

SERIE 0

Descripción y caracterización de los factores de proyecto

RECOMENDACIONES PARA OBRAS MARÍTIMAS



ROM 0.5-05

**Recomendaciones Geotécnicas
para Obras Marítimas y Portuarias**



MINISTERIO
DE FOMENTO

Puertos del Estado





ROM 0.5-05

Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias

1ª Edición

Noviembre 2005

EDICIÓN:

Puertos del Estado

REDACCIÓN PONENCIA:

Antonio Soriano Peña

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

INGENIERÍA DEL SUELO S.L.

COORDINACIÓN Y DISEÑO

DE LA PUBLICACIÓN:

Emilio Piñeiro Díaz

PUERTOS DEL ESTADO

IMPRESIÓN:

V.A. Impresores S.A.

I.S.B.N.:

84-88975-52-X

DEPÓSITO LEGAL:

M-34875-2006

© Puertos del Estado

PRECIO:

50 € (IVA incluido)

Prólogo

El **Programa ROM** vigente, que engloba diversas actividades de estudio y debate orientadas al desarrollo del conjunto de reflexiones sectoriales difundido con las distintas '**Recomendaciones para Obras Marítimas**' sucesivamente editadas, constituye un marco permanente de Normalización técnica en el ámbito de la ingeniería marítimo-portuaria que depende de las Administraciones competentes para Puertos de Interés general del Estado.

Sus objetivos se dirigen a consolidar la importante experiencia española en este campo, a establecer los diferentes estándares de Fiabilidad, Funcionalidad y Operatividad que deban exigirse a los proyectos correspondientes y, en síntesis, a potenciar una mayor calidad para la ejecución de las Obras Portuarias durante todas sus fases, desde las de la planificación, del proyecto y construcción o puesta en servicio hasta las de conservación y posibles reparaciones o desmantelamientos. Sin olvidar su papel como instrumento especializado para el desarrollo y la innovación, tanto en lo que respecta a una introducción de avances tecnológicos recientes cuanto a detectar las necesidades con más relevancia o urgentes de profundización en el conocimiento y, por tanto, de su investigación.

Este Programa normativo de Recomendaciones fue creado en 1987 por el entonces Ministerio de Obras Públicas –a través de la Dirección General de Puertos y Costas– y desde entonces ha desarrollado sus tareas de forma ininterrumpida, en constante evolución, materializando un conjunto de Documentos con amplias aplicaciones que han alcanzado reconocido prestigio estatal e internacional como excelentes herramientas técnicas para el Proyecto y Construcción de las Infraestructuras portuarias.

La sistemática establecida para elaborar los mismos, fruto de unos procesos de discusión prolongada y posterior acuerdo entre distintas posiciones técnicas representadas en el seno del Sector mediante los diversos Grupos de Trabajo –formados por Expertos, redactores con los Ponentes– y el resto de Comisiones amplias para una revisión anticipada desde la perspectiva de los usuarios, ha sido y seguirá siendo la mejor garantía de su rigor y aplicabilidad, al recoger en cada momento de forma contrastada todo el estado del arte y las experiencias aprovechables desarrolladas en definitiva, tanto al nivel práctico como en los teórico-académicos, por la ingeniería portuaria española.

Actualmente, las Publicaciones que incluye el Programa se agrupan en varias ramas temáticas diferenciadas:

- ◆ **Serie 0:** Descripción y caracterización de los factores de proyecto.
- ◆ **Serie 1:** Obras de abrigo frente a las oscilaciones del mar.
- ◆ **Serie 2:** Obras portuarias interiores.
- ◆ **Serie 3:** Planificación, gestión y explotación de las áreas portuarias.
- ◆ **Serie 4:** Superestructuras e instalaciones en tierra.
- ◆ **Serie 5:** Aspectos ambientales de las obras marítimas en el entorno litoral.
- ◆ **Serie 6:** Prescripciones técnicas, administrativas y legales.
- ◆ **Foro E/ROM de debates:** Estudios y análisis técnico-científico sobre las ROM.

La inicial de entre todas ellas, destinada a caracterizar lo referente a **Situación y Factores de Proyecto en las Obras Marítimas o Portuarias**, engloba tanto diversas Recomendaciones aprobadas ya –en los documentos específicos respecto a ‘Factores de Uso y Explotación: Acciones en el Proyecto’ (ROM 0.2-90), ‘Agentes Climáticos I: Oscilaciones del Mar’ (ROM 0.3-91), ‘Agentes Climáticos II: Procesos Atmosféricos’ (ROM 0.4-95) y ‘Factores del Terreno: Geotecnia’ (ROM 0.5-94), más la última desarrollada sobre ‘Procedimiento General y Bases de Cálculo en el Proyecto’ (ROM 0.0)- como otras previstas sobre ‘Materiales de Construcción’ (ROM 0.1), ‘Agentes Sísmicos’ (ROM 0.6) y ‘Sistemas de Medidas e Instrumentaciones’ (ROM 0.7), que se encuentran aún en preparación.

Dentro de dicha ‘Serie 0’ para las Obras Marítimas y Portuarias, ya en el año 1994 se publicaron (bajo la denominación de ROM 0.5-94) unas primeras **Recomendaciones Geotécnicas**. Y tras el periodo transcurrido, después de haber estado en vigor durante más de una década evidenciando gran utilidad e influencia para mejorar los Proyectos portuarios en el ámbito de la geotecnia, se ha considerado necesario revisar y actualizar las mismas para tomar en cuenta tanto resultados de su aplicación y nuevos desarrollos tecnológicos como la más reciente experiencia disponible, al objeto de mantener un texto continuamente alineado con las necesidades y mejores prácticas usuales presentes.

La nueva ROM 0.5-05 consecuente supone, pues, el primer caso finalizado relativo a una revisión ampliada o actualización de alguna de las Recomendaciones para Obras Marítimas editada con anterioridad, al que seguirán asimismo los demás planteados con respecto a otras también ya vigentes.

Su proceso de elaboración ha seguido la metodología habitual establecida en el Programa de estas Recomendaciones normativas, habiendo sido redactada bajo la responsabilidad y supervisada por Puertos del Estado, con participación de las siguientes personas:

- ◆ **Dirección del Programa ROM:**
José Llorca Ortega, *Puertos del Estado*.
- ◆ **Ponente de la ROM 0.5-05:**
Antonio Soriano Peña, *Universidad Politécnica de Madrid*.
- ◆ **Comisiones Técnicas de Trabajo:**
Germán Burbano Juana, *DRAGADOS-ACS*.
Antonio Capote del Villar, *FERROVIAL-AGROMAN*.
Luis Casero Mejías, *INTECSA*.
Francisco Esteban Lefler, *FCC*.
José Luis Fernández Martín, *Autoridad Portuaria de Sevilla*.
Luis Fort López-Tello, *NECSO*.
Gonzalo Gómez Barquín, *Puertos del Estado*.
Miguel Ángel Gómez Caldito, *ALATEC*.
Ramiro Gómez Escoubes, *IBERINSA*.
Jesús González Galindo, *INGENIERIA DEL SUELO*.
Juan Ignacio Grau Albert, *Puertos del Estado*.
Miguel Ángel Losada Rodríguez, *Universidad de Granada*.
David Marcano Ceballos, *Autoridad Portuaria de Santander*.
Claudio Olalla Marañón, *Laboratorio de Geotecnia del CEDEX*.
Eloy Pita Carpenter, *Puertos del Estado*.
César Sagaseta Millán, *Universidad de Cantabria*.
Carlos Sanchidrián Fernández, *PROES*.
Juan Carlos Suñé Recio, *Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras*.
Javier Uzcanga Salas, *Autoridad Portuaria de Barcelona*.
- ◆ **Presidente del Grupo de Trabajo para la ROM 0.5-05:**
Francisco Esteban Rodríguez-Sedano [† 2006], *Puertos del Estado*.
- ◆ **Coordinación General del Programa ROM:**
Francisco J. González Portal, *Puertos del Estado*.

Los trabajos para sus Grupos de Expertos finalizaron en julio de 2005 con aprobación del Documento por unanimidad entre todos los miembros de la Comisión Técnica ampliada, siendo en consecuencia refrendada por Presidencia de Puertos del Estado en el mes de noviembre del mismo año.

Esta versión de la **ROM 0.5-05 (Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias)** es de destacar, primeramente en relación con la anterior, por haberse adaptado al nuevo Procedimiento General y de Cálculo –en particular a sus requerimientos sobre Seguridad, así como de aptitud para el Servicio y del Uso o la Explotación– que, en la ROM 0.0 (2001), se había establecido con carácter global respecto a las Obras Portuarias. Y, en segundo lugar, por incorporar nuevos contenidos que completan los de la previa a la luz del conocimiento y avances tecnológicos que se han consolidado los últimos años, siendo especialmente remarcable una primera aproximación a las influencias que pueden tener la presencia de Agentes con un carácter dinámico –como los sismos, el oleaje u otras oscilaciones del mar– en el comportamiento de los Suelos saturados y, por tanto, en la verificación de distintos Modos de fallo geotécnicos que afectan a las obras portuarias.

No obstante, una vez actualizada, esta nueva Recomendación mantiene esencialmente la finalidad última de su precedente, que no es otra que conjugar aspectos metodológicos, normativos y tecnológicos con objeto de disponer una verdadera Guía, moderna, completa y exhaustiva, para Ayuda técnica en todo lo referido a los aspectos que inciden, afectan o condicionan a las infraestructuras portuarias desde el punto de vista geotécnico. Por ello se incluyen:

- ◆ Definiciones de planificación y técnicas para la **Investigación geotécnica**.
- ◆ Establecimiento de **Criterios del proyecto** para valores de parámetros geotécnicos, requerimientos exigibles frente a los modos de fallo y métodos en su verificación.
- ◆ **Problemas geotécnicos específicos** en diferentes tipologías de obras marítimo-portuarias, con recomendaciones sobre los métodos de análisis y solución para cada uno de ellos.

Cualesquier comentarios, sugerencias, aclaraciones u otras aportaciones que puedan presentarse acerca del contenido de esta nueva ROM 0.5-05 (cuya versión digitalizada se encuentra disponible desde <http://www.puertos.es>), así como sobre los resultados prácticos de sus aplicaciones, serán bienvenidos con el fin de ser tomados en consideración por futuras Revisiones de la misma. Y podrán remitirse en todo momento a la Coordinación del Programa, dirigiéndolos a programarom@puertos.es.

Índice General

Prólogo	5
CAPÍTULO I. GENERAL	
I.1. ÁMBITO DE APLICACIÓN	31
I.2. CONTENIDO	31
I.3. CRITERIOS DE SEGURIDAD	32
I.4. CONSIDERACIÓN DE LOS EUROCÓDIGOS ESTRUCTURALES	32
I.5. DEFINICIONES	35
I.6. SISTEMA DE UNIDADES	41
I.7. NOTACIONES	41
I.8. REFERENCIAS DOCUMENTALES	48
CAPÍTULO II. INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA	
2.1. INTRODUCCIÓN	55
2.2. PROPIEDADES DEL TERRENO	55
2.2.1. Granulometría	55
2.2.2. Índice de poros y porosidad	56
2.2.3. Humedad y grado de saturación	57
2.2.4. Densidades y pesos específicos	57
2.2.5. Plasticidad	58
2.2.6. Permeabilidad	58
2.2.7. Comportamientos drenado y no drenado	59
2.2.8. Resistencia de los suelos	60
2.2.8.1. Parámetros de resistencia en presiones efectivas	60
2.2.8.2. Suelos no saturados	61
2.2.8.3. Resistencia al corte sin drenaje	61
2.2.9. Resistencia de las rocas	62
2.2.9.1. Distancia media entre diaclasas	63
2.2.9.2. Número de fracturas por unidad de volumen	64
2.2.9.3. Persistencia de la fracturación	64
2.2.9.4. Apertura de las litoclasas	65
2.2.9.5. Rugosidad	65
2.2.9.6. Resistencia a compresión simple	65
2.2.9.7. Grado de alteración	66
2.2.10. Deformabilidad del terreno	66
2.2.10.1. El modelo elástico	66
2.2.10.2. El modelo edométrico	67
2.2.10.3. El modelo de Winkler	69
2.2.10.4. Otras formas de considerar la deformación del terreno	69
2.2.11. Otras características	69

2.3. OBJETIVOS Y FASES DEL RECONOCIMIENTO DEL TERRENO	70
2.4. ESTUDIO PRELIMINAR	72
2.4.1. Información preexistente	72
2.4.2. Informe geotécnico preliminar	73
2.4.3. Parámetros geotécnicos preliminares	75
2.5. PROGRAMACIÓN DE LOS RECONOCIMIENTOS	77
2.6. RECONOCIMIENTOS GEOFÍSICOS	78
2.7. SONDEOS MECÁNICOS	79
2.7.1. Ejecución de sondeos	79
2.7.2. Profundidad de los reconocimientos	80
2.8. POZOS, CALICATAS Y ZANJAS	83
2.9. ENSAYOS «IN SITU»	84
2.9.1. Ensayo de penetración estándar: SPT	84
2.9.2. Penetrómetros dinámicos	87
2.9.3. Penetrómetros estáticos	89
2.9.4. El piezocono. CPTU	91
2.9.5. Correlación entre ensayos de penetración	93
2.9.6. Presiómetros y dilatómetros	94
2.9.7. Ensayos de molinete	97
2.9.8. Ensayos de placa de carga	97
2.9.9. Ensayos de permeabilidad en sondeos y calicatas	97
2.9.10. Pruebas de campo y otros ensayos «in situ»	97
2.10. TOMA DE MUESTRAS	98
2.11. ENSAYOS DE LABORATORIO	100
2.11.1. Ensayos de identificación de suelos	100
2.11.2. Ensayos de compresión simple de suelos	100
2.11.3. Corte directo de suelos, gravas y escolleras finas	101
2.11.4. Ensayo triaxial de suelos	101
2.11.5. Ensayos edométricos	102
2.11.6. Ensayos de compactación	102
2.11.7. Permeabilidad	103
2.11.8. Ensayos dinámicos	103
2.11.9. Ensayos de rocas	103
2.11.10. Otros ensayos de laboratorio	104
2.12. INTENSIDAD DEL RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO	104
2.12.1. Tipos de reconocimiento	106
2.12.2. Número de puntos de investigación en los reconocimientos detallados	106
2.12.3. Reconocimientos reducidos y mínimos	109
2.12.4. Número de ensayos de laboratorio	110
2.13. INFORME GEOTÉCNICO	111
2.13.1. Anejo de trabajos de campo	111
2.13.2. Anejo de ensayos de laboratorio	112
2.13.3. Memoria	112
2.14. RECONOCIMIENTOS GEOTÉCNICOS PARA OBRAS O PROYECTOS DE CATEGORÍA A	113
2.14.1. Identificación de diferentes terrenos	113
2.14.2. Parámetros geotécnicos comunes	114

2.14.3.	Variabilidad de los parámetros geotécnicos	115
2.14.4.	Funciones probabilísticas recomendadas	116
2.15.	COSTE DE LOS RECONOCIMIENTOS DEL TERRENO	117
APÉNDICE I. FÓRMULAS PARA LA INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD EN POZOS Y SONDEOS.....		117
A1.1.	INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD EN SONDEOS	117
A1.1.1.	Ensayos Lefranc	117
A1.1.2.	Ensayos Lugeon	117
A1.1.3.	Ensayos con carga variable	118
A1.2.	INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE BOMBEO	119
A1.2.1.	Ensayos en régimen permanente	119
A1.2.2.	Ensayos en régimen transitorio	119
A1.2.3.	Inversión del ensayo de bombeo	120
A1.2.4.	Niveles dentro del pozo	120

CAPÍTULO III. CRITERIOS GEOTÉCNICOS

3.1.	ASPECTOS GENERALES	129
3.2.	CRITERIOS DE SEGURIDAD, SERVICIO Y EXPLOTACIÓN	129
3.2.1.	Fiabilidad frente a los Estados Límite Últimos	130
3.2.2.	Funcionalidad frente a Estados Límite de Servicio	132
3.2.3.	Operatividad frente a los Estados Límite de Parada Operativa	133
3.3.	CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS	133
3.3.1.	Estados Límite Últimos (ELU)	133
3.3.2.	Estados Límite de Servicio (ELS)	134
3.3.3.	Estados Límite de Parada Operativa (ELO)	135
3.3.4.	Métodos de cálculo	135
3.3.5.	Definición de los Estados o situaciones de proyecto	139
3.3.5.1.	Definición de los parámetros geométricos	139
3.3.5.2.	Definición de las propiedades del terreno	141
3.3.5.3.	Definición de las acciones	142
3.3.5.4.	Definición de las combinaciones de acciones y demás factores de proyecto	143
3.3.5.5.	Consideración de Estados o situaciones de corta duración	147
3.3.6.	Coefficientes de ponderación parciales de las acciones	148
3.3.7.	Coefficientes de minoración parciales de las resistencias del terreno	148
3.3.8.	Coefficientes de seguridad	149
3.3.8.1.	Coefficientes de seguridad mínimos	149
3.3.8.2.	Coefficientes de seguridad mínimos asociados con otras probabilidades de fallo	150
3.3.9.	El cálculo con modelos numéricos	150
3.3.10.	La fiabilidad en geotecnia	155
3.3.10.1.	Fuentes de incertidumbre y su medida	155
3.3.10.2.	El cálculo de referencia	158
3.3.10.3.	Estudios de sensibilidad individuales	158
3.3.10.4.	Composición de las sensibilidades individuales	159
3.3.10.5.	Valor centrado del coeficiente de seguridad	159
3.3.10.6.	Cálculo para la combinación cuasi-permanente	159
3.3.10.7.	Cálculo para cada una de las combinaciones fundamentales	160
3.3.10.8.	Cálculo en combinaciones accidentales o sísmicas	161
3.3.10.9.	Índice de confianza y probabilidad de fallo	163
3.3.10.10.	Verificación de la seguridad	164

3.4	FILTRACIONES Y CONSOLIDACIÓN	164
3.4.1.	Problemas geotécnicos más comunes	164
3.4.2.	Dibujo de redes de filtración	165
3.4.2.1.	Terrenos homogéneos e isotropos. Problemas bidimensionales	165
3.4.2.2.	Terrenos anisotropos	166
3.4.2.3.	Terrenos heterogéneos	166
3.4.2.4.	Problemas tridimensionales	166
3.4.3.	Caudales de filtración	166
3.4.3.1.	Problemas bidimensionales, isotropos y homogéneos	166
3.4.3.2.	Terrenos anisotropos	168
3.4.3.3.	Terrenos heterogéneos	168
3.4.3.3.	Problemas tridimensionales	168
3.4.4.	Empujes del agua intersticial sobre estructuras	168
3.4.4.1.	Niveles de las aguas exteriores y de las líneas de saturación en terrenos naturales y rellenos	169
3.4.5.	Fuerzas de arrastre	172
3.4.6.	El problema del levantamiento de fondo	174
3.4.7.	Rebajamiento del nivel freático con pozos	176
3.4.8.	Arrastres de partículas y erosiones internas	177
3.4.9.	Arrastres, socavaciones y otras erosiones externas	179
3.4.10.	Consolidación de masas de suelo	180
3.4.10.1.	Formulación básica	180
3.4.10.2.	Los excesos de presión intersticial	181
3.4.10.3.	Subsidencia creada por los achiques	181
3.4.10.4.	Los asentos de consolidación	183
3.4.11.	Presiones intersticiales generadas por el oleaje y otras oscilaciones del nivel del mar	184
3.4.11.1.	Distribución de presiones intersticiales en fondos marinos	184
3.5	CIMENTACIONES SUPERFICIALES	189
3.5.1.	Tipos de cimentación	189
3.5.2.	Modos de fallo	190
3.5.2.1.	Estados Límite Últimos	190
3.5.2.2.	Estados Límite de Servicio	192
3.5.2.3.	Otros problemas de las cimentaciones superficiales	192
3.5.3.	Características de la cimentación	192
3.5.3.1.	Configuración geométrica	192
3.5.3.2.	Acciones	193
3.5.3.3.	Características del terreno	195
3.5.4.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento	195
3.5.4.1.	Métodos de verificación	195
3.5.4.2.	Verificación según la experiencia local contrastada	196
3.5.4.3.	Verificación en función de los ensayos SPT	196
3.5.4.4.	Verificación mediante ensayos presiométricos	198
3.5.4.5.	Método basado en ensayos de penetración estática	199
3.5.4.6.	Métodos basados en otros ensayos de campo	200
3.5.4.7.	Carga de hundimiento en suelos cohesivos firmes y rocas	200
3.5.4.8.	Cálculo analítico de la carga de hundimiento	202
3.5.4.8.1.	Fórmula polinómica	202
3.5.4.8.2.	Factores de corrección	205
3.5.4.8.3.	Cimentaciones superficiales sobre terreno heterogéneo	208
3.5.4.8.4.	Cimentaciones en banqueta sobre suelos cohesivos	209
3.5.4.9.	Seguridad exigible frente al hundimiento	211

3.5.5.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento	212
3.5.5.1.	Consideraciones previas	212
3.5.5.2.	Procedimiento de cálculo	212
3.5.5.3.	Seguridad frente al deslizamiento	214
3.5.6.	Verificación de la seguridad frente al vuelco	215
3.5.6.1.	Vuelco rígido	215
3.5.6.2.	Vuelco plástico	216
3.5.6.3.	Seguridad frente al vuelco plástico	220
3.5.7.	Asientos y otros movimientos de las cimentaciones	220
3.5.7.1.	Zapatas aisladas	220
3.5.7.2.	Cimentaciones corridas	222
3.5.7.3.	Asientos de losas y cargas extensas	222
3.5.7.4.	Asientos admisibles	223
3.5.8.	Consideraciones sobre el proyecto estructural	224
3.6.	CIMENTACIONES PROFUNDAS	225
3.6.1.	Aspectos generales	225
3.6.1.1.	Tipos de terreno	225
3.6.1.2.	Tipos de pilote	227
3.6.2.	Modos de fallo más usuales	228
3.6.2.1.	Estados Límite Últimos	228
3.6.2.1.1.	Estados Límite Últimos de tipo geotécnico (GEO)	228
3.6.2.1.2.	Estados Límite Últimos de tipo estructural (STR)	228
3.6.2.2.	Estados Límite de Servicio	229
3.6.2.2.1.	Otras formas de fallo de las cimentaciones profundas	229
3.6.3.	Definición de los factores de proyecto	230
3.6.3.1.	Configuración geométrica	230
3.6.3.2.	Características del terreno	231
3.6.3.3.	Acciones	231
3.6.3.4.	Efectos parásitos	232
3.6.3.4.1.	Rozamiento negativo	232
3.6.3.4.2.	Empujes horizontales causados por sobrecargas verticales de superficie	234
3.6.3.4.3.	Empujes sobre pilotes en talud	236
3.6.3.5.	Efectos de las cargas cíclicas o alternativas	238
3.6.4.	La carga de hundimiento mediante fórmulas estáticas	242
3.6.4.1.	Formulación básica	242
3.6.4.2.	Carga de hundimiento en función del SPT	244
3.6.4.3.	Carga de hundimiento a partir de ensayos de penetración dinámica continuos	246
3.6.4.4.	Carga de hundimiento a partir de ensayos penetrométricos estáticos	246
3.6.4.5.	Carga de hundimiento calculada a partir del presiómetro	246
3.6.4.6.	Cimentaciones con pilotes sobre roca	247
3.6.4.7.	Métodos basados en soluciones analíticas	248
3.6.4.7.1.	Suelos granulares	248
3.6.4.7.2.	Suelos cohesivos	249
3.6.4.7.3.	Suelos cohesivos bajo la punta de los pilotes	250
3.6.4.8.	Pruebas de carga de hundimiento	251
3.6.5.	La carga de hundimiento mediante fórmulas dinámicas	252
3.6.5.1.	Fórmulas dinámicas de la hincia	253
3.6.5.2.	La ecuación de la onda	255
3.6.5.3.	El control de la hincia	257

3.6.6.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento	261
3.6.6.1.	Hundimiento individual de un pilote	261
3.6.6.2.	Hundimiento conjunto del grupo	262
3.6.6.3.	Coeficientes de seguridad mínimos frente al hundimiento	262
3.6.7.	Verificación de la seguridad frente al arranque	263
3.6.7.1.	El pilote individual	263
3.6.7.2.	Consideración del efecto grupo	264
3.6.7.3.	Seguridad frente al arranque	264
3.6.8.	Verificación de la seguridad frente a la rotura del terreno por tiro o empuje horizontal	265
3.6.8.1.	El pilote individual	265
3.6.8.2.	Consideraciones del efecto grupo	267
3.6.8.3.	Coeficiente de seguridad frente a la rotura horizontal del terreno	268
3.6.9.	Verificación de los Estados Límite de Servicio	268
3.6.9.1.	Asientos	268
3.6.9.1.1.	Asientos del pilote aislado	269
3.6.9.1.2.	Consideración del efecto grupo	269
3.6.9.2.	Movimientos horizontales y esfuerzos	269
3.6.9.2.1.	Método simplificado	270
3.6.10.	Consideraciones sobre los modos de fallo de tipo estructural	272
3.6.10.1.	Distribución de cargas en grupos de pilotes	273
3.6.10.2.	Resistencia estructural	274
3.7	ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN DE EMPUJES DE TIERRAS	275
3.7.1.	Tipologías	275
3.7.1.1.	Muros de gravedad	275
3.7.1.2.	Muros pantalla	276
3.7.1.3.	Entibaciones	276
3.7.2.	Valores límites del empuje	276
3.7.3.	Simplificaciones necesarias para el cálculo de empujes	278
3.7.3.1.	Geometría del trasdós del muro	278
3.7.3.2.	Heterogeneidades del terreno	281
3.7.3.2.1.	Relleno en talud	281
3.7.3.2.2.	Relleno en franja estrecha	283
3.7.3.3.	Inclinación de los empujes	283
3.7.4.	Método general de cálculo del empuje activo	284
3.7.4.1.	Geometría del problema	284
3.7.4.2.	Red de filtración	285
3.7.4.3.	Cargas externas	285
3.7.4.4.	Datos del terreno	285
3.7.4.5.	Tramos de cálculo	286
3.7.4.6.	Cálculo del empuje en cada tramo	287
3.7.5.	Métodos basados en el coeficiente de empuje activo	290
3.7.5.1.	El concepto de coeficiente de empuje activo	290
3.7.5.2.	Valor del coeficiente de empuje activo	293
3.7.5.3.	Cálculo del empuje efectivo debido al peso del terreno	297
3.7.5.4.	El empuje del agua	298
3.7.5.5.	El efecto de la cohesión	299
3.7.5.6.	El efecto de las sobrecargas	301
3.7.5.6.1.	Sobrecargas verticales uniformes de gran extensión	301
3.7.5.6.2.	Sobrecargas verticales uniformes de extensión limitada	302

3.7.5.6.3.	Sobrecargas verticales lineales o concentradas	303
3.7.5.6.4.	Otras sobrecargas	304
3.7.6.	Método general de cálculo del empuje pasivo	305
3.7.6.1.	Datos necesarios	305
3.7.6.2.	Línea de rotura	305
3.7.6.3.	Cálculo del empuje	306
3.7.7.	Métodos basados en el coeficiente de empuje pasivo	307
3.7.7.1.	El concepto del coeficiente de empuje pasivo	307
3.7.7.2.	Valor del coeficiente de empuje pasivo	308
3.7.7.3.	Cálculo del empuje pasivo	310
3.7.8.	Cálculo del empuje al reposo	312
3.7.9.	Consideración de algunos casos singulares	314
3.7.9.1.	Empuje activo en muros paralelos	314
3.7.9.2.	Pantallas de anclaje enterradas	316
3.7.9.3.	Pilotaje en el trasdós de los muros	316
3.7.9.4.	Efecto silo	318
3.7.10.	Empuje sobre entibaciones	319
3.7.11.	Modos de fallo más usuales de las estructuras de contención	320
3.7.11.1.	Estados Límite Últimos	320
3.7.11.1.1.	Caracterización de las situaciones de proyecto	324
3.7.11.1.2.	Verificación de la seguridad frente al vuelco en los muros de gravedad	325
3.7.11.1.3.	Verificación de la seguridad frente a la rotura del terreno en muros pantalla	328
3.7.11.1.4.	Verificación de la seguridad frente al levantamiento del fondo de entibaciones	331
3.7.11.2.	Estados Límite de Servicio	331
3.7.11.2.1.	Movimiento de los muros de gravedad	331
3.7.11.2.2.	Movimiento de los muros pantalla	332
3.8.	ESTABILIDAD DE TALUDES	335
3.8.1.	Introducción	335
3.8.2.	Modos de fallo más usuales de los taludes asociados a Estados Límite Últimos	336
3.8.2.1.	Pérdida de la estabilidad global	336
3.8.2.2.	Deformaciones	336
3.8.2.3.	Erosiones	336
3.8.3.	Modos de fallo más usuales de los taludes asociados a Estados Límite de Servicio	336
3.8.4.	El cálculo de la estabilidad global en suelos	338
3.8.4.1.	Tipos de deslizamiento	338
3.8.4.2.	Caracterización de las situaciones de proyecto	339
3.8.4.3.	Principios generales del cálculo	342
3.8.4.4.	Deslizamiento plano indefinido	343
3.8.4.5.	Estudio de deslizamientos circulares	344
3.8.4.5.1.	Método del círculo de rozamiento	344
3.8.4.5.2.	Ábacos de Taylor	346
3.8.4.5.3.	Método de las rebanadas. Líneas circulares	346
3.8.4.6.	Estudio de deslizamientos no circulares	350
3.8.4.6.1.	Método de las rebanadas. Líneas no circulares	350
3.8.4.6.2.	Método de las cuñas	351
3.8.5.	El cálculo de la estabilidad global en rocas	352
3.8.5.1.	Tipos de inestabilidad	353
3.8.5.2.	Caracterización de la situación de proyecto	353
3.8.5.3.	Principios generales de cálculo	356

3.8.6.	Coeficientes de seguridad mínimos frente a la pérdida de estabilidad global	358
3.8.7.	Consideración de las deformaciones	358
3.9.	MEJORA DEL TERRENO	359
3.9.1.	Aspectos generales	359
3.9.2.	Precargas	360
3.9.2.1.	Mejoras producidas por las precargas	360
3.9.2.2.	Tipos de precargas	360
3.9.2.3.	Reconocimientos previos	361
3.9.2.4.	Proyecto de precargas	361
3.9.2.5.	Observación del tratamiento	363
3.9.3.	Vibración profunda	363
3.9.3.1.	Tipos de tratamiento	364
3.9.3.2.	Mejoras alcanzables	364
3.9.3.3.	Procedimientos de control	365
3.9.4.	Compactación dinámica	366
3.9.5.	Compactación con explosivos	368
3.9.6.	Inclusiones rígidas	369
3.9.6.1.	Dimensionamiento de las inclusiones	370
3.9.7.	Inyecciones	372
3.9.7.1.	Inyecciones de impregnación	372
3.9.7.2.	Inyecciones de compactación (Compaction-Grouting)	372
3.9.7.3.	Inyecciones con tubos manguito (Clauquage)	373
3.9.7.4.	Inyecciones de alta presión (Jet-Grouting)	374
3.9.8.	Otros procedimientos	374
3.10.	EFFECTOS DINÁMICOS	375
3.10.1.	Consideraciones generales	375
3.10.2.	Comportamiento dinámico sin drenaje	376
3.10.2.1.	Generación de presiones intersticiales	377
3.10.2.2.	Resistencia dinámica sin drenaje	377
3.10.2.3.	Deformaciones bajo la actuación de cargas cíclicas, sin drenaje	379
3.10.3.	Comportamiento dinámico con drenaje	380
3.10.4.	Comportamiento del suelo frente al sismo	382
3.10.4.1.	Caracterización del movimiento sísmico	383
3.10.4.1.1.	Magnitud	383
3.10.4.1.2.	Intensidad	383
3.10.4.1.3.	Aceleración del terreno	384
3.10.4.1.4.	Espectro de respuesta	384
3.10.4.2.	Licuefacción del suelo debido a la acción sísmica	386
3.10.4.3.	Acciones sísmicas transmitidas al terreno de cimentación a través de la estructura resistente	389
3.10.5.	Cálculo dinámico del conjunto suelo-estructura	389
3.10.5.1.	Cálculo dinámico de la cimentación	391
3.10.5.2.	Cálculo pseudo-estático de la cimentación	392
3.10.5.2.1.	Acciones estáticas equivalentes a la acción del oleaje o del viento	392
3.10.5.2.2.	Acciones estáticas equivalentes a la acción sísmica	393
3.10.5.2.2.1.	Fuerzas estáticas equivalentes sobre los cimientos	394
3.10.5.2.2.2.	Fuerzas estáticas equivalentes para la verificación de modos de fallo de pérdida de la estabilidad global	394
3.10.5.2.3.	Empujes de tierra equivalentes sobre estructuras de contención	394

3.10.5.2.3.1. Empuje activo	395
3.10.5.2.3.2. Empuje pasivo	398
3.10.5.2.4. Fuerzas estáticas equivalentes para la verificación de la estabilidad de taludes	398

CAPÍTULO IV. ASPECTOS GEOTÉCNICOS PARTICULARES DE LAS DISTINTAS TIPOLOGÍAS DE OBRAS MARÍTIMAS Y PORTUARIAS

4.1. INTRODUCCIÓN	405
4.2. MUELLES DE GRAVEDAD	405
4.2.1. El terreno natural. Estudio del cimiento	406
4.2.2. Estudio de materiales	406
4.2.3. Estados Límite Últimos	407
4.2.3.1. Verificación de la seguridad frente al deslizamiento en el contacto hormigón-banqueta de apoyo	408
4.2.3.2. Verificación de la seguridad frente al deslizamiento en el contacto de la banquetta de apoyo y el terreno natural	409
4.2.3.3. Verificación de la seguridad frente al hundimiento	410
4.2.3.4. Verificación de la seguridad frente al vuelco plástico	411
4.2.3.5. Verificación de la seguridad frente a la estabilidad global	412
4.2.3.6. Verificación de la seguridad frente a la erosión interna del trasdós	412
4.2.3.7. Verificación de la seguridad frente a la socavación del pie del intradós	413
4.2.3.8. Resumen de los coeficientes de seguridad mínimos	415
4.2.4. Estados Límite de Servicio	415
4.2.5. Otras recomendaciones	416
4.3. MUELLES Y PANTALANES DE PILOTES	418
4.3.1. El terreno natural. Estudio del cimiento	418
4.3.2. Elección del tipo de pilote	419
4.3.3. Estudio de los materiales	420
4.3.4. Acciones sobre los pilotes	421
4.3.5. Estados Límite Últimos	422
4.3.5.1. Verificación de la seguridad frente al hundimiento o arranque de los pilotes	422
4.3.5.2. Verificación de la seguridad frente a la rotura horizontal del terreno	423
4.3.5.3. Verificación de la seguridad frente a la erosión del talud	424
4.3.5.4. Verificación de la seguridad frente al deslizamiento superficial del talud	424
4.3.5.5. Verificación de la seguridad frente al equilibrio global	425
4.3.5.6. Verificación de la seguridad frente a las erosiones internas y arrastres	427
4.3.5.7. Verificación de la seguridad frente a las socavaciones	427
4.3.5.8. Resumen de los coeficientes de seguridad mínimos	428
4.3.6. Estados Límite de Servicio	428
4.3.7. Otras recomendaciones	429
4.4. MUELLES DE PANTALLAS	430
4.4.1. Tipología básica	430
4.4.2. Datos del terreno	431
4.4.3. Estudio de materiales	432
4.4.4. Comportamiento estructural	432
4.4.4.1. Tensión en el tirante	432
4.4.4.2. Esfuerzos en la pantalla	433
4.4.5. Estados Límite Últimos	433
4.4.5.1. Verificación de la seguridad frente al giro alrededor del anclaje	434
4.4.5.2. Verificación de la seguridad frente al giro alrededor del pie	436

4.4.5.3.	Verificación de la seguridad frente a la rotura del terreno en el entorno del anclaje	439
4.4.5.4.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento conjunto	440
4.4.5.5.	Verificación de la seguridad frente al equilibrio global	442
4.4.5.6.	Verificación de la seguridad frente al equilibrio vertical	443
4.4.5.7.	Verificación de la seguridad frente a la erosión interna	444
4.4.5.8.	Verificación de la seguridad frente a la socavación	444
4.4.5.9.	Resumen de coeficientes de seguridad mínimos	444
4.4.6.	Estados Límite de Servicio	444
4.4.7.	Otras recomendaciones	445
4.5.	MUELLES DE RECINTOS DE TABLESTACAS	446
4.5.1.	Tipología	446
4.5.2.	Factores de proyecto	448
4.5.2.1.	Datos del terreno	448
4.5.2.2.	Estudio de materiales	448
4.5.2.3.	Niveles de agua	449
4.5.3.	Estados Límite Últimos	449
4.5.3.1.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento	450
4.5.3.1.1.	Cimentaciones superficiales	451
4.5.3.1.2.	Cimentaciones empotradas	452
4.5.3.2.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento	454
4.5.3.3.	Verificación de la seguridad frente al vuelco	455
4.5.3.4.	Verificación de la seguridad frente a la rotura de la celda	459
4.5.3.5.	Verificación de la seguridad frente a la inestabilidad local del pie	460
4.5.3.6.	Verificación de la seguridad frente al equilibrio vertical de las tablestacas	463
4.5.3.7.	Verificación de la seguridad frente al equilibrio global	465
4.5.3.8.	Verificación de la seguridad frente a la erosión interna	465
4.5.3.9.	Verificación de la seguridad frente a la socavación	465
4.5.3.10.	Resumen de los coeficientes de seguridad mínimos	465
4.5.4.	Estados Límite Últimos del tipo agotamiento estructural	465
4.5.5.	Estados Límite de Servicio	467
4.5.6.	Otras recomendaciones	469
4.6.	DIQUES SECOS Y ESCLUSAS	470
4.6.1.	Clasificación	470
4.6.2.	Reconocimiento geotécnico	471
4.6.3.	Diques secos de gravedad	472
4.6.3.1.	Verificación de la seguridad frente al levantamiento del dique debido a las subpresiones	472
4.6.3.2.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento longitudinal	473
4.6.3.3.	Verificación de la seguridad frente al agotamiento estructural de la solera	474
4.6.3.4.	Verificación de la seguridad de los muros cajeros	474
4.6.3.5.	Movimientos	474
4.6.3.6.	Verificación de la seguridad frente a los efectos de las filtraciones	475
4.6.4.	Diques secos de solera drenada	475
4.6.4.1.	Reducción de subpresiones. Verificación de la seguridad frente a los efectos de las filtraciones	475
4.6.4.2.	Verificación de la seguridad frente al agotamiento estructural de la solera	476
4.6.4.3.1.	Verificación de la seguridad de los muros cajeros	477
4.6.4.3.2.	Movimientos	477
4.6.5.	Diques secos de solera anclada	477
4.6.5.1.	Verificación de la seguridad frente al levantamiento de la solera	477
4.6.5.2.	Verificación de la seguridad frente al agotamiento estructural de la solera	478

4.6.5.3.	Verificación de la seguridad de los muros cajeros	479
4.6.5.4.	Movimientos	479
4.6.5.5.	Verificación de la seguridad frente a los efectos de las filtraciones	479
4.6.6.	Esclusas de navegación	479
4.6.7.	Estudio de la construcción	479
4.7.	DIQUES DE ABRIGO	479
4.7.1.	Tipos de diques	480
4.7.2.	Información geotécnica	483
4.7.2.1.	Reconocimiento del cimientto	483
4.7.2.2.	Estudio de materiales de préstamo	483
4.7.3.	Verificación de la seguridad frente a los modos de fallo de tipo geotécnico	486
4.7.3.1	Elección de la probabilidad de ocurrencia de un modo de fallo geotécnico	487
4.7.3.2	Elección del procedimiento de verificación para cálculos de Nivel I	487
4.7.4.	Diques en talud emergido	490
4.7.4.1.	Verificación de la seguridad frente a la rotura del manto principal	490
4.7.4.2.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento superficial del manto	491
4.7.4.3.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad del espaldón	492
4.7.4.4.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad de la berma	492
4.7.4.5.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad global	493
4.7.4.5.1	Estabilización con bermas	495
4.7.4.6.	Verificación de la seguridad frente a la erosión interna	496
4.7.4.7.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad del núcleo del dique	496
4.7.4.8.	Verificación de la seguridad frente a la socavación del fondo natural	497
4.7.4.9.	Coeficientes de seguridad mínimos	498
4.7.4.10.	Asientos	499
4.7.5	Diques verticales	499
4.7.5.1.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento horizontal de la estructura	501
4.7.5.2.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento, la plastificación local y el vuelco plástico	501
4.7.5.3.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de la estabilidad global	503
4.7.5.4.	Verificación de la seguridad frente a las socavaciones y erosiones	503
4.7.5.5.	Asientos y deformaciones	503
4.7.5.6.	Coeficientes de seguridad mínimos	504
4.8.	PLATAFORMAS MARINAS (OFF-SHORE)	505
4.8.1.	Tipologías	505
4.8.2.	Acciones del oleaje y del viento	506
4.8.3.	Reconocimientos geotécnicos	507
4.8.4.	Estabilidad del fondo	507
4.8.5.	Cimentaciones superficiales	507
4.8.5.1.	Análisis estático	508
4.8.5.2.	Análisis dinámico	510
4.8.6.	Cimentaciones profundas	511
4.8.6.1.	Estudio de la hinca	511
4.8.6.2.	Carga de hundimiento	512
4.8.6.3.	Carga de rotura horizontal del terreno	512
4.8.6.4.	Deformabilidad	512
4.8.6.5.	Esfuerzos en los pilotes	513
4.9	DRAGADOS Y RELLENOS	513
4.9.1.	Tipos de dragados	513
4.9.2.	Información geotécnica	514

4.9.2.1.	Reconocimiento del terreno	514
4.9.2.2.	Clasificación de los terrenos a dragar	515
4.9.3.	Taludes de dragado	517
4.9.4.	Tipos de relleno	520
4.9.5.	Características de los rellenos	521
4.9.5.1.	Rellenos sumergidos de vertido directo	521
4.9.5.2.	Rellenos hidráulicos	522
4.9.5.3.	Rellenos en seco	523
4.9.6.	Consolidación de los rellenos	524
4.9.6.1.	Asiento de los rellenos generales	524
4.9.6.2.	Procedimiento de observación	524
4.9.7.	Otras recomendaciones	527
4.9.7.1.	Selección de rellenos	527
4.9.7.2.	Precauciones en la realización de dragados	528
4.9.7.3.	Precauciones en la ejecución de los rellenos	528
4.9.7.4.	Estudio de los vertidos	529
4.10	OTRAS OBRAS MARÍTIMAS Y PORTUARIAS	529
4.10.1.	Diques de alba	529
4.10.1.1.	Tipologías	529
4.10.1.2.	Problemas geotécnicos asociados	530
4.10.2.	Instalaciones de botadura e izado	531
4.10.2.1.	Gradas	531
4.10.2.2.	Varaderos	532
4.10.2.3.	Ascensores y cajoneros	532
4.10.3.	Tinglados, almacenes y parques cubiertos	532
4.10.4.	Emisarios y conducciones submarinas	533
4.10.4.1.	Problemas geotécnicos y procedimientos de reconocimiento	534
4.10.4.2.	Procedimientos de instalación	535

Índice de Figuras

CAPÍTULO II. INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA

Figura 2.2.1.	Variables de estado más comunes	56
Figura 2.9.1.	Correlaciones SPT (arenas)	86
Figura 2.9.2.	Ensayo de penetración dinámica Borro	88
Figura 2.9.3.	Ensayo de penetración estática	90
Figura 2.9.4.	Correlaciones del ensayo de penetración estática	91
Figura 2.9.5.	Clasificación del suelo a partir de los resultados del piezocono CPTU	93
Figura 2.9.6.	Gráfico para la determinación de c_h a partir de t_{50} y un índice de rigidez (I_p) entre 50 y 500 ...	93
Figura 2.9.7.	Esquema del resultado de un ensayo presiométrico	94
Figura 2.12.1.	Número de puntos recomendados en reconocimientos detallados	109
Figura A1.1.	Coefficientes de forma en el ensayo Lefranc	118
Figura A1.2.	Ensayos de bombeo en régimen permanente	119
Figura A1.3.	Esquema del ensayo de bombeo en régimen transitorio	120

CAPÍTULO III. CRITERIOS GEOTÉCNICOS

Figura 3.3.1.	Esquema del proceso de evaluación de la seguridad y la funcionalidad	138
Figura 3.3.2.	Posible ordenación de los estudios paramétricos (Cálculos de sensibilidad)	162
Figura 3.4.1.	Filtración simple en medios heterogéneos	167
Figura 3.4.2.	Solución simple. Filtración bajo un muelle	167
Figura 3.4.3.	Solución de una excavación y un achique con entibación	169
Figura 3.4.4.	Esquema de una red de filtración y de las fuerzas de arrastre correspondientes (Régimen laminar)	174
Figura 3.4.5.	Solución de la filtración al interior de un recinto tablestacado	175
Figura 3.4.6.	Esquema del problema de consolidación unidimensional	180
Figura 3.4.7.	Esquema del problema de consolidación unidimensional (Continuación)	182
Figura 3.4.8.	Incremento de la presión sobre el fondo debido al oleaje por un tren de ondas progresivo en profundidades indefinidas (Terreno rígido e impermeable)	185
Figura 3.4.9.	Red de filtración instantánea correspondiente a la acción del oleaje sobre un fondo marino homogéneo e isótropo	186
Figura 3.4.10.	Estimación de la variación de la Ley de Presiones Intersticiales del fondo marino para situación drenada bajo la acción del oleaje u otras oscilaciones del mar (de Rouck, 1991)	188
Figura 3.5.1.	Algunas formas típicas de cimentación	191
Figura 3.5.2.	Geometría de la cimentación equivalente	193
Figura 3.5.3.	Cimentación rectangular equivalente a otra circular con carga excéntrica	194
Figura 3.5.4.	Geometría del posible hundimiento	202
Figura 3.5.5.	Cimentaciones en zonas de pendiente	208
Figura 3.5.6.	Solución aproximada en terrenos heterogéneos	209
Figura 3.5.7.	Esquema de la rotura de una banqueta granular apoyada sobre un suelo blando sin drenaje ...	210
Figura 3.5.8.	Comprobación del vuelco plástico	217
Figura 3.5.9.	Movimiento de zapatas aisladas y Constantes de Resorte para cálculos de interacción suelo-estructura	221
Figura 3.5.10.	Fórmulas del método de Steinbrenner	223
Figura 3.6.1.	Principales temas a considerar en cimentaciones profundas	225
Figura 3.6.2.	Algunas notaciones relativas al pilote aislado	231
Figura 3.6.3.	Esquema de cálculo del rozamiento negativo	234

Figura 3.6.4.	Esfuerzos horizontales. Sobrecargas sobre terrenos blandos	235
Figura 3.6.5.	Procedimientos de estimación de empujes sobre pilotes en talud	237
Figura 3.6.6.	Evaluación de la seguridad de un pilote con carga axial cíclica	239
Figura 3.6.7.	Procedimientos de cálculo para la carga de hundimiento	244
Figura 3.6.8.	Hinca de pilotes. Fórmula de Hiley	254
Figura 3.6.9.	Modelo discreto de la ecuación de la onda	256
Figura 3.6.10.	Resistencia a la penetración de un pilote obtenida del control dinámico de la hinca	259
Figura 3.6.11.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento	261
Figura 3.6.12.	Esquema de cálculo de la fuerza horizontal de rotura	266
Figura 3.6.13.	Rotura horizontal del terreno: suelos granulares (Broms)	266
Figura 3.6.14.	Rotura horizontal del terreno: suelos puramente cohesivos (Broms)	267
Figura 3.6.15.	Representación simplificada de la parte enterrada de un pilote	271
Figura 3.7.1.	Tipologías básicas de estructuras de contención	275
Figura 3.7.2.	Esquema de la relación entre empuje y movimiento	277
Figura 3.7.3.	Sustitución de un trasdós quebrado por un plano vertical equivalente	279
Figura 3.7.4.	Paramento virtual equivalente en muros de trasdós quebrado	279
Figura 3.7.5.	Trasdós equivalente en muros en L	280
Figura 3.7.6.	Expresión gráfica de la Ley de Variación de la inclinación del empuje	281
Figura 3.7.7.	Esquema de algunas heterogeneidades típicas	282
Figura 3.7.8.	Esquema del método general de cálculo del empuje activo	287
Figura 3.7.9.	Cálculo del empuje activo sobre el tramo AC	288
Figura 3.7.10.	Determinación de la inclinación del empuje	289
Figura 3.7.11.	Extensión del concepto de coeficientes de empuje activo de suelos granulares	292
Figura 3.7.12.	Geometría y solución del problema resuelto analíticamente por Coulomb	294
Figura 3.7.13.	Geometría y solución del problema resuelto por Rankine	296
Figura 3.7.14.	Cálculo de empujes activos horizontales debidos al peso efectivo del terreno	297
Figura 3.7.15.	Cálculo del empuje horizontal del agua	299
Figura 3.7.16.	Efecto de la cohesión en el empuje activo horizontal	300
Figura 3.7.17.	Efecto de una sobrecarga uniforme en el empuje activo horizontal	301
Figura 3.7.18.	Efecto de sobrecargas parciales en el empuje activo horizontal	302
Figura 3.7.19.	Efecto de cargas lineales o concentradas en el empuje activo horizontal	303
Figura 3.7.20.	Efectos de otras sobrecargas	304
Figura 3.7.21.	Esquema del método general del cálculo del empuje pasivo	306
Figura 3.7.22.	Definición del coeficiente de empuje pasivo en suelos granulares	307
Figura 3.7.23.	Teoría simplificada de la plasticidad aplicada al cálculo de empujes pasivos	308
Figura 3.7.24.	Coeficientes de empuje pasivo	309
Figura 3.7.25.	Coeficiente de empuje pasivo horizontal K_{ph} para muros verticales y relleno de trasdós horizontal	310
Figura 3.7.26.	Coeficientes de empuje pasivo horizontal K_{ph} para muros verticales	311
Figura 3.7.27.	Efecto de la cohesión y las sobrecargas en el empuje pasivo	312
Figura 3.7.28.	Empuje activo sobre muros paralelos próximos	315
Figura 3.7.29.	Cálculo del tiro en algunas estructuras discontinuas	316
Figura 3.7.30.	Empujes sobre pilotes en el trasdós de un muro	317
Figura 3.7.31.	Empujes del terreno sobre entibaciones	320
Figura 3.7.32.	Esquema de algunos modos de fallo	321
Figura 3.7.33.	Esquema de algunos modos de fallo estructural	323
Figura 3.7.34.	Comprobación de seguridad frente al vuelco	326
Figura 3.7.35.	Análisis simplificado de una pantalla anclada	329
Figura 3.7.36.	Levantamiento del fondo en excavaciones entibadas	331
Figura 3.7.37.	Esquema de cálculo de pantallas mediante resortes equivalentes	333
Figura 3.8.1.	Esquema de algunos modos de fallo por pérdida de la estabilidad global	337
Figura 3.8.2.	Tipos de deslizamientos en suelos	338
Figura 3.8.3.	Comprobación de seguridad frente al deslizamiento en plano indefinido	344
Figura 3.8.4.	Esquema de cálculo mediante el método del círculo de rozamiento	345
Figura 3.8.5.	Ábaco de Taylor. Suelos puramente cohesivos, $\phi = 0$	347

Figura 3.8.6.	Ábaco de Taylor. Caso general, $\phi \neq 0$	348
Figura 3.8.7.	Esquema del método de las rebanadas en deslizamientos circulares	349
Figura 3.8.8.	Método de las rebanadas para superficies de rotura no circulares	351
Figura 3.8.9.	Esquema del método de las cuñas	352
Figura 3.8.10.	Tipos de inestabilidades elementales en taludes rocosos	354
Figura 3.8.11.	Procedimiento simplificado de evaluación de la seguridad. Taludes rocosos diaclasados	357
Figura 3.9.1.	Estimación del grado de consolidación de precargas con drenaje acelerado	362
Figura 3.9.2.	Esquema del tratamiento de vibrocompactación	364
Figura 3.9.3.	Esquema de la compactación dinámica	366
Figura 3.9.4.	Esquema del tratamiento con explosivos	368
Figura 3.9.5.	Esquemas de algunos tratamientos de mejora mediante inclusiones rígidas	369
Figura 3.9.6.	Esquemas de algunos tipos de inyección usuales	373
Figura 3.10.1.	Número de ciclos N, necesarios para causar una deformación tangencial del 5%	378
Figura 3.10.2.	Ejemplo típico de resistencia de una arena saturada frente a la actuación de cargas dinámicas (suelos arenosos del Puerto de Motril)	379
Figura 3.10.3.	Ejemplo típico de parámetros de comportamiento deformacional de un suelo bajo la actuación de cargas cíclicas (suelos arenosos del Puerto de Motril)	381
Figura 3.10.4.	Isosistas del terremoto de Lisboa de 1755	383
Figura 3.10.5.	Mapa español de peligrosidad sísmica (NCSE-02)	385
Figura 3.10.6.	Ejemplos de espectros de respuesta (amortiguamiento D = 5%)	385
Figura 3.10.7.	Resistencia a la licuefacción	388
Figura 3.10.8.	Esquema de empujes equivalentes sobre una estructura de contención en condiciones sísmicas	395
Figura 3.10.9.	Fórmulas de Mononobe-Okabe	396

CAPÍTULO IV. ASPECTOS GEOTÉCNICOS PARTICULARES DE LAS DISTINTAS TIPOLOGÍAS DE OBRAS MARÍTIMAS Y PORTUARIAS

Figura 4.2.1.	Muelle de bloques	405
Figura 4.2.2.	Muelle de cajones	406
Figura 4.2.3.	Modos de fallo geotécnicos en muelles de gravedad	407
Figura 4.2.4.	Esquema del deslizamiento por la base de la banquetta	409
Figura 4.2.5.	Métodos simplificados de cálculo de la carga de hundimiento de un muelle de gravedad sobre una banquetta	410
Figura 4.2.6.	Esquema de la acción erosiva de las hélices	414
Figura 4.2.7.	Esquema de una protección antierosiva	414
Figura 4.3.1.	Muelle de pilotes	418
Figura 4.3.2.	Modos de fallo geotécnicos en muelles de pilotes	422
Figura 4.3.3.	Método simplificado de cálculo de estabilidad	426
Figura 4.3.4.	Método de cálculo de la protección de pie del talud mediante escolleros de características granulométricas no uniformes	427
Figura 4.4.1.	Muelle de pantallas	431
Figura 4.4.2.	Modos de fallo geotécnicos en muelles de pantallas	434
Figura 4.4.3.	Giro alrededor del anclaje	435
Figura 4.4.4.	Giro alrededor del pie	437
Figura 4.4.5.	Definición de la seguridad frente al giro	438
Figura 4.4.6.	Esquema de algunos sistemas de anclaje	440
Figura 4.4.7.	Deslizamiento conjunto	441
Figura 4.4.8.	Situación del punto «C» en otras formas de anclaje	443
Figura 4.4.9.	Seguridad frente al equilibrio vertical	443
Figura 4.5.1.	Muelle de recintos de tablestacas	447
Figura 4.5.2.	Planta esquemática de recintos de tablestacas	447
Figura 4.5.3.	Modos de fallo geotécnicos en muelles de recintos de tablestacas	451
Figura 4.5.4.	Coeficiente de seguridad al deslizamiento en recintos no empotrados	452
Figura 4.5.5.	Coeficiente de seguridad al deslizamiento en recintos empotrados	454

Figura 4.5.6.	Esquema para evaluación de la seguridad frente al hundimiento	455
Figura 4.5.7.	Coeficiente de seguridad frente al vuelco. Modo 1	456
Figura 4.5.8.	Coeficiente de seguridad frente al vuelco. Modo 2	457
Figura 4.5.9.	Espirales logarítmicas para distintos ángulos de rozamiento	458
Figura 4.5.10.	Lugar geométrico de los polos de las espirales logarítmicas	458
Figura 4.5.11.	Coeficiente de seguridad frente a la rotura de la celda	459
Figura 4.5.12.	Seguridad frente al levantamiento del terreno en el pie	461
Figura 4.5.13.	Comprobación tensional en el entorno del pie del muelle	463
Figura 4.5.14.	Seguridad frente al equilibrio vertical de las tablestacas	464
Figura 4.5.15.	Esquema de los esfuerzos de tracción en las paredes	467
Figura 4.5.16.	Esquema del cálculo simplificado de deformaciones	468
Figura 4.6.1.	Elementos típicos de un dique seco	471
Figura 4.6.2.	Temas asociados al estudio de diques secos	473
Figura 4.6.3.	Posibles esquemas de soleras drenadas	476
Figura 4.6.4.	Posibles esquemas de soleras ancladas	478
Figura 4.7.1.	Dique en talud emergido	481
Figura 4.7.2.	Dique vertical	481
Figura 4.7.3.	Dique mixto	482
Figura 4.7.4.	Dique rebasable y sumergido	482
Figura 4.7.5.	Dique berma	482
Figura 4.7.6.	Diagrama de fallo de un dique vertical asociado a Estados Límite Últimos. Obras de ISA no significativo ($ISA < 5$). Ejemplo simplificado de asignación de probabilidades de fallo, considerando que la probabilidad conjunta de fallo obtenida por criterios de optimización económica es 0,16	488
Figura 4.7.7.	Modos de fallo geotécnicos e hidráulicos adscritos a Estados Límite Últimos, asociados a los diques en talud emergidos	491
Figura 4.7.8.	Estabilidad de diques de abrigo. Fuerzas actuantes en situación de ascenso del flujo de agua (Run-up)	493
Figura 4.7.9.	Mejora de la estabilidad global con banquetas	497
Figura 4.7.10.	Modos de fallo geotécnicos adscritos a Estados Límite Últimos, asociados a los diques de abrigo verticales	499
Figura 4.7.11.	Periodos naturales de oscilación de los diques verticales correspondientes a los modos fundamentales	500
Figura 4.7.12.	Consideración de las presiones intersticiales generadas por el oleaje en la banqueta y el terreno natural a los efectos de la verificación de la seguridad (Hundimiento y vuelco)	502
Figura 4.7.13.	Consideraciones de las presiones intersticiales generadas por el oleaje en el interior de la banqueta y del terreno natural a los efectos de la verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad global	504
Figura 4.8.1.	Tipologías de plataformas marinas (Off-Shore)	506
Figura 4.8.2.	Modos de fallo típicos de plataformas de gravedad	509
Figura 4.9.1.	Esquema de un dragado en zanja para sustitución de suelos blandos	514
Figura 4.9.2.	Esquema de posibles rellenos junto a un muelle	520
Figura 4.9.3.	Esquema del asiento de los rellenos	526
Figura 4.10.1.	Esquemas para duques de alba	530
Figura 4.10.2.	Esquema para instalaciones de botadura e izado	531
Figura 4.10.3.	Esquema para un parque de almacenamiento cubierto	533
Figura 4.10.4.	Esquema sobre instalación de emisarios submarinos	535

Índice de Tablas

CAPÍTULO I. GENERAL

Tabla 1.4.1.	Eurocódigos. Valores mínimos recomendados del índice de fiabilidad β (Estados Límite Últimos)	33
Tabla 1.7.1.	Notaciones, abreviaturas y símbolos convencionales fundamentales utilizados en estas Recomendaciones	41

CAPÍTULO II. INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA

Tabla 2.2.1.	Caracterización de litoclasas (Adaptación de las recomendaciones de la ISRM)	63
Tabla 2.2.2.	Escala de la meteorización de las rocas (ISRM)	66
Tabla 2.4.1.	Símbolos y términos comunes para la descripción preliminar del terreno	74
Tabla 2.4.2.	Algunas características elementales de las rocas sanas que pueden utilizarse para estimaciones previas	76
Tabla 2.4.3.	Algunas características elementales de los suelos que pueden utilizarse para estimaciones previas	76
Tabla 2.6.1.	Resumen de algunos métodos geofísicos utilizados en reconocimientos geotécnicos	78
Tabla 2.7.1.	Algunas formas de realizar sondeos mecánicos	80
Tabla 2.10.1.	Procedimientos habituales de toma de muestras en profundidad	99
Tabla 2.12.1.	Categoría de las obras según los índices IRE e ISA, a los efectos de la definición de la intensidad de los reconocimientos geotécnicos	105
Tabla 2.12.2.	Tipo de reconocimiento recomendado para un proyecto constructivo	106
Tabla 2.12.3.	Número de puntos de investigación en reconocimientos reducidos y mínimos	110
Tabla 2.14.1.	Unidades de referencia recomendadas y valores aproximados del coeficiente de variación de los parámetros geotécnicos para terrenos normalmente homogéneos	116

CAPÍTULO III. CRITERIOS GEOTÉCNICOS

Tabla 3.2.1.	Probabilidad de fallo individual asociada a los métodos de verificación de Nivel I que se adoptan en esta ROM (Estados Límite Últimos). Modos de fallo geotécnicos	132
Tabla 3.2.2.	Máxima probabilidad de fallo individual asociada a modos de fallo funcionales (Estados Límite de Servicio). Modos de fallo geotécnicos	132
Tabla 3.3.1.	Niveles representativos a adoptar para las aguas exteriores en función del tipo de combinación considerado	140
Tabla 3.3.2.	Coeficientes de ponderación parciales de las acciones para la verificación de modos de fallo adscritos a Estados Límite Últimos (ELU). Combinaciones fundamentales	148
Tabla 3.3.3.	Coeficientes de seguridad mínimos recomendados para la verificación de modos de fallos geotécnicos adscritos a Estados Límite Últimos. $5 \leq ISA \leq 19$	149
Tabla 3.3.4.	Algunos valores de β y p	163
Tabla 3.4.1.	Desniveles límite a adoptar entre los niveles representativos de las aguas libres exteriores y las líneas de saturación en terrenos naturales o rellenos	171
Tabla 3.4.2.	Coeficientes de seguridad mínimos frente al levantamiento de fondo. ISA bajo (5 a 19)	176
Tabla 3.5.1.	Métodos de verificación de la seguridad frente al hundimiento	196
Tabla 3.5.2.	Factor de corrección del índice «N» del SPT por la sobrecarga efectiva de las tierras. $N_{\text{(corregido)}} = f \cdot N$	197
Tabla 3.5.3.	Coeficientes de capacidad de carga de la fórmula de Brinch Hansen	203

Tabla 3.5.4.	Coeficientes de seguridad frente al hundimiento de cimentaciones superficiales. Valores mínimos recomendados para obras de carácter ISA bajo (5 a 19)	212
Tabla 3.5.5.	Coeficientes de seguridad mínimos frente al deslizamiento horizontal. Obras de carácter ISA bajo (5 a 19)	214
Tabla 3.5.6.	Coeficientes de seguridad mínimos frente al vuelco plástico. Obras de carácter ISA bajo (5 a 19)	220
Tabla 3.6.1.	Coeficientes de seguridad, F, mínimos frente al hundimiento de pilotes. Obras con ISA bajo (5 a 19)	263
Tabla 3.6.2.	Coeficientes de seguridad mínimos frente a la rotura horizontal del terreno. Obras con ISA bajo (5 a 19)	268
Tabla 3.6.3.	Valores del parámetro n_h (MPa/m)	271
Tabla 3.6.4.	Factores de reducción de los esfuerzos en la zona enterrada de los pilotes	272
Tabla 3.6.5.	Compresión media máxima en pilotes	274
Tabla 3.7.1.	Valores máximos del ángulo de rozamiento entre el paramento del muro y el terreno, en función del ángulo de rozamiento del terreno, ϕ	284
Tabla 3.7.2.	Valores de K_{ah} según Blum	295
Tabla 3.8.1.	Coeficientes de seguridad mínimos recomendados frente a la pérdida de estabilidad global. Obras de ISA bajo (5 a 19)	358
Tabla 3.9.1.	Ejemplo de posibles mejoras producidas por precargas	360
Tabla 3.9.2.	Aplicabilidad de los tratamientos de vibración profunda a los distintos tipos de terrenos	365
Tabla 3.10.1.	Ejemplos de daños sísmicos en puertos en las últimas dos décadas	386
Tabla 3.10.2.	Valores del parámetro CRR	387
Tabla 3.10.3.	Factor corrector del parámetro CRR en función de la magnitud del sismo (Youd e Idriss, 1997)	387

CAPÍTULO IV. ASPECTOS GEOTÉCNICOS PARTICULARES DE LAS DISTINTAS TIPOLOGÍAS DE OBRAS MARÍTIMAS Y PORTUARIAS

Tabla 4.2.1.	Coeficientes de seguridad mínimos recomendados para el proyecto de muelles de gravedad. ISA bajo (5 a 19)	416
Tabla 4.3.1.	Coeficientes de seguridad mínimos recomendados para el proyecto de muelles y pantalanes pilotados. ISA bajo (5 a 19)	428
Tabla 4.4.1.	Coeficientes de seguridad mínimos recomendados para el proyecto de muelles de pantallas. Obras de ISA bajo (5 a 19)	445
Tabla 4.5.1.	Coeficientes de seguridad mínimos para muelles de recintos de tablestacas. Obras con ISA bajo (5 a 19)	466
Tabla 4.7.1.	Coeficientes de seguridad mínimos para diques en talud emergidos (con probabilidad de ocurrencia en el modo de fallo del orden de 0,01)	498
Tabla 4.7.2.	Coeficientes de seguridad mínimos para diques verticales (con probabilidad de ocurrencia del modo de fallo del orden de 0,01)	501
Tabla 4.9.1.	Calificación de los suelos a dragar por su compacidad o consistencia	515
Tabla 4.9.2.	Terminología a utilizar para definir el grado de alteración de las rocas	516
Tabla 4.9.3.	Terminología a utilizar en la descripción de la resistencia de la roca matriz	516
Tabla 4.9.4.	Criterios de descripción objetiva del estado de fracturación de la roca	517
Tabla 4.9.5.	Clasificación de macizos rocosos según el valor del índice RQD	517
Tabla 4.9.6.	Taludes de dragado usuales (H/V)	519
Tabla 4.9.7.	Coeficientes de seguridad mínimos recomendados frente a la pérdida de estabilidad de taludes de dragado. Obras con ISA no significativo (< 5)	520
Tabla 4.9.8.	Valores típicos de algunas propiedades en rellenos sumergidos recién vertidos	522
Tabla 4.9.9.	Valores típicos para algunas propiedades de rellenos compactados en seco	523
Tabla 4.10.1.	Problemas geotécnicos y procedimientos de reconocimiento asociados a emisarios y conducciones submarinas	534