. Definición

Un revestimiento es una forma de protección colocada en una superficie inclinada o en una estructura para estabilizar y proteger contra la erosión provocada por el oleaje o las corrientes

2.2.2. Funciones

Los revestimientos son estructuras colocadas paralelas o casi paralelas a la línea de costa, a fin de separar una zona de tierra de una zona marina. El propósito principal de un revestimiento es proteger el terreno y las propiedades de las zonas elevadas de los daños del oleaje. A diferencia de los muros marinos los revestimientos no tienen auto soporte y dependen del suelo subyacente a ellos para su soporte. Los revestimientos reflejan las olas arriba de sus superficies inclinadas y disipan la energía del oleaje sobre sus frentes. Su integridad funcional depende de la estabilidad estructural del acorazamiento primario. El revestimiento puede construirse sobre la playa existente o sobre el talud de un banco si este es estable. Un talud inestable debe ser evaluado adecuadamente antes de la colocación de varias capas de material del revestimiento. Las superficies en talud, especialmente de material rugoso, no reflejan las olas de la misma forma como las superficies verticales de las mamparas y muros marinos; pero un revestimiento puede causar daños a la playa frente a la estructura debido a la reflexión del oleaje, a menos de que el revestimiento se localice tan alto en la playa que este solo sea expuesto al oleaje durante inusuales oleadas extremas de tormenta.

2.2.3. Limitaciones

Estas estructuras ofrecen protección solo al terreno que se encuentra inmediatamente detrás de ellas y ninguno a áreas adyacentes costa bajo o costa arriba. En una costa erosionada, la recesión de la línea costera circunvecina continuará y se acelerará en los alrededores del revestimiento por la reflexión del oleaje proveniente de la estructura. Si las playas vecinas se están abasteciendo con arena erosionada proveniente del área que va a ser protegida por un revestimiento, estas mismas playas experimentarán un incremento en la erosión como resultado de la pérdida de la fuente de abastecimiento. El revestimiento refleja la energía del oleaje, pero a un menor grado que las estructuras verticales. Esta reflexión del oleaje podría incrementar la altura de las olas, el run up y el rebase del oleaje, y la socavación del área inmediatamente enfrente del revestimiento. Se pueden requerir de estructuras adicionales si se va a retener una playa adyacente al revestimiento.

2.2.4. Clasificación

Las tres principales clasificaciones (*figura 2.1*) son las siguientes:

- Diques de arcilla angostos—defensas costeras o diques para crecientes realizados por el hombre.

- Defensa amplia de arena o cordilleras de guijarros—probablemente son características naturales, pero pueden también ser realizadas por el hombre.
- Protecciones en farallones—formado de material importado o de material reclasificado en el sitio.

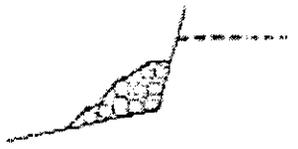
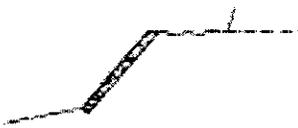
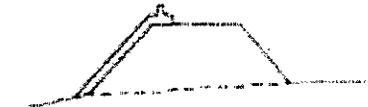
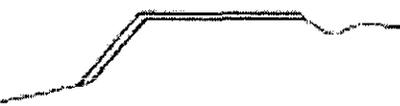
| Dique angosto (con núcleo de arcilla) | Defensa amplia (con núcleo de arena o guijarros) | Protección en farallones |
|--|---|---|
|  <p>Dique sin protección</p> |  <p>Duna de arena o cordillera de guijarros</p> |  <p>Protección en la base</p> |
|  <p>Dique revestido</p> |  <p>Revestimiento en la duna o en la cordillera</p> |  <p>Revestimiento en la base</p> |
|  <p>Dique revestido y muro en la cresta</p> |  <p>Revestimiento y muro en la cresta</p> |  <p>Revestimiento con muro en la cresta</p> |
|  <p>Dique revestido y cresta protegida</p> |  <p>Revestimiento y cresta pavimentada</p> |  <p>Revestimiento con plataforma</p> |
|  <p>Dique revestido, cresta protegida y muro en la cresta</p> |  <p>Revestimiento, cresta pavimentada y muro en la cresta</p> |  <p>Revestimiento plataforma y muro en la cresta</p> |

Figura 2.1. Clasificación de revestimientos.

2.2.5. Aspectos estructurales

Un revestimiento consiste de tres componentes. El componente primario, el cual determina las características de los otros dos, es la capa de acorazamiento. Esta debe ser estable bajo las fuerzas del oleaje. El segundo componente es la capa filtro la cual brinda un soporte a la coraza contra los asentamientos, proporciona el drenado del agua subterránea a través de la estructura y previene que el suelo subyacente sea deslavado a través del acorazamiento por la acción de las olas o la infiltración del agua subterránea. El tercer componente, la protección al pie o protección local, previene el asentamiento o remoción del extremo del revestimiento que da hacia el mar. En la figura 2.2 se observa la sección transversal de un revestimiento tipo.



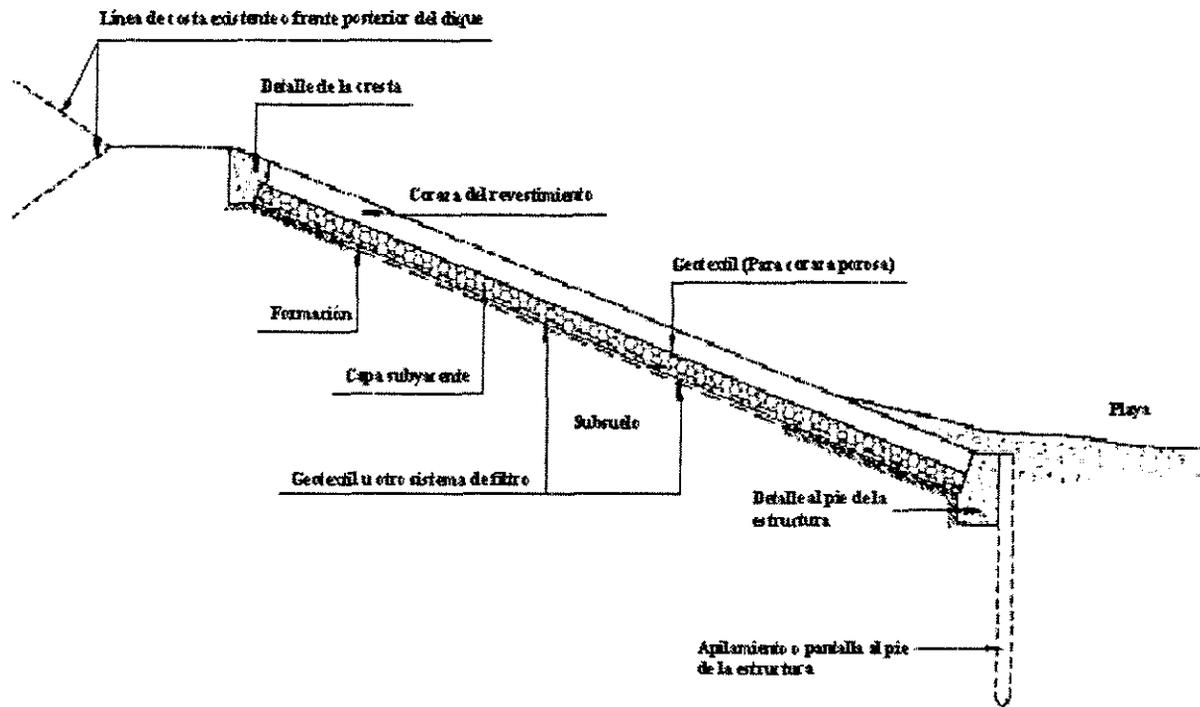


Figura 2.2. Sección transversal de un revestimiento tipo.

2.2.5.1. Capa de acorazamiento

La capa de acorazamiento mantiene su posición bajo la acción del oleaje debido a su propio peso y, si la coraza consiste de piezas individuales, al engranaje entre sus unidades. La coraza puede ser clasificada como flexible, semirígida o rígida.

La coraza flexible mantiene sus cualidades protectoras cuando la estructura es severamente deformada, tal es el caso cuando el suelo subyacente se asienta o la socavación causa que el extremo al pie del revestimiento se hunda. Los enrocamientos uniformes y los gaviones son ejemplos primarios de la coraza flexible (figura 2.3 y 2.4, respectivamente).

La coraza semirígida puede tolerar cierta distorsión, pero las piezas de la coraza pueden ser removidas si son desplazadas tan lejos como para permanecer entrelazadas a las piezas circundantes. Un ejemplo de este tipo de corazas son los revestimientos con bloques de concreto entrelazados (figura 2.5). Otros diseños de empalme, los cuales incrementan el engranaje mecánico entre bloques, también incrementan la resistencia a las fuerzas del oleaje pero disminuyen la flexibilidad del revestimiento.

Las estructuras rígidas se pueden dañar y fallar completamente si están sujetas a diferentes asentamientos o a un daño del soporte por el suelo subyacente. Ejemplos de este tipo de estructuras son los revestimientos con colchonetas o bultos de material sintético rellenos con grout y reforzados entre sí con varillas (figura 2.6).

El talud de la estructura depende del tipo de coraza usada. Los gaviones y sacos pueden ser apilados relativamente en pendiente, pero los tipos construidos en pendientes no deben ser más

pronunciados que 1 vertical sobre 2 horizontal. Para estas estructuras el banco natural, o cualquier material requerido de relleno, debe ser graduado y compactado para brindar una base adecuada (ver figura 2.5).

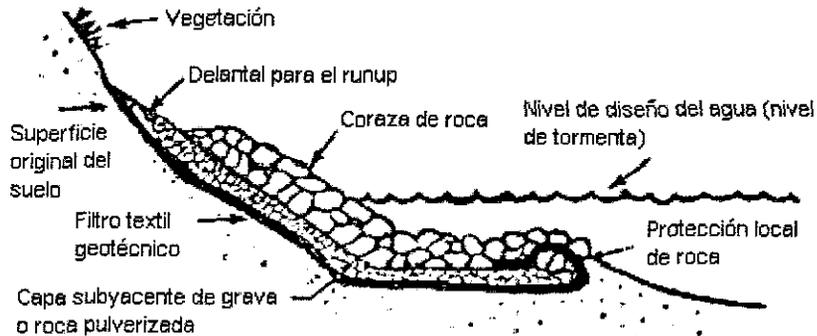


Figura 2.3. Revestimiento de roca cantera.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

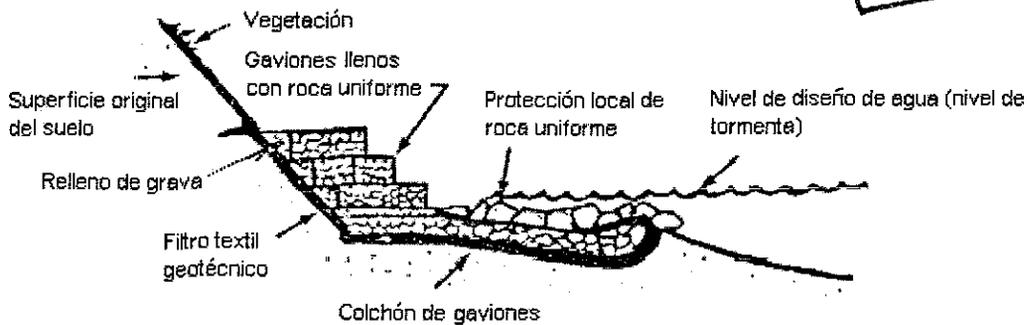


Figura 2.4. Revestimiento de gaviones.

2.2.5.2. Capa filtro

Una capa filtro brinda un adecuado drenaje cuando es necesario mantener el talud de la base. Si el revestimiento atrapa agua subterránea, esta puede fluir a la interfase entre el revestimiento y el suelo subyacente, deslavando el suelo abajo del banco hasta formar huecos y montículos. Si el agua subterránea puede drenar a través del revestimiento, y se permite al suelo fluir con ella, ocurre el fenómeno de tubificación y también forma agujeros en el banco.

La capa de filtro más simple que se pueda usar es el filtro textil geotécnico. Aunque el filtro textil impedirá que los componentes individuales de un revestimiento se asienten de forma independiente, este actúa básicamente como un filtro, y se debe escoger cuidadosamente a fin de que brinde el drenaje necesario mientras retiene el tipo de suelo en el sitio del revestimiento. Las figuras 2.4 y 2.6 muestran el uso del textil como una capa filtro bajo los gaviones y los bultos.

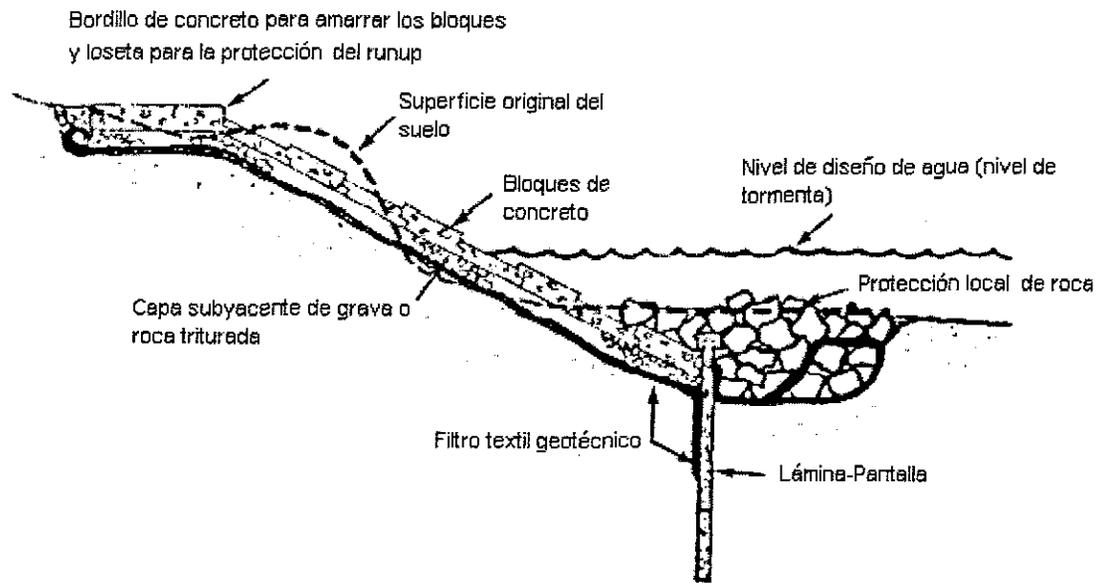


Figura 2.5. Revestimiento de bloques de concreto.

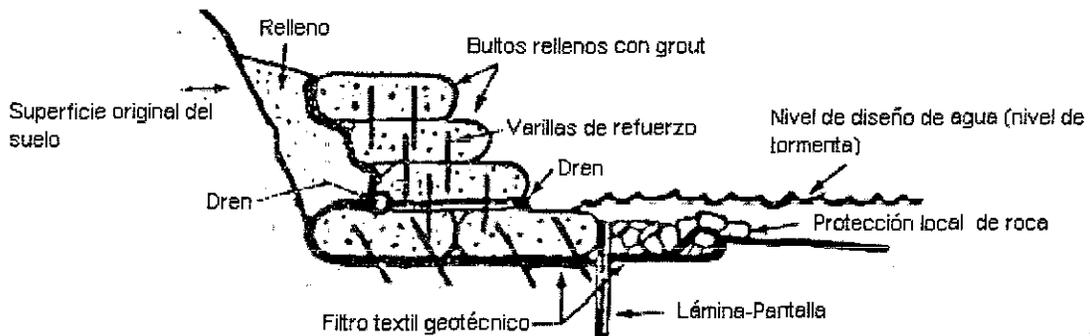


Figura 2.6. Revestimiento de bultos rellenos de grout.

Un filtro más complejo usa una capa de grava o roca de cantera pulverizado sobre el filtro textil para proteger el mismo textil o facilitar la construcción. Los extremos angulares de la roca masiva puede perforar el textil, a menos de que la capa de grava o roca triturada se use para proteger el textil distribuyendo equitativamente la carga de la coraza de roca (ver figura 2.3). Esta capa intermedia o subyacente también contribuirá al engranaje de la hilada final de la roca. Los revestimientos de bloques deben construirse sobre taludes suaves para permitir el correcto alineamiento de las juntas. Si es difícil de darle la pendiente al material del banco, se puede colocar una capa de grava sobre el filtro textil y extenderla hasta lograr los requerimientos de pendiente del diseño. En algunos casos puede ser económico reemplazar el filtro textil con una capa de arena gruesa suficiente para ser retenida por la capa superior de grava o la coraza, y aún lo suficientemente fina para retener el suelo natural o el relleno subyacente. Los filtros geotextiles y minerales son diseñados por considerar los tamaños del suelo retenido, así como también el tamaño de las aberturas en la roca uniforme que retiene los materiales del filtro.

2.2.5.3. Protección local

A menos que la protección local de un revestimiento pueda ser unida a la roca subyacente, las olas pueden socavar la parte frontal de la protección local y se puede extender bajo el revestimiento si no se protege la misma protección. Si no se diseñan medidas adecuadas de drenaje en las corazas de baja permeabilidad, el agua atrapada del revestimiento fluirá hacia el lado del mar bajo la protección local, erosionando posiblemente el suelo. La protección típica (ver *figuras 2.3 a 2.6*) consiste de una capa de roca uniforme, lo suficientemente grande para resistir el movimiento de las fuerzas del oleaje, con material granular y/o textil geotécnico con el cual previene que el suelo sea deslavado a través de los vacíos en la roca uniforme. Si el revestimiento se construye sobre un suelo suave o arenoso, se debe colocar una lámina-pantalla lo suficientemente profunda para proteger el revestimiento contra la socavación ocasionada por el oleaje e impedir que el agua subterránea fluya más allá de la protección local. También puede ser necesario un pedraplén o delantal en combinación con la lámina-pantalla, dependiendo de las condiciones del suelo y del oleaje (ver *figuras 2.5 y 2.6*).

La protección local también varía con la estabilidad, la permeabilidad y las propiedades de disipación del oleaje de la coraza usada. Los delantales de los revestimientos de roca uniforme y gaviones pueden tener algunas ampliaciones hacia el mar (ver *figuras 2.3 y 2.4*). El direccionamiento de los bloques, en los revestimientos de bloques, se debe colocar contra las pantallas para asegurar una adecuada alineación de las juntas así como prevenir la socavación de la protección local (ver *figura 2.5*). Las estructuras acorazadas con bloques o losas, o con textiles llenos con grout, requerirán protecciones locales más elaboradas.

2.2.5.4. Otras medidas de protección

A menos que se tomen otras precauciones de diseño, la parte del revestimiento que da hacia la playa puede erosionarse por el flujo del agua subterránea, el rebase del oleaje o flanqueo de sus costados. El agua subterránea que fluye fuera del banco por encima del revestimiento se puede controlar instalando adecuadas estructuras de drenaje en el pie y dentro del banco. El rebase puede erosionar el área detrás del revestimiento, invalidando la función de la estructura; puede remover el suelo que soporta la cresta del revestimiento, conduciendo a un daño provocado por las olas; y puede incrementar el volumen de agua en el suelo debajo de la estructura, contribuyendo a problemas de drenaje. Los efectos del rebase pueden estar limitados por la elección de la altura de diseño que exceda la altura de run up esperado; o, acorazando el banco encima del revestimiento (ver *figuras 2.3 y 2.5*). El flanqueo ocurre cuando la erosión de las playas adyacentes al revestimiento avanza hacia el área que da hacia tierra del revestimiento, conduciendo a una destrucción progresiva del revestimiento desde sus extremos hasta la mitad. El flanqueo se puede prevenir amarrando cada extremo a estructuras de protección adyacentes, o extendiendo cada extremo de vuelta al banco a una distancia suficiente.

2.2.6. Materiales de la coraza

La roca uniforme angular (roca cantera) es el material preferido para la coraza del revestimiento. La roca uniforme es uno de los materiales más durables usado en estructuras costeras. Las corazas de roca uniforme se reparan fácilmente; pueden ser uniformes, ajustándose a un estrecho rango de tamaño; o graduadas en un amplio rango. Los materiales de construcción (fragmentos), tales como ladrillos rotos, restos de concreto y los bloques de concreto, normalmente no pueden brindar las características deseadas de resistencia al oleaje requeridas

para la coraza del revestimiento; sin embargo, algunas veces son usados como protección de emergencia hasta que se puedan tomar medidas más permanentes.

Puesto que los gaviones se llenan con rocas uniformes grandes, se aproximan a la rugosidad de las mismas. Se pueden llenar con rocas más pequeñas y más redondeadas que las rocas grandes y uniformes. Esto hace de los gaviones sean más útiles cuando no hay disponibilidad de rocas grandes. Los gaviones están hechos de alambre galvanizado para uso en agua dulce y alambre galvanizado forrado de plástico para uso en agua salada. La vida de la estructura depende de la integridad de su protección a la corrosión. El forro, y en final instancia el alambre, está sujeto a la abrasión causada por el movimiento de la arena inducido por el oleaje y el movimiento del relleno de roca dentro de los gaviones si está empacado ajustadamente. Los huecos se pueden reparar amarrando con alambre, pero se requiere que se hagan inspecciones periódicas para asegurar que la reparación se haga antes de que el relleno sea dañado.

Los bloques de concreto están disponibles en una variedad de permeabilidades y formas de engranaje, brindando grados diferentes de rugosidad y rigidez de su superficie. Los bloques deben ser hechos de concreto de buena calidad y estar fabricados con cuidado para asegurar la facilidad del engranaje y la colocación correcta durante la construcción. Algunos tipos de bloques pueden pegarse al filtro textil para acelerar la construcción y ayudar en su amarre.

Los textiles sintéticos usados para bultos y colchonetas son suaves, creando problemas de reflexión de oleaje y run up. Son vulnerables a daños por vandalismo, a la exposición a la luz del sol y al impacto de escombros; de este modo al hacer un relleno de material, generalmente grout o concreto para revestimientos permanentes, se brinda toda la integridad estructural. Los contornos redondeados, suaves de los costales crean problemas de engranaje. A menos que se proporcionen varillas de refuerzo o alguna otra forma de engranaje de los bultos, la estabilidad de una estructura con sacos estará limitada por el tamaño individual de los sacos. Puesto que las colchonetas no tienen refuerzos de acero, se pueden romper entre sus intersticios hasta que falle completamente rompiéndose en pequeños bloques que son muy fácilmente movibles.

Las losas de concreto generalmente se construyen con una superficie suave, pero se pueden usar con una forma rugosa. Se debe usar una cubierta de concreto adecuada para prevenir la corrosión del acero de refuerzo. Si el concreto es expuesto a agua salada y/o congelación y deshielos, con una alta calidad de concreto se evitará su astillamiento.

Los materiales más ligeros de la coraza se han usado con éxito en sitios expuestos solo a corrientes y olas muy bajas; pero en costas expuestas a un oleaje más enérgico, su comportamiento no ha sido satisfactorio, o no ha sido estudiado lo suficiente para determinar su aplicabilidad para este uso.

2.2.7. Selección de los materiales de los revestimientos

En el *anexo 1* se presentan diversas alternativas de revestimientos; se da un bosquejo general del revestimiento, los factores a considerar en el diseño y un corte transversal donde se aprecia de forma general su estructura.

A continuación se exponen tres consideraciones generales a tomarse en cuenta para la selección de los materiales de los revestimientos:

1. La roca uniforme permite el drenaje, la disipación de las olas y proporciona un buen hábitat para los organismos marinos. En algunos lugares no es fácil obtener roca de la forma y tamaño adecuados. Los gaviones, los cuales ofrecen algunas de las ventajas de la roca

uniforme, pueden usar roca local más pequeña. Los bloques de concreto contienen vacíos lo que hace deficiente la rugosidad y favorece el funcionamiento de la roca uniforme, que ofrece un mejor drenaje y una disipación del oleaje que los bloques sólidos de superficie altamente suave y reflexiva.

2. La naturaleza, y acceso, de un sitio pueden dictaminar los posibles métodos de construcción y, en tanto, limitar el uso de los materiales. Se puede involucrar el uso de equipo, desde buldózer a palas mecánicas, en la construcción de revestimientos de roca uniforme, bloques, colchonetas rellenas de grout y placas de concreto, cuando no se pueda construir en taludes pronunciados. El filtro textil geotécnico se puede extender a mano, pero es necesario un equipo para su remoción si los textiles están adheridos a bloques. Si los bloques no están adheridos al textil entonces se pueden colocar manualmente, pero se requiere de buena técnica para cuidar que los bloques queden perfectamente alineados y entrelazados. El material usado para el filtro, no importando el tipo, generalmente es difícil de colocar bajo el agua y en condiciones de oleaje. Aunque se pueda usar equipo ligero, los equipos remolcadores pesados simplifican el manejo de la grava y la roca triturada. Si es necesario, se pueden colocar los gaviones vacíos, muy bien amarrados con alambre, y llenarse a mano. El concreto para las losas puede ser transportado al lugar y requerir de equipo para su colocación, por otro lado el grout para los bultos y colchonetas se puede vaciar a estas con bombas pequeñas.
3. Las reparaciones son más fáciles en las corazas flexibles. Si la capa filtro falla y sufre asentamientos, o la parte de superior de la protección local es erosionada, solo las estructuras flexibles pueden sufrir estas deformaciones sin agrietarse o sufrir daños en las piezas de la coraza. Si se remueve la roca uniforme, esta puede ser fácilmente remplazada con la adición de roca nueva en la zona dañada. Los gaviones, los cuales fallan por la pérdida de roca cuando la malla se rompe, son reparados fácilmente con el reemplazo de roca en los huecos y su amarre adecuado. De los otros tipos de coraza, solo los bloques de concreto sin características de engranaje, por lo común de lados planos, tienen muchas posibilidades de llenar de nuevo una base distorsionada. Los bloques con engranaje dislocado son difíciles de entrelazarse de nuevo, cualquiera que sean las condiciones de la capa filtro. Los sacos rellenos con grout que hayan sido rotos pueden ser reemplazados sin problema alguno; pero las losas de concreto y las colchonetas rellenas de grout resquebrajadas deben ser remplazadas en su totalidad, o ser cubiertas con una nueva coraza.

2.2.8. Identificación de los modos probables de falla de los revestimientos

El definir la falla es importante en el diseño de cualquier estructura. La falla puede ser de tipo catastrófica de la estructura o bien aquella que haga reducir su funcionamiento.

Los modos de falla más importantes que deben considerarse a la hora de evaluar la estabilidad de un revestimiento son:

- Presiones elevadas
- Deslizamiento
- Impacto del oleaje
- Erosión
- Rebase del oleaje –overtopping–
- Falla geotécnica

Los probables modos de falla de un sistema de revestimiento dependerán del material usado en la construcción. Generalmente estos modos de falla son interdependientes, así uno de ellos puede ser la consecuencia de los demás.

Presiones elevadas

Las presiones elevadas pueden ser causadas por condiciones dinámicas o casi estáticas. Las condiciones casi estáticas se originan debido a un atraso en el descenso del nivel de agua subterránea durante la marea, lo cual puede causar presiones elevadas. Las presiones elevadas dinámicas ocurren como resultado del viento o por embarcaciones generando olas que causan un cambio en el nivel del agua afectando el revestimiento.

Deslizamiento

El deslizamiento de un revestimiento puede ocurrir cuando la fuerza actuante, la componente del peso del revestimiento paralelo al talud, excede a la fuerza de fricción entre el revestimiento y el talud, o cuando el pie de la estructura es inadecuado.

Impacto del oleaje

Las cargas más severas por el oleaje ocurren cuando este rompe en la estructura, causando presiones muy altas de corta duración. Estas presiones de impacto están normalmente localizadas por encima o debajo del nivel quieto del agua.

Erosión

La presencia de una estructura rígida puede incrementar las olas y las velocidades de las corrientes en sus alrededores, lo cual causa un incremento del movimiento del material de la base. Esto puede manifestarse como una erosión local al pie de la estructura.

Rebase de las olas –overtopping–

El rebase de las olas puede causar un daño estructural a los diques y a los revestimientos, resultando en condiciones riesgosas tanto en la parte superior como detrás de la estructura, limitando el acceso vehicular o humano. Una altura de cresta adecuada en el revestimiento debe asegurar que el rebase de las olas se mantenga a un nivel aceptable.

Falla geotécnica

La falla geotécnica del material subyacente puede causar la falla del sistema del revestimiento. La falla geotécnica se da de las siguientes formas:

- Asentamiento excesivo
- Falla por deslizamiento
- Licuefacción o fluidización
- Migración del material a través de pequeños canales internos

En las *figuras 2.7 a 2.10* se esquematizan los modos típicos de falla en revestimientos.

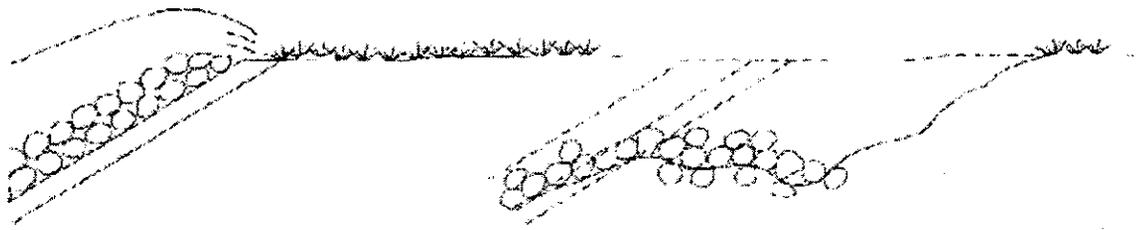


Figura 2.7. Falla por erosión ocasionada por el rebase del oleaje.

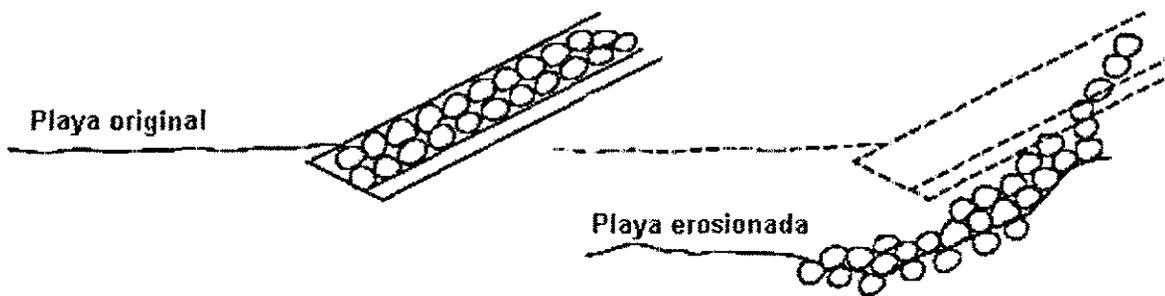


Figura 2.8. Falla por erosión al pie de talud.

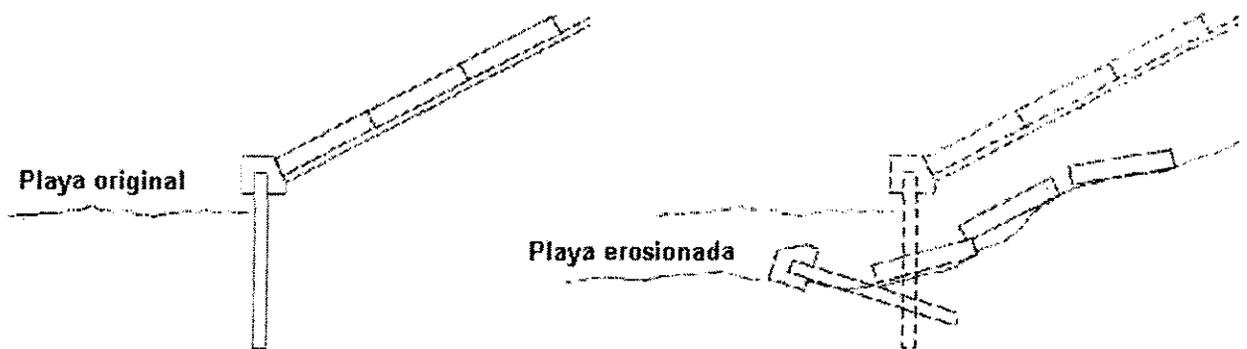


Figura 2.9. Falla de la pantalla al pie de talud.

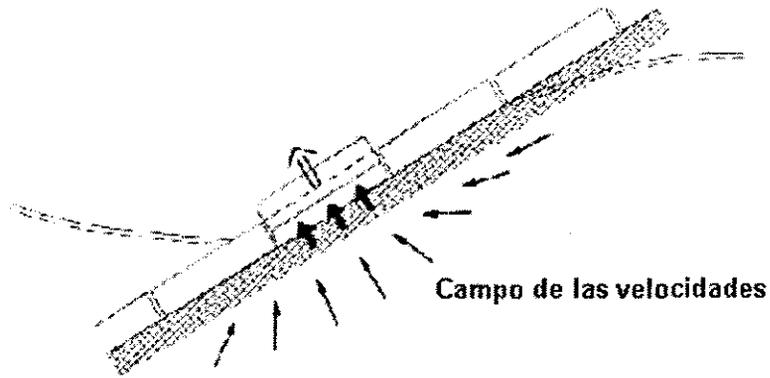


Figura 2.10. Falla por presión subyacente de los bloques.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 3
PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

3.1. Introducción

Los métodos de diseño se basan en la comparación de la resistencia del sistema, R , con la de la carga, W , que experimenta. La resistencia de un sistema y la carga a la cual está sujeta, son funciones de muchas variables, la mayoría de las cuales son estocásticas en naturaleza. Para asegurar un diseño seguro, la resistencia de la estructura debe exceder a la carga. En la práctica se debe adoptar una frecuencia anual aceptable de excedencia. El recíproco de esta excedencia es el periodo de retorno del evento de diseño.

Los métodos de diseño pueden ser determinísticos o probabilísticos. Estos métodos varían en función del que brinde la mejor seguridad buscada en el diseño.

Tradicionalmente los métodos determinísticos se han adoptado para la mayoría de los diseños. Un nivel aceptado de carga, denominado como la condición del estado límite, será determinado por la estructura. Este estado límite corresponderá a una cierta resistencia de la estructura. Puede ser un estado límite de servicio o el estado último de servicio. Exceder el estado límite de servicio indica que la estructura no cumple con el funcionamiento requerido. Mientras que si se excede el estado último de servicio resultará en daño o falla de la estructura. Este estado límite corresponderá a ciertas características de resistencia de la estructura, generalmente denotada como R_C .

En los diseños probabilísticos, se usan niveles de riesgo aceptables, posiblemente por balancear la probabilidad y las consecuencias de falla. Estas consecuencias son usualmente cuantificadas en términos monetarios. También se pueden realizar algunas evaluaciones donde es difícil estimar un valor monetario, como las posibles pérdidas humanas que se podrían tener.

Una vez que el periodo de retorno del evento de diseño se ha determinado, la carga de diseño W_D , se puede derivar de un análisis estadístico. La incertidumbre de la carga y de la resistencia se corrigen por medio de un factor de seguridad, F_S , el cual siempre debe ser mayor de 1.

$$F_S = R_C / W_D \quad (3.1)$$

La carga y la resistencia son función de un número de variables. Estas variables son generalmente estocásticas en naturaleza. Es importante notar que los métodos determinísticos pueden ser descritos como aquellos que son parcialmente probabilísticos y de riesgo pues se basan en la carga de diseño en un periodo de retorno seleccionado, T_R , el cual se considera una entidad estadística.

3.1.a. Aspectos Generales

1) Los pasos en ingeniería de diseño relacionados a un tipo específico de obra marítima se esquematizan de la siguiente forma:

a). Especificación de las condiciones funcionales y vida útil de la obra.

- b). Establecimiento de las estadísticas de los estados de mar locales a corto y a largo plazo, así como la estimación de los posibles cambios geomorfológicos.
 - c). Selección de los niveles de diseño para las respuestas hidráulicas: run up, rebase, transmisión y reflexión del oleaje.
 - d). Consideración del equipo y de los procedimientos de construcción y la disponibilidad y durabilidad de materiales.
 - e). Selección de obras con geometrías alternativas para ser a su vez analizadas.
 - f). Identificación de todos los modos posibles de falla de las obras seleccionadas.
 - g). *Selección de niveles de diseño de daño para los modos de falla identificados.*
 - h). Diseño conceptual de las partes estructurales basado en los niveles de diseño escogidos para los modos de falla y las respuestas hidráulicas.
 - i). Evaluación de los costos de las alternativas de obra y selección de diseño(s) preferido(s) para un análisis más detallado y su optimización.
 - j). Diseño detallado incluyendo una optimización económica y evaluación de la seguridad global de la obra. Esta etapa debe involucrar pruebas con modelos a escala y/o análisis computacionales avanzados para obras no estándar o importantes.
- 2) Los subíndices *c* y *g* se relacionan estrechamente con *a*.
 - 3) En todos los pasos, el procedimiento de diseño debe de preferencia involucrar un método probabilístico que permita la implementación de seguridad basada en valoraciones confiables.
 - 4) La interacción oleaje-estructura se puede separar en respuestas y cargas hidráulicas y respuestas de las partes estructurales. Cada interacción se describe por una fórmula, la cual en la mayoría de los casos es semiempírica de naturaleza con la forma basada en consideraciones físicas excepto las constantes empíricas determinadas por el ajuste de datos experimentales.
 - 5) La incertidumbre y parcialidad de la formulación son proporcionadas cuando se conocen.

3.1.b. Interacción oleaje-estructura

- 1) Respuesta Hidráulica.
 - a). Las condiciones de diseño para obras marítimas incluyen niveles aceptables de respuestas hidráulicas en base al run up, rebase, transmisión y reflexión del oleaje.
 - b). El nivel de run up del oleaje es uno de los factores más importantes que afectan el diseño de las obras marítimas porque determina el diseño del nivel de la cresta de la estructura en aquellos casos donde el rebase no es aceptable o solo de forma insignificante.
 - c). El rebase del oleaje ocurre cuando la altura de cresta de la estructura es más pequeña que el nivel del run up. La descarga del rebase es un parámetro de diseño muy importante puesto que determina el nivel de la cresta y el diseño de la parte superior de la estructura.
 - d). En estructuras impermeables, la transmisión del oleaje se lleva a cabo cuando el impacto del rebase del agua genera nuevas olas en la parte posterior de la estructura. Las estructuras permeables como los terraplenes de rocas y las pantallas acanaladas permiten la transmisión del oleaje como resultado de la penetración de las olas. Los niveles de diseño de las olas transmitidas dependen del uso del área protegida.
 - e). Los rompeolas y escolleras pueden causar reflexión del oleaje sobre playas vecinas y de este modo incrementar los impactos del oleaje en los procesos de la playa.
- 2) Cargas producidas por el oleaje y respuestas estructurales relacionadas.

- a). Una parte importante del procedimiento de diseño para las obras en general es la determinación de las cargas y sus relacionadas presiones, deformaciones y condiciones de estabilidad de los miembros estructurales.
- b). En el caso de los terraplenes con cascotes expuestos a las olas, tales procedimientos de diseño no pueden seguirse porque la carga del oleaje sobre las rocas o bloques individuales no puede ser determinada en teoría, por pruebas en modelos a escala normal o por grabaciones prototipos. En cambio se usa el método de la caja negra en el sentido que los experimentos son aprovechados para establecer relaciones entre las características de cierto oleaje y la respuesta hidráulica, usualmente expresadas en términos de los movimientos de la coraza. Las presiones relacionadas, e.g., con los bloques de concreto, son conocidas sólo para unos cuantos tipos para los cuales se han realizado investigaciones especiales. Para las estructuras monolíticas de frente vertical es posible estimar tanto teórica como experimentalmente las cargas del oleaje y subsecuentemente determinar las presiones, deformaciones y la estabilidad.

3.2. Lista de verificación del procedimiento de diseño de revestimientos

Los pasos usuales necesarios para diseñar un revestimiento adecuado son:

- a. Determinar la variación de los niveles de agua del sitio.
- b. Determinar las alturas de ola.
- c. Seleccionar las alternativas disponibles de coraza para resistir la ola de diseño.
- d. Seleccionar el tamaño de las piezas de la coraza.
- e. Determinar el run up potencial para definir la elevación de la cresta.
- f. Determinar la cantidad de rebase esperado para las estructuras bajas.
- g. Diseñar las características de drenaje si son requeridas.
- h. Permitir el escurrimiento superficial local y el escurrimiento de rebase y hacer las previsiones requeridas para otras instalaciones de drenaje tales como alcantarillas y canales.
- i. Considerar las condiciones extremas para evitar la falla debida a flanqueos.
- j. Diseñar la protección al pie de talud.
- k. Diseñar el filtro y los estratos subyacentes.
- l. Permitir una compactación firme de todos los materiales de llenado y de apoyo. Estos requisitos deben incluirse en los proyectos y en las especificaciones. También debe considerarse la compactación en el costo estimado.
- m. Elaborar un costo estimado para cada alternativa.

3.3. Diseño de los niveles de agua

Se necesita el nivel de agua máximo para estimar la altura máxima de la ola rompiente en la estructura, el run up esperado y la elevación requerida de la cresta de la estructura. Los niveles mínimos de agua juegan un importante rol para anticipar la cantidad de erosión local que puede ocurrir y la profundidad a la cual la coraza debe extenderse.

- a. *Mareas astronómicas.* Los cambios en los niveles de agua son causados por las mareas astronómicas con una posible componente adicional debido a factores meteorológicos (ascensos de nivel por efecto del viento y por la reducción de la presión atmosférica). En el caso de México los boletines de predicción de mareas en los puertos del país son editados por varias instituciones como la Secretaría de Marina y parcialmente el CICESE y el Instituto de Geofísica de la UNAM.

- b. *Ascenso de niveles por efectos climáticos.* Este ascenso se puede estimar por un análisis estadístico de un registro histórico de datos, por métodos descritos en el *Shore Protection Manual*, o a través del uso de modelos numéricos. Estos últimos solo se justifican para proyectos importantes. Algunos modelos pueden aplicarse a estudios de mar abierto, mientras que otros solo pueden ser usados en bahías y estuarios donde deben ser considerados los efectos de inundación.
- c. *Niveles de lagos.* Estas variaciones son registradas y controladas en aquellos países con grandes lagos, como el caso de los Grandes Lagos en la frontera norte de Estados Unidos.

3.4. Estimación de la ola de diseño

Las alturas y periodos de olas deben escogerse de manera que produzcan la combinación más crítica de fuerzas en una estructura con la debida consideración de la vida útil, la integridad estructural y el riesgo de eventos que puedan exceder las condiciones de diseño. Las características de las olas pueden estar basadas en un análisis de registro de olas medidas, observación directa de la acción del oleaje, pronósticos de oleaje, o la altura máxima de ola rompiendo en el sitio. Las características de ola derivadas de tales métodos pueden ser solo para aguas profundas por lo que deben transformarse al sitio de la estructura usando técnicas de refracción y difracción como las descritas en el *Shore Protection Manual*. Los análisis del oleaje se pueden realizar para niveles de agua de diseño extremos bajos y altos y para uno o más niveles intermedios a fin de determinar las condiciones críticas de diseño.

3.5. Variación en las alturas y periodos de olas y olas significantes

a. *Altura de ola*

- (1) Un tren de ondas dado contiene olas individuales de diversas alturas y periodos. La altura de ola significativa, H_s , se define como la altura promedio de la tercera parte de las alturas más grandes de un tren de ondas. Se pueden obtener otras alturas de ola tales como H_{10} y H_1 , donde H_{10} es el promedio del 10% de las alturas más grandes, y H_1 es el promedio del 1% de las alturas más grandes. Asumiendo una distribución de Rayleigh, se puede definir que

$$H_{10} \approx 1.27H_s \tag{3.2}$$

y

$$H_1 \approx 1.67H_s \tag{3.3}$$

- (2) La información disponible de la onda se da frecuentemente como la altura de la energía basada en el momento cero, H_{m0} . En aguas profundas, H_s y H_{m0} son casi iguales, sin embargo pueden ser significativamente diferentes en aguas poco profundas debido al someramiento (Thompson y Vincent 1985). La siguiente ecuación se puede usar para igualar la H_s a partir de los parámetros de onda de la energía basada en el momento cero (Hughes y Borgman 1987):

$$\frac{H_s}{H_{m0}} = \exp \left[C_0 \left(\frac{d}{gT_p^2} \right)^{-C_1} \right] \tag{3.4}$$



donde

C_0, C_1 = coeficientes de regresión dados como 0.00089 y 0.834, respectivamente

d = profundidad del agua en el punto en cuestión (i.e. al pie de la estructura)

g = aceleración de la gravedad

T_p = periodo pico de la densidad de la energía del espectro de onda

Un valor conservativo de H_s puede ser obtenido usando 0.00136 para C_0 . La ecuación 3.4 no debe ser usada para

$$\frac{d}{gT_p^2} < 0.0005 \tag{3.5}$$

o donde hay un sustancial rompimiento de ola.

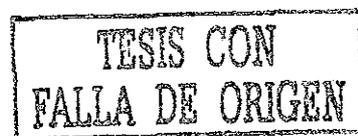
(3) En aguas poco profundas, H_s es estimada a partir de las condiciones de aguas profundas, para esto se puede usar el modelo de Goda (1975, 1985) de rompimiento y someramiento de olas irregulares. Goda (1985) recomienda para el diseño de estructuras con cascotes que si la profundidad es menor a la mitad de la altura de ola significativa en aguas profundas, entonces el diseño debería basarse en la altura de ola significativa en una profundidad igual a la mitad de altura de ola significativa en aguas profundas.

b. *Periodo de ola*. El periodo de ola para las condiciones del espectro de olas se da típicamente como el periodo T_p , que es el pico de la densidad de energía del espectro. Sin embargo, no es raro encontrar referencias y fórmulas de diseño basadas en el promedio de periodos de ola (T_z) o el periodo de ola significativa (T_s , periodo promedio de la tercera parte de las olas más altas). Se da una guía aproximada de la relación entre estos periodos de ola en la *tabla 3.1*

c. *Consideraciones de estabilidad*. La altura de ola a usarse en las consideraciones de estabilidad depende de si la estructura es rígida, semirígida o flexible. Las estructuras rígidas que podían fallar en forma catastrófica si se sobretensan pueden garantizar un diseño basado en H_1 . Las estructuras semirígidas pueden garantizar un diseño de olas entre H_1 y H_{10} . Las estructuras flexibles son usualmente diseñadas para H_s o H_{10} . Los coeficientes de estabilidad son relacionados con las alturas de ola a fin de desarrollar varios grados de daño, incluyendo sin daño.

| T_z/T_p | T_s/T_p | Comentarios | γ |
|-----------|-----------|---|----------|
| 0.67 | 0.80 | Condiciones severas en la zona de surf ¹ | NA |
| 0.74 | 0.88 | Espectro de Pierson-Moskowitz ² | 1.0 |
| 0.80 | 0.93 | Espectro típico de JONSWAP ² | 3.3 |
| 0.87 | 0.96 | Swell de tormentas distantes ² | 10.0 |

¹Desarrollado a partir de los datos de Ahrens (1987).
²Desarrollado a partir de Goda (1987).



3.6. Medición de olas y Observaciones Visuales

Los datos de olas disponibles son generalmente escasos y limitados para sitios específicos. Adicionalmente, los datos existentes de medición son algunas veces registros análogos los cuales no han sido analizados y son difíciles de procesar.

La carencia de recursos en los proyectos y las limitantes de tiempo pueden prohibir el establecimiento de un programa viable de medición que proveería de suficientes datos digitales para un estudio fiable. Las observaciones visuales a partir de los puntos de la línea costera son convenientes y económicos, pero tienen una precisión cuestionable, pues generalmente se ven afectados por la omisión de eventos extremos y son algunas veces difíciles de extrapolar a otras zonas a lo largo de la costa.

3.7. Predicción de oleaje

Con la predicción del oleaje se determinan las características del oleaje producido por una perturbación meteorológica, como puede ser un ciclón o huracán.

Existen dos tipos de predicción del oleaje:

- Predicción con base en datos meteorológicos ocurridos en el pasado (hindcasting).
- Predicción con base en datos estimados (forecasting).

Existen diversas técnicas para la predicción en cualquiera de sus formas, desde la más sofisticadas con el empleo de datos de clima medidos y modelos matemáticos muy especiales, hasta técnicas relativamente simples, pero que son de utilidad para el proyecto de obras.

Para una aplicación práctica es necesario contar con los siguientes datos generales de perturbación:

- a) Trayectoria.
- b) Selección de la posición o posiciones del huracán o ciclón más desfavorable, en relación a un determinado punto en donde se quiera conocer las características del oleaje.
- c) Variables específicas.

Estos datos en México se pueden obtener a partir de la información que proporciona el Sistema Meteorológico Nacional (SMN) y la Secretaría de Marina (SEMAR), tanto en sus "trayectorias ciclónicas" como en las cartas sinópticas de tiempo.

En el *Shore Protection Manual* se presentan métodos simplificados para estimar condiciones del oleaje.

3.8. Olas rompientes

a. Las alturas de ola derivadas a partir del pronóstico retrospectivo (hindcasting) de oleaje deben cotejarse con la máxima altura rompiente de ola que puede soportarse en el sitio dada la profundidad disponible en el nivel de diseño estacionario del agua y la pendiente del fondo de la costa. En la *figura 3.1* (Weggel 1972) se muestra como la relación rompiente, H_b/d_s , (H_b es la altura máxima de rompiente y d_s es la profundidad de la estructura a partir de la superficie del

agua) depende del aperlamiento de la ola y de la pendiente del fondo. Por consiguiente la altura de diseño de la ola será la más pequeña de la altura máxima de rompiente o de la altura de ola del pronóstico retrospectivo.

b. Para condiciones severas comúnmente usadas para diseño, H_{m0} , puede estar limitada por las condiciones de rompiente de la ola. Un razonamiento superior de H_{m0} está dado por

$$(H_{m0})_{max} = 0.10 L_p \tanh\left(\frac{2\pi d}{L_p}\right) \tag{3.6}$$

donde L_p es la longitud de onda calculada usando T_p y d .

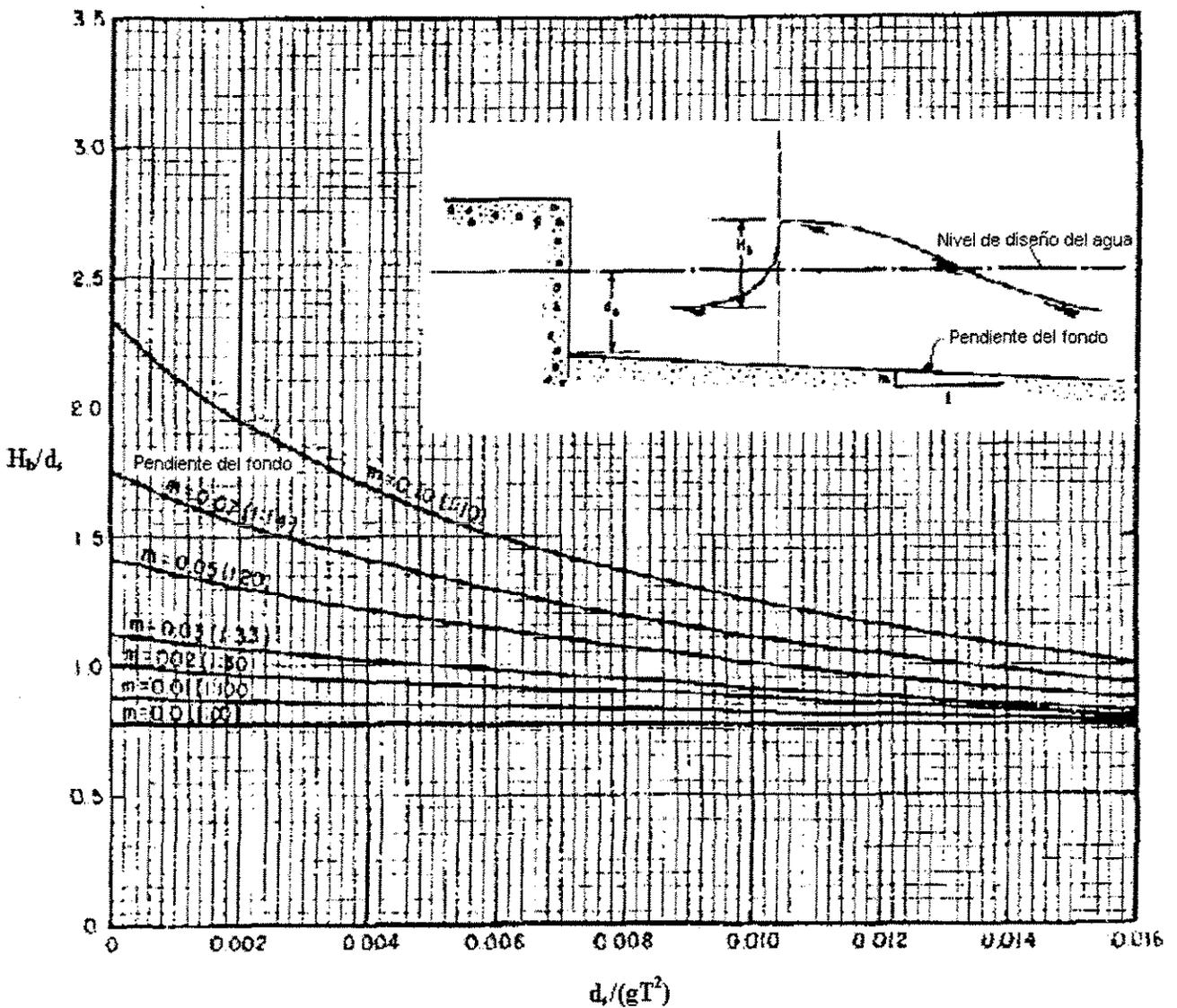


Figura 3.1. Relación rompiente, H_b/d_s , como función de $d_s/(gT^2)$.

3.9. Altura de protección

Al seleccionar la altura de protección, se debe considerar la máxima altura del nivel de agua, los asentamientos de la estructura, el bordo libre, el run up y el rebase del oleaje.

3.10. Run up del oleaje

El run up es la altura vertical por encima del nivel estacionario del agua a la cual la acometida de una ola alcanzará una estructura. Hay que notar que no es la distancia medida a lo largo de la superficie inclinada.

a. Run up sobre pendientes rugosas

(1) El run up máximo de olas irregulares sobre revestimientos del tipo riprap puede estimarse por (Ahrens y Heimbaugh 1988)

$$\frac{R_{max}}{H_{m0}} = \frac{a\xi}{1+b\xi} \quad (3.7)$$

donde

R_{max} = altura vertical máxima del run up sobre el nivel quieto del agua

a, b = coeficientes de regresión determinados como 1.022 y 0.247, respectivamente

ξ = indicativo de la forma de rotura del oleaje, también conocido como número de Iribarren, definido por

$$\xi = \frac{\tan \beta}{\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{1/2}} \quad (3.8)$$

donde β es el ángulo de la pendiente del revestimiento con respecto a la horizontal. La longitud de onda en aguas profundas se determina por

$$L_0 = \frac{gT_p^2}{2\pi} \quad (3.9)$$

El número de Iribarren es la razón de la pendiente del talud entre la raíz cuadrada del peraltamiento de la ola. Este indicativo es útil para definir el tipo de rotura del oleaje esperado en la estructura, como se muestra en la *figura 3.2*. En una playa de pendiente uniforme el tipo de rotura se estima por:

Oscilación y colapso $\xi > 3.3$

Voluta $0.5 < \xi < 3.3$

Descrestamiento $\xi < 0.5$

(2) Un valor más conservativo para R_{max} se obtiene usando 1.286 en a en la ecuación 3.7. Los run up máximos determinados usando este valor conservativo nos proporciona un límite superior razonable de los datos a partir de los cuales la ecuación fue desarrollada.

(3) Los cálculos de run up de los revestimientos, riprap u otros, se pueden obtener con los factores de corrección por pendiente rugosa en la *tabla 3.2*. Esta tabla se desarrolló para cálculos preliminares de run up basados en datos de oleaje monocromático y pendientes suaves. Para usar los factores de corrección de la *tabla 3.2* con oleaje irregular, el run up en pendientes rugosas se estima de la ecuación 3.7, multiplicando R_{max} en la ecuación 3.7 por el factor de corrección enlistado en la *tabla 3.2* y dividir por el factor de corrección para la roca analizada. Así por ejemplo, para estimar R_{max} para un talud de 1:1.5 con contrahuellas verticales, se determina R_{max} por medio de la ecuación 3.7 y se multiplica por (factor de corrección para el talud/factor de corrección de la roca) $(0.75/0.60) = 1.25$. Así R_{max} para este tipo de talud es 25% más grande que un talud riprap.

b. *Run up sobre pendientes suaves.* Los valores de run up para pendientes suaves se pueden determinar en las curvas de diseño indicadas en el *Shore Protection Manual*. Sin embargo, dichas curvas fueron basadas en pruebas de olas monocromáticas en lugar de condiciones de olas más realistas. Usando H_s para la altura de ola con las curvas de diseño se obtendrán estimaciones que pueden ser excedidas en un 50% por aquellas olas de un tren de ondas con alturas más grandes de H_s . El run up máximo se puede estimar por la ecuación 3.7 y convertir lo calculado a pendiente suave dividiendo el resultado por el factor de corrección por pendiente rugosa de la *tabla 3.2*.

c. *Run up en muros.* Las determinaciones de run up para muros verticales y curvos deben obtenerse mediante la guía indicada en el *Shore Protection Manual*.

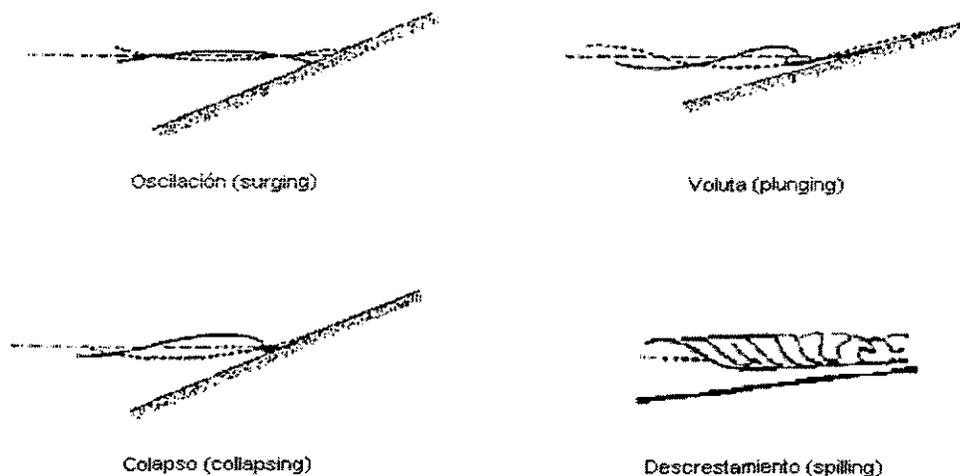


Figura 3.2. Tipo de rotura del oleaje.

3.11. Rebase del oleaje

a. Generalmente conviene diseñar las estructuras de protección costera lo suficientemente altas para prevenir el rebase. En algunos casos, sin embargo, los costos prohibitivos u otras consideraciones pueden conducir a estructuras más bajas que aquello que idealmente se necesita. En esos casos puede ser necesario calcular el volumen de agua por unidad de tiempo que puede rebasar la estructura.

b. El rebase del oleaje en los revestimientos tipo riprap se puede calcular a partir de la ecuación adimensional (Ward 1992)

$$Q' = C_0 e^{C_1 F'} e^{C_2 m} \tag{3.10}$$

Tabla 3.2
Factores de corrección para run up por pendiente rugosa.

| Tipo de coraza | Pendiente (cot β) | Tamaño relativo $H / K_r^{a,b}$ | Factor de corrección r_u |
|--|-------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Roca cantera | 1.5 | 3 a 4 | 0.60 |
| Roca cantera | 2.5 | 3 a 4 | 0.63 |
| Roca cantera | 3.5 | 3 a 4 | 0.60 |
| Roca cantera | 5.0 | 3 | 0.60 |
| Roca cantera | 5.0 | 4 | 0.68 |
| Roca cantera | 5.0 | 5 | 0.72 |
| Bloques de concreto ^c | Cualquiera | 6 ^b | 0.93 |
| Taludes escalonados con contrahuellas verticales | 1.5 | $1 \leq H'_0 / K_r^d$ | 0.75 |
| Taludes escalonados con contrahuellas verticales | 2.0 | $1 \leq H'_0 / K_r^d$ | 0.75 |
| Taludes escalonados con contrahuellas verticales | 3.0 | $1 \leq H'_0 / K_r^d$ | 0.70 |
| Taludes escalonados con bordes redondeados | 3.0 | $1 \leq H'_0 / K_r^d$ | 0.86 |
| Piezas geométricas de concreto | | | |
| Tetrápodos al azar de dos estratos | 1.3 a 3.0 | - | 0.45 |
| Tetrápodos uniformes de dos estratos | 1.3 a 3.0 | - | 0.51 |
| Tribars al azar de dos estratos | 1.3 a 3.0 | - | 0.45 |
| Tribars uniformes de un estrato | 1.3 a 3.0 | - | 0.50 |

^a K_r es la altura característica de la sección de la coraza perpendicular al talud. Para roca cantera, es el diámetro nominal; para las secciones de la coraza, es la altura por arriba del talud.
^bUsar H'_0 para $d_s / H'_0 > 3$; y la altura de ola local, H_s , para $d_s / H'_0 \leq 3$.
^cSuperficies horadadas de bloques tipo Gobi, tipo losa y bloques de concreto colocados con los huecos hacia arriba.
^d K_r es la altura de la contrahuella

donde Q' es el rebase adimensional definido como

$$Q' = \frac{Q}{(gH_{mo}^3)^{1/2}} \tag{3.11}$$

donde Q es el rebase dimensional en unidades uniformes. F' en la ecuación (3.10) es el bordo libre adimensional definido como

$$F' = \frac{F}{(H_{m0}^2 L_0)^{1/3}} \tag{3.12}$$



donde F es el bordo libre dimensional. Los términos restantes en la ecuación 3.10 son m_i (cotangente del talud del revestimiento) y los coeficientes de regresión C_0 , C_1 y C_2 definidos como

$$\begin{aligned} C_0 &= 0.4578 \\ C_1 &= -29.45 \\ C_2 &= 0.8464 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Estos coeficientes fueron determinados para bordos libres adimensionales dentro del rango $0.25 < F' < 0.43$ y taludes de revestimiento de 1:2 y 1:3.5.

c. Los índices de rebase para diques marinos son complicados por las diversas formas en sus fachadas y la variedad de bermas, revestimientos y escalones. Se dispone de información sobre índices de rebase para un rango de configuraciones en Ward y Ahrens (1992). Para los muros de retención marinos y muros verticales simples sin un revestimiento frontal y con un pequeño parapeto en la cresta, el índice de rebase se puede calcular de

$$Q' = C_0 \exp \left[C_1 F' + C_2 \left(\frac{F}{d_s} \right) \right] \tag{3.14}$$

donde Q' se define en la ecuación 3.11, F' se define en la ecuación 3.12, d_s es la profundidad al pie de la estructura y los coeficientes de regresión se definen como

$$\begin{aligned} C_0 &= 0.338 \\ C_1 &= -7.385 \\ C_2 &= -2.178 \end{aligned} \tag{3.15}$$

3.12. Estabilidad y Flexibilidad

Las estructuras se pueden construir usando grandes masas monolíticas que resisten las fuerzas del oleaje o en agrupaciones de piezas pequeñas que se colocan de forma aleatoria u ordenada. Ejemplos de esto son los diques marinos de concreto reforzado, los revestimientos de enrocamiento o del tipo riprap y los revestimientos con bloques geométricos de concreto. Las masas monolíticas y los bloques engranados generalmente presentan una resistencia inicial superior más, la carencia de flexibilidad, no permite asentamientos diferenciales ni erosiones locales que conduzcan a una falla prematura. Por otro lado, la colocación aleatoria de piezas de concreto o roca experimentan asentamientos y reajustes bajo la acción del oleaje y, hasta cierto punto, tienen una resistencia de reserva por encima de las condiciones de diseño. Además no conducen a una falla catastrófica si se infligen daños menores. Las ecuaciones en este capítulo están disponibles para diseños preliminares de estructuras importantes. Sin embargo, el diseño final usualmente requerirá la verificación de la estabilidad y el funcionamiento a través de modelos hidráulicos. La guía de diseño en este capítulo se puede usar para un diseño final de pequeñas estructuras donde las consecuencias de falla sean menores. Para esos casos, los recursos financieros son usualmente limitados como para permitir modelos de estudio.

3.13. Estabilidad de las piezas del acorazamiento

a. La forma más usada ampliamente de estabilidad de piezas es aquella desarrollada por Hudson (1961) la cual se da en la ecuación 3.16.

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D \left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1 \right)^3 \cot \beta} \quad (3.16)$$

donde

W = peso requerido por pieza de la coraza, kg (o el W_{50} para riprap graduado)

γ_r = peso específico por pieza de la coraza, kg/m³

H = altura de la ola monocromática

K_D = coeficiente de estabilidad dado en la *tabla 3.3*

γ_w = peso específico del agua en el sitio (dulce o salada)

β = ángulo de desnivel de la estructura con respecto a la horizontal

Las rocas de la coraza pueden variar desde 0.75 hasta 1.25 W , mientras que el 50% del peso, al menos en W y en la graduación, es uniforme a lo ancho de la superficie de la estructura. La ecuación 3.16 se puede usar para un diseño preliminar y para el diseño final cuando H es menor que 1.5m y no hay rebase considerable de la estructura. Para alturas mayores de ola, es preferible realizar pruebas con modelos para desarrollar un diseño óptimo. Los pesos de la coraza determinados con la ecuación 3.16 para oleaje monocromático deben ser verificados durante las pruebas con modelos mediante el uso de condiciones espectrales de oleaje.

b. La ecuación 3.16 es frecuentemente presentada como una fórmula de estabilidad con N_s , como número de estabilidad. Rescribiendo la ecuación 3.16 como

$$N_s = \frac{H}{\left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{1/3} \left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1 \right)} \quad (3.17)$$

Fácilmente se puede ver que

$$N_s = (K_D \cot \beta)^{1/3} \quad (3.18)$$

Igualando las ecuaciones 3.17 y 3.18, W se obtiene de una manera muy sencilla.

c. Para condiciones de oleaje irregular en revestimientos de riprap volcado, el número de estabilidad recomendado es

$$N_{sz} = 1.14 \cot^{1/6} \beta \quad (3.19)$$

donde N_{sz} es el número de estabilidad de daño nulo, el valor de 1.14 se obtiene de Ahrens (1981b), el cual recomienda un valor de 1.45 y usar H_s con la ecuación 3.17, luego lo modificado

se basa en Broderick (1983), el cual encontró mediante el uso de H_{10} en la ecuación 3.17 que se acomodaba mejor a la información. Asumiendo una distribución de Rayleigh de las alturas de ola, $H_{10} \approx 1.27H_s$. Ya que H_s es más fácil de conseguir que H_{10} , el número de estabilidad en la ecuación 3.18 fue ajustado ($1.45/1.27 = 1.14$) para permitir que H_s sea usada en la ecuación de estabilidad a pesar de que se proporciona el efecto más conservativo al usar H_{10} en el diseño.

Tabla 3.3
Valores sugeridos para el uso en la determinación del peso de la coraza (con condiciones de rotura de oleaje).

| Pieza de la coraza | n^1 | Colocación | Talud ($\cot \beta$) | K_D |
|---------------------------------------|----------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| Rocas cantera | | | | |
| Cantos rodados suaves | 2 | Aleatorio | 1.5 a 3.0 | 1.2 |
| Cantos rodados suaves | >3 | Aleatorio | 1.5 a 3.0 | 1.6 |
| Bordes angulares poco uniformes | 1 | Aleatorio | 1.5 a 3.0 | No usar |
| Bordes angulares poco uniformes | 2 | Aleatorio | 1.5 a 3.0 | 2.0 |
| Bordes angulares poco uniformes | >3 | Aleatorio | 1.5 a 3.0 | 2.2 |
| Bordes angulares poco uniformes | 2 | Especial ² | 1.5 a 3.0 | 7.0 a 20.0 |
| Riprap graduado ³ | 2 ⁴ | Aleatorio | 2.0 a 6.0 | 2.2 |
| Piezas geométricas de concreto | | | | |
| Tetrápodos | 2 | Aleatorio | 1.5 a 3.0 | 7.0 |
| Trípodos | 2 | Aleatorio | 1.5 a 3.0 | 9.0 |
| Trípodos | 1 | Uniforme | 1.5 a 3.0 | 12.0 |
| Dolos | 2 | Aleatorio | 2.0 a 3.0 ⁵ | 15.0 ⁶ |

¹ n es igual al número de diámetros equivalentes esféricos correspondientes al peso de roca mediana que llenaría el espesor del estrato.

²Colocación especial con los ejes longitudinales de la roca colocada perpendicularmente al frente del talud

³El riprap graduado no se recomienda cuando las alturas de ola excedan 1.50m

⁴Por definición, el espesor de riprap graduado es dos veces el diámetro del tamaño mínimo de W_{50} .

⁵La estabilidad de los dolos en talud más escarpados de 1:2 deben ser verificados mediante pruebas con modelos.

⁶Diseños sin daño (3 a 5% de movimiento de las piezas). Si no se desea un movimiento de la coraza (menos del 2%), reducir K_D aproximadamente el 50%.

d. Las ecuaciones de estabilidad derivadas a partir de una serie extensiva de pruebas de laboratorio en Los Países Bajos fueron presentadas en van der Meer y Pilarczyk (1987) y van der Meer (1988a, 1988b). Se presentaron dos ecuaciones de estabilidad. Para roturas de oleaje del tipo voluta,

$$N_s = 6.2P^{0.13} \left(\frac{S}{N} \right)^{0.2} \xi_z^{0.5} \tag{3.20}$$

y para rotura de oleaje del tipo oscilación u oleaje sin rotura,

$$N_s = 1.0P^{-0.13} \left(\frac{S}{N} \right)^{0.2} \sqrt{\cot \beta} \xi_z^P \tag{3.21}$$

donde

P = coeficiente de permeabilidad



S = nivel de daño

N = número de olas

P varía desde $P = 0.1$ para un revestimiento riprap sobre un talud impermeable hasta $P = 0.6$ para un terraplén de coraza de roca sin núcleo. Para un comienzo de daño, $S = 2$ en taludes de 1:2 o 1:3, o $S = 3$ para taludes desde 1:4 hasta 1:6. El número de olas es difícil de estimar, más las ecuaciones 3.20 y 3.21 son válidas para $N = 1,000$ y hasta $N = 7,000$, así seleccionando 7,000 olas se debe proporcionar una estimación conservadora de la estabilidad. Para otras estructuras que no sean revestimientos riprap, se presentan valores adicionales de P y S en van der Meer (1988a, 1988b).

e. Las ecuaciones 3.20 y 3.21 fueron desarrolladas para condiciones de oleaje en aguas profundas y no incluyen truncamiento de la altura de ola debido a rotura de oleaje. van der Meer por lo tanto recomienda una corrección para aguas someras dada como

$$N_s(\text{aguas someras}) = \frac{1.40H_s}{H_2} \quad (3.22)$$

$$N_s(\text{aguas profundas})$$

donde H_2 es la altura de ola excedida por el 2% de la olas. En aguas profundas, $H_2 \approx 1.40H_s$ y no hay corrección en la ecuación 3.22.

3.14. Espesor del estrato

a. *Piezas del acorazamiento.* Como lo indicado en el *Shore Protection Manual*, el espesor del estrato del acorazamiento se puede determinar por la ecuación 3.23:

$$r = nk_{\Delta} \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{1/3} \quad (3.23)$$

donde r es el espesor del estrato en metros, n es el número de piezas del acorazamiento que cabrían en el espesor del estrato (generalmente $n = 2$) y k_{Δ} es coeficiente del estrato dado en la *Tabla 3.4*. Para propósitos de cálculo, el número de piezas del acorazamiento, N_s , para un área superficial A dada en metros cuadrados es

$$N_s = Ank_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{\gamma_r}{W} \right)^{2/3} \quad (3.24)$$

donde P es la porosidad promedio del estrato de la cubierta obtenido de la *Tabla 3.4*.

b. *Riprap graduado.* El espesor del estrato para riprap graduado debe ser de al menos dos veces el diámetro nominal del W_{50} de la roca, donde el diámetro nominal es la raíz cúbica del volumen de roca. Adicionalmente, r_{\min} debe ser al menos 25% más grande que el diámetro nominal de la roca mayor y ser más grande que el espesor mínimo del estrato de 0.30 metros (Ahrens 1975). Además,

$$r_{\min} = \max \left[2.0 \left(\frac{W_{50\min}}{\gamma_r} \right)^{1/3} ; 1.25 \left(\frac{W_{100}}{\gamma_r} \right)^{1/3} ; 0.30m \right] \quad (3.25)$$

donde r_{\min} es el espesor mínimo del estrato perpendicular al talud. El espesor mayor del estrato tenderá a incrementar el esfuerzo de reserva del revestimiento contra olas más grandes que las de diseño. La graduación (dentro de los límites del ancho) parece tener un efecto pequeño en la estabilidad puesto que el W_{50} se usa para caracterizar el estrato. La siguiente guía sugerida es para establecer los límites de la graduación (del EM 1110-2-1601) (ver también Ahrens 1981a):

- (1) El límite más bajo del W_{50} de la roca, el $W_{50\min}$, debe seleccionarse basándose en los requerimientos de estabilidad usando la ecuación 3.16.
- (2) El límite superior del W_{100} de la roca, el $W_{100\max}$, debe ser igual al máximo tamaño que puede obtenerse económicamente de la cantera pero no debe excederse cuatro veces el $W_{50\min}$.
- (3) El límite más bajo del W_{100} de la roca, $W_{100\min}$, no debe ser menor que dos veces el $W_{50\min}$.
- (4) El límite superior del W_{50} de la piedra, $W_{50\max}$ deber ser cerca de 1.5 veces el $W_{50\min}$.
- (5) El límite más bajo del W_{15} de la piedra, $W_{15\min}$, deber ser cerca de 0.4 veces el $W_{50\min}$.
- (6) El límite superior del W_{15} de la piedra, $W_{15\max}$, deber ser seleccionado de acuerdo con los requerimientos del filtro especificado en EM1110-2-1901. Debe exceder ligeramente el $W_{50\min}$.
- (7) La mayor parte del volumen de roca más ligero que $W_{15\min}$ en una graduación no debe exceder el volumen de vacíos en el revestimiento desprovisto de esta roca más ligera. En muchos casos, sin embargo, la producción de la cantera disponible diferirá de los límites de la graduación especificados arriba. En tales casos el diseñador debe juzgar la adecuación de la graduación abastecida. Bajo tales circunstancias la consideración primaria debe darse al tamaño del $W_{50\min}$. Por ejemplo, lo más recomendable es que las graduaciones puedan ser adecuadas si el W_{50} abastecido es más pesado que el $W_{50\min}$ requerido. La segregación llega a ser un problema importante aún y cuando el riprap sea ampliamente graduado.

3.15. Estabilidad de reserva

a. General. Una modalidad conocida de aquellas estructuras con rocas colocadas aleatoriamente es la capacidad de ajustarse y reasentarse bajo condiciones de oleaje que causen daños menores. Esto se conoce como poder de reserva o estabilidad de reserva. Las estructuras construidas con piezas colocadas de forma regular o uniforme tales como los bloques de concreto, tienen comúnmente una pequeña o nula reserva y pueden fallar rápidamente si se someten a condiciones mayores a las del diseño.

b. *Piezas del acorazamiento.* Los valores de los coeficientes de estabilidad, K_D , dados en el párrafo 3.13 permiten hasta un 5% de daños bajo las condiciones de oleaje de diseño. La *Tabla 3.5* contiene valores de alturas de ola que producen un incremento en los niveles de daño. Las alturas de ola son referenciadas a la altura de ola de daño nulo ($H_{D=0}$) como lo usado en la ecuación 3.16. La exposición del acorazamiento dimensionado para $H_{D=0}$ a alturas mayores de ola debe producir daños en el rango dado. Si la roca para el acorazamiento disponible en el sitio es más ligera que el tamaño de la roca calculada usando la altura de ola del sitio, la altura de ola de daño nulo para la roca disponible puede ser calculada y se puede usar una proporción de la altura de ola del sitio para calcular el daño con la roca disponible. Todos los valores en la tabla son para piezas colocadas aleatoriamente, $n=2$, y para un rebase menor. Los valores de la *Tabla 3.5* son adaptados a partir de la *Tabla 7-7 del Shore Protection Manual*. Los valores del *Shore Protection Manual* son para diseño de rompeolas y condiciones de oleaje sin rotura e incluye niveles de daño por arriba del 30%. Debido a las diferencias en la forma de daño tanto a rompeolas como a revestimientos, éstos últimos pueden fallar antes de que los daños alcancen el 30%. Los valores deben usarse con precaución para niveles de daño de estructuras rompeolas y estructuras no rompeolas.

Tabla 3.4
Coefficientes de estrato y porosidad para diferentes piezas de la coraza.

| Pieza de la coraza | n | Colocación | k_Δ | $P(\%)$ |
|-----------------------|----------------|------------|------------|---------|
| Roca cantera (suave) | 2 | Aleatoria | 1.00 | 38 |
| Roca cantera (rugosa) | 2 | Aleatoria | 1.00 | 37 |
| Roca cantera (rugosa) | ≥ 3 | Aleatoria | 1.00 | 40 |
| Riprap graduado | 2 ^a | Aleatoria | N/A | 37 |
| Tetrápodos | 2 | Aleatoria | 1.04 | 50 |
| Tribar | 2 | Aleatoria | 1.02 | 54 |
| Tribar | 1 | Uniforme | 1.13 | 47 |
| Dolos | 2 | Aleatoria | 0.94 | 56 |

*Por definición, el espesor del riprap es igual a dos longitudes cúbicas de W_{50} o $1.25 W_{100}$

Tabla 3.5
 $H/H_{D=0}$ para niveles de daño en la capa de acorazamiento con diferentes tipos de material ($H/H_{D=0}$ para nivel de daño en por ciento).

| Pieza | $0 \leq \%_D < 5$ | $5 \leq \%_D < 10$ | $10 \leq \%_D < 15$ | $15 \leq \%_D < 20$ | $20 \leq \%_D \leq 30$ |
|------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| Roca cantera (suave) | 1.00 | 1.08 | 1.14 | 1.20 | 1.29 |
| Roca cantera (angular) | 1.00 | 1.08 | 1.19 | 1.27 | 1.37 |
| Tetrápodos | 1.00 | 1.09 | 1.17 | 1.24 | 1.32 |
| Tribars | 1.00 | 1.11 | 1.25 | 1.36 | 1.50 |
| Dolos | 1.00 | 1.10 | 1.14 | 1.17 | 1.20 |

c. *Riprap graduado*. La información de estabilidad de reserva del riprap se puede encontrar en Ahrens (1981a). La estabilidad de reserva parece ser la que primariamente se relaciona con el espesor del estrato aunque el peso medio de la roca y el talud de la estructura son también importantes.

3.16. Protección local

a. *General*. La protección local es un acorazamiento suplementario de la playa o de la superficie del fondo frente a la estructura la cual previene la socavación por la acción del oleaje. Los factores incidentes en el grado de socavación local incluyen el rompimiento del oleaje (cuando esto ocurre cerca del pie de la estructura), el run up, la reflexión y la distribución granulométrica de la playa o de los materiales del fondo. La protección local generalmente requiere consideración especial debido a que está sujeta a fuerzas hidráulicas y al cambio de perfiles de la playa frente a la protección. La estabilidad de la protección local es esencial porque la falta de ésta generalmente conducirá a la falla completa de la estructura. Aún no se ha desarrollado una guía específica para el diseño de protección local basada en resultados de prototipos o modelos. Se sugiere una guía empírica en Eckert (1983).

b. *Revestimientos*.

(1) *Procedimiento de diseño*. La protección local para revestimientos es generalmente gobernada por criterios hidráulicos. La socavación puede ser causada por el oleaje, por corrientes marinas provocadas por el oleaje o por la marea. Para la mayoría de los revestimientos, los factores más importantes serán el oleaje y las corrientes provocadas por éste. Los pesos de la roca usada en la protección que estará sumergida, pueden calcularse de acuerdo a la ecuación 3.26.

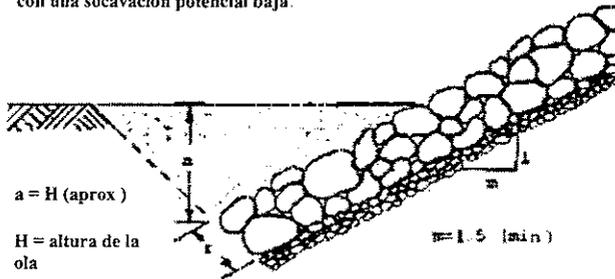
$$W_{min} = \frac{\gamma_r H^3}{N_s^3 \left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1 \right)^3} \quad (3.26)$$

donde N_s es el número de estabilidad de diseño para la protección local realizada con cascotes frente a un muro vertical. Para aquellas estructuras de protección expuestas a la acción del oleaje, el diseñador debe seleccionar la ecuación 3.16 que aplica en la superficie del agua o cerca de ella o la ecuación 3.26. Se debe reconocer que la ecuación 3.26 nos da como resultado un peso mínimo y la ecuación 3.16 nos da un peso mediano. La selección de la roca debe estar basada en las graduaciones de roca desarrolladas a partir de los pesos de las rocas. La importancia relativa de estos factores depende de la localización de la estructura y de su elevación con respecto al nivel más bajo del agua. Cuando la protección local es para la socavación causada por corrientes de ríos o de mareas, el diseñador se debe referir a EM 1110-2-1601. Virtualmente no existen datos de corrientes actuando en las rocas de la protección cuando dichas corrientes son producidas por el oleaje de tormentas o por el flujo de ríos y mareas. Se debe asumir que los efectos de socavación son parcialmente aditivos. En el caso de una protección local con revestimiento, se provee de cierto conservatismo al usar el número de estabilidad de diseño para la protección local frente a un muro vertical.

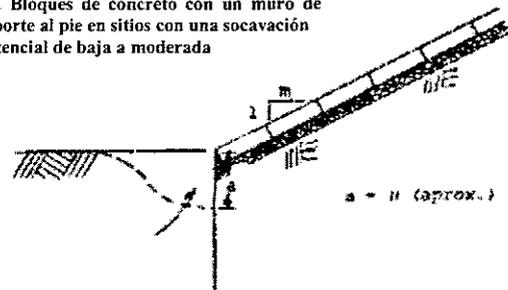
(2) *Configuraciones locales sugeridas*. La guía contenida en EM 1110-2-1601 que relaciona las configuraciones de diseño local para canales de control de flujo se modifica para revestimientos costeros y se presenta en la figura 3.3. Algunos otros esquemas que sean satisfactorios para el

diseñador también son aceptables. Los diseños I, II, IV y V son para moderar las condiciones de socavación local y la construcción en seco. Los diseños III y VI se pueden usar para deducir la excavación cuando la roca en la trinchera de la protección local se considera como movable pues será reemplazada después de algunos eventos principales. Una protección engrosada similar a la del diseño III se puede usar para construcciones sumergidas excepto cuando la roca de la protección sea colocada de preferencia en el fondo existente que en una trinchera excavada.

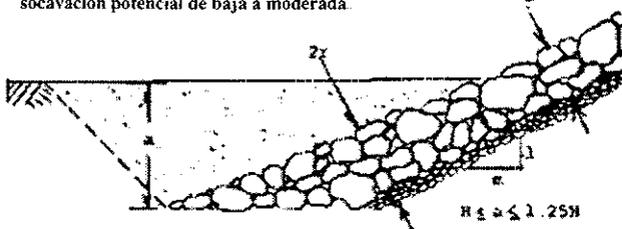
I. Roca cantera o piezas geométricas de concreto en sitios con una socavación potencial baja.



IV. Bloques de concreto con un muro de soporte al pie en sitios con una socavación potencial de baja a moderada



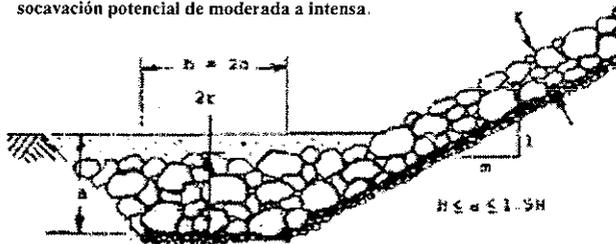
II. Roca cantera o piezas geométricas en sitios con una socavación potencial de baja a moderada.



V. Bloques de concreto enclavados al pie en sitios con una socavación potencial de baja a moderada



III. Roca cantera o piezas geométricas en sitios con una socavación potencial de moderada a intensa.



VI. Bloques de concreto con pedacería de roca al pie en sitios con una socavación potencial de moderada a intensa.

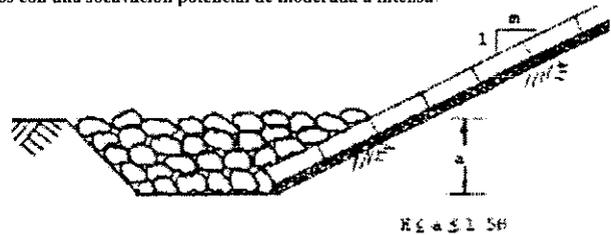


Figura 3.3. Protección local o al pie usada en los revestimientos.

3.17. Filtros

Un filtro es un estrato transicional de grava, rocas pequeñas o textil colocado entre el suelo subyacente y la estructura (revestimiento). El filtro previene la migración de las partículas finas del suelo a través de los vacíos en la estructura, distribuye el peso de las piezas de la coraza, provee un asentamiento más uniforme y permite un aligeramiento de las presiones hidrostáticas del suelo. Para las zonas por arriba del nivel del agua, los filtros también previenen que el agua superficial cause erosión por debajo del riprap. De forma general los estratos presentan la relación dada en la ecuación 3.27:

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

$$\frac{D_{15 \text{ superior}}}{D_{85 \text{ inferior}}} < 4 \quad (3.27)$$

Una guía de diseño específico para filtros de grava y roca está contenida en EM 1110-2-1901 y EM 1110-2-2300 (ver también Ahrens 1981a) y la guía para filtros textiles está en CW 02215. Los requerimientos de dichos documentos se describen brevemente en los siguientes párrafos.

a. *Filtros de roca graduada.* El criterio de los filtros se puede establecer como:

$$\frac{D_{15 \text{ filtro}}}{D_{85 \text{ suelo}}} < 4 \text{ a } 5 < \frac{D_{15 \text{ filtro}}}{D_{15 \text{ suelo}}} \quad (3.28)$$

donde el lado izquierdo de la ecuación 3.28 se interpreta como la prevención de tubificación a través del filtro y el lado derecho provee la permeabilidad adecuada para la división de estratos estructurales. Esta guía también aplica entre estratos sucesivos de estructuras multiestratificadas. Tales diseños son necesarios cuando existe una larga disparidad entre el tamaño de los vacíos en la coraza y los tamaños de las partículas en el estrato subyacente.

b. *Substratos de riprap y roca para coraza.* Los substratos para revestimientos riprap deben ser dimensionados como lo indicado en la ecuación 3.29

$$\frac{D_{15 \text{ coraza}}}{D_{85 \text{ filtro}}} < 4 \quad (3.29)$$

donde el diámetro de la roca D puede relacionarse al peso W de la roca a través de la ecuación 3.23 mediante $n = 1$. Esto es más restrictivo que la ecuación 3.28 y provee una margen adicional contra las variaciones en los tamaños de los vacíos que pueden ocurrir mientras la coraza cambia bajo la acción del oleaje. Para rangos de graduación amplios de riprap, cada substrato encuentra la condición especificada en la ecuación 3.29 y el espesor del estrato debe ser por lo menos tres diámetros medios de la roca. Para corazas y substratos de roca de medida uniforme, el primer substrato debe ser de por lo menos el espesor de dos diámetros de roca y las piezas individuales deben pesar cerca de una décima parte de las piezas de la coraza. Cuando se usen piezas de concreto en la coraza con $K_D > 12$, el substrato debe ser roca proveniente de una cantera que pese cerca de la quinceava parte de las piezas de la coraza.

c. *Selección de los filtros de textil plástico.* La selección de estos filtros se basa en el tamaño de abertura equivalente, (EOS por sus siglas en inglés), el cuál es el número de la U.S. Standard Sieve, que tiene aberturas más parecidas a las del filtro de textil. El material será retenido primero en una malla cuyo número es igual al EOS. Para suelos granulares con finos menores del 50% (limos y arcillas) en peso (pasando la malla no. 200), se selecciona el filtro de textil mediante la aplicación de la ecuación 3.30.

$$\frac{\text{malla EOS}}{D_{85 \text{ suelo}}} \leq 1 \quad (3.30)$$

Para otros suelos, la EOS no debe ser mayor que las aberturas en una malla del No. 70. Además, no se debe usar ningún textil cuyo EOS sea mayor que 100, y ningún filtro debe usarse cuando el suelo subyacente contenga más del 85% de material pasando por la malla No. 200. En tales casos, un estrato de arena intermedio puede proveer el estrato de transición necesario entre el

suelo y el textil. Finalmente, el gradiente del filtro de textil se limita a un valor máximo de tres. Esto es, basado en una prueba de permeabilidad, el gradiente hidráulico a través del textil y la pulgada del suelo adyacente a éste (i_1) dividido por el gradiente hidráulico de 2 pulgadas del suelo entre 1 y 3 pulgadas por arriba del textil (i_2) es:

$$\text{Gradiente} = \frac{i_1}{i_2} \leq 3 \quad (3.31)$$

Estudios tales como el de Chen et al. (1981) sugieren que los requerimientos de selección de estos filtros de textil pueden ser de alguna forma restrictivos.

d. Colocación de filtros de textil. La experiencia indica que los filtros sintéticos pueden retener su resistencia después de largos periodos de exposición a agua dulce y salada. Para tener un buen funcionamiento, sin embargo, se debe instalar un filtro adecuadamente seleccionado con las debidas precauciones siguientes. Primero, las piezas más pesadas de la coraza pueden presionar al filtro tan pronto se asienten, eventualmente esto causa un rompimiento del filtro. Se sugiere una cama de roca por debajo de las piezas de la coraza que pesen más de 1 Ton. para aquellos trabajos superficiales y 1.5 Ton. para construcciones sumergidas, (Dunham y Barrett 1974) y pueden ser necesarios múltiples substratos bajo piezas primarias que pesen más de 10 Ton. Se debe aplicar una guía de filtros adecuada para tales casos. Segundo, el filtro de textil no debe extenderse hacia el mar; es preferible que se extienda unas decenas de centímetros hacia tierra como lo mostrado en la *figura 3.4*. Tercero, se deben proveer traslapes adecuados entre capas. Para revestimientos ligeros esto puede ser tan pequeño como 30 cm y puede incrementarse a 1 m para estructuras sumergidas más largas. Cuarto, se deben incluir suficientes pliegues para eliminar la tensión y el estiramiento que se producen bajo el asentamiento. Se deben colocar pasadores de seguridad con tuercas en intervalos de 60 cm a 1.50 m a lo largo de puntos intermedios de los traslapes. Por último, la colocación de roca adecuada requiere que se comience en el pie de la estructura y se prosiga hasta el talud. Las rocas que caigan de una altura de tan solo 30 cm pueden rasgar algunos filtros, aunque Dunham y Barrett (1974) sugieren que aquellas rocas que pesen arriba de 125 Kg. pueden caer de forma segura a partir de 1 m. Son permisibles alturas más grandes de caída bajo el agua si los bloques por arriba de 1 Ton. de peso pueden caer a través de columnas de agua de al menos 1.50 m.

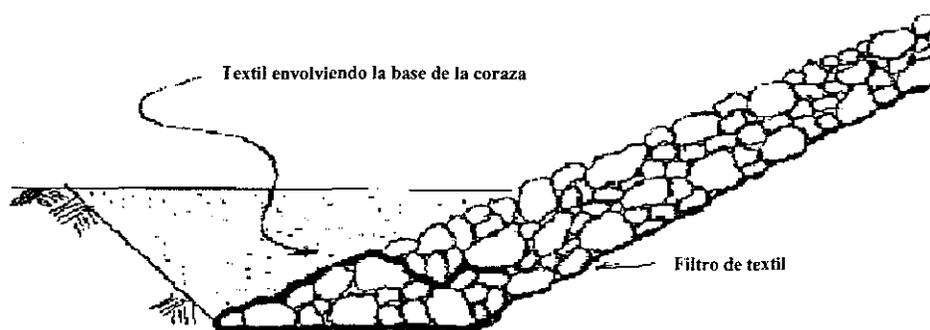


Figura 3.4. Uso de filtro de textil bajo revestimientos y protección local.

3.18. Protección de flancos

La protección de flancos es necesaria para limitar la vulnerabilidad de una estructura por la tendencia de la erosión que continua en sus extremos. Las secciones de restitución son generalmente necesarias en ambos extremos para prevenir esto. Estructuras tales como las pilas de madera pueden ser atadas en los bancos bajos existentes, pero las secciones de restitución de otros elementos tales como los revestimientos de roca deben usualmente ser prolongadas progresivamente mientras la erosión continúe. La extensión de revestimientos delante del punto de erosión activa se debe considerar pero generalmente no es factible. En otros casos se puede usar una sección final más gruesa, similar a la protección local, cuando el índice de erosión es moderado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 4
DISEÑO FUNCIONAL

4.1. Introducción

El diseño funcional de los revestimientos implica cálculos del run up y rebase del oleaje. Estos factores técnicos junto con las restricciones económicas, ambientales, políticas (sociales) y estéticas de la zona, se combinan para determinar la elevación de la cresta de la estructura.

Para ilustrar el uso de los revestimientos como estructura de protección costera contra la erosión provocada por el oleaje o las corrientes, se ejemplifica su diseño para el caso de erosión que se presenta en la línea de costa adyacente a la obra de toma superficial de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos, cerca del Puerto de Tuxpan, Veracruz.

4.2. Diseño del revestimiento

4.2.1. Condiciones del sitio

La Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos se localiza en el litoral del estado de Veracruz a 5 Km al norte de la desembocadura del río Tuxpan y del puerto del mismo nombre (*figura 4.1*), la playa está orientada de norte a sur; se localiza en los $21^{\circ} 03'$ de latitud norte y en los $97^{\circ} 24'$ de longitud oeste. Para el sistema de enfriamiento de los condensadores se construyó una obra de toma superficial constituida en su primera etapa por dos escolleras perpendiculares a la costa (*figura 4.2*). La presencia de estas escolleras ha alterado sensiblemente el equilibrio dinámico en que se encontraba la playa antes de 1989 (*figura 4.3*), de tal manera que al norte de la obra de toma se presenta un asolvamiento progresivo, en tanto que la playa ubicada al sur ha sufrido un proceso erosivo desde diciembre de 1989 (*figura 4.4*).

Puesto que el ataque del oleaje en un revestimiento se relaciona directamente con las mareas alta y baja así como el nivel medio del mar, se debe determinar que tipo de oleaje (sin rotura, con rotura o después de la rotura) puede encarar el revestimiento.

El nivel de pleamar media (sin considerar eventos extremos) del lugar es de 0.503m y se considera el efecto de 0.914m por cuestión de mareas de tormenta. El pie del revestimiento se localizará al nivel de bajamar media (0.000). La profundidad de diseño total del agua al pie de la estructura, d_s , es: $0.503+0.914 = 1.417\text{m}$. La pendiente del fondo es $m=0.030$ (1:33). Se usará un rango de periodo de ola desde 4 a 7 seg. En la *figura 4.5* se esquematiza un corte transversal con las condiciones del sitio.

4.2.2. Selección de los materiales del acorazamiento

Se asume que la pendiente existente se puede graduar a una pendiente de 1:2 (ver *tabla 4.1*) para la construcción del revestimiento. Los materiales seleccionados para la construcción, elegidos del Anexo 1 serán: riprap, roca cantera, bloques de concreto y gaviones. Por lo que se tendrá una comparación del diseño con cada uno de estos materiales.



Figura 4.1. Ubicación geográfica del Puerto de Tuxpan, Veracruz.



Figura 4.2. Vista Sur-Norte de la zona de escolleras de la Central Termoelectrica Adolfo López Mateos. Marzo, 1988.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

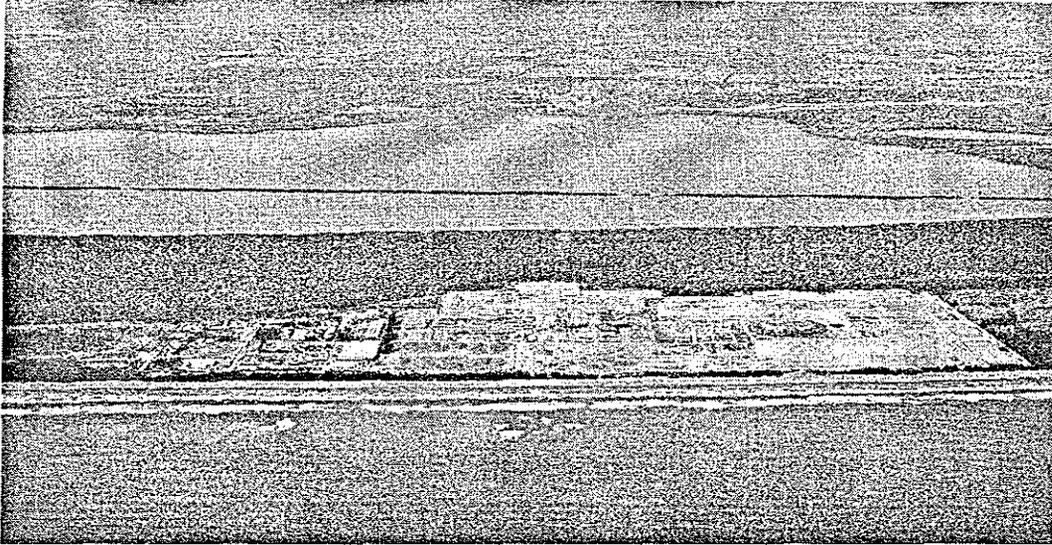
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.3. Vista Este-Oeste del sitio de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos. Obsérvese que no se ha iniciado la construcción de las escolleras, por lo que la línea de costa se encuentra en equilibrio dinámico. Octubre, 1986.

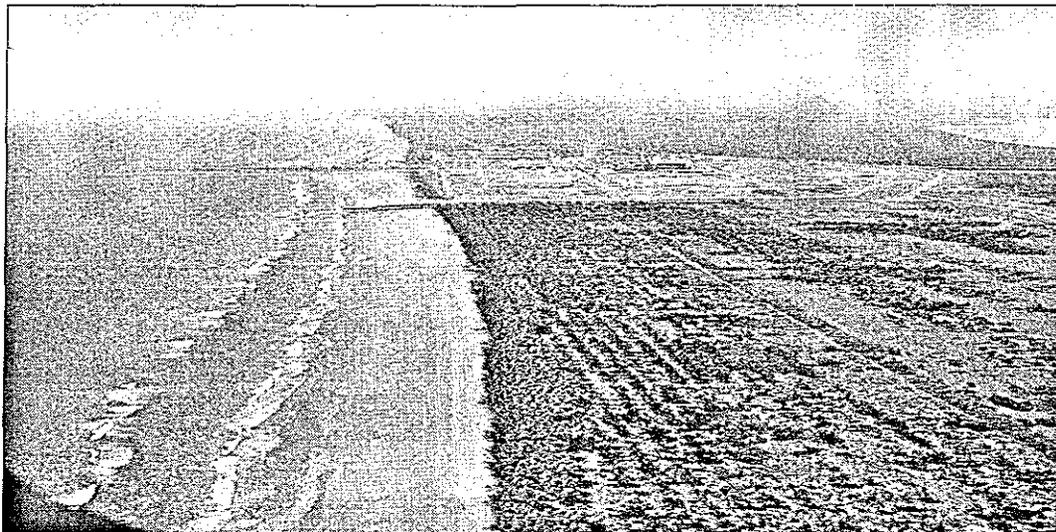


Figura 4.4. Panorámica de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos, vista de Norte a Sur. Nótese la erosión de la línea de costa en la playa sur, así como el depósito en la playa norte. Abril, 1990.

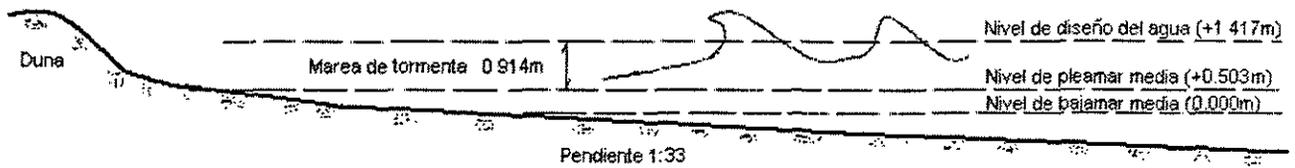


Figura 4.5. Corte transversal con las condiciones del sitio.

Tabla 4.1. Taludes máximos para diferentes materiales.

| Estructura | Talud óptimo | Talud máximo |
|--|--------------|------------------------|
| Riprap | | 1:5 a 1:2 ¹ |
| Roca armadura (roca cantera o uniforme) | | 1:1.5 |
| Bloques de concreto | 1:3 | 1:2 |
| Colchonetas de concreto | | 1:1.5 |
| Asfalto -asfalto ligero en asfalto de arena fina | | 1:2 |
| -Asfalto ligero en geotextil anclado al tope | 1:3 | 1:1.5 |
| -Grout | | 1:1.5 |

Nota: ¹Para taludes mayores a 1:3, el riprap puede perder sus propiedades de autoseguridad

4.2.3. Criterios de la rotura del oleaje

Usando la figura 3.1, se determina la máxima altura de ola que rompe en la estructura con $d_s = 1.417m$, una pendiente del fondo $m = 0.030$ (1:33) y un rango de periodo de ola desde 4 a 7 seg.

Determinación de la máxima altura de ola

| T (s) | $\frac{d_s}{gT^2}$ | $\frac{H_b}{d_s}$ | H_b (m) |
|------------|--------------------|-------------------|--------------|
| 4 | 0.0090 | 0.95 | 1.35 |
| 5 | 0.0058 | 1.00 | 1.42 |
| 6 | 0.0040 | 1.02 | 1.44 |
| 7 | 0.0029 | 1.05 | 1.49 |
| 8 | 0.0023 | 1.051 | 1.49 |

Verificación

La verificación se realiza para determinar si una subestimación del periodo de ola afectará significativamente la altura de rompiente. Finalmente se elige como altura de ola rompiente un valor intermedio entre 1.44 y 1.49m, es decir con un $T = 6.5$ s, así:

Con esta altura de ola rompiente, se puede observar que las olas no romperán sobre la estructura, lo que da una altura de ola limitada.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

4.2.4. Determinación del espesor de la coraza

(1) Riprap.

Los dos métodos más comunes son la fórmula de Hudson, usada en el *Shore Protection Manual* o el método de van der Meer (1988).

Para este caso se utiliza la fórmula de Hudson (ecuación 3.16). Esta ecuación se puede usar para un diseño preliminar y para el diseño final cuando H es menor que 1.5m y no hay rebase considerable de la estructura.

$$W_{50} = \frac{\gamma_r H^3}{K_D \left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1 \right)^3 \cot \beta};$$

$H = 1.47\text{m}$; $T = 6.5\text{seg.}$; $\cot \beta = 2.0$; $\gamma_r = 2650\text{kg/m}^3$; $\gamma_w = 1025\text{kg/m}^3$; $K_D = 2.2$ (tabla 3.3)

$$W_{50} = \frac{(2650\text{kg/m}^3)(1.47\text{m})^3}{2.2 \left(\frac{2650\text{kg/m}^3}{1025\text{kg/m}^3} - 1 \right)^3 2.0} = 480\text{kg}$$

El peso mínimo, W_{\min} , es $0.125W_{50}$ o 60kg y el peso máximo, W_{\max} , es $4.0W_{50}$ o 1,920kg.

(2) Roca uniforme.

Usando dos capas de espesor de roca de cantera con bordes angulares ($n=2$), $K_D = 2.0$ (tabla 3.3) y de la ecuación 3.16

$$W = \frac{(2650\text{kg/m}^3)(1.47\text{m})^3}{2.0 \left(\frac{2650\text{kg/m}^3}{1025\text{kg/m}^3} - 1 \right)^3 2.0} = 528\text{kg}$$

El rango de pesos de la roca de la coraza, para dos capas de espesor de roca de cantera, puede variar desde $0.75W$ hasta $1.25W$ (396 a 660kg) con aproximadamente el 50% de las rocas individuales pesando más que W (528kg).

De la ecuación 3.23, el espesor de la coraza r para ($n=2$) es:

$k_\Delta = 1.00$ (tabla 3.4)

$$r = nk_\Delta \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{1/3}$$

$$r = (2)(1.00) \left(\frac{528\text{kg}}{2650\text{kg/m}^3} \right)^{1/3} = 1.17\text{m}$$

De la ecuación 3.24, el número de rocas de cantera N_r , por área (se usará $A = 100\text{m}^2$) es:

Con $P = 37\%$ (tabla 3.4)

$$N_r = Ank_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{\gamma_r}{W} \right)^{2/3}$$

$$N_r = (100\text{m}^2)(2)(1.00) \left(1 - \frac{37}{100} \right) \left(\frac{2650\text{kg/m}^3}{528\text{kg}} \right)^{2/3} = 370 \text{ rocas por } 100\text{m}^2$$

La comparación de la roca uniforme y la roca graduada es la siguiente:

| Piezas de la coraza | Pesos |
|---------------------|------------------|
| Roca uniforme | 396 a 660kg |
| Roca Graduada | Mínimo = 60kg |
| | Medio = 480kg |
| | Máximo = 1,920kg |

Con esto se demuestra que con un revestimiento de roca uniforme resultaría una estructura menos masiva y más económica debido al amplio rango de roca necesaria para el riprap graduado.

(3) Bloques de concreto.

Una estimación inicial del espesor de la coraza se puede determinar por:

$$t_a = CH_s \tag{4.1}$$

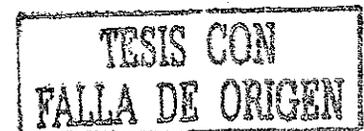
donde C es el coeficiente dependiente del material del revestimiento, dado en la tabla 4.2

t_a es el espesor de la coraza (m).

| Tipo de revestimiento | Coeficiente, C |
|--|------------------|
| Bloques | 1/6 |
| Asfalto ligero-filtro de asfalto de arena fina | 1/10 |
| Asfalto ligero-filtro geotextil | 1/6 |
| Colchonetas de concreto | 1/10 |

Asumiendo que la ola de diseño es la altura de ola significativa, H_s , el espesor inicial de la capa es:

$$t_a = (1/6)(1.47\text{m}) = 0.25\text{m}$$



Usando el método simplificado de Klein Breteler y Bezuijen (1991), donde el espesor de la capa se determina de:

$$t_a = \frac{H_s \xi^{0.67}}{\Delta S_b} \tag{4.2}$$

donde S_b es un coeficiente derivado empíricamente, ver *tabla 4.3*

$$\xi \text{ es el número de Iribarren} = \frac{\tan \beta}{s_p^{1/2}}$$

$$s_p \text{ es la pendiente pico del mar} = \frac{2\pi H_s}{g T_p^2}$$

$$\Delta = \frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1; \gamma_r = 2350 \text{kg/m}^3; \gamma_w = 1025 \text{kg/m}^3;$$

Tabla 4.3
Coeficiente S_b para diferentes construcciones de revestimiento

| Descripción | $S_{b \text{ min}}$ | $S_{b \text{ max}}$ |
|--|---------------------|---------------------|
| Bloques sueltos en filtro granular, baja estabilidad | 2.6 | 5.6 |
| Bloques sueltos en filtro granular, estabilidad normal | 3.7 | 8.0 |
| Bloques sueltos en geotextiles en arena | 3.7 | 8.0 |
| Bloques sueltos en arcilla | 5.1 | 11.0 |
| Bloques unidos en filtro granular, baja estabilidad | 3.0 | 6.5 |
| Bloques unidos en filtro granular, estabilidad normal | 3.7 | 8.0 |
| Bloques unidos en geotextiles en arena | 5.1 | 11.0 |

Así:

$$s_p = \frac{2\pi(1.47\text{m})}{9.8\text{m/s}^2(6.5\text{seg.})^2} = 0.022$$

$$\xi = \frac{1/2}{0.022^{1/2}} = 3.37$$

$$\Delta = \frac{2350\text{kg/m}^3}{1025\text{kg/m}^3} - 1 = 1.29$$

$$t_a = \frac{(1.47\text{m})(3.37)^{0.67}}{(1.29)(8.0)} = \mathbf{0.32\text{m}}$$

Usando un revestimiento con bloques de control para este espesor (ver este tipo de revestimiento en el *anexo 1*).

(4) Gaviones.

Usando un espesor de **0.45m (18")** será suficiente.



4.2.5. Requisitos del filtro

(1) Roca uniforme.

El revestimiento descansará sobre una sub-capa, cuyo espesor mínimo debe ser de 2 rocas uniformes ($n = 2$), y debe pesar la décima parte del peso de la capa de la coraza ($W/10$)

Así:

$528/10 \approx 55\text{kg}$, con un rango de peso de 40 a 70kg con el 50% más pesado que 55kg.

Adicionalmente se coloca un filtro de roca en dos capas. La primera será de 30cm de agregados de roca pulverizada; la segunda capa será de 30cm de gravilla. Se puede colocar un filtro textil (EOS=70) en lugar de la segunda capa.

(2) Bloques de concreto.

Se colocarán los bloques sobre un filtro textil (EOS=70).

(3) Gaviones.

Los gaviones serán colocados sobre una capa de gravilla con un espesor de 30cm, o también podría usarse un filtro textil (EOS=70).

4.2.6. Estimación del run up del oleaje

(1) Roca uniforme.

Suponiendo que las condiciones de diseño dadas fueron para la altura de ola significativa y el periodo pico en una profundidad de 5m. Se usa la ecuación 3.4 para encontrar H_{m0} :

$$\frac{H_s}{H_{m0}} = \exp \left[C_0 \left(\frac{d}{gT_p^2} \right)^{-c_1} \right]$$

$$\frac{1.47\text{m}}{H_{m0}} = \exp \left[0.00089 \left(\frac{5\text{m}}{(9.8\text{m/s}^2)(6.5\text{seg.})^2} \right)^{-0.834} \right]$$

$$\frac{1.47\text{m}}{H_{m0}} = 1.036$$

$$H_{m0} = 1.42\text{m}$$

El máximo run up se encuentra con las ecuaciones 3.7 y 3.8:

$$\xi = \frac{\tan \beta}{\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{1/2}} = \frac{\tan \beta}{\left(\frac{2\pi H_{m0}}{gT_p^2}\right)^{1/2}}$$

$$\xi = \frac{0.5}{\left[\frac{(2)(\pi)(1.42m)}{(9.8m/s^2)(6.5seg.)^2}\right]^{0.5}} = 3.406$$

$$\frac{R_{max}}{H_{m0}} = \frac{a\xi}{1+b\xi}$$

$$\frac{R_{max}}{1.42m} = \frac{(1.022)(3.406)}{1+(0.247)(3.406)} = 1.89$$

$$R_{max} = (1.42m)(1.89) = \mathbf{2.68m}$$

(2) Bloques de concreto.

Los valores mostrados en la tabla 3.2 indican que el run up será mayor para los bloques que para la roca uniforme. Así de la tabla 3.2, se asume un valor para un talud de $\cot \beta = 2.0$ entre los valores dados para $\cot \beta = 1.5$ y $\cot \beta = 2.5$. El ajuste al valor máximo de run up se realiza de la siguiente forma:

$$r_u(\text{bloques}) = 0.93$$

$$r_u(\text{roca uniforme}) \approx 0.61$$

$$R_{max}(\text{bloques}) = R_{max}(\text{roca uniforme})$$

$$\left[\frac{r_u(\text{bloques})}{r_u(\text{roca uniforme})}\right] = 2.68m \frac{0.93}{0.61}$$

$$= \mathbf{4.09m}$$

(3) Gaviones.

Para el run up en gaviones, se usa un factor de corrección del run up intermedio entre la roca uniforme y los bloques: $r_u = 0.77$. El run up máximo se determina de forma similar a los bloques de concreto:

$$r_u(\text{gaviones}) = 0.77$$

$$r_u(\text{roca uniforme}) \approx 0.61$$

$$R_{max}(\text{gaviones}) = R_{max}(\text{roca uniforme})$$

$$\left[\frac{r_u(\text{gaviones})}{r_u(\text{roca uniforme})}\right] = 2.68m \frac{0.77}{0.61}$$

$$= \mathbf{3.38m}$$

Resumen del run up:

La elevación tope requerida para evitar el rebase es el nivel de agua de diseño más el run up estimado. Los resultados se pueden ver en la *tabla 4.4*.

| Estructura | Nivel de agua (m) | Run up (m) | Elevación de la cresta (m) |
|---------------------|-------------------|------------|----------------------------|
| Roca uniforme | 1.42 | 2.68 | 4.10 |
| Bloques de concreto | 1.42 | 4.09 | 5.50 |
| Gaviones | 1.42 | 3.38 | 4.80 |

El rebase debe considerarse para brindar las adecuadas medidas de drenaje y evitar alguna inconveniencia si se encuentra con algún elemento de circulación detrás del revestimiento. El cálculo del rebase no se considera en este ejemplo.

Se debe considerar una adecuada protección en la cresta para protegerla contra la erosión ocasionada por el rebase. En las figuras del *anexo 2* se muestran los detalles típicos de cresta en revestimientos.

4.2.7. Erosión local

Se asumirá que la profundidad de la socavación local es igual a la altura de ola. El pie del revestimiento se localizará al nivel de bajamar media. La profundidad máxima del agua, d_s , es 1.42m en el nivel de diseño del agua. La altura máxima de rompiente es $H = 1.47$ m. Se debe estimar la profundidad de socavación local basándose en una ola más grande que 1.47m, por lo que se recomienda el uso de H_{10} : $H_{10} \approx 1.27H_s \approx (1.27)(1.47) \approx 1.87$; por lo tanto, se asume que la profundidad será aproximadamente 1.90m debajo del fondo existente. Esto es, en cierta forma, conservador puesto que no considera la estructura, las formas, o las propiedades de reflexión del oleaje. En la *tabla 4.5* se presentan las profundidades previstas de socavación. La protección local de roca o el empotramiento de la estructura en el fondo será de al menos la profundidad máxima, excepto en el caso de los gaviones donde su flexibilidad hará cesar cualquier socavación que pueda ocurrir.

| Tipo de revestimiento | Profundidad de la socavación máxima (m) | Reflexión potencial |
|-----------------------|---|---------------------|
| Roca uniforme | 1.87 | Baja |
| Bloques de concreto | 1.87 | Mediana-Alta |
| Gaviones | 1.87 | Moderada-Alta |

4.2.8. Sumario del diseño

Las secciones transversales del diseño para cada alternativa se muestran en las *figuras 4.5 a 4.7*. La *tabla 4.6* presenta una sinopsis con los datos de diseño de las opciones de revestimiento.

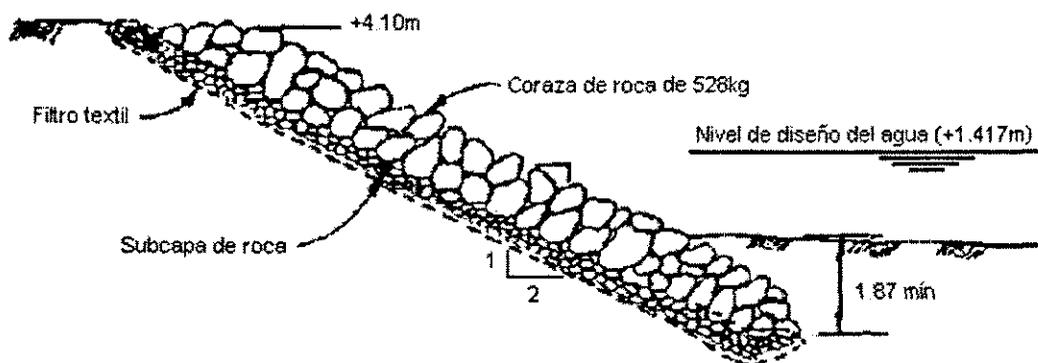


Figura 4.6. Sección transversal de diseño del revestimiento de roca uniforme.

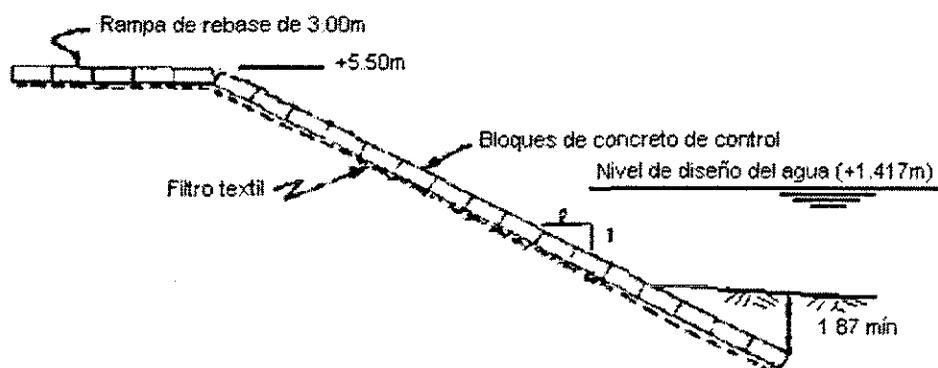


Figura 4.7. Sección transversal de diseño del revestimiento de bloques de concreto de control.

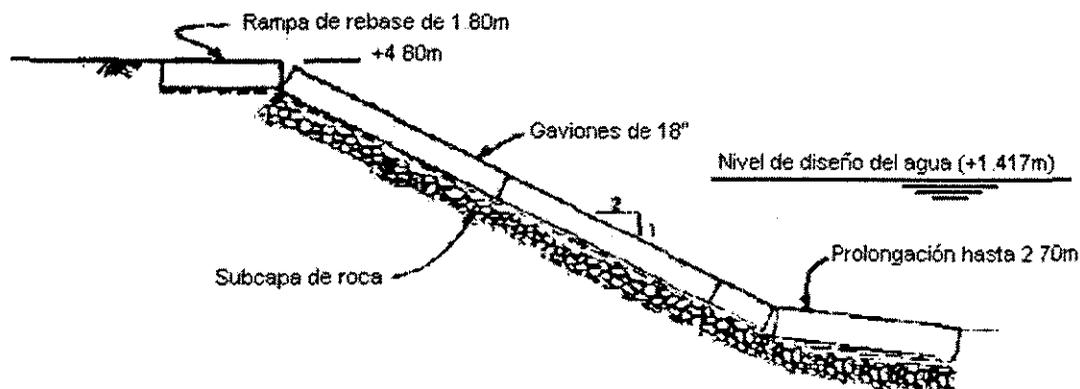


Figura 4.8. Sección transversal de diseño del revestimiento de gaviones.

Tabla 4.6**Sinopsis con los datos de diseño para las diferentes opciones de revestimiento.**

| Tipo de revestimiento | Espesor de la coraza | Altura de ola (m) | Elevación de la cresta (m) | Socavación máxima (m) |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------|
| Roca uniforme | 1.17m ¹ | 1.47 | 4.10 | 1.87 |
| Bloques de concreto | Bloques de control ² | 1.47 | 5.50 | 1.87 |
| Gaviones | Cestas de 18" | 1.47 | 4.80 | 1.87 |

¹W = 528 kg
²Bloques de control de 8"x16"x12"(ancho x largo x altura)

4.2.9. Evaluación de costos

A manera de ilustrar el proceso que se debe llevar a cabo en una evaluación de costos para las diferentes alternativas de revestimientos, se muestran las siguientes tablas modelo (tablas 4.7 a 4.9) con los conceptos de obra y los materiales involucrados en cada opción. Esta evaluación económica dependerá de los costos de la mano de obra de la zona y de la disponibilidad de materiales para la construcción.

Tabla 4.7**Modelo de tabla de los costos de preparación del sitio para las diferentes opciones de revestimiento.**

| Concepto | Cantidad | P.U. (\$) | Costo Total (\$) |
|--------------------|----------|-----------|------------------|
| Limpieza del sitio | | | |
| Excavación | | | |
| Relleno | | | |
| Nivelación | | | |
| Total | | | |

Tabla 4.8**Modelo de tabla de los costos de materiales para las diferentes opciones de revestimiento.**

| Concepto | Cantidad | P.U. (\$) | Costo Total (\$) |
|----------------------------|----------|-----------|------------------|
| Material de la coraza | | | |
| Filtro de grava | | | |
| Filtro textil | | | |
| Excavación al pie de talud | | | |
| Total | | | |

Tabla 4.9**Modelo de tabla con los costos iniciales para las diferentes opciones de revestimiento.**

| Opción | Preparación del sitio (\$) | Construcción (\$) | Costo Total (\$) |
|---------------------|----------------------------|-------------------|------------------|
| Roca uniforme | | | |
| Bloques de concreto | | | |
| Gaviones | | | |
| Total | | | |

4.2.10. Acciones de inspección, mantenimiento y reparación

El mantenimiento de los revestimientos puede ser difícil, especialmente demasiado si la mayor parte de la estructura está con frecuencia sumergida. Y los trabajos temporales, los cuales fueron construidos para acceder durante la construcción, es probable que no sean mantenidos. Las reparaciones típicas pueden involucrar la colocación de material suelto el cual se ha asentado y el reemplazo de elementos dañados. En el caso de grandes elementos prefabricados, el reemplazo puede ser tan difícil, y desde luego caro, que sea necesaria una instalación especial. En tales casos, la reparación en el sitio es más conveniente.

Un estudio realizado por Summers (1986) consideró el mantenimiento de los revestimientos costeros. Este identificó un número de factores que afectan el mantenimiento:

- Financiamiento,
- Accesibilidad,
- Adaptabilidad de revestimientos existentes y
- Necesidad de un diseño adecuado de reparaciones.

Este estudio indicó que generalmente hay fondos limitados disponibles para el mantenimiento y que la mayoría de los subsidios son otorgados para trabajos principales. Tradicionalmente, el mantenimiento fue llevado a cabo al día como fue requerido, pero esto a menudo probó ser antieconómico por lo que ahora se ha adoptado un programa de mantenimiento. Esto sin embargo requiere que el personal y equipo tengan un acceso disponible al lugar.

Es importante tener en mente la accesibilidad del sitio para la terminación de los trabajos de mantenimiento. A menudo las defensas se pueden haber construido a partir de la acción del mar y el acceso desde tierra no sea posible. El tipo de línea costera puede también causar un problema de acceso, por ejemplo, es más fácil atravesar una zona arenosa que una limosa. Las limitaciones del equipo pueden también causar problemas de accesibilidad. El equipo a menudo operará a partir de la cresta del terraplén y su alcance puede ser insuficiente para reparar el daño y aún más bajar el talud, requiriendo por lo tanto un equipo más grande y más caro.

Para cualquier revestimiento, las inspecciones periódicas de monitoreo (quizás en intervalos semestrales) debe llevarse a cabo, para identificar las necesidades de mantenimiento. Esto típicamente involucrará que se observen zonas con asentamiento excesivo, localización de daños o erosiones perimetrales. Se deben repetir inspecciones adicionales después de ocurrir serias tormentas.

Los trabajos correctivos simples pueden incluir el llenar los vacíos con concreto o grout asfáltico o el reemplazo de piezas que hayan fallado.

CONCLUSIONES y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

CONCLUSIONES

Se ha descrito el uso de revestimientos como estructuras de protección costera, explicando sus funciones, limitaciones, clasificación, elementos estructurales y sus materiales componentes y la identificación de los modos probables de falla a los que están expuestos.

Para un adecuado funcionamiento de los revestimientos deben apegarse a guías de diseño establecidas; así se proporcionó una guía de diseño práctica para el diseño funcional de revestimientos como estructura de protección costera basada en otros estudios e investigaciones realizados.

Esta guía, así mismo permite una selección adecuada del o los materiales apropiados (y/o en disponibilidad) para el diseño de los componentes del revestimiento; esto incentiva la creatividad del diseñador al disponer de un criterio de selección de las diferentes alternativas de materiales en el diseño de revestimientos, con lo cual dispondrá de una comparativa que le ayudará a elegir o combinar la(s) mejor(es) opción(es) al momento de diseñar y evaluar costos

En base a esta guía de diseño, se ilustró con una aplicación práctica en un caso real de erosión que se presenta en la línea de costa adyacente a la obra de toma superficial de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos, cerca del Puerto de Tuxpan, Veracruz.

FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Se pueden analizar eventos particulares –mediante modelos numéricos y simulaciones– donde se estudiaría la respuesta de los diferentes materiales empleados en los revestimientos, lo cual enriquecería y normalizaría los criterios de diseño. Así también se podrían analizar a más detalle los mecanismos de falla que sufren los sistemas en conjunto.

Conviene realizar una recopilación de información detallada de materiales prefabricados usados en la construcción de los revestimientos, con especificaciones técnicas y métodos de construcción. Esto daría pie a elaboración de manuales específicos con tal o cual material apoyándose en guías de diseño adecuadas.

Una última consideración sería la evaluación de proyectos de este tipo en costas mexicanas erosionadas o inestables que, por su importancia, requieran el uso de alternativas como los revestimientos; se analizaría tanto su factibilidad técnica, económica, social y ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

1. **AHRENS. 1975.** Large wave tank tests of riprap stability, CERC Technical Memorandum 51, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
2. **AHRENS. 1981a.** Design of riprap revetments for protection against wave attack, CERC Technical Paper 81-5, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
3. **AHRENS. 1981b.** Irregular wave runup on smooth slopes, CERC Coastal Engineering Technical Aid 81-17, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
4. **AHRENS. 1987.** Characteristics of reef breakwaters, CERC Technical Report 87-17, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
5. **AHRENS y HEIMBAUGH. 1988.** Approximate upper limit of irregular wave runup on riprap, Technical Report CERC-88-5, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
6. **BARRET, M. G. 1983.** "Coast-protection design: the overall scheme". En: Proceedings of a conference organized by the Institution of Civil Engineers at the University of Southampton", pp. 119-126, Great Britain, 248 p.
7. **BIRD, ERIC. 1996.** "Beach processes and morphology", pp. 20-71 y "Causes of beach erosion", pp. 73-108. En: Beach Management, 281 p.
8. **BRODERICK. 1983.** "Riprap stability, a progress report". En: Proceedings Coastal Structures '83 ASCE Specialty Conference, 331-41.
9. **CHEN et al. 1981.** "Hydraulic testing of plastic filter fabrics". En: Journal, Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers 107 (IR3), 307-24.
10. **CUR/TAW REPORT 155. 1995.** Design Manual for Pitched Slope Protection, CUR, Gouda, Netherlands, 297 p.
11. **DUNHAM y BARRETT 1974.** "Woven plastic cloth filters for stone seawalls". En: Journal, Waterways, Harbors, and Coastal Engineering Division, American Society of Civil Engineers 100, (WWI), 13-22.
12. **ECKERT. 1983.** "Design of toe protection for coastal structures". En: Coastal Structures '83 ASCE Specialty Conference, 331-41.
13. **FREDSOE, JORGEN y DEIGAARD, ROLF. 1993.** "Basic concepts of sediment transport". En Mechanics of Coastal Sediment Transport (Advanced Series on Ocean Engineering-Volume 3), pp. 194-224, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 369 p.
14. **FRÍAS, ARMANDO y MORENO, GONZALO. 1988.** "Transporte de sedimentos". En: Ingeniería de Costas, 2ª. ed., pp. 163-213, Ed. Limusa, México, D.F., 333 p.
15. **GAVIONES MACCAFERRI. 1995.** Catálogo Maccaferri de Gaviones, Oficina Maccaferri, West Sacramento, CA, USA.
16. **GODA. 1975.** "Irregular wave deformation in the surf zone". En: Coastal Engineering in Japan, Vol. 18.
17. **GODA. 1985.** Random seas and design of maritime structures. University of Tokyo Press.
18. **GODA. 1987.** "Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum", AIRH Seminar.
19. **HUDSON. 1961.** Wave forces on rubble-mound breakwaters and jetties, Miscellaneous Paper 2-453, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

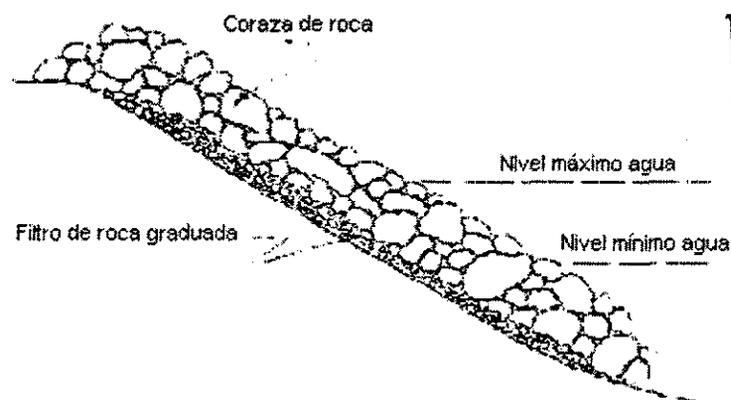
20. **HUGHES y BORGMAN. 1987.** "Betarayleigh distribution for shallow water wave heights". En: Proceedings of Conference Sponsored by WW Div./ASCE, Newark, DE.
21. **KLEIN, BRETELER y BEZUIJEN. 1991.** "Simplified design method for block revetments". En: Proceedings ICE Conference on Coastal Structures and Breakwaters, Thomas Telford, London, U.K.
22. **MACDONEL, GUILLERMO et al. 1999.** "Introducción". En: Ingeniería Marítima y Portuaria, 1ª. ed., pp. 2-10, Ed. Alfaomega, México, D.F., 629 p.
23. **McCONNELL KIRSTY. 1998.** Revetment systems against wave attack –A design manual–, 1ª. ed., Ed. Thomas Telford, Great Britain, 162 p.
24. **ROSALES, VÍCTOR. 1999.** Tesis: Caracterización del oleaje aplicada a Tuxpan, Veracruz, Instituto Politécnico Nacional, México.
25. **SCHIERECK, G. J. 2001.** "Waves-erosion and stability", pp. 177-202, y "Protections", pp. 257-281. En: Introduction to bed, bank and shore protection –Delft: Delft University Press.– III, 1ª. ed., 397 p.
26. **SHORE PROTECTION MANUAL. 1973.** 2 Vols., US Army Coastal Engineering Research Center, US Govt. Publishing, Washington D. C., USA.
27. **SILVA, RODOLFO. 2001.** Apuntes de los cursos: Hidráulica Marítima y Análisis y Predicción del Oleaje, Instituto de Ingeniería UNAM, México.
28. **SILVESTER, RICHARD y HSU, JOHN. 1997.** Coastal Stabilization (Advanced Series on Ocean Engineering-Volume 14), World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 578 p.
29. **SUMMERS, L. 1986.** Maintenance of revetments, Technical Note 124, CIRIA, London, UK.
30. **THOMPSON y VINCENT. 1985.** "Significant wave height for shallow water design". En: ASCE Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering 111 (5).
31. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS.** Hydraulic Design of Flood Control Channels, Engineer Manual 1110-2-1601, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
32. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1980.** Use of geotechnical fabrics, CETN III-3. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
33. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS.** Geotextiles Used as Filters, CW 02215. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
34. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1981.** Revetments-Their applications and limitations, CETN III-9, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
35. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1981.** Shore protection selection criteria, CETN III-6. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
36. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1985.** Armor unit placement method versus stability coefficients, CETN III-4. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
37. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1985.** Design of coastal revetments, seawalls and bulkheads, Engineer Manual 1110-2-1614, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
38. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1985.** Riprap revetment design, CETN III-1. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
39. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1985.** Run up on composite rough slopes, CETN III-2. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
40. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1986.** Use of gabions in the coastal environment, CETN III-31. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.

41. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1988.** Revetment failure-An Australian lesson, CETN III-40. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
42. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1993.** "Apéndice D: Filter design", En: Seepage Analysis and Control for Dams, Engineer Manual 1110-2-1901, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
43. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1994.** "Apéndice B: Filter design", En: Earth and Rock-fill Dams General Design and Construction Considerations, Engineer Manual 1110-2-2300, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
44. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1998.** Field Guidance for Periodic Inspections of Coastal Structures, CETN III-63. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
45. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 2001.** Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (en 6 volúmenes).
46. **van der MEER y PILARCZYK. 1987.** "Stability of breakwater armour layers deterministic and probabilistic design". En: Delft Hydraulics Communication No. 378, Delft, The Netherlands.
47. **van der MEER. 1988a.** "Deterministic and probabilistic design of breakwater armour layers". En: ASCE Journal of Waterways, Port, Coastal, and Ocean Engineering 114 (1), pp. 66-80.
48. **van der MEER. 1988b.** Ph.D. Tesis: Rock slopes and gravel beaches under wave attack, Dept. of Civil Engineering, Delft Technical University. También, Delft Hydraulics Communication No. 396, Delft, The Netherlands.
49. **van RIJN. 1998.** "Introduction", pp. 1.1-2.10, "Coastal classification", pp. 2.1-2.10, "Basic hydrodynamic processes in the coastal zone", pp.3.1-3.32 y "Sand coasts", pp.4.422-4.425, 4.454, 4.482. En Principles of coastal morphology, 1ª. ed., Ed. Aqua Publications, Netherlands.
50. **WARD. 1992.** Prediction of overtopping rates for irregular waves on riprap revetments", CERC Miscellaneous Paper 92-4, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
51. **WARD y AHRENS. 1992.** Overtopping rates for seawalls, CERC Miscellaneous Paper 92-3, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
52. **WHITEHOUSE, RICHARD. 1998.** "General principles of scour", pp. 7-32 y "Preventive or remedial measures for scour", pp. 85-102. En Scour at marine structures, 1ª. ed., Ed. Thomas Telford, Great Britain, 198 p.
53. **WEGGEL. 1972.** "Maximum breaker height for design". En: Journal, Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, American Society of Civil Engineers 98 (WW4), Paper 9384.
54. **WIEGEL, ROBERT. 1965.** "Shores and shore processes", pp. 341-346 y "Functional design", pp. 442-444. En: Oceanographical Engineering, 2ª. ed., Prentice-Hall, Inc., USA, 532 p.

ANEXO 1
TIPOS DE REVESTIMIENTOS

A1.1. Enrocamiento uniforme y riprap graduado

a. *General.* Los revestimientos de roca son construidos tanto de piezas con tamaños casi uniformes (rocas de cantera) o de una graduación de tipo granulométrico (riprap). Los revestimientos riprap son de alguna forma más difíciles de diseñar e inspeccionar debido al control riguroso de las graduaciones permisibles (aquellos paquetes de materiales pequeños deben excluirse) y a su tendencia de ser menos estables bajo el impacto de grandes olas. Se puede obtener una gran economía mediante la igualación de los límites de graduación del diseño riprap con los de la cantera de producción, de manera que la disparidad no sea demasiado grande. Los revestimientos de riprap graduados deben usarse con suma precaución, pues solo son aceptables como aplicaciones en protección costera con un bajo impacto de oleaje. Las estructuras con enrocamiento uniforme son más estables por lo que se les recomienda para oleaje con gran impacto.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura A1.1. Revestimiento de roca uniforme.

b. *Ventajas y desventajas.* La ventaja principal de los revestimientos de roca es su flexibilidad, la cual les permite asentarse sobre el suelo subyacente o experimentar un menor daño. Debido a su superficie rugosa, también experimentan run up y rebase menores que aquellas superficies más suaves. La desventaja principal es que requiere de maquinaria pesada para la colocación de la roca.

c. *Consideraciones en el diseño.* En la mayoría de los casos, la pendiente recomendada del talud es 1:2. Se debe colocar material de llenado cuando se necesite tener un talud uniforme, pero debe estar libre de rocas grandes y escombros y también se debe compactar firmemente antes de que se comience la construcción del revestimiento. Las velocidades de la corriente pueden ser también importantes en algunas áreas tales como en las mareas de ensenadas donde las alturas de ola son bajas. Se deben colocar filtros de medida apropiada para prevenir la pérdida de material del talud a través de vacíos en el revestimiento de roca. Si se usan filtros textiles, puede ser necesario un estrato intermedio de rocas pequeñas debajo de la coraza para distribuir la carga y prevenir la ruptura del filtro.

d. Factores de diseño.

- (1) La altura de ola de daño nulo es función del peso de la roca.
- (2) Se calcula el run up potencial del oleaje de forma que su efecto sea tan bajo como el 50% del que se da en superficies suaves.
- (3) Se calcula la reflexión potencial del oleaje para que su efecto sea bajo.

e. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.1.

A1.2. Sobrecubierta de roca

a. General. La sobrecubierta de roca consiste en un estrato con rocas grandes de forma uniforme usado tanto para mejorar un revestimiento de roca dañado o con tamaños de material insuficientes o bien para proveer un diseño inicial económico. Pruebas con modelo de escala grande (McCartney y Ahrens 1976) nos sugieren que la estabilidad de tales estratos es casi igual a un diseño estándar pero solamente con la mitad del esfuerzo de reserva.

b. Factores de diseño

- (1) La altura de ola de daño nulo es función del peso de la roca.
- (2) Se calcula el run up potencial del oleaje de forma que su efecto sea tan bajo como el 50% del que se da en superficies suaves.
- (3) Se calcula la reflexión potencial del oleaje para que su efecto sea bajo.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.2.

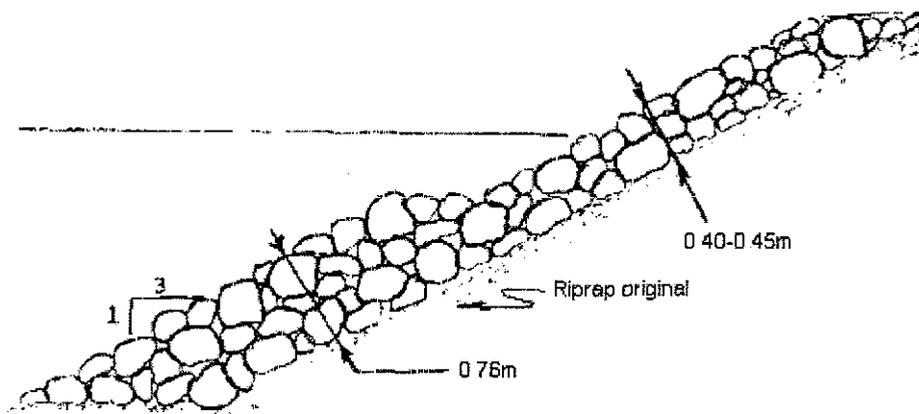


Figura A1.2. Revestimiento con sobrecubierta de roca.

A1.3. Roca de campo

a. General. Un revestimiento formado con aquella roca que se encuentra a campo abierto puede construirse usando solamente una capa sencilla de este material de cantos rodados o semirodados. Es necesario poner especial atención a fin de tener una sección uniforme. Las formas redondeadas son consideradas inusuales para multiestratos, más se puede lograr un funcionamiento adecuado si se cuida adecuadamente la colocación.

b. Factores de diseño

- (1) La altura de ola de daño nulo es función del peso de la roca.



- (2) Se calcula el run up potencial del oleaje de forma que su efecto sea tan bajo como el 50% del que se da en superficies suaves.
- (3) Se calcula la reflexión potencial del oleaje para que su efecto sea bajo.

c. *Instalaciones prototipo. Ver figura A1.3.*

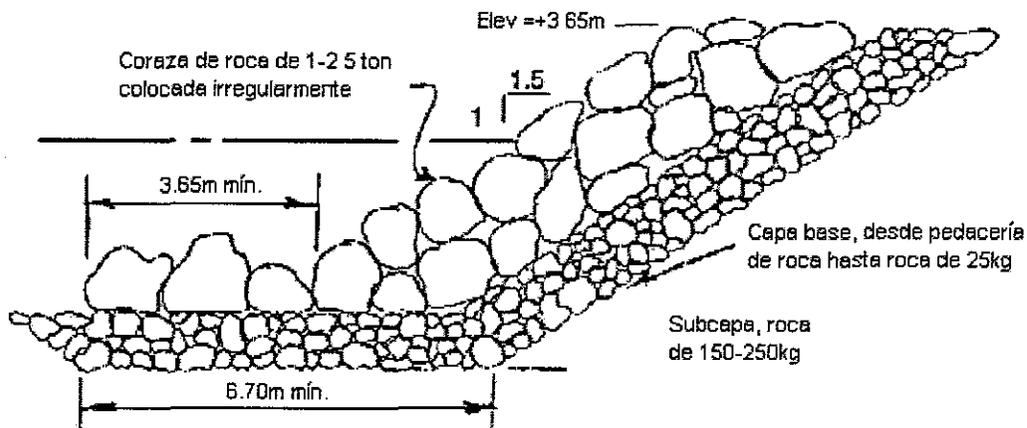


Figura A1.3. *Revestimiento con roca de campo.*

A1.4. Fragmentos de concreto

a. *General.* El concreto usado en tales estructuras debe resistir la abrasión por desechos flotantes y el ataque de agua salada. Adicionalmente, si los fragmentos contuvieran salientes de los restos de varillas estas deberán cortarse previo a la colocación de las piezas. Las fallas de este tipo de revestimientos han ocurrido generalmente por la negligencia en los requerimientos de drenaje y filtrado. También se ha observado que algunas fallas se han debido a que los revestimientos constaban de una sola capa o su colocación fue defectuosa en el talud.

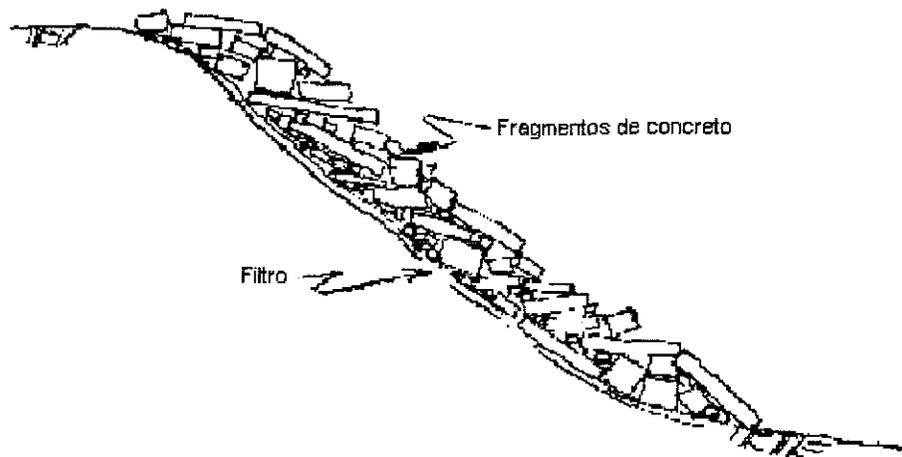


Figura A1.4. *Revestimiento con fragmentos de concreto.*

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una mejora en el procedimiento sería colocar una capa delgada de fragmentos pequeños, así cada pieza sería conformada de tal forma que la más grande no fuera tres veces más grande que la más corta, por lo que se incrementaría la estabilidad del revestimiento y se minimizaría su destrucción por la acción del oleaje. Los fragmentos se tenderían directamente sobre el filtro. En un método alternativo se utilizarían fragmentos apilados en un talud a fin de crear una cara escalonada.

b. Factores de diseño (calculados)

- (1) La altura de ola de daño nulo es menor de 0.90m
- (2) El run up potencial del oleaje para una colocación aleatoria es de tal forma que su efecto sea tan bajo como el 50% del que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje para una colocación aleatoria es de tal forma que su efecto sea bajo.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.4.

A1.5. Asfalto

a. General. El asfalto ha sido usado en la construcción de los revestimientos de las siguientes formas: como pavimento de concreto asfáltico, como goma asfáltica para aglutinar grandes rocas y como parches asfálticos para unir pequeños grupos de roca (5 a 10) cuando se vierte en un talud.

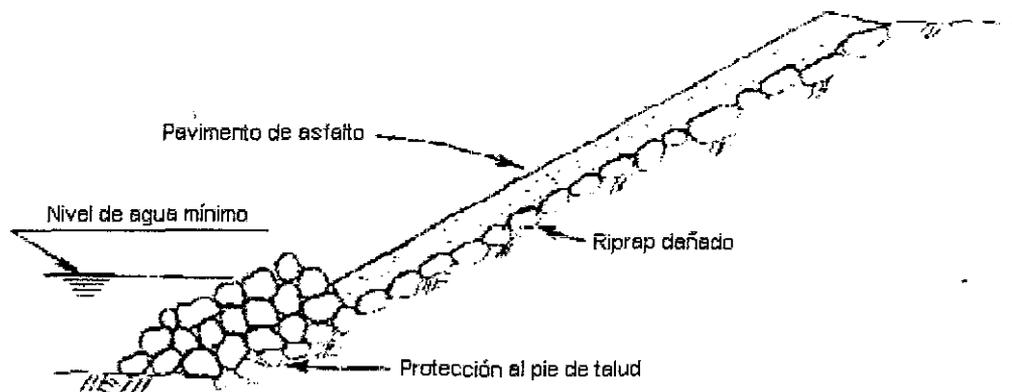


Figura A1.5. Revestimiento con concreto asfáltico.

b. Pavimento de concreto asfáltico. El pavimento de concreto asfáltico consiste de un pavimento estándar que es colocado sobre un talud como capa de acorazamiento. La estabilidad es una función desconocida del espesor de la capa. El pavimento es de alguna forma flexible lo cual incrementa su estabilidad, más una adecuada filtración y un alivio en la presión hidrostática son necesarios debido a su naturaleza impermeable. Adicionalmente, la colocación del asfalto bajo el agua es difícil y cara y el control de calidad no es fácil.

c. Goma asfáltica. En un revestimiento con goma asfáltica, una capa de riprap o de enrocamiento uniforme es aglutinada por medio de un vertido caliente de asfalto sobre ella. El resultado es una capa de roca-asfalto con una estabilidad superior comparada con aquella capa de pura roca. La construcción debajo del agua es un problema puesto que la goma se enfría rápidamente y no penetra de forma efectiva para aglutinar las rocas. El alcance de este problema es función de la profundidad del agua.

d. *Parches asfálticos.* Se vierte el asfalto en los taludes de roca a fin de unir de 5 a 10 rocas. Pruebas realizadas revelaron un incremento en el coeficiente de estabilidad en dos o tres veces mayores a aquellos taludes sin vertido alguno (McCartney y Ahrens 1976). Este procedimiento potencia tanto a las secciones de revestimiento dañadas como aquellas secciones originales. Se recomienda solo penetrar dos tercios de un espesor de la capa igual a tres diámetros de roca nominales. El tercio restante del fondo sirve después como reserva en el caso de que el asfalto sea deslavado (d'Angremond et al. 1970).

e. *Factores de diseño.*

(1) La altura de ola de daño nulo se calcula de forma que:

El pavimento: Sea función del espesor del estrato.

La goma: Se use en capas de 0.60 a 1.20m.

El parche asfáltico: Sea función del tamaño de la roca.

(2) El run up potencial del oleaje se calcula de forma que:

En el pavimento: sea 100% del efecto del run up en superficies suaves.

Con la goma: sea 80 a 100% del efecto del run up en superficies suaves pero en función del espesor de la goma.

En el parche asfáltico: sea 60 a 70% del efecto del run up en superficies suaves.

(3) La reflexión potencial del oleaje se calcula de forma que:

En el pavimento y la goma asfáltica: su efecto sea alto.

Con el parche asfáltico: su efecto sea mediano

f. *Instalaciones prototipo.* Ver figura A1.5.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A1.6. Piezas geométricas de concreto

a. *General.* Las piezas geométricas de concreto tales como tribars, tetrápodos y dolos se pueden usar en lugar de roca en los revestimientos. Para el tamaño de la selección se debe referir a los métodos indicados en los párrafos 3.12 a 3.15 del capítulo 3.

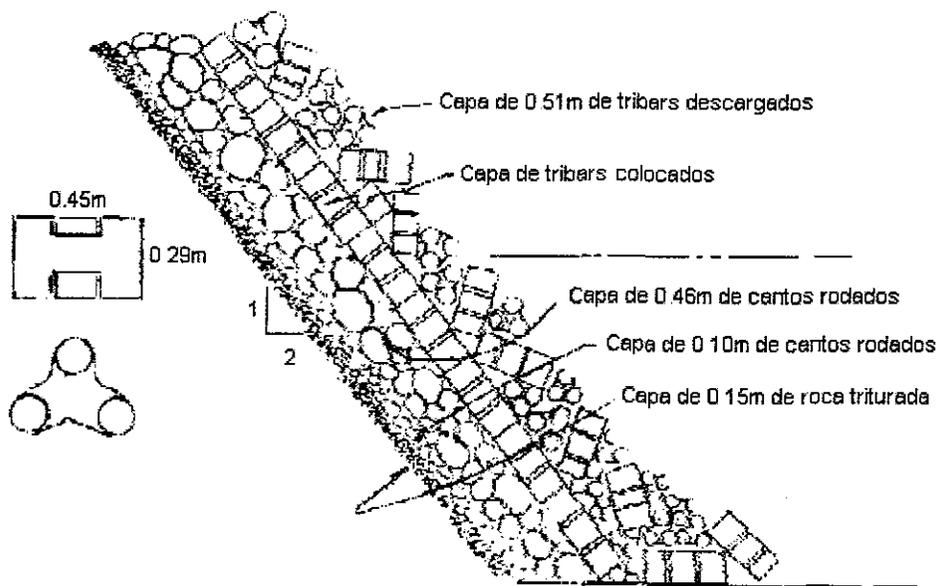


Figura A1.6. Revestimiento con tribars de concreto.

De acuerdo a lo indicado en esos párrafos, algunas clases de este tipo de piezas muestran estabilidad contra el ataque del oleaje superando de dos a seis veces la estabilidad, de un peso similar, proporcionada por las rocas. Sin embargo la dotación de estas piezas en lugares donde hay disponibilidad de rocas no llega a ser económicamente factible.

b. Factores de diseño.

- (1) La altura de ola de daño nulo es función del tamaño la piezas de la capa.
- (2) Se calcula el run up potencial del oleaje de forma que su efecto sea del orden del 50 al 80% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es calculada de tal forma que su efecto sea de bajo a medio.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.6.

A1.7. Planchas de concreto

a. General. Los revestimientos de este tipo consisten en la aplicación de una plancha de concreto en el sitio. Esta superficie puede ser lisa o escalonada, además la estructura se puede rematar con un borde curvado a fin de limitar el rebase del run up del oleaje. La protección local puede realizarse con roca o con algún tablestacado; dicha protección debe realizarse para atenuar las presiones hidrostáticas detrás del tablestacado y para un filtrado adecuado. La construcción de este tipo de revestimiento es generalmente más cara que el riprap o el enrocamiento uniforme.

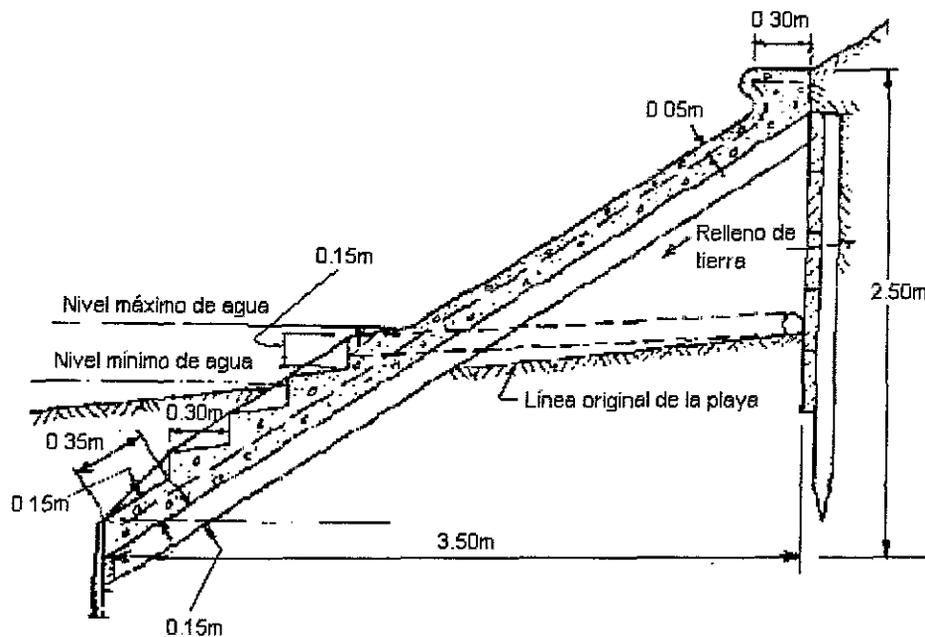


Figura A1.7. Revestimiento con plancha de concreto.

b. Factores de diseño.

- (1) La altura de ola de daño nulo es función del espesor de la capa de concreto.
- (2) Se calcula el run up potencial del oleaje de forma que su efecto sea del orden del 100% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es calculada de tal forma que su efecto sea alto.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.7.

A1.8. Bloques de concreto

Los bloques de concreto prefabricado son comúnmente usados como sustitutos del riprap o del enrocamiento uniforme. Hay muchos diseños disponibles y se ofrecen nuevas formas en bases regulares para reemplazar aquellos que no son aceptados por el mercado. Los bloques para revestimiento son diseñados generalmente con características de engranaje, muchas de estas piezas son patentadas. Los bloques de concreto tienen la ventaja de tener una apariencia limpia y uniforme y muchas piezas son lo suficientemente ligeras para instalarse manualmente sobre la superficie preparada. La desventaja de los bloques de concreto es que el engranaje entre las piezas requiere de mantenimiento. Una vez que una pieza falle, posteriormente las demás harán lo mismo conduciendo a una falla completa del sistema. Se requiere de una base estable luego que el asentamiento de la protección al pie de la estructura pueda causar un desplazamiento de las piezas y conducir a una falla. También, la mayoría de los revestimientos con bloques de concreto tienen una superficie relativamente suave que puede conducir a un mayor run up y rebase del oleaje que el de aquellos formados con enrocamiento. En la *figura A1.8* se muestran los tipos de bloques de concreto con sus medidas y nombres comerciales.

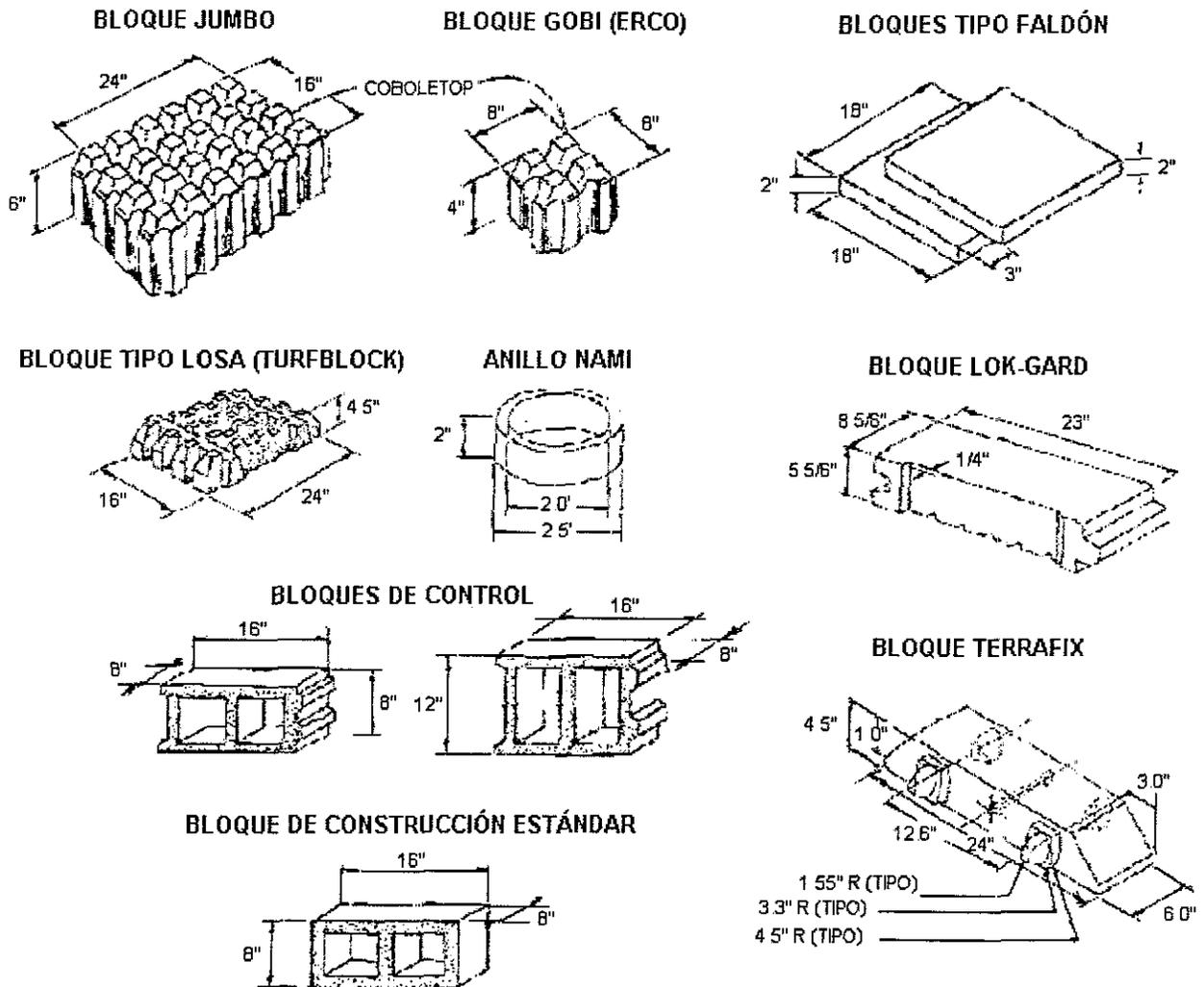


Figura A1.8. Tipos de bloques de concreto.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

A1.9 Bloques Gobi (Erco), bloques jumbo y colchonetas (mats)

a. *General.* Los bloques Gobi son piezas patentadas que pesan cerca de 6 Kg. Los bloques Erco son similares, pero son de un proveedor diferente. Los bloques Jumbo son bloques Erco de gran tamaño que pesan cerca de 50 Kg. Las piezas están diseñadas para colocarse manualmente sobre un filtro de tela, o ya vienen desde fábrica pegadas a bandas de soporte de filtros de tela. Los bloques más recientes se llaman Gobimats (Ercomats) o Jumbo Ercomats, dependiendo del tamaño de las piezas. Si los bloques están pegados a ambos lados de la banda de soporte, espada con espalda, son conocidos como Gobimats dobles (Ercomats) o Ercomats Jumbo dobles. Los bloques usados para producir mats tienen los bordes chaflanados a fin de facilitar su colocación. Mientras los bloques diseñados para una colocación manual tienen lados verticales a fin de ayudar al mejor ajuste posible. Es preferible colocar los mats en los sitios donde exista vandalismo. Los mats sencillos y dobles requieren de maquinaria para su colocación. El relleno con arena o grava de los bloques incrementa la estabilidad del revestimiento y si crece pasto en las aberturas de los bloques aumentará la resistencia.

b. Factores de diseño

Altura de la ola de daño nulo:

Bloques: 0.60m (McCartney 1976)

Mats: 1.20m (calculada)

Run up potencial del oleaje: es con un efecto del orden del 90% de aquel que se da en superficies suaves (Stoa 1979).

Reflexión potencial del oleaje: Alto (calculado).

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.9.

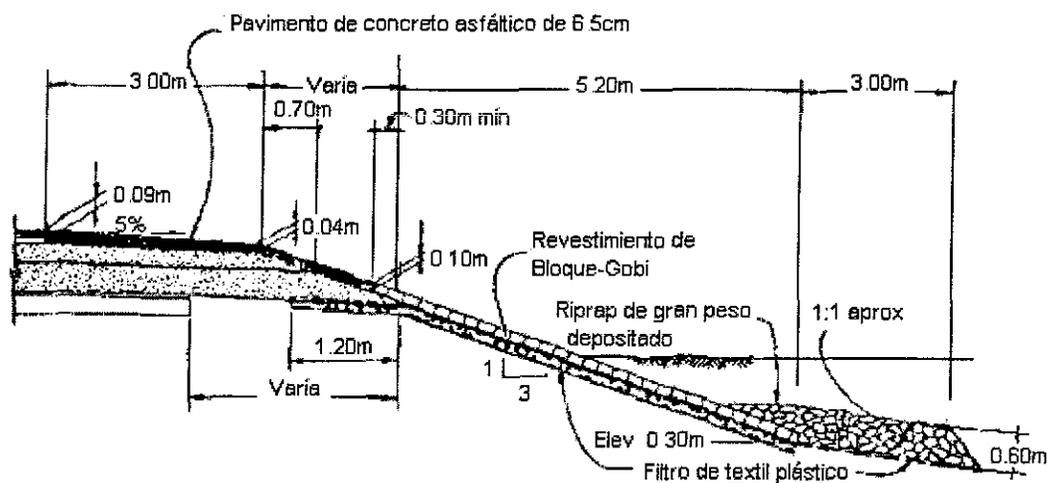


Figura A1.9. Revestimiento de bloque-Gobi.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A1.10 Bloques tipo losa (Turfblocks)

a. *General.* Los bloques tipo losa, turfblocks, son piezas patentadas que están diseñadas para una colocación manual sobre un filtro con los ejes longitudinales paralelos a la línea costera. Cada bloque mide 40x60x11.5 cm y su peso es aproximadamente de 45 Kg. Las instalaciones en campo

no han producido resultados concluyentes, pero su funcionamiento debe ser similar al de los bloques Jumbo Erco. Su forma plana y delgada requiere una base estable ya que cualquier asentamiento diferencial debajo de los bloques hace que sean susceptibles a un derrumbe bajo la acción del oleaje.

b. Factores de diseño (calculados).

- (1) La altura de la ola de daño nulo es de 0.60m.
- (2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 90% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es alta.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.10.

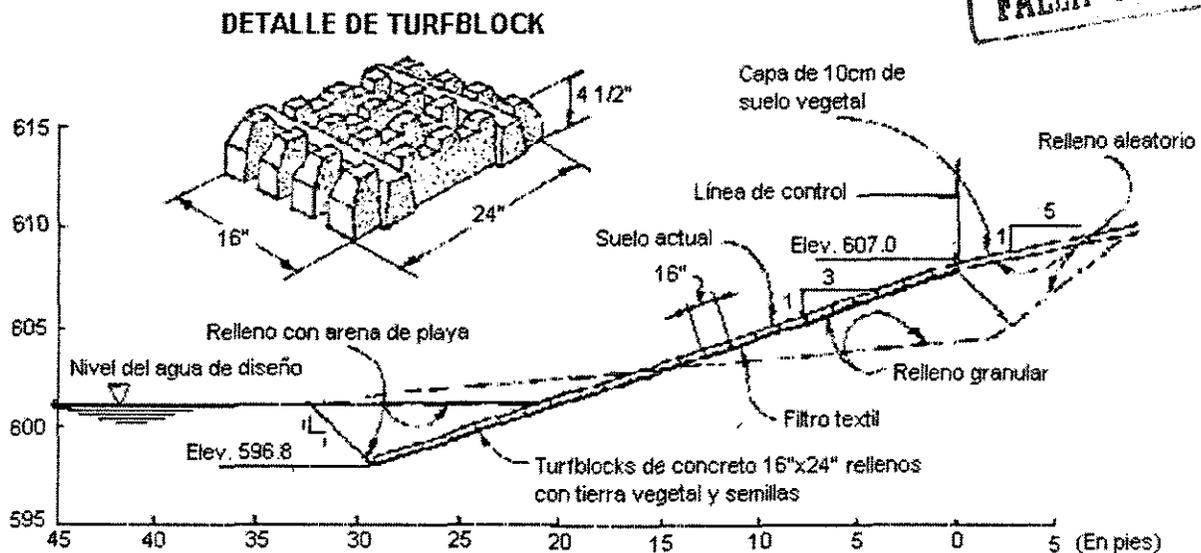


Figura A1.10. Revestimiento de bloque-Turblock.

A1.11 Anillos Nami

a. General. El anillo Nami es un bloque de concreto patentado en forma de una sección corta de tubería, 0.76m de diámetro por 0.30m de altura, el cual pesa 110 Kg. Los anillos son colocados lado a lado en el talud y sobre un filtro. Se ha observado un mejor funcionamiento cuando se unen los anillos por medio de una barra. La arena o grava atrapada con la turbulencia de las olas se deposita dentro de los anillos y en los vacíos entre anillos, lo cual agrega estabilidad a la sección y protege al filtro de tela. Debido a su forma, los anillos Nami son susceptibles a severas abrasiones y daños causados por pequeñas rocas redondeadas, por lo que su uso se recomienda básicamente en ambientes con arena.

b. Factores de diseño (calculados)

- (1) La altura de ola de daño nulo es de 0.90m.
- (2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 50 al 90% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es de media a alta.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.11.

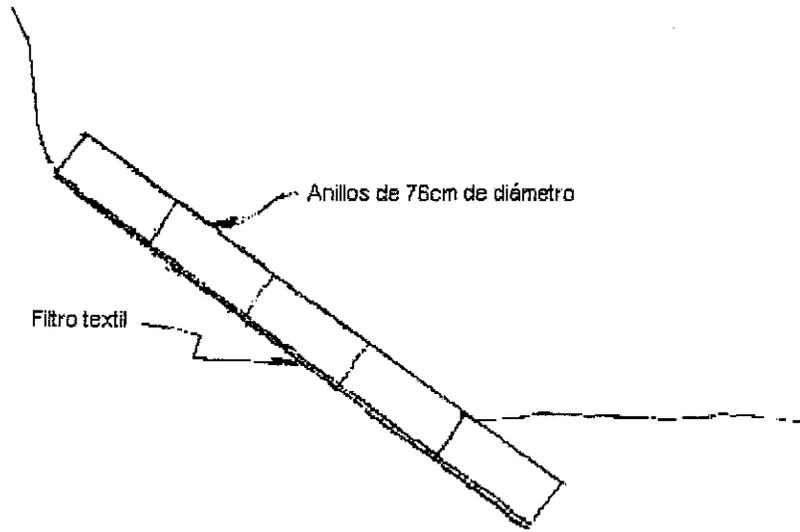


Figura A1.11. Revestimiento de anillos Nami.

A1.12 Bloques de construcción estándar de concreto

a. *General.* Los bloques de construcción estándar de concreto pueden ser colocados manualmente sobre un filtro de tela con sus ejes longitudinales perpendiculares a la línea costera y sus huecos en forma vertical. Su disponibilidad general es una ventaja fundamental, sin embargo son altamente susceptibles de robo. La capa que forma queda perfectamente ajustada lo cual brinda estabilidad si es que el pie y flancos de la estructura están adecuadamente protegidos. Se han realizado pruebas de falla de este tipo de revestimientos en un prototipo a escala (Giles 1978). Otra desventaja es que este tipo de material no es lo suficientemente durable en un medio marino, por lo que se deben usar concretos especiales.

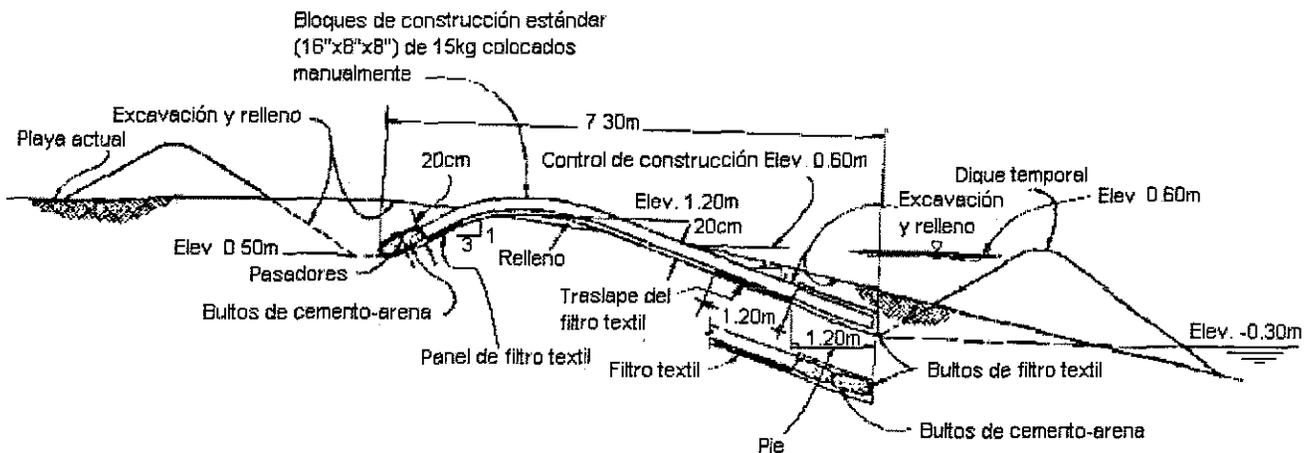


Figura A1.12. Revestimiento de bloques de construcción estándar.

b. *Factores de diseño (calculados)*

- (1) La altura de ola de daño nulo es de 1.20m.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

- (2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 80 al 90% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es alta.

c. *Instalaciones prototipo. Ver figura A1.12.*

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A1.13 Bloques de control de concreto

a. *General.* Los bloques de control de concreto vienen en varios tamaños y son similares a los bloques de construcción estándar de concreto a excepción de unas salientes en los bordes de los primeros que brindan una forma de engranaje entre las piezas. Diseñados para ser colocados manualmente sobre un filtro textil con las celdas verticales, los bloques pueden alinearse con sus ejes longitudinales paralelos a la línea costera, sin embargo para un funcionamiento óptimo la colocación podría ser perpendicular a la orilla.

b. *Factores de diseño (calculados)*

- (1) La altura de ola de daño nulo es de 1.50m.
- (2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 50 al 90% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es de mediana a alta.

c. *Instalaciones prototipo. Ver figura A1.13.*

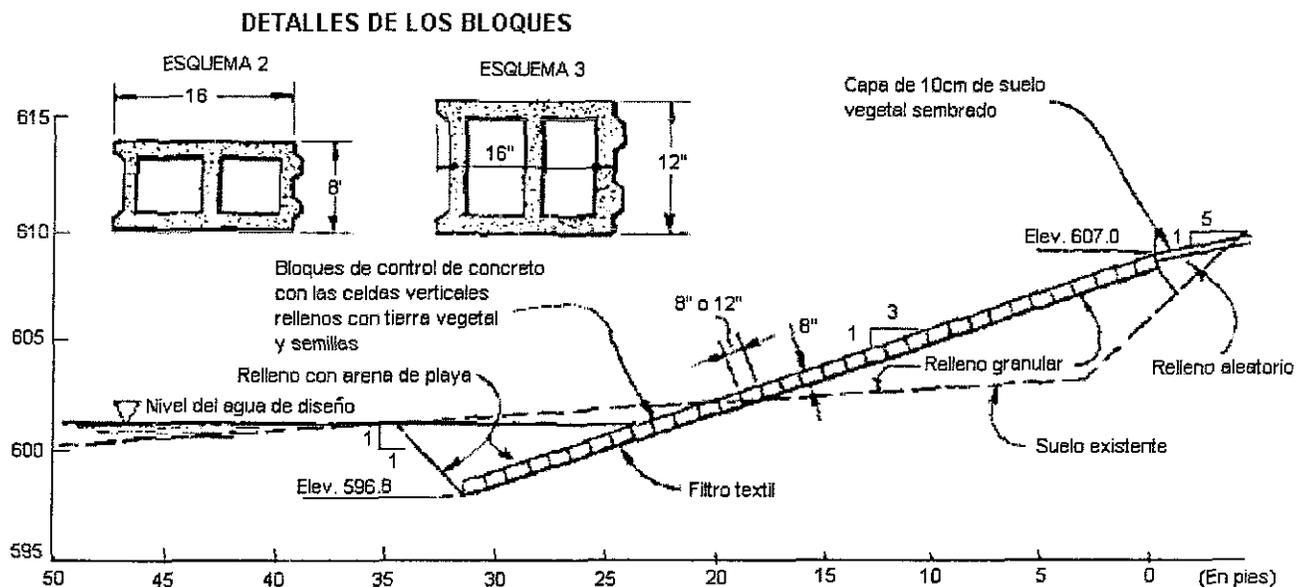


Figura A1.13. Revestimiento de bloques de control de concreto.

A1.14 Bloques tipo faldón

a. *General.* Los bloques tipo faldón se forman uniendo bloques estándar o de otros tamaños con un adhesivo epóxico. El peso resultante de las piezas depende del tamaño básico de los bloques usados. La *tabla A1.1* lista los pesos para diferentes tamaños de bloques.

| Tabla A1.1 | |
|---|-----------|
| Pesos de los bloques tipo faldón | |
| Pieza con dos bloques unidos (cm) | Peso (kg) |
| 20 x 40 x 10 | 18 |
| 45 x 45 x 15 | 73 |
| 90 x 90 x 50 | 953 |
| 90 x 90 x 70 | 1334 |

b. Factores de diseño

(1) Alturas de ola de daño nulo:

Bloques pequeños: 1.20m (May y Jachowski, 1964).

Bloques grandes: 1.50m (calculado).

(2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 90 al 100% de aquel que se da en superficies suaves.

(3) La reflexión potencial del oleaje es alta.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.14.

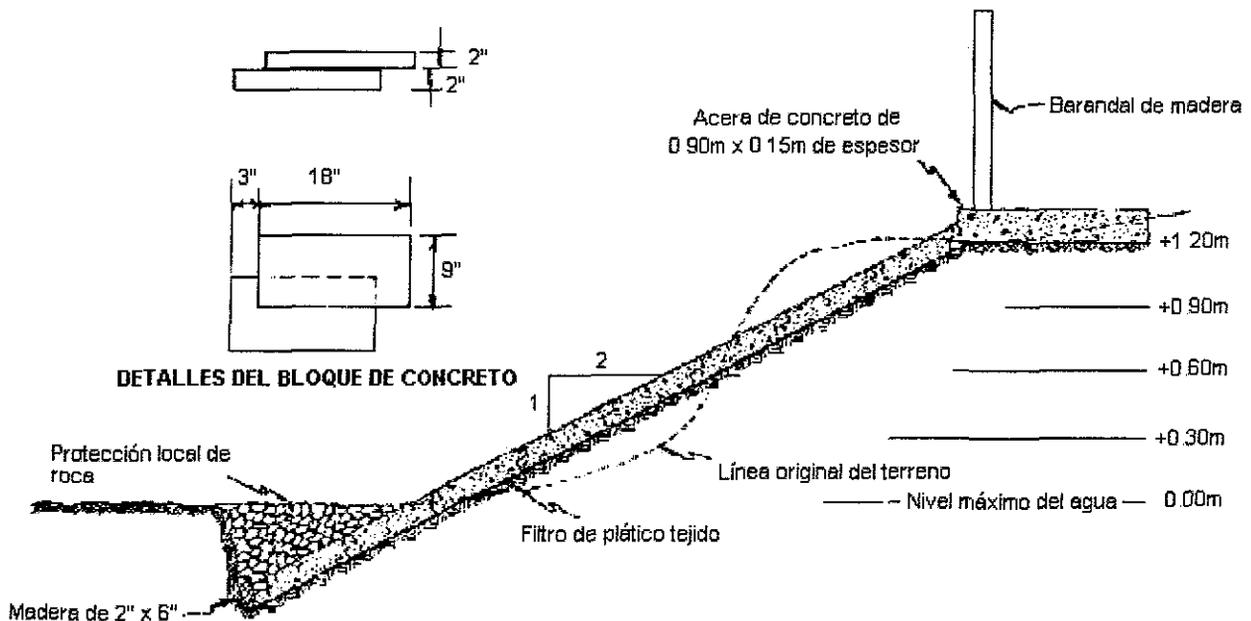


Figura A1.14. Revestimiento de bloques tipo faldón.

A1.15 Bloques Lok-Gard

a. General. Los bloques Lok-Gard se unen mediante un sistema de engranaje. Las piezas patentadas de 40 kg de peso son diseñadas para una colocación manual con sus ejes longitudinales perpendiculares a la línea costera. El revestimiento final tiene una superficie suave con lo cual se da un run up alto y un rebase potencial del oleaje.

b. Factores de diseño (calculados)

(1) La altura de ola de daño nulo es de 1.20m.

(2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 100% de aquel que se da en superficies suaves.



(3) La reflexión potencial del oleaje es alta.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.15.

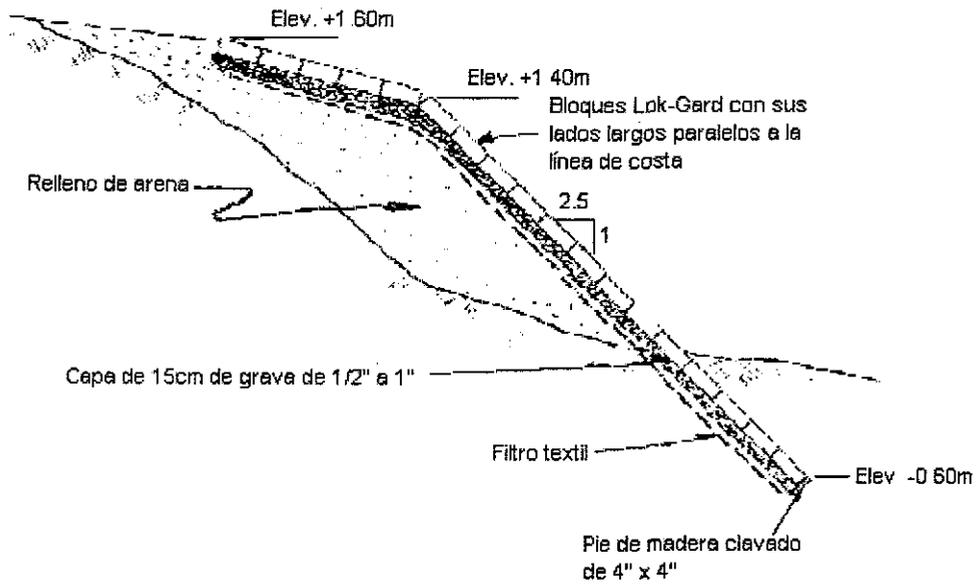


Figura A1.15. Revestimiento de bloques Lok-Gard.

A1.16 Bloques Terrafix

a. General. Los bloques Terrafix son piezas patentadas que se unen con mortero y un sistema

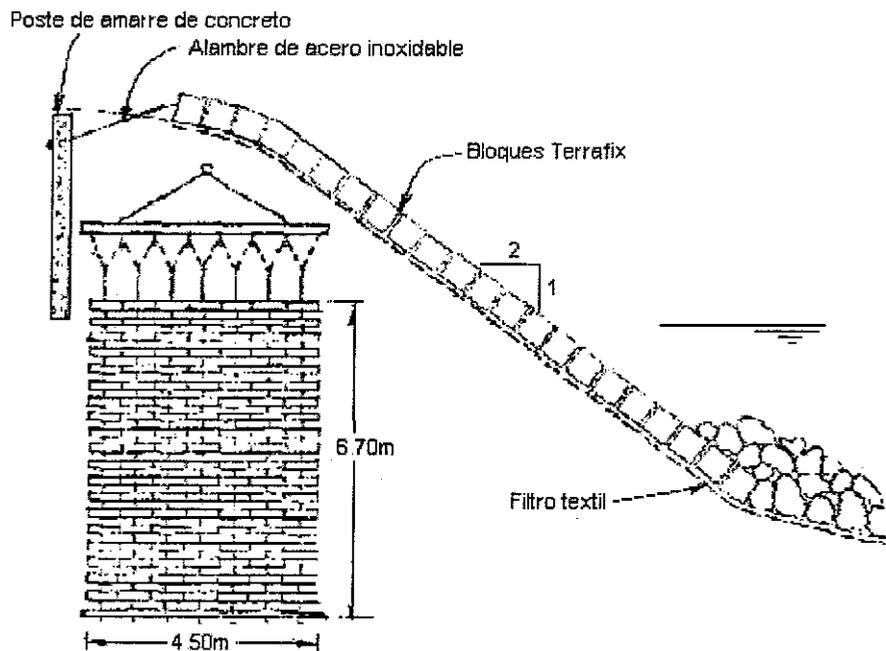
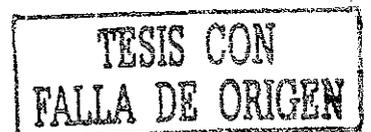


Figura A1.16. Revestimiento de bloques Terrafix.



de espigas y tienen proyecciones en forma de cono con los cuales se ajustan a los agujeros en el fondo de los bloques adyacentes. Además, por el centro de los agujeros de cada bloque se realiza una unión de todos los bloques con un cable de acero inoxidable. El engranaje uniforme de las piezas de 25 kg ofrece una apariencia limpia y ordenada.

b. Factores de diseño (calculados)

- (1) La altura de ola de daño nulo es de 1.50m.
- (2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 90% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es alta.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.16.

A1.17 Contenedores

Hay varias empresas que producen bultos y colchonetas en varios tamaños que se pueden usar para la construcción de revestimientos cuando son llenados con arena o con una mezcla de concreto. Los bultos se pueden colocar directamente sobre el talud en un estrato sencillo o pueden apilarse en múltiples estratos. Las colchonetas también son diseñadas para ser colocadas directamente sobre el talud. Las ventajas de los revestimientos con bultos son su facilidad de construcción y el costo inicial moderado. Los bultos con arena son relativamente flexibles y se pueden reparar fácilmente. Sus desventajas son que están propensos al vandalismo, al daño de las partículas arrastradas por el oleaje y a la degradación por la luz ultravioleta. Con el uso de concreto en los bultos se pueden eliminar las desventajas, pero implica un mayor costo y una pérdida de flexibilidad estructural. La colocación se deberá hacer siempre sobre un talud estable.

A1.18 Colchonetas de concreto

a. General. Las colchonetas se diseñan para colocarse directamente sobre un talud preparado. Son colocados en el sitio cuando están vacías y luego se llenan con concreto mediante bombeo. Esto da como resultado una masa con secciones de concreto en forma de almohadas con filtros interpuestos espaciados en forma regular para aliviar las presiones hidrostáticas. La instalación debe estar siempre de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

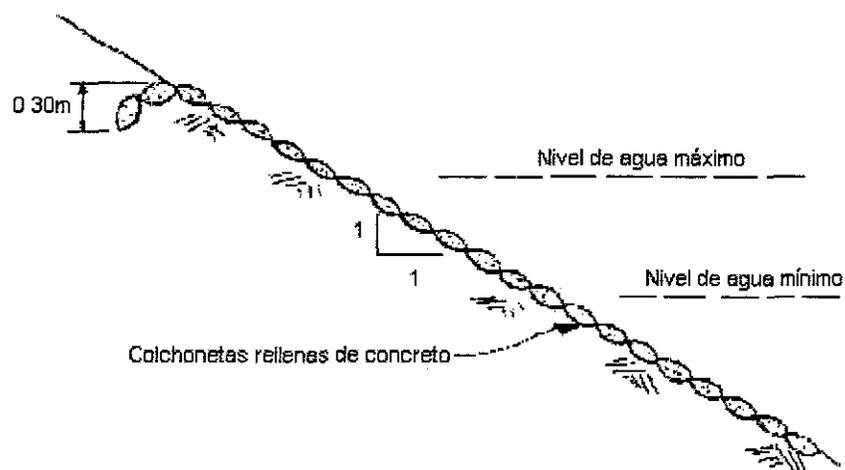


Figura A1.17. Revestimiento de colchonetas de concreto.

b. Factores de diseño (calculados)

- (1) La altura de ola de daño nulo es de 0.90m.
- (2) El runup potencial del oleaje es con un efecto del orden del 90 al 100% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es alta.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.17.

A1.19. Bultos

a. Revestimiento con capas. Se colocan una o dos capas de bultos directamente sobre un talud de forma temporal, para emergencia o como protección de corta duración. Los contornos redondeados y suaves de los sacos presentan problemas de engranaje y se resbalan fácilmente. Para mejorar la estabilidad no se deben llenar los sacos a fin de crear una superficie más lisa y por lo tanto de mayor área de contacto.

b. Revestimiento con apilamiento de bultos. Este tipo de estructura consiste de bultos apilados de forma piramidal en la base del talud. Los ejes longitudinales de los bultos deben ser paralelos a la costa y los empalmes deben ser como los de un enladrillado. Los bultos rellenos con grout o concreto pueden ser adicionalmente estabilizados con varillas de acero pasando por su interior. Tampoco se deben llenar los bultos para mejorar la estabilidad. Además debe proveerse el área suficiente entre estructura y talud para prevenir un deslizamiento y facilitar un delantal para absorber la energía del oleaje que rebasa la estructura y de este modo proteger el pie del talud de la erosión.

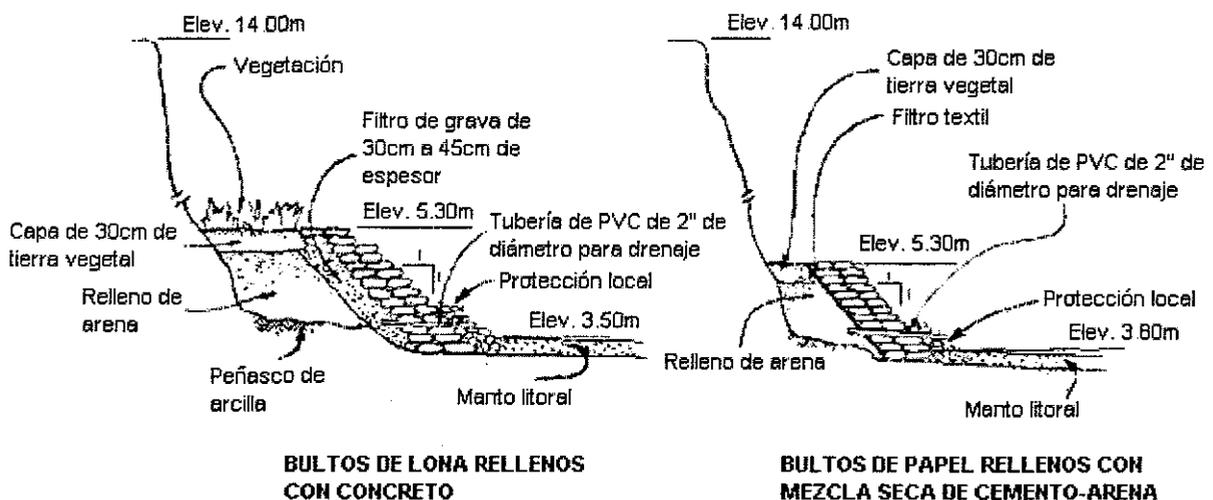


Figura A1.18. Revestimiento de bultos.

c. Factores de diseño (calculados)

- (1) Alturas de ola de daño nulo.
 - 0.45m para sacos pequeños en capas.
 - 0.60m para sacos grandes en capas.
 - 0.60m para sacos pequeños apilados.
 - 0.90m para sacos grandes apilados.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

- (2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 90% de aquel que se da en superficies suaves para las capas y del 80% para los apilamientos
- (3) La reflexión potencial del oleaje es alta.

d. *Instalaciones prototipo. Ver figura A1.18.*

A1.20. Gaviones

a. *General.* Los gaviones son cestas rectangulares o colchonetas hechas de malla de alambre galvanizado y algunas veces de acero revestido con PVC. Los gaviones estándar, divididos en celdas del mismo tamaño, miden 0.90m de ancho y longitudes de 1.80, 2.80 y 3.70m con espesores de 0.30, 0.45 y 0.90m. Las colchonetas son de espesores de 0.25 o 0.30m. Se prefieren las cestas estándar en lugar de las colchonetas porque son fabricadas con un alambre más grueso (aproximadamente un calibre 11 contra uno de 13-1/2). En el sitio de trabajo, las cestas son ensambladas amarrando los extremos con alambre. Luego las cestas individuales son conectadas y llenadas con rocas de 0.10 a 0.20m de diámetro. Se cierran finalmente las cubiertas y se enlazan los gaviones formando una gran masa pesada.

b. *Ventajas.* Una desventaja de los gaviones es que pueden construirse sin la necesidad de usar equipo pesado. Los gaviones son flexibles y pueden mantener dicha función aún si la base donde se apoyan sufre asentamientos. Los gaviones se pueden reparar abriendo las cestas, rellenarlas, cerrarlas y amarrando de nuevo muy bien. También se pueden reparar mediante la aplicación de concreto presurizado, pero debe tenerse cuidado de asegurar el alivio de las presiones hidrostáticas.

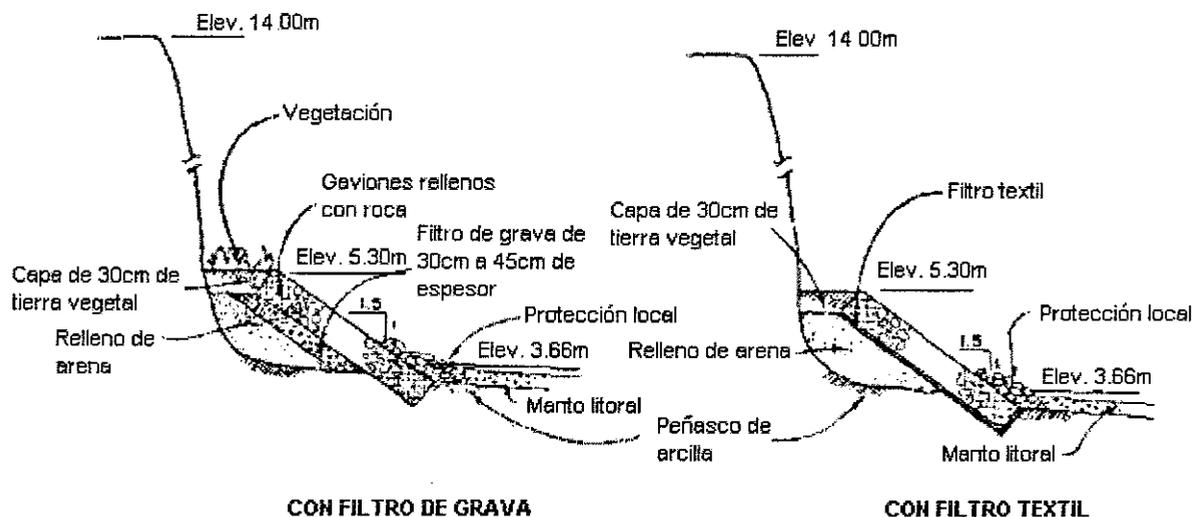


Figura A1.19. Revestimiento de gaviones.

c. *Desventajas.* La desventaja de los gaviones es que las cestas se pueden abrir por la acción del oleaje. Además, como el funcionamiento estructural depende de la continuidad de la malla de alambre, la abrasión y el daño ocasionados al revestimiento de PVC pueden conducir a una rápida corrosión del alambre y a una falla de las cestas. Por esta razón, las cestas deben empaquetarse fuertemente para minimizar el movimiento de la roca del interior y el daño subsecuente a la malla. La oxidación y rompimiento de las cestas también representan un peligro para la

seguridad. Los gaviones requieren de inspecciones periódicas de manera que las reparaciones necesarias sean hechas antes de que ocurra un daño serio.

d. *Precauciones en el diseño.* Para asegurar un mejor funcionamiento, se deben usar rocas con el tamaño adecuado. No se recomiendan sacos de arena que contengan materiales pequeños. Las cestas deben llenarse de forma justa para prevenir el movimiento de la roca, el relleno debe hacerse también de la misma manera. Los gaviones no deben usarse donde exista un bombardeo de escombros o guijarros o donde habrá paso peatonal. Las cestas deben rellenas en el lugar para permitir que sean amarradas a las piezas adyacentes anteriormente rellenas.

e. *Factores de diseño (calculados)*

- (1) La altura de ola de daño nulo es de 1.50m.
- (2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 80% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es alta.

f. *Instalaciones prototipo.* Ver figura A1.19.

A1.21. Toneles de acero de combustible

a. *General.* Este tipo de revestimiento se limita a aquellas zonas donde haya abundancia de toneles de combustible usados y que puedan ser recuperables. Debido a la rápida corrosión de los

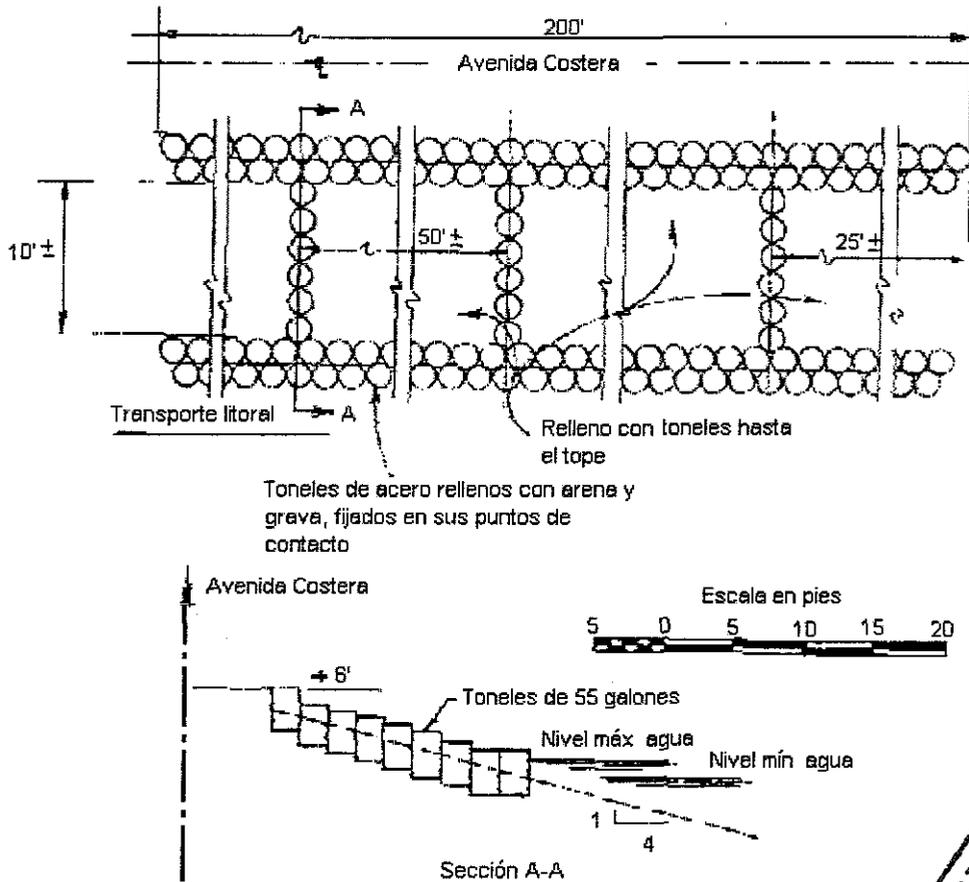


Figura A1.20. Revestimiento de toneles de acero.

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

toneles en aguas cálidas, este tipo de sistema solo es confiable en regiones del Ártico. Los toneles deben llenarse completamente con materiales granulares gruesos para prevenir daños de escombros y masas de hielo flotante y aquellos barriles que dan hacia el mar deben encasquetarse con concreto. Además con un entierro parcial de los toneles se incrementa la estabilidad.

b. Factores de diseño (calculados)

- (1) La altura de ola de daño nulo es de 0.90m.
- (2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 80% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es de media a alta.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.20.

A1.22. Textiles

a. General. Los revestimientos que usan filtros textiles como capas principales de protección del talud no han tenido éxito. Deben tener algún potencial, sin embargo, pueden usarse como un recurso de emergencia si se necesita acelerar la construcción o a falta de materiales adecuados para el acorazamiento. La tela puede usarse aisladamente o se puede combinar con algunas formas de lastre para agregar estabilidad.

b. Factores de diseño (calculados)

- (1) La altura de ola de daño nulo es de 0.15 a 0.30m.
- (2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 100% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es alta.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.21.

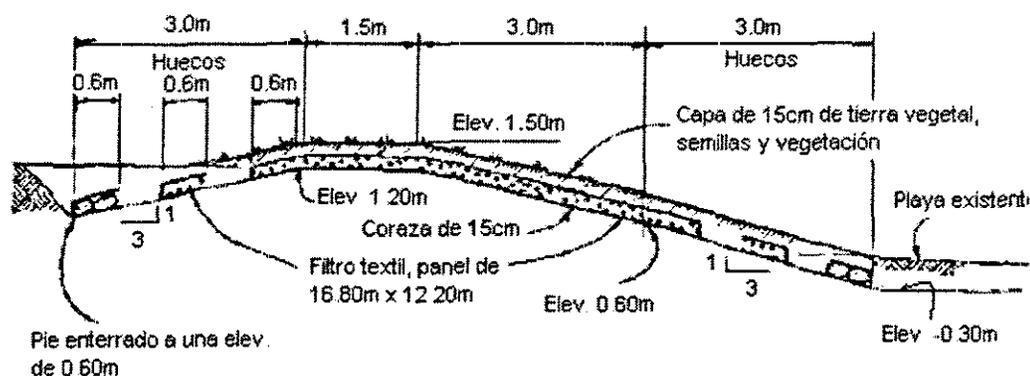


Figura A1.21. Revestimiento de filtros textiles.

A1.23. Tabletas de concreto

a. General. Las tabletas grandes de concreto recuperadas de trabajos de demolición se han usado para trabajos de protección. Colocadas directamente sobre un talud, brindan una estructura maciza y pesada que no se mueve fácilmente por la acción del oleaje. Las fallas han sido

numerosas, sin embargo, se deben generalmente a un inadecuado suministro de filtración, a una inadecuada protección al pie y a una ausencia de protección de los flancos.

b. Factores de diseño (calculados)

- (1) La altura de ola de daño nulo es de 0.30 a 1.50m dependiendo del espesor de las tabletas.
- (2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 100% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es alta.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.22.

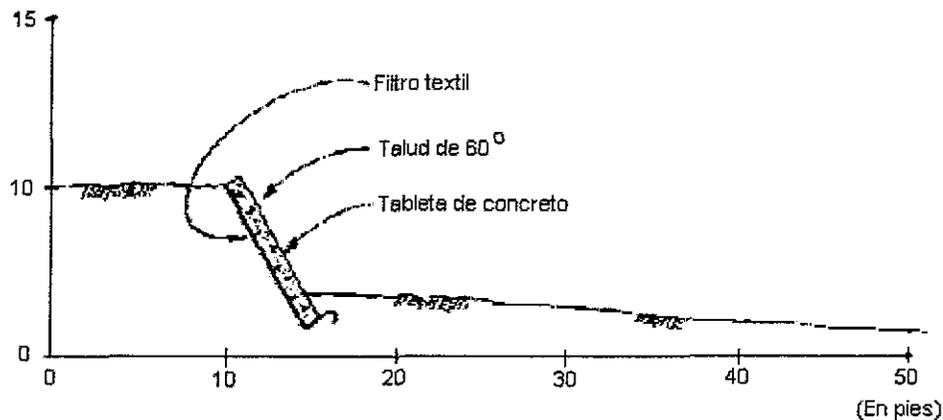


Figura A1.22. Revestimiento de tabletas de concreto.

A1.24. Suelo-cemento

a. General. El suelo-cemento es una mezcla de cemento portland, agua y suelo. Cuando es compactado mientras se encuentra húmedo, forma un material resistente y duradero con propiedades similares al concreto y a la roca. Una mezcla típica puede contener de 7 a 14% de cemento portland y un 10% de agua por peso de suelo seco. El uso de suelo-cemento en protección costera se discute en Wilder y Dinchak (1979).

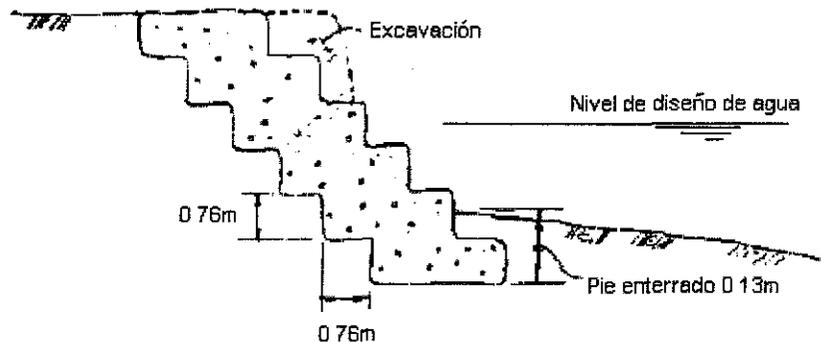


Figura A1.23. Revestimiento de suelo cemento.

b. Factores de diseño

- (1) La altura de ola de daño nulo, que depende del espesor del estrato y el control de calidad durante la construcción, es para una ola estimada de 3m como máximo.
- (2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 80 al 90% de aquel que se da en superficies suaves (Stoa 1979).
- (3) La reflexión potencial del oleaje se estima que sea alta.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.23.

A1.25. Colchonetas de llantas

a. General. Estas colchonetas consisten en pequeñas llantas sueltas o conectadas colocadas sobre un filtro y rellenadas con un lastre de cemento-arena o mezcla de concreto. Tales estructuras pueden ser durables, flexibles y baratas a condición de que el peso de las llantas rellenas proporcione una estabilidad adecuada.

b. Factores de diseño (calculados)

- (1) La altura de ola de daño nulo es de 0.30m.
- (2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 90% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es alta.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.24.

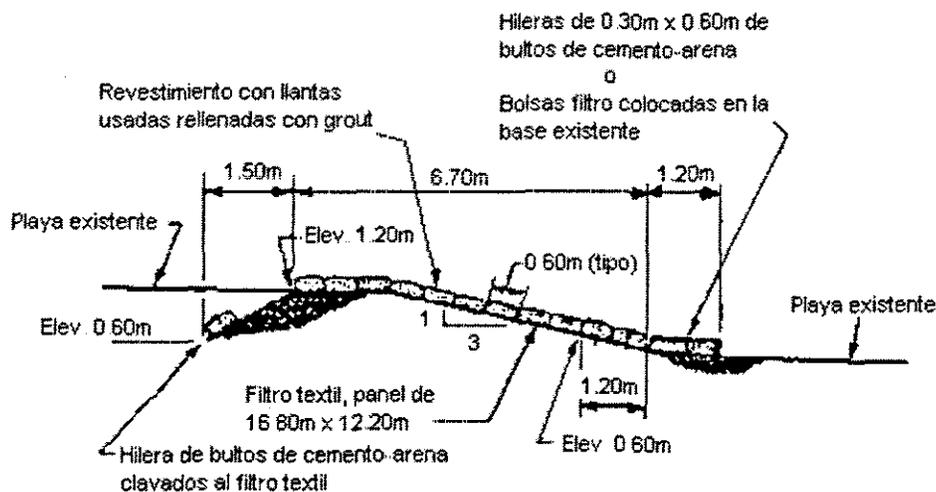


Figura A1.24. Revestimiento de colchoneta de llantas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A1.26. Alfombrillas

a. General. Estas alfombrillas consistentes en fibra de vidrio de un espesor de 0.625 pulgadas son moldeadas en forma de waffle con un peso de 1lb/ft². Se pueden usar como acorazamiento en revestimientos expuestos a un clima con oleaje suave, dando una adecuada protección al pie de la

estructura y un adecuado filtrado, junto con un método adecuado de sujeción firme de las alfombrillas a la base.

b. Factores de diseño (calculados)

- (1) La altura de ola de daño nulo depende de la resistencia del sistema de anclaje y su altura probable está dentro del rango de 0.30 a 0.60m.
- (2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 100% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es alta.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.25.

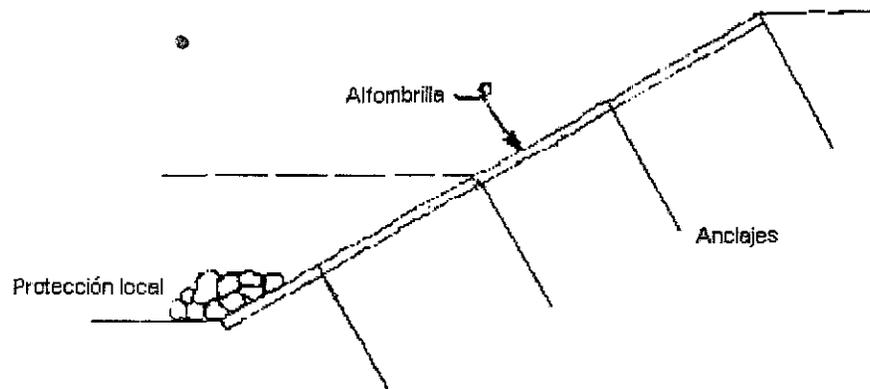


Figura A1.25. Revestimiento de alfombrilla.

A1.27. Hiladas de roca en repisa

a. General. Las hiladas de roca en repisa brindan un método alternativo de la utilización de rocas para la protección de un talud. En lugar de incurrir en gastos para la construcción de un revestimiento formal, la roca se puede acumular en la parte superior de un talud la cual será liberada cuando la erosión causa que el banco se repliegue. Como otra alternativa, la roca se puede colocar en una trinchera en el tope del banco y cubrirse con tierra y semillas. En todo caso, el costo probablemente sea menor que el de un revestimiento formal. La desventaja obvia es que la caída aleatoria del material bajo el talud no permite la formación de una capa adecuada de filtro debajo de las rocas más grandes del acorazamiento. Probablemente, si se colocara una gran cantidad de roca bien graduada en la parte superior del talud, los procesos naturales de clasificación conducirían eventualmente al desarrollo de un filtro adecuado. Este método podría usarse en un sitio donde el retroceso de algún banco sea aceptable antes de que el revestimiento en repisa sea necesario.

b. Factores de diseño

- (1) La altura de ola de daño nulo depende del tamaño de la roca y de su graduación.
- (2) El run up potencial del oleaje es con un efecto del orden del 50% de aquel que se da en superficies suaves.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es baja.

c. Instalaciones prototipo. Ver figura A1.26.



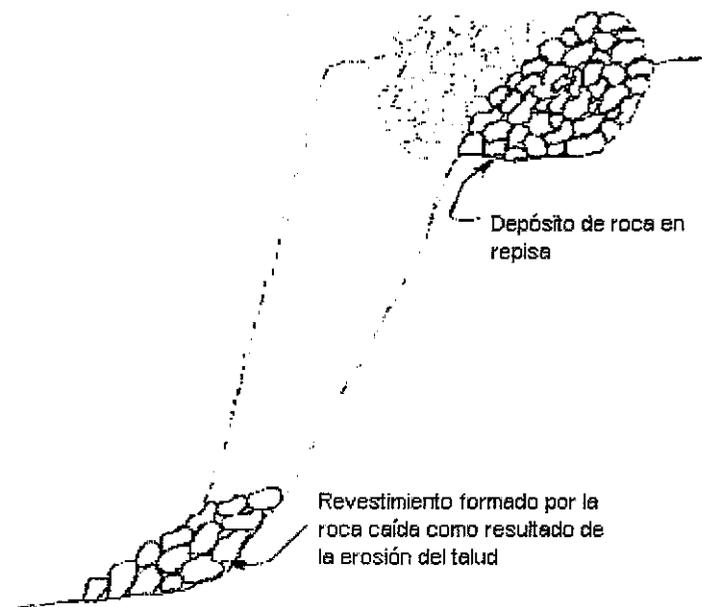


Figura A1.26. Revestimiento formado por el proceso de erosión.

A1.28. Vegetación

a. General. La vegetación puede ser un método de protección costera altamente efectivo cuando se usa bajo condiciones apropiadas. Se puede usar cubiertas de marisma como una zona divisoria para disipar la energía del oleaje entrante, además de otras especies de la zona de mareas para darle una mayor protección y estabilidad a la línea costera. Las especies apropiadas de usar varían de acuerdo al país y solo se pueden usar aquellas que estén bien adaptadas a las condiciones del lugar. La espartina (*Spartina alterniflora*) es una especie excelente para sembrar en muchas áreas.

b. Factores de diseño

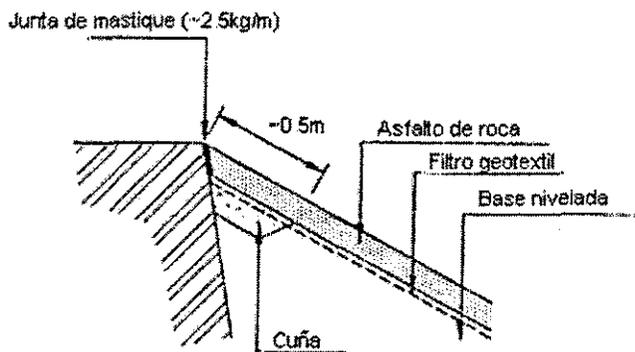
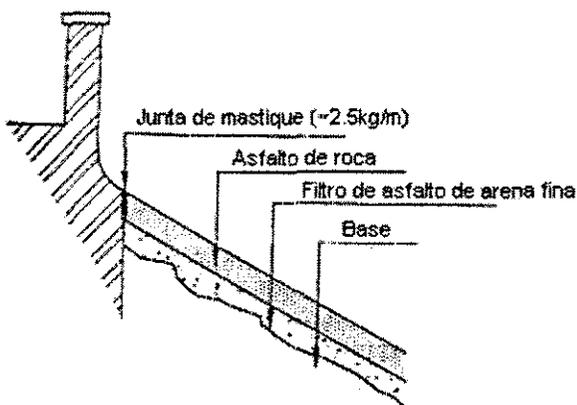
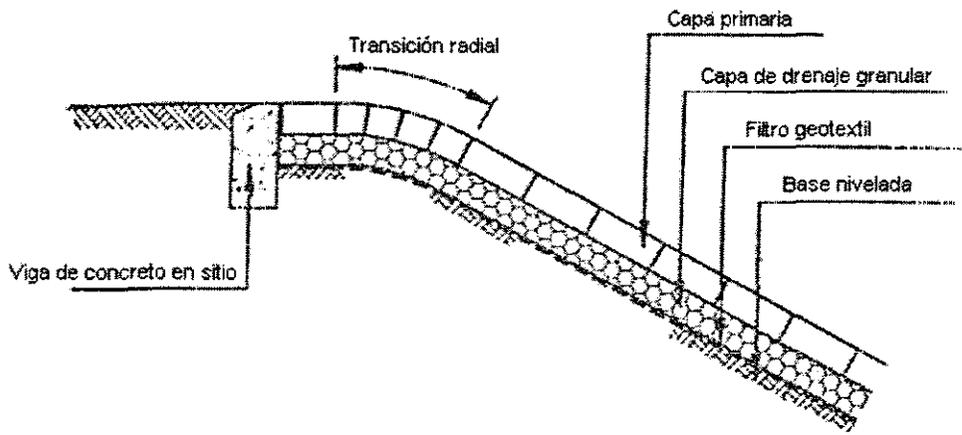
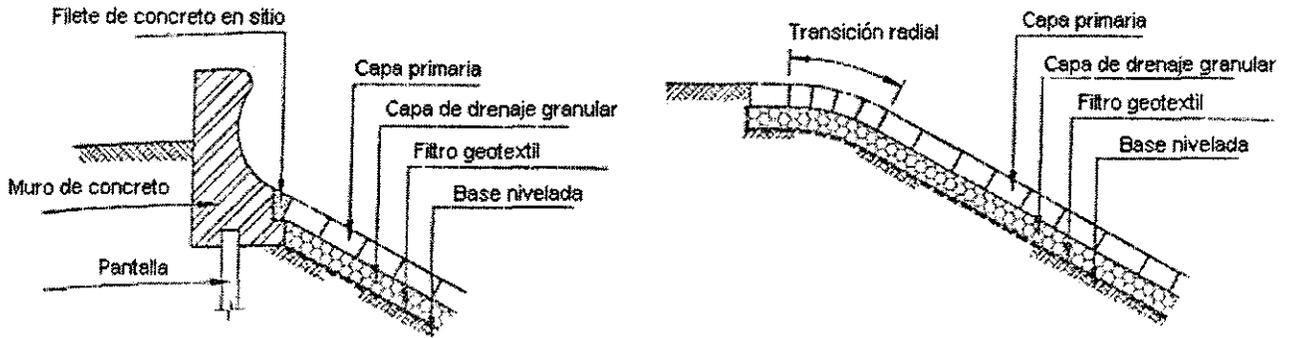
- (1) La altura de ola de daño nulo se estima que sea menor de 0.30m a pesar de que algunas instalaciones sobreviven en condiciones de energía mayores si se pueden asentar durante las etapas de baja energía.
- (2) El run up potencial del oleaje se da con un efecto bajo para plantaciones bien establecidas.
- (3) La reflexión potencial del oleaje es baja para plantaciones bien establecidas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

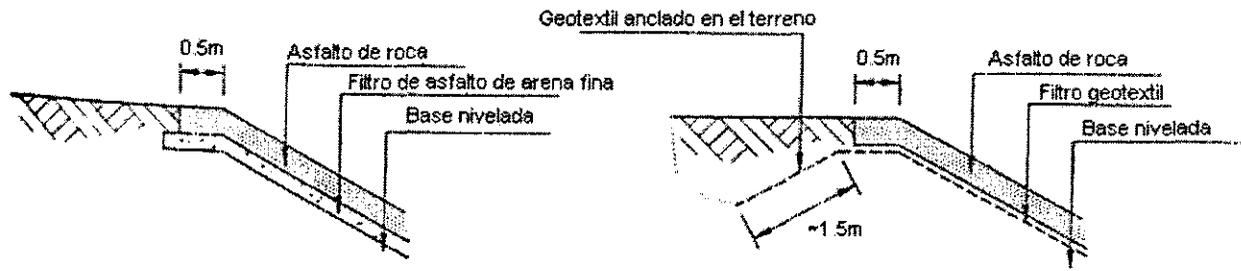
ANEXO 2
DETALLES TÍPICOS DE CRESTAS

ANEXO 2

DETALLES TÍPICOS DE CRESTAS



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN