



**Procedimiento general y bases de cálculo en
el proyecto de obras marítimas y portuarias. PARTE I**

1ª Edición

Diciembre 2001

EDICIÓN:

Puertos del Estado

REDACCIÓN PONENCIA:

Miguel A. Losada

Universidad de Granada

DISEÑO GRÁFICO:

Pizzicato Estudio Gráfico

IMPRESIÓN:

Gráficas Calima

I.S.B.N:

84-88975-30-9

DEPOSITO LEGAL:

SA-819-2001

© Puertos del Estado

PRECIO:

30 € (IVA incluido)

PRÓLOGO

En Abril de 1990 el entonces Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo a través de la Dirección General de Puertos y Costas, publicó la primera Recomendación de Obras Marítimas, ROM 0.2-90, "Acciones en el proyecto de obras marítimas y portuarias", iniciando con ella un fructífero programa de desarrollo tecnológico que se ha materializado en un conjunto ordenado de criterios técnicos que, sin tener carácter vinculante o normativo, orienta a los proyectistas de obras marítimas en el camino hacia los objetivos de fiabilidad, funcionalidad y calidad de las obras.

Desde aquella fecha y con la aplicación de las diferentes Recomendaciones, los documentos ROM han adquirido un reconocido prestigio nacional e internacional como una excelente herramienta técnica y científica. Con independencia de su aplicación por parte de las Autoridades Portuarias, otros organismos portuarios de los Gobiernos Autónomos y empresas de proyecto y construcción, los documentos ROM son utilizados en la Universidad española y con frecuencia se adoptan en Europa e Iberoamérica, como documentos base para la definición de los criterios técnicos de las obras e infraestructuras marítimas.

El paso del tiempo, la experiencia adquirida en su aplicación y la evolución del conocimiento han requerido una revisión del Programa Rom. Nada más lógico que comenzar por el primer documento publicado, la ROM 0.2-90, que en su andadura ha sido el fundamento de los vigentes procedimientos de cálculo. El documento que tiene en sus manos, denominado ROM 0.0, es una revisión de los capítulos referentes a los criterios generales y las bases de cálculo incluidos en aquel documento; en él se concretan y se precisan diversos conceptos presentados en aquella, y se amplía el marco de la verificación de los modos de fallo mediante la incorporación de los métodos probabilistas de Nivel II y III. A esta publicación seguirán en un futuro inmediato otras Recomendaciones; en el capítulo I se presenta una relación de las mismas.

Corresponde ahora a los técnicos utilizar estas Recomendaciones con prudencia y espíritu crítico y les animamos a remitir sus sugerencias, dudas y críticas para que, con la opinión de todos y tras un periodo de maduración técnica y de aplicación reflexiva, los documentos ROM adquieran el fundamento necesario para convertirse en Normas Técnicas.

Deseo expresar mi agradecimiento a todos los que, de una manera u otra, han convertido en realidad la ROM 0.0 puesto que conozco, por experiencia propia, lo difícil que es concretar una publicación de esta naturaleza. En la década transcurrida desde la publicación de la ROM 0.2-90 hasta nuestros días, los documentos ROM fueron una de mis responsabilidades administrativas, primero como ponente y Secretario de Comisión y después como Presidente de Comisión y responsable del Departamento de Tecnología y Normativa. Cada una de las Recomendaciones publicadas forman parte de mi pequeña historia y siento por ellas ese orgullo personal por las cosas bien hechas.

Es una satisfacción poder prologar este primer documento del renovado Programa ROM con el conocimiento de que esta revisión es un paso necesario para aumentar su prestigio e influencia en el mundo de la ingeniería nacional e internacional. Si en mi anterior ámbito de responsabilidad fui un impulsor decidido del Programa ROM, ahora como Presidente de Puertos del Estado estoy sin duda comprometido en su consolidación y desarrollo futuro como instrumento de primer orden para el desarrollo tecnológico de la ingeniería marítima y portuaria española.

Madrid, diciembre de 2001

José Llorca Ortega
Presidente de Puertos del Estado

| | |
|--|-----------|
| 1 PRESENTACIÓN | 15 |
| 1.1 El Programa ROM..... | 17 |
| 1.1.1 Organización en Series del Programa ROM ¹ | 17 |
| 1.1.2 Redacción de la ROM 0.0 | 19 |
| 1.2 Objetivo y Ámbito de Aplicación | 20 |
| 1.3 Justificación y Contenidos | 20 |
| 1.4 Summary | 23 |
| 1.4.1 Aim and Scope of Application..... | 23 |
| 1.4.2 Justification and Contents..... | 23 |
| 1.4.3 Chapter's Contents..... | 24 |
| 2 CRITERIOS GENERALES EN EL PROYECTO | 27 |
| 2.1 Introducción..... | 29 |
| 2.2 Definiciones..... | 30 |
| 2.3 Objetivos, Requisitos y Criterios de Proyecto..... | 36 |
| 2.4 Espacio y Tiempo..... | 36 |
| 2.5 Temporalidad y Vida..... | 40 |
| 2.6 Condicionantes y Bases de Cálculo | 42 |
| 2.7 Caracteres General y Operativo..... | 42 |
| 2.8 Procedimiento de Verificación | 47 |
| 2.9 Seguridad, Servicio y Explotación..... | 49 |
| 2.10 Valores Recomendados..... | 55 |
| 2.11 Anejo: Cálculo de los Índices de Repercusión..... | 60 |
| 3 CONDICIONANTES DE PROYECTO | 67 |
| 3.1 Introducción..... | 69 |
| 3.2 La Incertidumbre en el Proyecto..... | 70 |
| 3.3 Variabilidad Espacial y Temporal | 72 |
| 3.4 Factores de Proyecto..... | 73 |
| 3.5 Parámetros de Proyecto | 74 |
| 3.6 Agentes y Acciones..... | 77 |
| 3.7 Clasificación Temporal..... | 82 |
| 3.8 Valores de un Factor de Proyecto | 84 |
| 3.9 Clases Estadísticas de Valores..... | 87 |
| 3.10 Estudio de los Factores..... | 89 |
| 3.11 Anejo: Algunos Valores de Factores de Proyecto | 90 |
| 4 PROCEDIMIENTO DE VERIFICACIÓN..... | 97 |
| 4.1 Introducción..... | 99 |
| 4.2 Metodo de los Estados Límite | 100 |
| 4.3 Modos de fallo y de parada..... | 109 |
| 4.4 Formas de la Ecuación de Verificación..... | 110 |
| 4.5 Condiciones de Trabajo..... | 112 |
| 4.6 Condiciones de Trabajo y Estados Límite..... | 115 |
| 4.7 Ordenación de Factores y Términos..... | 117 |
| 4.8 Compatibilidad de Valores | 120 |
| 4.9 Combinación de Factores y Términos | 121 |
| 4.10 Métodos de Verificación y Cálculo..... | 125 |
| 4.11 Probabilidad y Fase de Proyecto..... | 128 |

(1) Los títulos, el orden y la secuencia de algunas Recomendaciones y Series podrán cambiar durante su desarrollo

| | |
|---|------------|
| 5 MÉTODOS DE NIVEL I | 131 |
| 5.1 Introducción..... | 133 |
| 5.2 Coeficiente de Seguridad Global..... | 134 |
| 5.3 Método de los Coeficientes Parciales..... | 141 |
| 5.4 Anejo:Otros Métodos de Nivel I | 161 |
| 6 MÉTODOS DE NIVEL II Y III | 163 |
| 6.1 Introducción..... | 165 |
| 6.2 Formulación General del Problema..... | 165 |
| 6.3 Métodos de Nivel II | 167 |
| 6.4 Métodos de Nivel III | 172 |
| 6.5 Relación entre los Métodos de Nivel I y II y III | 178 |
| 6.6 Anejo:Cálculo del Rebase por Nivel II | 179 |
| 6.7 Anejo:La Verificación en los Eurocódigos y en la EHE..... | 185 |
| 7 PROBABILIDAD DE FALLO Y PARADA OPERATIVA | 189 |
| 7.1 Introducción..... | 191 |
| 7.2 Conceptos Previos | 192 |
| 7.3 Probabilidad frente a un Modo en T_L | 197 |
| 7.4 Diagramas de Modos..... | 201 |
| 7.5 Probabilidad Conjunta de Fallo | 203 |
| 7.6 Operatividad | 208 |
| 7.7 Tramos con $IRE \geq 20$ e $ISA < 20$ | 209 |
| 7.8 Optimización Económica del Tramo..... | 210 |
| 7.9 Conservación de Obras e Instalaciones | 213 |
| 7.10 Observación de las Obras e Instalaciones | 213 |
| 7.11 Fallo de Obras Existentes | 214 |
| 7.12 Anejo: Cálculo de la Probabilidad Conjunta | 215 |

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Capítulo 1 | 1.1 Organización y capítulos de la ROM 0.0 | 21 |
| Capítulo 2 | 2.1 Organización y contenidos del capítulo 2 | 30 |
| | 2.2 Intervalos de tiempo y descripción estadística | 37 |
| | 2.3 Caracteres general y operativo del tramo de obra | 43 |
| | 2.4 Requisitos de proyecto:seguridad,servicio y uso y explotación | 49 |
| | 2.5 Secuencia de cálculo de la probabilidad conjunta de fallo y de parada | 53 |
| | 2.6 Valores recomendados en función de los caracteres general y operativo del tramo de la obra | 55 |
| Capítulo 3 | 3.1 Organización y contenidos del capítulo 3 | 70 |
| | 3.2 Fuentes de incertidumbre en el proyecto | 71 |
| | 3.3 Factores de proyecto:clasificación por su origen y función y clasificación temporal..... | 77 |
| | 3.4 Clasificación de los agentes y sus acciones por su origen y función | 81 |
| | 3.5 Valores de un factor de proyecto | 84 |
| | 3.6 Clases estadísticas de valores | 87 |
| Capítulo 4 | 4.1 Ordenación y contenidos del capítulo 4 | 100 |
| | 4.2 Estados límite últimos,de servicio y operativos | 101 |
| | 4.3 Modos de fallo y parada y formas de verificación | 110 |
| | 4.4 Condiciones de trabajo | 113 |
| | 4.5 Ordenación de factores y términos | 118 |
| | 4.6 Combinación de factores y términos | 123 |
| | 4.7 Métodos de verificación en el programa ROM | 128 |
| | 4.8 Dominios de seguridad y fallo | 129 |
| Capítulo 5 | 5.1 Ordenación y contenidos del capítulo 5 | 133 |
| | 5.2 Secuencia de aplicación del método del coeficiente global | 134 |
| | 5.3 Secuencia de aplicación del método de los coeficientes parciales | 141 |
| | 5.4 Ordenación de factores y términos en el método de los coeficientes parciales..... | 143 |
| | 5.5 Secuencia para calcular el coeficiente de ponderación básico | 149 |
| | 5.6 Secuencia para el cálculo del coeficiente de compatibilidad | 153 |
| Capítulo 6 | 6.1 Organización y contenidos del capítulo 6 | 165 |
| | 6.2 Métodos de verificación de Nivel II y III | 166 |
| | 6.3 Secuencia para la aplicación de un método de Nivel II..... | 167 |
| | 6.4 Secuencia para la aplicación de un método de Nivel III..... | 172 |
| | 6.5 Definición de las variables | 180 |
| | 6.6 Evolución de la variables en el proceso iterativo..... | 185 |
| Capítulo 7 | 7.1 Ordenación y contenidos del capítulo 7..... | 192 |
| | 7.2 Evolución temporal del término desfavorable..... | 192 |
| | 7.3 Evolución temporal del término favorable. | 193 |
| | 7.4 Picos del término desfavorable seleccionados uno por cada uno de los intervalos de tiempo regulares | 194 |
| | 7.5 Picos del agente seleccionados en el intervalo de tiempo..... | 195 |
| | 7.6 Número aleatorio de picos del agente en el intervalo de tiempo | 196 |
| | 7.7 Diagrama de modos de fallo y parada..... | 201 |
| | 7.8 Cálculo de la probabilidad conjunta en la vida útil..... | 203 |

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Capítulo 2 | 2.1 Vida útil mínima en la fase de proyecto servicio | 56 |
| | 2.2 Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio para los E.L.U..... | 57 |
| | 2.3 Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio para los E.L.S..... | 57 |
| | 2.4 Operatividad mínima en la fase de servicio | 59 |
| | 2.5 Número medio de paradas operativas en el intervalo de tiempo | 59 |
| | 2.6 Duración máxima probable de la parada de un modo de parada operativa (horas) | 59 |
| Capítulo 3 | 3.1 Clasificación temporal de los factores de proyecto | 83 |
| Capítulo 4 | 4.1 Condiciones de trabajo y de verificación | 113 |
| | 4.2 Condiciones de trabajo y estados límite | 115 |
| | 4.3 Condiciones de trabajo y estados límite últimos | 116 |
| | 4.4 Condiciones de trabajo y estados límite de servicio..... | 116 |
| | 4.5 Condiciones de trabajo y estados límite operativos..... | 117 |
| | 4.6 Método de verificación recomendado en función del carácter del tramo de obra..... | 127 |
| Capítulo 5 | 5.1 Coeficiente de ponderación básico.Todos los términos excepto deformación y terreno | 149 |
| | 5.2 Coeficiente de ponderación básico.Términos asociados a factores de deformación..... | 150 |
| | 5.3 Coeficiente de ponderación básico.Términos asociados a factores del terreno..... | 150 |
| | 5.4 Coeficiente de compatibilidad básico por actuación del término | 153 |
| | 5.5 Coeficiente de compatibilidad básico por el origen del término | 154 |
| | 5.6 Coeficiente reductor básico:propiedades de los materiales | 156 |
| | 5.7 Coeficiente reductor básico:propiedades del terreno | 156 |
| | 5.8 Modificación del coeficiente reductor básico por el control de la ejecución | 157 |
| | 5.9 Tabla de Coeficientes de Compatibilidad,CEB (1976) | 162 |
| | 5.10 Tabla de Coeficientes de Compatibilidad 2,CEB (1976) | 162 |
| Capítulo 6 | 6.1 Resultados de la aplicación del método de Nivel II: índice de fiabilidad y probabilidad de fallo..... | 184 |
| | 6.2 Resultados de la aplicación del método de Nivel II: índices de sensibilidad | 185 |

A

Acción, 31, 77
 Agente, 30, 77
 Agen.asoc. al método construcción, 81
 Agente asociado al material, 80
 Agente biogeoquímico, 80
 Agente climático, 79
 Agente de uso y explotación, 80
 Agente gravitatorio, 78
 Agente hidráulico, 79
 Agente medio físico, 79
 Agente predominante, 30
 Agente sísmico, 80
 Agente térmico, 93
 Agente del terreno, 80
 Agotamiento resistente, 102
 Alteración geométrica acumulativa, 106
 Alternativa de Proyecto, 32, 36

C

Carácter general, 42, 43
 Carácter operativo, 42, 45
 Ciclo de solicitud, 38
 Ciclo de variabilidad, 38
 Clases estadísticas de valores, 87
 Clasificación de los parámetros, 74
 Clasificación por el origen y la función, 78
 Clasificación temporal, 82
 Coef. de compatibilidad básico, 154
 Coef. de ponderación básico, 149
 Coeficiente de compatibilidad, 151, 152
 Coeficiente de ponderación, 148, 149
 Coeficiente de seguridad, 111, 134, 135
 Coeficiente de seguridad global, 54, 134, 135
 Coeficiente parcial, 141
 Coeficiente reductor, 151, 156, 157
 Coeficiente reductor básico, 156
 Colapso progresivo, 102, 104
 Combinación cuasi permanente, 123
 Combinación de factores, 121
 Combinación frecuente, 123
 Combinación fundamental, 122
 Combinación habitual, 123
 Combinación poco probable, 122
 Compatibilidad de términos, 151
 Compatibilidad de valores, 120
 Condiciones excepcionales, 114

Cond. excep. fortuitas, 114
 Cond. excep. previstas, 115
 Cond. oper. post-excepcionales, 114
 Cond. oper. post-extremas,
 Cond. operativas normales, 113
 Condición de comprobación, 134, 142
 Condicionante de Proyecto, 42, 69
 Condiciones de trabajo, 48, 112
 Condiciones extremas, 114
 Conservación, 213
 Conservación y optimización, 213
 Convergencia en la simulación, 177
 Correlación débil, 169
 Correlación entre factores, 169, 174
 Correlación espacial, 72
 Correlación fuerte, 169
 Correlación temporal, 72
 Coste de adimensionalización, 44, 61
 Coste de inversión, 44, 61
 Coste de repercusión, 44, 61
 Coste total óptimo, 210, 213
 Cota superior de la probabilidad, 206, 207, 208
 Criterio de fallo, 127
 Criterios de proyecto, 29, 36

D

Declaración factor de proyecto, 73
 Deformación, 103
 Deformación excesiva, 107
 Desviación admisible, 91
 Determinismo y aleatoriedad, 73
 Diagrama compuesto, 202
 Diagrama de modos, 54, 201
 Diagrama en paralelo, 202
 Diagrama en serie, 202
 Dominios de seguridad y fallo, 54, 129
 Durabilidad, 104, 105
 Duración de la fase de proyecto, 41
 Duración de una parada, 53, 59

E

Ecuación de verificación, 110
 Efecto ambiental y social, 107
 Equilibrio estático, 102
 Equivalencia de clases, 120, 121
 Esquema de cálculo, 171, 174
 Esquema de cálculo en el Nivel II, 171
 Estado, 32, 138
 Estado de proyecto, 32

Estado límite, 33, 100
 Estado límite último, 101
 Estado límite de servicio, 104
 Estado límite operativo, 107
 Estrategia de conservación, 213
 Estudio de los factores, 189

F

F. de distribución de Poisson, 195, 196
 Factor condicionante, 136, 143
 Factor de proy. extraordinario, 82
 Factor de proy. insólito, 83
 Factor de proy. no permanente, 82
 Factor de proy. permanente, 82
 Factor de proy. simultáneo, 119
 Factor de Proyecto, 31, 73, 117
 Factor predominante, 31, 136
 Factor relevante, 136, 142
 Factores o términos correlacionados, 202
 Fase de conservación y reparación, 40
 Fase de construcción, 39
 Fase de desmantelamiento, 40
 Fase de proyecto, 39
 Fase de servicio, 40
 Fatiga, 102, 103
 Fiabilidad, 35, 50
 Fisuración, 106
 Fuentes de incertidumbre, 70
 Función de supervivencia, 215
 Función objetivo, 215
 Función peligro, 215
 Funcionalidad, 35, 51

G

Generación de variables continuas, 176
 Generación de variables discretas, 176
 Generación números aleatorios, 176

H

Hiperciclo de variabilidad, 39

I

Índice de repercusión, 44, 45
 Índice de sensibilidad, 170, 185
 Imperativo legal, 108, 109
 Inestabilidad, 102, 103
 Inferencia estadística, 84

Inspección y auscultación, 214
 Integración numérica, 175
 Intervalo de confianza, 92, 93, 94
 Intervalo de corta duración, 37
 Intervalo de larga duración, 37, 38
 Intervalo de tiempo, 37, 192, 193
 IRE, 44, 60
 IREO, 46, 64
 ISA, 45, 62
 ISAO, 46, 65

J

Jerarquía de métodos, 128

M

Máxima probabilidad conjunta, 50, 51, 57
 Método de los coef. parciales, 125, 141
 Método de Nivel I, 125, 133
 Método de Nivel II, 125, 165, 167
 Método de Nivel III, 125, 165, 172
 Método de verificación, 125
 Método del coef. de seguridad, 133, 134
 Margen de seguridad, 48, 111, 142
 Modo de fallo, 109
 Modo de parada operativa, 109
 Modo principal, 33, 203
 Modos correlacionados, 202
 Modos mutuamente excluyentes, 204, 205, 216
 Monte Carlo, 175

N

Número aleatorio de picos, 195
 Número de muestras en la simulación, 177
 Número de picos, 194
 Número medio de paradas, 53, 59

O

Objetivo de proyecto, 36
 Obra definitiva, 41
 Obra provisional, 40
 Operatividad, 52
 Operatividad mínima, 59
 Optimización económica, 210
 Optimización socio-económica, 210
 Ordenación de factores, 117, 143

P

Parámetro de proyecto, 74, 90
 Parámetro del material, 76, 93
 Parámetro del terreno, 75, 91
 Parámetro geométrico, 74, 90
 Parámetros del aire y agua, 76, 92
 Periodo de retorno, 199, 209
 Pico máximo, 192
 Plan de conservación, 213
 Probabilidad conjunta de fallo, 35, 203
 Probabilidad de fallo, 50, 51
 Probabilidad de parada, 52
 Probabilidad de un modo, 197
 Proyecto, 30

R

Relación entre métodos, 178
 Reparación, 40
 Resultados del método de Nivel II, 170, 179
 Resultados de la aplicación del Nivel III, 175
 Revisión de la probabilidad de fallo, 214, 215

S

Secuencia de calibración de métodos, 178
 Secuencia de cálculo en el Nivel III, 174
 Secuencia de cálculo, Nivel II, 170
 Seguridad, 34, 50
 Servicio, 34, 51

T

Término, 110, 117
 Término desfavorable, 111, 138, 146
 Término favorable, 131, 229
 Tipo de combinación, 122, 124
 Tramo de obra, 31, 36

U

Unidad de intervalo de tiempo, 32, 194, 195
 Uso y explotación, 34, 52

V

Valor característico, 85
 Valor de cálculo, 86
 Valor de comprobación, 86
 Valor de los factores en el Nivel II, 168
 Valor de los factores en el Nivel III, 173
 Valor de la acción, 96
 Valor de la clase centrada, 88
 Valor de la cola inferior, 88

Valor de la cola superior, 88
 Valor del agente, 95
 Valor nominal, 85
 Valor representativo, 85
 Valor umbral, 108, 199, 200, 201
 Valor de los parámetros de los materiales, 76, 93
 Valor de los parámetros del aire y agua, 76, 92
 Valor de los parámetros del terreno, 75, 91
 Valor geométrico, 74, 90, 91
 Valores máximo y mínimo, 86
 Variabilidad espacial, 72
 Variabilidad temporal, 72
 Vibración excesiva, 104, 106
 Vida útil, 35
 Vida útil mínima, 56
 Vida fiable, 35, 215

CAPITULO 1

Presentación



1

PRESENTACIÓN

1.1

El Programa ROM

El Programa de las “Recomendaciones para Obras Marítimas” (**Programa R.O.M.**) se inició en 1987 con la constitución de la Comisión Técnica encargada de redactar unas Recomendaciones que, facilitasen y guiasen a los distintos organismos estatales y empresas privadas en el proyecto, construcción, mantenimiento y explotación de las Construcciones Marinas y en particular de las Obras Marítimas. Dicho Programa se estructuró en las siguientes series:

- Serie 0: Recomendaciones de carácter general
- Serie 1: Obras exteriores: diques de abrigo
- Serie 2: Obras interiores: muelles y estructuras de amarre y fondeo
- Serie 3: Forma y disposición en planta
- Serie 4: Superestructuras portuarias

Desde esa fecha, la Comisión Técnica junto con diversos especialistas y en colaboración con Instituciones y Organismos Públicos y Privados, está trabajando en las distintas áreas de las Construcciones Marinas, dando como resultado de la publicación de las siguientes Recomendaciones:

R.O.M. 0.2: *Acciones en el proyecto de obras marítimas y portuarias.*

Esta Recomendación queda sustituida por la presente Recomendación.

R.O.M. 0.3: *Acciones climáticas I: Oleaje.*

R.O.M. 0.4: *Acciones climáticas II: Viento.*

R.O.M. 0.5: *Recomendaciones geotécnicas para obras marítimas.*

R.O.M. 3.1: *Proyecto de la configuración marítima de los puertos, canales de acceso y áreas de flotación.*

R.O.M. 4.1: *Recomendaciones para el proyecto y construcción de pavimentos portuarios.*

La importancia y acogida que el Programa ROM está teniendo en los medios técnicos, la amplitud del campo de trabajo y la publicación de esta ROM 0.0, han motivado la revisión del Programa tal y como estaba inicialmente planteado, quedando de la forma siguiente.

1.1.1

Organización en Series del Programa ROM¹

(1) Los títulos, el orden y la secuencia de algunas Recomendaciones y Series podrán cambiar durante su desarrollo.

• **Serie 0. Descripción y caracterización de los factores de proyecto de obras marítimas y portuarias**

ROM 0.0: Procedimiento general y bases de cálculo

ROM 0.1: Descripción de los materiales de construcción

ROM 0.2: Parámetros y agentes de uso y explotación

ROM 0.3: Descripción del medio físico, I: Oscilaciones del mar
ROM 0.4: Descripción del medio físico, II: Procesos atmosféricos
ROM 0.5: Descripción del medio físico, III: Terreno
ROM 0.6: Descripción del medio físico, IV: Agentes sísmicos
ROM 0.7: Métodos y técnicas de inspección, auscultación e instrumentación

- **Serie 1: Obras de abrigo frente a las oscilaciones del mar**

ROM 1.0: Criterios generales para obras y estructuras de abrigo
ROM 1.1: Diques de abrigo
ROM 1.2: Estructuras de abrigo fijas y flotantes

- **Serie 2: Obras portuarias interiores**

ROM 2.0: Criterios generales para obras portuarias interiores
ROM 2.1: Muelles
ROM 2.2: Estructuras de atraque, amarre y fondeo
ROM 2.3: Obras especiales: esclusas, gradas, varaderos y diques secos

- **Serie 3: Planificación, gestión y explotación de áreas portuarias**

ROM 3.0: Estudios de planificación, gestión y explotación
ROM 3.1: Proyecto de la configuración marítima de los puertos
ROM 3.2: Proyecto de la configuración terrestre de los puertos
ROM 3.3: Señalización, balizamiento y sistemas de control en áreas portuarias
ROM 3.4: Gestión y explotación de puertos

- **Serie 4: Superestructuras e instalaciones en tierra de las áreas portuarias**

ROM 4.0: Criterios generales
ROM 4.1: Pavimentos en áreas portuarias
ROM 4.2: Accesos y tráfico rodado
ROM 4.3: Edificación portuaria
ROM 4.4: Instalaciones portuarias

- **Serie 5: Las obras marítimas y portuarias en el entorno**

ROM 5.0: Criterios generales y estudio de impacto ambiental
ROM 5.1: La calidad del agua en las áreas portuarias: alivios, derrames y vertidos.
ROM 5.2: Las obras marítimas y portuarias en el litoral
ROM 5.3: Dragados y Rellenos

- **Serie 6: Prescripciones técnicas, administrativas y legales.**

ROM 6.0: Aspectos administrativos y legales en el proyecto
ROM 6.1: Prescripciones técnicas para la construcción, reparación y mantenimiento
ROM 6.2: Prescripciones técnicas para la gestión y explotación

- **El Progama EROM**

Recoge los comentarios de los usuarios y de las personas que aplican las diferentes Recomendaciones, por tanto es un foro abierto de discusión de las publicaciones del Programa ROM siguiendo unos criterios análogos a los de las revistas técnicas.

1.1.2 Redacción de la ROM 0.0

Esta ROM 0.0 es una revisión de los capítulos referentes a los Criterios generales y las bases de cálculo presentadas en la ROM 0.2: Acciones en el proyecto de obras marítimas y portuarias. En ella se concretan y se precisan diversos conceptos presentados inicialmente en la primera ROM que el paso del tiempo, la experiencia adquirida en su aplicación y la evolución del conocimiento así lo han requerido. Se amplía el marco de la verificación de los modos de fallo mediante la incorporación de métodos probabilistas de Nivel II y III.

La ROM 0.0 ha sido redactada por Puertos del Estado, bajo la responsabilidad y supervisión de la Dirección técnica de infraestructuras y servicios portuarios, con la participación de las siguientes personas:

- Presidente: Antonio Martín Oliver, Puertos del Estado
- Coordinador de los trabajos de ponencia: José Llorca, M^a Dolores Cancela y Juan Ignacio Grau, Puertos del Estado
- Ponente: Miguel A. Losada, Universidad de Granada

La comisión de trabajo ha estado formada por los siguientes vocales:

- Antonio Capote del Villar, Ferrovial-Agroman
- José Luis Díaz Rato, Autoridad Portuaria de Gijón
- Francisco González Portal, Puertos del Estado
- M^a Jesús Martín Soldevilla, Cepyc-Cedex
- Josep Medina Folgado, Universidad Politécnica de Valencia
- Ignacio Rodríguez Arévalo, Puertos del Estado
- Álvaro Rodríguez Dapena, Puertos del Estado
- Carlos Sanchidrián Fernández, Alatec-Proes
- Eduardo Serrano Sanz, Sener
- Antonio Soriano Peña, Ingeniería del Suelo
- César Vidal Pascual, Universidad de Cantabria

Además de los miembros de la comisión de trabajo, el comité técnico de redacción ha estado formado por los siguientes vocales:

- Eduardo Arana Romero, NECSO
- José María Berenguer Pérez, Berenguer Ingenieros
- José Antonio Caffarena Laporta, Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras
- José Daniel López López, Abarloa2
- Francisco Esteban Rodríguez-Sedano, Asesor Técnico Puertos del Estado
- Gregorio Gómez Pina, Dirección General de Costas
- Braulio González Madrigal, CEPYC-CEDEX
- Joan Hugas Maurici, Diputación de Gerona
- Vicente Negro Valdecantos, Universidad Politécnica de Madrid
- Carlos Peña Martínez, Dirección General de Costas
- Carlos Pérez Quintero, Empresa Pública de Puertos de Andalucía
- José María Picó Hormeña, Autoridad Portuaria de Bilbao
- Eloy Pita Carpenter, Puertos del Estado

- Jesús Poncela Pardo, Puertos del Estado
- Javier Rodríguez Besné, Puertos del Estado
- Rafael Saénz de Navarrete, Autoridad Portuaria de Barcelona
- Agustín Sánchez Arcilla Conejo, Universitat Politècnica de Catalunya
- César Sagaseta Millán, Universidad de Cantabria
- Pablo Molinero Guillén, Dragados
- Antonio Vacas Jaramillo, Sato
- Jesús Villanueva Fraile, Autoridad Portuaria de Bilbao

1.2 Objetivo y Ámbito de Aplicación

El objetivo de la ROM 0.0 es proporcionar un conjunto de normas y criterios técnicos de aplicación en el proyecto, construcción, explotación, mantenimiento, reparación y desmantelamiento de todas las obras marítimas y portuarias, cualquiera que sea su clase o destino y cualesquiera que sean los materiales, medios y elementos empleados en su construcción, explotación, conservación, reparación y desmantelamiento.

El ámbito de aplicación de esta ROM 0.0 se extiende a todos aquellos aspectos relacionados con la actividad portuaria, la gestión y el mantenimiento del litoral, la explotación de los recursos marinos, la navegación y su interacción con el medio físico.

La ROM 0.0 se estructura en dos partes. La primera contiene siete capítulos y en ellos se articula el procedimiento general y las bases de cálculo de las obras marítimas y portuarias. La segunda parte, que se publica de forma separada a esta Parte I contiene dos capítulos dedicados a la presentación del programa de ayuda para la aplicación del procedimiento general y a algunos conceptos teóricos que pueden ayudar a la comprensión de esta ROM 0.0. La figura I.1 contiene un diagrama de la organización de la Parte I de esta ROM.

1.3 Justificación y Contenidos

Un procedimiento es una secuencia de actos que se deben realizar para la consecución de un fin; en este caso, el fin es garantizar la seguridad, el servicio y la explotación del proyecto. En esta ROM 0.0, la palabra cálculo se utiliza en su sentido más amplio e incluye la verificación de la obra frente a los modos de fallo y parada operativa y la estimación de la probabilidad conjunta de fallo del tramo de obra durante cada una de las fases de proyecto. El procedimiento incluye, por tanto, la aplicación de diversos métodos que, utilizados secuencialmente, pero sin solución de continuidad, permiten determinar si una alternativa de proyecto satisface los requisitos de seguridad, servicio y explotación, con la fiabilidad, funcionalidad y operatividad recomendadas durante todas sus fases de proyecto.

Esta secuencia de actividades se ordena de la siguiente forma,

- Criterios generales de proyecto
- Condicionantes de proyecto
- Procedimiento de verificación

Métodos de Nivel I, II y III Probabilidad conjunta y operatividad

A continuación se ofrece una explicación de los objetivos de cada una de estas actividades, que constituye una breve presentación de los contenidos de los capítulos de estas Recomendaciones.

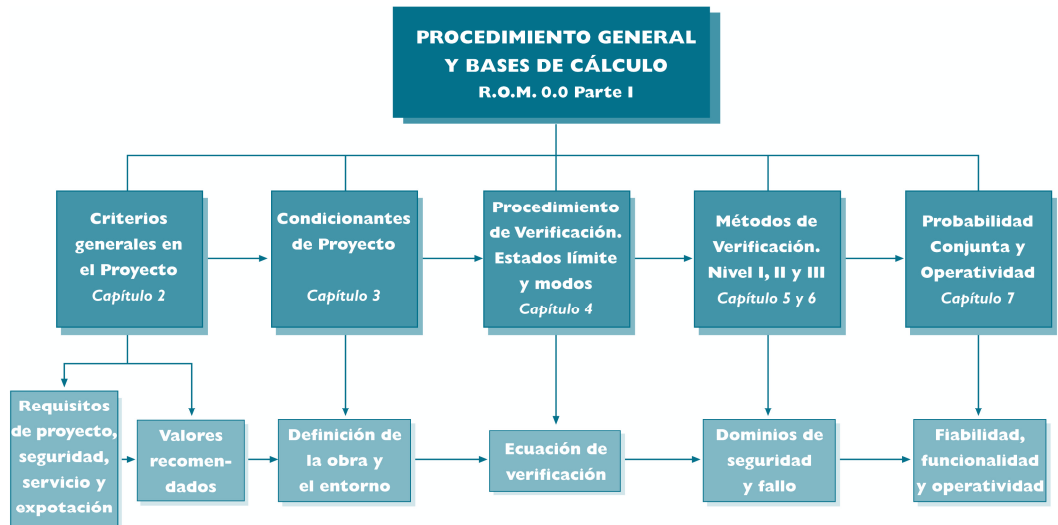


Figura 1.1:
Organización y
capítulos de la
ROM 0.0

Capítulo 2: Criterios generales de proyecto.

El objetivo principal del Proyecto es definir el tramo de obra y verificar que satisface unas determinadas funciones con la fiabilidad, la funcionalidad y la operatividad requeridas. Para ello se establece un procedimiento general de cálculo. Éste se inicia definiendo la obra o tramo en el tiempo y en el espacio desde el punto de vista de la seguridad, el servicio y el uso y la explotación. Para conseguir este objetivo se definen en el capítulo 2, entre otros, los siguientes conceptos: carácter, provisionalidad, fases de proyecto y su duración, método de verificación de la obra marítima y de sus elementos y las probabilidades frente a un modo y frente al conjunto de modos de fallo y parada. A partir de ellos se recomiendan, entre otros, la vida útil de la obra, la probabilidad conjunta de fallo frente a los modos de fallo principales adscritos a los estados límite últimos y de servicio, la operatividad mínima, el número medio de paradas operativas y la duración máxima.

Capítulo 3: Condicionantes de proyecto.

En este capítulo se define el tramo de la obra y del entorno los mediante factores de proyecto: parámetros, agentes y acciones. Los primeros permiten identificar y cuantificar propiedades del medio físico, del terreno y de la obra, en particular su geometría; los segundos, llamados agentes, sirven para definir quién, cómo y cuándo puede interferir con la obra y el entorno; las terceras, denominadas acciones, definen cómo, cuándo y cuánto interfieren los agentes con la obra y el entorno. A continuación, se ordenan y clasifican los factores de proyecto por su origen y función y por el tiempo de actuación, lo que permite establecer su simultaneidad. Por último, se proporcionan criterios para especificar los valores de dichos factores considerando su descripción determinista o aleatoria, y se ordenan estadísticamente por clases de valores que ayudan a definir su compatibilidad y los tipos de combinación de términos en la ecuación de verificación.

Capítulo 4: Procedimiento de verificación.

El proceso de verificación de la obra es complejo por lo que es necesario establecer un método de trabajo y de organización del mismo. En este capítulo se presenta y se desarrolla este proceso.

En primer lugar se definen los objetivos del cálculo y se desarrolla el método de trabajo denominado de los estados límite y los correspondientes modos de fallo y parada que describen la forma, causa, mecanismo, etc en la que se produce el fallo o la parada del tramo de obra. Se describen los estados relacionados con la seguridad y el servicio, mediante los estados límite últimos y de servicio y los relacionados con la operatividad a través de los estados límite de parada operativa. A continuación, se analiza la forma de la ecuación de verificación de cada uno de los modos y sus términos; después, se presentan los criterios para ordenar los factores de proyecto y los términos de la ecuación y, a partir de la ordenación, se especifican la simultaneidad de actuación y la compatibilidad de sus valores, teniendo en cuenta las condiciones de trabajo.

Por último, tras analizar los diferentes intervalos de tiempo en el cálculo de la probabilidad de presentación de uno y todos los modos, se proponen los métodos de verificación y cálculo en el Programa ROM.

Capítulo 5: Métodos de Nivel I.

En este capítulo se describe la aplicación de los métodos denominados de Nivel I, recomendados para verificar y evaluar la fiabilidad de la obra marítima frente a los modos de fallo y a los de parada operativa cuando el carácter general de la obra sea bajo o medio, tabla 4.5. Se consideran, el método del coeficiente de seguridad global y el método de los coeficientes parciales. Éstos se elaboran a la luz del procedimiento explicado en el capítulo 4, y, en particular, en lo relacionado con la ordenación de factores y términos, con su simultaneidad y su compatibilidad. Además, se especifica una secuencia lógica para determinar los coeficientes de ponderación y de compatibilidad que afectan a los términos de la ecuación de verificación escrita en el formato de margen de seguridad. De la aplicación de estos métodos no se obtiene la probabilidad de fallo de la obra frente al modo; a tal efecto, se debe proceder de forma aproximada.

Capítulo 6: Métodos de Nivel II y III.

En este capítulo se desarrollan los métodos de cálculo llamados de Nivel II y Nivel III para la verificación de los modos de fallo y de parada operativa adscritos a unos estados límite, y sometidos a unas condiciones de trabajo que pueden ocurrir durante un intervalo de tiempo. El resultado de la aplicación de uno de estos métodos es un número y la probabilidad asociada a ese número es una medida del nivel de seguridad, de servicio o de explotación que el tramo de obra tiene frente al modo, de fallo o parada, en el intervalo de tiempo.

El capítulo se inicia con el desarrollo del Nivel II, que se puede aplicar con varios órdenes de aproximación, siendo el más popular el que se deriva linealizando la ecuación de verificación en el entorno del punto de fallo, por lo que se conoce como aproximación de primer orden o lineal. A continuación, se presentan los métodos de Nivel III que incluyen los llamados de simulación; de estos últimos se presenta el método apoyado en el algoritmo de Monte Carlo.

Dado que la mayoría de las ecuaciones de verificación de los modos de fallo y de parada operativa se obtuvieron para su aplicación con los métodos de Nivel I, y, en general, con el método del

coeficiente de seguridad global, en este capítulo se proporcionan criterios para pasar de este formato a otro, por ejemplo al de los coeficientes parciales, sin reducción de los estándares de seguridad existentes.

Capítulo 7: Probabilidad conjunta y operatividad

La fiabilidad, funcionalidad y operatividad del tramo de obra evolucionan a lo largo del tiempo. En el capítulo 2 se recomiendan los valores máximos de la probabilidad conjunta de fallo del tramo frente a los modos adscritos a los estados límite últimos y de servicio y la operatividad mínima en la fase de proyecto servicio. En este capítulo se analiza la evolución temporal de la seguridad, del servicio y de la operatividad del tramo, y se proponen diferentes técnicas para determinar la probabilidad de ocurrencia en la vida útil a partir de la probabilidad de ocurrencia en un intervalo de tiempo unidad. Después, mediante los diagramas de modos, se extiende el cálculo a los modos principales de fallo y de parada que pueden ocurrir en la fase de proyecto. También se proporciona una secuencia simplificada para estudiar la probabilidad conjunta de fallo de obras cuyo carácter sea medio o bajo teniendo en cuenta algunos modos de fallo principales.

Se recomienda realizar estudios de optimización económica y de coste beneficio del tramo de obra. A partir de éstos se pueden obtener probabilidades de fallo diferentes a las recomendadas en las tablas 2.2, 2.3 y 2.4. Así mismo, se aconseja la redacción y la aplicación de un plan de inspección, auscultación e instrumentación, y el análisis a partir de la información recogida de la fiabilidad, funcionalidad y operatividad remanente del tramo hasta el final de su vida útil. Por último se especifican criterios para el desarrollo de estrategias de conservación y, en su caso, de reparación.

1.4

Summary

1.4.1

Aim and Scope of Application

The objective of ROM 0.0 is to provide a set of technical norms and criteria applicable to the design, construction, management, maintenance, repair and dismantling of all maritime and port works, whichever may be their class or purpose and materials, techniques and elements employed for their construction, management, maintenance and dismantling. In the same manner, the scope of application of this ROM 0.0 extends to all aspects related to port activity, management and maintenance of the littoral, management of marine resources, navigation, and interaction with natural environment.

Figure I.1 summarises the organisation of this ROM. The following section defines the procedure for verification and calculation of maritime and port works from which all contents and organisation of these Recommendations are justified. The section ends with a brief description of each chapter.

1.4.2

Justification and Contents

The term "procedure" is understood as the sequence of activities that need to be undergone to reach a specific aim. In this case, the aim is the verification of calculation of maritime and port works. In the context of this ROM 0.0, the word calculation is used in its widest sense and inclu-

des the verification of the work against failure and technical breakdown modes,as well as the estimation of the overall probability of failure of the work section, during each one of the different stages of the project.Therefore, the procedure includes the application of a variety of methods which are applied sequentially and help to define whether an alternative project option can satisfy the safety, serviceability and use and exploitation requirements with the reliability, functionality and operativity recommended during all stages of the project.

The general procedure formulated in this Recommendation is laid out as a sequence of chapters to follow in the project of maritime and port works and are organised in the following manner:

- Project general criteria
- Design requirements
- Verification procedure
- Methods of level I, II and III
- Overall probability and operativity

Thereafter, a brief explanation on the objectives of each of these activities is given as a presentation and justification of the contents of the different chapters of this ROM 0.0.

1.4.3

Chapter's contents

Chapter 2: Project general criteria

All maritime work is constructed to comply, during on interval of time, with specific functions, according to certain requirements of reliability, functionability and operativity. These functions allow or ease economic activities and thus redound socially and interfere with the environment. The main purpose of the project of a work is the verification of these objectives and requirements. The general procedure of calculation must begin by identifying the work or set of work in terms of safety, serviceability and management, in time and space .

Therefore, one of the various purposes which chapter 2 pretends to fulfil is to define the following concepts: the intrinsic nature, the provisionality, the stages and duration of the project, the limit states and working conditions of the maritime structure and its elements and the probabilities against one mode and all the failure and breakdown modes. These definitions give rise to various recommendations,some of which are the useful life of the work,the overall probability of failure against modes failure linked to ultimate and serviceability limit states, the minimum operativity, the average number of admissible technical breakdowns and their maximum duration.

Chapter 3: Design requeriments

This chapter is dedicated to define the work and the environment through the following project factors: parameters, agents and actions.The parameters allow identifying and quantifying the properties of the physical environment, the field and the work, in particular its geometry.The second factors called agents serve to define who, how and when can interfere with the work and the environment.The last factors, the actions, determine how, when and to which extent the agents interfere with the work and the environment.Thereafter, the project factors are organised and classified according to their origin and function which may help to establish their simultaneity. Finally, the criteria are set to specify the values of these factors, taking into consideration their deterministic and random description, which are then organised statistically by class of values, to help define the compatibility and type of combination of terms in the verification equation.

Chapter 4: Verification procedure

The general procedure of calculation should help in the verification of a section of maritime work, and each one of its structural elements, at all the stages of the project and under all working conditions. Given the complexity of the verification, it is necessary to establish a methodology and organisation of the process of verification. This chapter will present and show the development of this methodology.

Firstly, the objectives of the calculation are set followed by the development of the so-called limit states method and the corresponding failure and breakdown modes that describe the form, the cause, the mechanism, etc. in which the failure or the breakdown of the work section occurs. A description of the states related to safety, through the ultimate and serviceability states, as well as the states related to use and exploitation, through the states of technical breakdown, will then be given. Further on, the form of the verification equation of each mode will be analysed, including the analysis of their terms. After this, the criteria to organise the project factors and terms of the equation will be presented; next the simultaneity of action and the compatibility of their values will be specified.

Finally, after carrying out the analysis of the different intervals of time in the calculation of the probability of presentation of every mode, the verification and calculation methods to be applied in the ROM Programme are offered.

Chapter 5: Methods of Level I

This chapter contains the detailed application of the methods called of Level I, which have been recommended to check and evaluate the reliability of the maritime work against failure and technical breakdown modes when the general intrinsic nature of the work is low or medium. We take into consideration the overall safety coefficient method and the method of partial coefficients. These methods are developed according to the general procedure elaborated in chapter 4, and, in particular, to the section related to the organisation of factors and terms, their simultaneity and compatibility. Moreover, a logical sequence to determine the weighting and compatibility coefficients that affect the terms of the verification equation expressed in the safety margin format is given. These methods do not provide the failure probability of the work against the mode. That is the reason why, to that effect, it is necessary to proceed in an approximate way.

Chapter 6: Methods of Level II and III

Chapter 6 focuses on the development of calculation methods called of Level II and Level III to verify the failure and technical breakdown modes linked to limit states and under working conditions that can occur during a time interval. The result of the application of one of those methods to a verification equation is a number, and the probability associated to that number, is a measurement of safety, serviceability or exploitation level of the work against the failure or technical breakdown mode during the time interval.

The chapter begins with an introduction on probability evaluation methods. It then goes on with the development of Level II. This method can be applied with several levels of approximation. The most common one is derived by linearising the verification equation around the failure point. This method is known as first class or linear approximation FORM. Further on, Level III methods are described including the so-called simulation methods. One of these is the method based on the algorithm of Monte Carlo.

Given that most of the failure and technical breakdown modes verification equations are obtained to be applied with Level I methods, generally the overall safety coefficient method, criteria are provided to transfer from this format to another, and in particular to that of partial coefficients with no reduction of existing safety standards.

Chapter 7: Overall probability and operativity

The reliability, functionability and operativity of a set of work evolve through out time. In chapter 2, maximum values of the overall probability of failure of the set against the modes linked to the ultimate limit states and serviceability, as well as the minimum operativity during the useful life are recommended. This chapter offers an analysis of the temporal evolution of safety, serviceability and exploitation of the section and proposes different techniques to evaluate the occurrence probability within a unit interval of time. Thereafter, using the modes diagrams, the calculation is extended to all the failure and breakdown modes that can occur in the useful life. Criteria to study the overall failure of work probability which intrinsic nature is medium or low are given taking into account some of the main failure modes.

Economic optimisation and cost-benefit studies of the set of work is recommended although those studies may provide different failure probabilities to those recommended in Tables 2.3, 2.4 and 2.5. On the other hand, the elaboration and execution of an inspection and monitoring plan is recommended data should be used to analyse the remaining reliability, functionability and operativity of the set until the end of the work's useful life. Criteria for the development of maintenance and, if necessary, repair strategies are also provided.

CAPITULO 2

Criterios generales en el proyecto



2

CRITERIOS GENERALES
EN EL PROYECTO

2.1

Introducción

Toda obra marítima se construye para cumplir unas determinadas funciones, permitiendo o facilitando unas actividades económicas, repercutiendo socialmente e interfiriendo con el medio ambiente. Esta obra debe ser fiable, funcional y operativa durante el tiempo en que vaya a permanecer en servicio. A lo largo de su vida, la obra pasa por diferentes estados de proyecto¹, estructurales, formales y de uso y explotación dependiendo de la variabilidad temporal y espacial de los factores de proyecto.

Por diversas razones o causas, la obra puede perder, progresivamente o de manera súbita, de forma temporal o definitiva, parcial o totalmente sus propiedades resistentes o estructurales (seguridad), estructurales y formales (servicio) y de uso y explotación (explotación) por mecanismos descritos en modos de fallo y de parada operativa.

El objetivo de esta ROM 0.0 es establecer un procedimiento general y las bases de cálculo para que, definida una alternativa de proyecto, se verifique si es fiable frente a la seguridad, si es funcional frente al servicio y si está operativa frente al uso y la explotación. Este procedimiento y los criterios para la declaración dependen de los criterios generales de proyecto, que son el objeto de este capítulo.

(1) Alternativa y estado de proyecto se definen en los apartados 2.2.8 y 2.2.10, respectivamente.

2.1.1

Contenidos y organización del capítulo

La figura 2.1 es un esquema de los contenidos, alcance y ordenación de este capítulo. En primer lugar se definen los conceptos necesarios para el desarrollo de las siguientes secciones; a continuación, se formulan el objetivo y los criterios de Proyecto de una obra marítima y portuaria; se especifican el espacio y el tiempo, mediante el tramo de obra y los intervalos de tiempo, respectivamente; se define la temporalidad o eventualidad de la obra o tramo y la duración de las fases de proyecto, entre ellas, la vida útil.

La sección siguiente es una introducción a los condicionantes y las bases de cálculo que son el objeto del capítulo 3. Después, se definen los caracteres general y operativo del tramo y se propone un método para su determinación, en el caso en que el promotor de la obra no lo hiciere. Este método se desarrolla en un Anejo al capítulo. El procedimiento de cálculo es el objeto de la siguiente sección; contiene una breve introducción al método de los estados límite, las condiciones de trabajo y los tipos de combinación, cuyos contenidos se amplían en el capítulo 4; la sección finaliza con una presentación de los métodos de verificación que se aplican en estas Recomendaciones y se elaboran en los capítulos 5 y 6.

A continuación, se abordan los aspectos relacionados con los binomios, seguridad-fiabilidad, servicio-funcionalidad y uso y explotación-operatividad, presentando los métodos para calcular:

(1) la probabilidad de ocurrencia de un modo en un intervalo de tiempo unidad, (2) la probabilidad de ocurrencia de un modo en una fase de proyecto y (3) la probabilidad conjunta de fallo de un tramo frente a la seguridad, el servicio y el uso y la explotación del tramo durante una fase de proyecto. El capítulo concluye con los valores recomendados de la vida útil, la probabilidad conjunta de fallo y la operatividad en función de los caracteres general y operativo del tramo de obra.

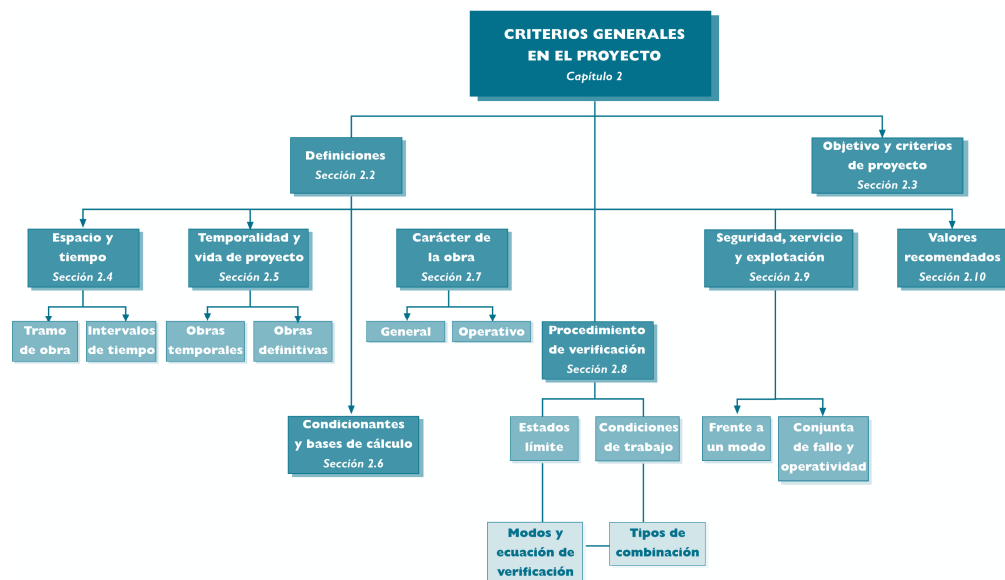


Figura 2.1:
Organización y
contenidos del
capítulo 2.

2.2 Definiciones

Para establecer adecuadamente los criterios generales de proyecto, es necesario definir previamente los conceptos siguientes

2.2.1 Proyecto

En el ámbito de aplicación de los documentos ROM, se denomina Proyecto al conjunto de actividades que comprenden el estudio y redacción de proyecto, la construcción, la explotación, la conservación, reparación en su caso, y desmantelamiento de una obra marítima.

2.2.2 Parámetros

Conjunto de variables que caracterizan, en un determinado emplazamiento y en un determinado intervalo de tiempo, la geometría de la construcción y del terreno, las propiedades del medio físico, del terreno y de los materiales de construcción.

2.2.3 Agente

Es todo aquello que puede ejercer o producir en o sobre la obra y su entorno, efectos significativos para su seguridad y su servicio². Aquellos agentes cuyo efecto sea predominante se denominan agentes predominantes.

(2) A diferencia de «paciente», el agente es el que realiza la acción en vez de sufrirla. Los agentes ponen en acción (en actividad) la obra, los elementos de la obra y el entorno.

2.2.4 Acción

Es cualquier efecto que un agente puede producir en la obra y su entorno como resultado de su mutua interferencia. En el término acción, por tanto, se pueden incluir, la fuerza, la carga aplicada sobre la estructura, los movimientos impuestos, las deformaciones impuestas, etc. La relación entre agentes y acciones se establece por una función en la que pueden intervenir también parámetros de proyecto.

2.2.5 Factores de Proyecto

Conjunto de parámetros, agentes y acciones. La magnitud (y dirección, en su caso) de los factores de proyecto y en consecuencia, la operatividad y la respuesta estructural, en su conjunto, evolucionan o pueden evolucionar en el tiempo.

2.2.5.1 Factor predominante

(3) Los modos de fallo y parada se definen en los apartados 2.2.13 y 2.2.14.

Es aquel cuya presentación desencadena la ocurrencia de un modo de fallo o parada³.

Comentario

Con carácter general, son parámetros los factores de proyecto que están predeterminados en el proceso de verificación. Pueden ser tratados como variables estadísticas, pero su función de distribución y sus valores representativos, una vez especificados, se consideran conocidos y determinados. Por el contrario, los agentes y las acciones son aquéllas que intervienen de manera directa en la definición de la obra, en su tipología y sus dimensiones.

Por ejemplo, en el caso de un dique de abrigo en talud construido con escollera, las propiedades resistentes del terreno pueden considerarse como parámetros de proyecto y ser definidas a priori. La altura y el periodo de la ola definen y caracterizan el agente oleaje y sus valores dependen, entre otros, del criterio de avería y de la probabilidad de fallo.

La acción, fuerza horizontal sobre un dique vertical rebasable, está producida por la interferencia del oleaje y la obra, en presencia de la gravedad. La altura y el periodo de la ola y la profundidad del agua definen y caracterizan los agentes del medio físico; las densidades del agua, del hormigón y del relleno y la aceleración de la gravedad pueden considerarse parámetros.

En el estudio de la difusión de la pluma de un eyector de un emisario submarino solicitado por los agentes oleaje, corrientes y gravedad, el factor de proyecto, densidad del agua, define y caracteriza el agente, al igual que la altura de la ola y la velocidad de la corriente.

2.2.6 Tramo de obra

Es el conjunto de partes de la obra que cumplen solidariamente una función específica y relevante de los objetivos y los requisitos de explotación de la obra, están sometidos a los mismos niveles de acción de los agentes actuantes y forman parte de la misma tipología formal y estructural.

2.2.7 Condicionantes de Proyecto

El proyecto de un tramo trata de responder a los condicionantes de proyecto, entre los que se incluyen,

- La ubicación espacial (emplazamiento) y temporal (fases de proyecto)

- Los requisitos de explotación
- La geometría del tramo y del terreno
- Las propiedades (parámetros) del medio físico y de los materiales
- Los agentes que pueden interferir con la obra y el entorno, y sus acciones

2.2.8 Alternativa de Proyecto

Conocidos los condicionantes de Proyecto las alternativas del tramo definen,

- La geometría del tramo y del terreno
- Los factores de proyecto: parámetros, agentes que pueden interferir con la obra y su entorno, y sus acciones

2.2.9 Intervalo de tiempo

Marco temporal en el que se describen, clasifican, seleccionan y determinan los parámetros de proyecto, los agentes y las acciones, y se verifica su seguridad, el servicio y explotación.

2.2.9.1 Unidad de intervalo de tiempo

Marco temporal en el que se dispone de información estadística para describir los factores de proyecto mediante modelos de probabilidad.

2.2.10 Estado

Intervalo de tiempo en el que puede admitirse que cualquier manifestación de los factores de proyecto es estacionaria en sentido estadístico.

Comentario

Es conveniente, para ayudar en su identificación, calificar el estado cuando se refiere, sólomente, a un factor o grupo de factores de proyecto; por ejemplo, el estado de mar, que tradicionalmente se utiliza para indicar las manifestaciones del oleaje, el estado de marea, el estado climatológico o del tiempo, etc. Cuando se trata de describir el conjunto de manifestaciones de los factores de proyecto y la repuesta estructural, formal y de explotación del tramo se denomina estado de proyecto.

Las secuencias temporales de las manifestaciones estructurales, formales y operativas que la obra y el entorno pueden tener a lo largo de su existencia, se ordenan en curvas de estados de proyecto. Durante la ocurrencia de cada uno de ellos, se admite que aquellas manifestaciones son estacionarias en sentido estadístico. La duración de un estado de proyecto depende de la variabilidad temporal de los factores de proyecto y de la respuesta de la obra.

Uno de los objetivos de proyecto es que el tramo de obra, frente a todos los estados de proyecto, sea fiable, funcional y operativo en el marco especificado por los requisitos de proyecto. El desconocimiento, a priori, de la secuencia real de estados de proyecto, obliga a que la verificación se realice para los estados peores posibles, o estados límite.

2.2.10.1 Estado de Proyecto

Conjunto de manifestaciones de los factores de proyecto y de la repuesta estructural, formal y de explotación del tramo, admitiendo que son estadísticamente estacionarias.

2.2.11 Fase de Proyecto

Secuencia temporal de estados de proyecto durante los cuales el tramo de obra mantiene una misma actividad principal, aunque pueda tener otras secundarias. Se podrán considerar las siguientes fases de proyecto: estudios y proyecto de construcción, construcción, servicio, conservación, reparación y desmantelamiento. La duración de la fase de servicio es la vida útil del tramo.

2.2.12 Estado límite

Estado de proyecto en el cual, la obra en su conjunto, o en alguno de sus tramos o elementos, queda fuera de uso o servicio por incumplimiento de los requisitos de seguridad, de servicio y de explotación especificados en el proyecto. Los estados límite se clasifican en últimos ELU, de servicio ELS, y operativos ELO.

Comentario

En general, las obras marítimas se construyen para defender unos bienes y servicios de las dinámicas marítima y atmosférica y poder realizar a su amparo diversas actividades. Por razones principalmente económicas, no es posible construir obras marítimas capaces de dar protección frente a todos los estados de estas dinámicas. Aunque la obra debe ser segura durante su vida útil, es de esperar que durante ésta, se produzcan paradas operativas por superar unos ciertos umbrales los agentes climáticos, marítimos o atmosféricos. Por esto, es conveniente definir los estados límite operativos que, a diferencia de los de servicio, permiten evaluar la pérdida temporal de la operatividad de las instalaciones portuarias por causa de las diferentes manifestaciones de los agentes del medio físico, sin fallo estructural de las mismas.

2.2.13 Modo de fallo

Forma o mecanismo, geométrico, físico, mecánico, químico o biológico, por el cual la obra o alguno de sus elementos, queda fuera de servicio por causas estructurales. Para su comprobación, los modos de fallo se adscriben a los estados límite último o de servicio. Una vez ocurrido un modo de fallo, los requisitos estructurales, formales y de explotación del tramo de obra sólo se recuperan mediante su reparación o reconstrucción.

2.2.14 Modo de parada operativa

Causa, razón o motivo, geométrico, físico, mecánico, químico o biológico, por el cual, la obra, o alguno de sus elementos estructurales, deben dejar de operar o deben reducir su nivel funcional. Una vez que cesa la causa de la parada, la obra y sus instalaciones vuelven a estar en explotación con los requisitos especificados en el proyecto.

Comentario

A la hora de iniciar el proyecto de una obra marítima es necesario tener en cuenta que no es posible garantizar la "operatividad total", es decir, que el tramo de obra esté en condiciones de estar en explotación todos los días del año. Al igual que otras obras civiles construidas en el medio físico, tales como aeropuertos, carreteras, etc, las obras marítimas pueden sufrir paradas operativas sin que ello signifique que haya fallos estructurales.

2.2.15 Modo principal

Las dimensiones geométricas de la obra suelen determinarse en función de estos modos y, en general, son los que contribuyen de forma significativa al valor de la probabilidad conjunta de fallo del tramo de obra en la vida útil.

Comentario

El muelle de Levante del Puerto de Almería está construido con bloques de hormigón en masa y se destina al atraque de barcos de pasajeros. Uno de los objetivos del proyecto es verificar que para el tramo de obra en su conjunto, y cada uno de sus elementos no se produce ninguno de los modos de fallo o de parada posibles. Para los estados límite últimos, los modos principales son: deslizamiento entre hiladas y banqueta, vuelco, pérdida de estabilidad global, hundimiento del terreno y licuefacción. La ocurrencia de algunos de ellos tiene repercusiones económicas, sociales y ambientales que, como se verá más adelante, permiten otorgar al muelle un carácter general comprendido en el intervalo, $6 < IRE \leq 20$; $5 \leq ISA < 20$. Por otra parte, algún elemento del muelle puede fallar, por ejemplo los bolardos y las defensas, pero su ocurrencia no tiene consecuencias significativas en la fiabilidad, funcionalidad y operatividad del tramo de obra. Estos modos no son principales y su probabilidad de ocurrencia en la vida útil debe estar acotada, pero no debe contribuir en el cálculo de la probabilidad conjunta del tramo, (véase capítulo 7).

2.2.16 Condiciones de trabajo

Una condición de trabajo, CT, es un conjunto de estados de proyecto caracterizados por la ocurrencia simultánea y compatible de algunos factores de proyecto. Se considerarán las siguientes condiciones de trabajo: CT₁, operativas normales, CT₂, extremas y CT₃ excepcionales.

2.2.17 Tipos de combinación

Son las formas compatibles de presentación de factores de proyecto. Ayudan a determinar los valores compatibles de los factores de proyecto y términos que pueden ocurrir simultáneamente en una unidad de intervalo de tiempo, y, por tanto, están en la ecuación de verificación. Estos factores de proyecto se dice que son concomitantes.

2.2.18 Seguridad

Un tramo de obra se considera seguro cuando cumple los requisitos de seguridad especificados en el proyecto y exigidos por la normativa vigente durante la ocurrencia de todos los estados que pueden presentarse en las fases de proyecto.

2.2.19 Servicio

Un tramo de obra está en servicio cuando cumple los requisitos funcionales (resistentes y formales) especificados en el proyecto y exigidos por la normativa vigente durante la ocurrencia de todos los estados que pueden presentarse en las fases de proyecto

2.2.20 Uso y explotación

Una obra o tramo y sus instalaciones están en explotación cuando cumplen los requisitos de uso especificados en el proyecto y los exigidos por la normativa vigente.

2.2.21 Probabilidad de fallo

La probabilidad de que un tramo de obra incumpla los requisitos de seguridad en un intervalo de tiempo mediante la ocurrencia de un modo de fallo, se denomina genéricamente probabilidad de fallo.

| | | |
|--|---|--|
| 2.2.22 | Probabilidad conjunta de fallo | |
| | Es la probabilidad de fallo en la vida útil del tramo frente a todos los modos de fallo principales adscritos a todos los estados límite últimos o de servicio. | |
| Comentario | En la sección 2.10 se recomiendan valores máximos admisibles de la probabilidad conjunta de fallo en la vida útil del tramo de obra frente a todos los estados límite, últimos y de servicio. | |
| 2.2.23 | Fiabilidad | |
| (4) El valor complementario de la probabilidad p, es (1-p). | Es el valor complementario ⁴ de la probabilidad conjunta de fallo frente a todos los modos principales, adscritos a todos los estados límite últimos. | |
| 2.2.24 | Funcionalidad | |
| | Es el valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo frente a todos los modos principales, adscritos a todos los estados límite de servicio. | |
| 2.2.25 | Probabilidad de parada | |
| | La probabilidad de que un tramo de obra incumpla los requisitos de explotación en un intervalo de tiempo mediante la ocurrencia de un modo de parada, se denomina probabilidad de parada operativa. | |
| 2.2.26 | Probabilidad conjunta de parada | |
| | Es la probabilidad de fallo en la vida útil del tramo, frente a todos los modos de parada principales adscritos a todos los estados límite de parada operativa. | |
| 2.2.27 | Operatividad | |
| (5) Los términos fiabilidad, funcionalidad operativa y los de seguridad, servicio y uso y explotación, suelen ir acompañados de la palabra nivel; por ejemplo nivel de seguridad | Es el valor complementario de la probabilidad de parada en la fase de proyecto frente a todos los modos de parada principales adscritos a todos los estados límite de parada ⁵ . | |

2.3 Objetivo, Requisitos y Criterios de Proyecto

El objetivo de proyecto es conseguir una obra, que en su conjunto, tramos y elementos, satisfaga los requisitos de seguridad, servicio y uso y explotación en cada una de las fases de proyecto,

- estudiando alternativas y determinando para ellas los factores de proyecto que, (1) definen la geometría de la obra y del terreno, (2) caracterizan el medio físico y los materiales y (3) valoran los agentes y sus acciones
- verificando que se alcanzan los niveles de fiabilidad, funcionalidad y operatividad recomendados en la sección 2.10.

2.3.1 Criterios de Proyecto

Se emplean para definir y verificar un Proyecto y sus alternativas; se consideran, al menos, los siguientes criterios,

- Espacio y tiempo
- Temporalidad y vida
- Condicionantes y bases de cálculo
- Carácter general y carácter operativo
- Procedimiento de cálculo
- Fiabilidad, funcionalidad y operatividad
- Valores recomendados

Las siguientes secciones se dedican al desarrollo de los criterios de Proyecto.

2.4 Espacio y Tiempo

En general, la obra se ubica en un emplazamiento para cumplir unas funciones durante un cierto intervalo de tiempo. Dependiendo de sus dimensiones y del entorno, la tipología de la obra puede cambiar sustancialmente en el espacio. Es conveniente, por tanto, definir unidades espaciales o tramos de obra en función de su tipología y del entorno.

Por otra parte, desde que se inicia la ejecución de la obra hasta su cambio de uso o desmantelamiento, ésta y cada uno de sus tramos, pasa por una secuencia continua de condiciones que se denominan estados de proyecto, que caracterizan su operatividad y sus propiedades estructurales y formales, es decir, su actividad. Los estados se agrupan en intervalos de tiempo de mayor duración cuya secuencia se ordena en fases de proyecto.

2.4.1 Tramo de obra

Para describir, clasificar, seleccionar y evaluar los factores de proyecto, así como para establecer el marco espacial en la verificación de la seguridad, del servicio y de la explotación, la obra se dividirá en tramos.

2.4.2 Intervalos de tiempo

Marco temporal en el que se describen, clasifican, seleccionan y evalúan los parámetros de proyecto, los agentes y las acciones de un tramo de obra, para la verificación de su seguridad, el servicio y la explotación. Se podrán considerar los siguientes intervalos de tiempo, figura 2.2,

- Intervalo de corta duración
- Intervalo de larga duración
- Fase de proyecto

Los dos primeros intervalos se pueden definir en función de la variabilidad de los factores de proyecto y de su duración. Las fases de proyecto se definen en función de la actividad principal de la obra. Los intervalos de mayor duración se pueden describir por secuencias de intervalos de menor duración; en este caso, el intervalo de duración menor se denomina unidad de intervalo de tiempo.

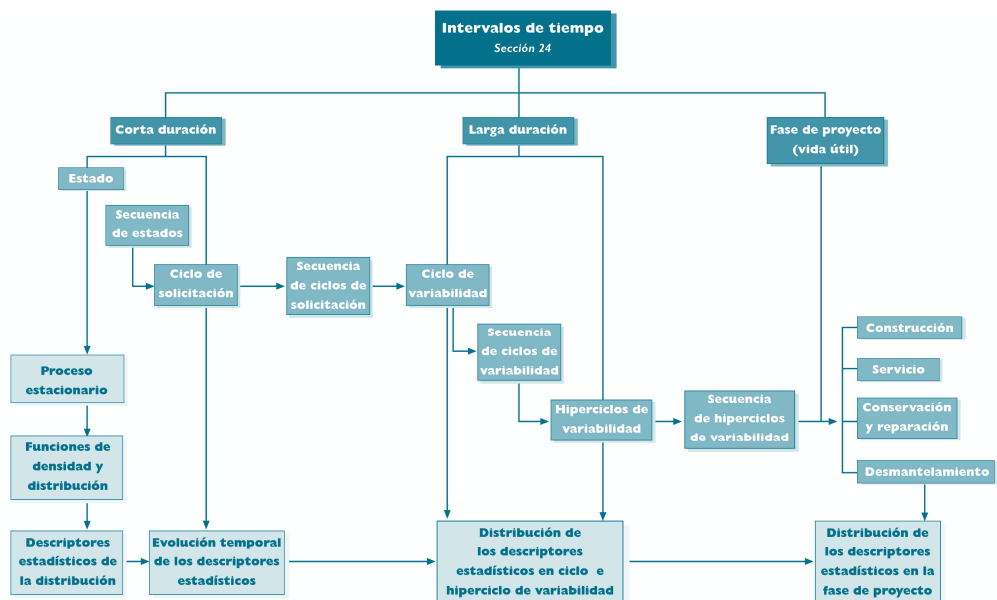


Figura 2.2:
Intervalos de tiempo

2.4.2.1 Intervalos de corta duración

Entre otros, se incluyen los estados y los ciclos de solicitud.

Comentario

En general, el valor de los factores de proyecto y el comportamiento de la obra o el entorno, varía a lo largo del tiempo de forma difícilmente predecible. La variabilidad temporal se puede acotar en intervalos de tiempo durante los que los procesos que provocan dicha variabilidad se pueden suponer estacionarios en sentido estadístico. En esas condiciones, se puede describir el comportamiento del valor del factor de proyecto mediante modelos de probabilidad en los que los parámetros del modelo son constantes. En cada intervalo de tiempo se define la manifestación básica o fundamental del factor de proyecto, la cual, en general, es una variable aleatoria.

2.4.2.1.1 Estado

Intervalo de tiempo en el que se puede admitir que la manifestación de los factores y de la respuesta estructural o funcional en un determinado tramo de obra o emplazamiento, es estacionaria en sentido estadístico. La duración de un estado de proyecto depende de la variabilidad temporal de los factores de proyecto, incluyendo la respuesta de la obra. Cuando el estado se refiere a una respuesta de la obra se denomina estado de Proyecto.

La manifestación se describe por variables cuyo valor cambia con el tiempo. Esta variabilidad se puede describir estadísticamente por funciones de probabilidad y sus correspondientes descriptores estadísticos.

Comentario

Durante el estado se produce una secuencia de manifestaciones fundamentales o básicas de algunos factores de proyecto. Por ejemplo, en un estado de mar se presenta una secuencia de alturas de ola, definidas éstas por la máxima distancia vertical entre dos pasos ascendentes consecutivos por el nivel medio. En este caso, la manifestación fundamental del oleaje es la altura de ola. Dada la variabilidad de la secuencia de las olas, la manifestación del oleaje en un estado de mar, bajo ciertas condiciones, se puede definir por una variable aleatoria, p. ej. la media del tercio de olas mas altas, denominada altura de ola significativa y que es la variable de estado o descriptor estadístico.

2.4.2.1.2 Ciclo de solicitud

Es una secuencia de estados que comienza desde el instante en el que el valor del descriptor estadístico que representa el estado supera un cierto valor umbral hasta que, transcurrido cierto tiempo, es inferior a él.

Comentario

(6) Debería decirse significativa; no obstante, en España se utiliza significativa.

Un ejemplo de ciclo de solicitud es una secuencia de estados de mar que tienen altura de ola significativa⁶ superior a un cierto valor umbral, p. ej. $H_s = 3m$. Por regla general, este ciclo se conoce con el nombre de temporal. Si los estados de mar del ciclo de variabilidad son inferiores al valor umbral se habla de calma.

2.4.2.2 Intervalos de larga duración

Se incluyen entre otros los ciclos e hiperciclos de variabilidad y los hiperciclos.

2.4.2.2.1 Ciclo de variabilidad

Es una secuencia de ciclos de solicitud. En general, el ciclo de variabilidad será el año meteorológico.

Comentario

El año meteorológico, que comienza el 1 de octubre y finaliza el 30 de septiembre del año siguiente, se puede considerar como el pulso meteorológico del planeta. Por otra parte, el año, que comienza el 1 de enero y finaliza el 31 de diciembre del mismo año, es el pulso económico de la sociedad occidental. La vida de servicio de una obra se suele definir en años.

Bajo una perspectiva ambiental, social y económica, los ciclos de solicitud se pueden agrupar en ciclos de variabilidad cuya duración, por lo general, será el año. No obstante, esta generalidad no debe entenderse como unicidad puesto que, en emplazamientos donde las manifestaciones climáticas estén vinculadas a los monzones, o donde el ciclo económico sea estrictamente estacional, los ciclos de variabilidad pueden tener otras duraciones distintas, por ejemplo cuatro meses, dos meses, etc.

2.4.2.2.2 Hiperciclo de variabilidad

Es la secuencia de ciclos de variabilidad. Su duración depende del emplazamiento.

Comentario

Es conocido que en las zonas templadas del planeta se producen secuencias de años húmedos y secos, cuya causa no está aún bien establecida. No se dispone de suficiente información para determinar estos hiperciclos, pero con el paso de los años y la constancia en los procesos de medida, se podrán analizar los hiperciclos de la dinámica marina y atmosférica. Con los datos disponibles en la península ibérica, los hiperciclos suelen tener duraciones en el rango entre siete a once años.

2.4.2.3 Otros intervalos de tiempo

Los intervalos de corta y larga duración se definen en función de la variabilidad de los agentes del medio físico. Otros factores de proyecto presentan distintas variabilidades temporales en un determinado lugar. Con la debida justificación se podrán definir otros intervalos de tiempo.

Comentario

Para tener en cuenta localmente la evolución temporal del comportamiento del suelo, se suelen considerar dos estados extremos: corto plazo, cuando el agua no ha podido moverse (sin drenaje) y largo plazo, cuando el agua intersticial ha alcanzado el régimen permanente. La duración de estos dos estados depende del tipo de suelo y del estado de carga.

2.4.2.4 Fase de Proyecto

Es la secuencia temporal de estados de Proyecto durante los cuales la obra o un tramo de obra mantiene una misma actividad principal, aunque pueda tener otras secundarias. Se podrán considerar las siguientes fases de proyecto: estudios y proyecto de construcción, construcción, servicio, conservación, reparación y desmantelamiento.

Comentario

El ciclo de solicitud se describe a partir de los estados que a esos efectos son intervalos de tiempo unidad. De forma análoga, la fase de proyecto se puede describir por años; en este caso el año es el intervalo de tiempo unidad. Los intervalos de tiempo unidad se aplican en la descripción estadística de los factores de proyecto.

2.4.2.4.1 Estudios y proyecto de construcción

Se extiende desde el inicio de los trabajos de planificación hasta la redacción del proyecto constructivo, conteniendo las campañas de campo, ensayos de laboratorio, estudios de impacto ambiental, etc.

2.4.2.4.2 Fase de construcción

Se extiende desde el inicio de la construcción hasta la puesta en servicio de la obra, entendiendo por tal, el instante en el cual la obra está en condiciones de cumplir plenamente la función principal para la que ha sido concebida. Dependiendo de las actuaciones a realizar en la obra, o en alguno de sus elementos, se podrán distinguir subfases de construcción, que son por lo general: fabricación, transporte, instalación, avances y esperas, y otras.

2.4.2.4.3 Fase de servicio

Está formada por todos los estados de Proyecto que pueden presentarse desde el instante en el que el tramo de obra está en condiciones de cumplir plenamente la función principal para la que ha sido concebida, hasta su inutilización, desmontaje o cambio de uso, incluyendo inspección, seguimiento, conservación y reparaciones ordinarias.

2.4.2.4.4 Fase de conservación y reparación

Incluye los estados de Proyecto por los que puede pasar la obra o alguno de sus elementos durante los trabajos de conservación y de reparación y, que pueden conllevar, una reducción de sus niveles de servicio. Dependiendo de las actuaciones a realizar en la reparación del tramo de obra o en alguno de sus elementos, se podrán distinguir subfases de conservación y reparación, que en general, serán: preparación y desmontaje, fabricación, transporte, instalación, avances y esperas, y otras.

2.4.2.4.5 Fase de desmantelamiento

Incluye los estados de proyecto durante el desmantelamiento de la obra. Dependiendo de las actuaciones a realizar en la obra o en alguno de sus elementos, se podrán distinguir subfases de desmantelamiento, que en general serán: preparación y desmontaje, transporte, depósito, abandono, reciclaje o reutilización, y otras.

2.4.2.4.6 Especificación de otras fases de proyecto

En función de las particularidades de la obra, se podrán considerar otras fases y subfases de proyecto. En tal caso, deberán establecerse, con la debida justificación, los criterios y los métodos empleados para verificar la seguridad, el servicio y para estimar la fiabilidad en las nuevas fases y subfases de proyecto.

2.5 Temporalidad y Vida

Las obras marítimas o sus tramos podrán declararse provisionales o definitivas, de acuerdo con los criterios reflejados en los siguientes apartados.

2.5.1 Obras provisionales

Una obra se declarará provisional o eventual cuando vaya a permanecer en un determinado emplazamiento, sin modificaciones en sus aspectos de seguridad, servicio y explotación durante un cierto periodo de tiempo que, a efectos de estas Recomendaciones, se considerará inferior a cinco años.

2.5.1.1 Vida de las obras provisionales

La duración o vida de las distintas fases de proyecto estará definida por su necesidad o funcionalidad, y se especificará justificadamente en el proyecto.

| | |
|--|--|
| 2.5.1.2 | Transformación de provisional a definitiva |
| (7) La vida útil ampliada se define en el apartado 2.5.2.4 | En el caso en el que una obra provisional vaya a ser convertida en definitiva, el titular de la obra deberá proyectar y verificar la obra teniendo en cuenta la vida útil ampliada ⁷ , de acuerdo con los criterios generales de proyecto. |
| 2.5.2 | Obras Definitivas |
| | Salvo justificación, una obra se declarará definitiva cuando vaya a permanecer en un determinado emplazamiento y con las características del proyecto original durante un periodo de tiempo igual o superior a cinco años. |
| 2.5.2.1 | Duración de las fases de proyecto |
| | La duración o vida de cualquiera de las fases de proyecto de obras marítimas definitivas viene impuesta por razones constructivas, funcionales, económicas y administrativas. No obstante, en algunos casos, no resulta fácil especificar una duración de las fases de proyecto, en particular, para la fase de servicio. Para estos casos en el apartado 2.10.1, se acotan los valores de la duración de la fase de proyecto servicio, (vida útil mínima). |
| 2.5.2.2 | Vida útil de la obra |
| | El periodo de tiempo que transcurre durante la fase de servicio se denomina vida útil de proyecto o vida útil, V , y, en general, corresponde al periodo de tiempo en el que la obra cumple la función principal para la cual ha sido concebida. |
| 2.5.2.3 | Criterios para determinar la vida útil |
| | <p>Corresponde al promotor de la obra marítima, público o privado, la determinación del valor de la vida útil de la fase de proyecto servicio, V_s. No obstante, esta duración deberá cumplir los siguientes criterios,</p> <ul style="list-style-type: none">• En obras marítimas definitivas cuya duración esté determinada por razones de servicio, se tomará ésta como el valor mínimo de la vida útil de proyecto.• En aquellos casos en los que no se conozca la duración (o no haya sido determinada), la vida útil de proyecto, se expresará en años. Sin otra justificación, ésta será como mínimo el valor consignado en la tabla 2.1, en función del carácter general de la obra marítima.• Por razones climáticas, operativas, o de otra índole, se podrá definir la vida útil de la obra en función de otros intervalos de tiempo. En ese caso, se deberán convertir los valores de la tabla 2.1, en unidades del intervalo de tiempo considerado, adecuando con la debida justificación su equivalencia con aquéllos.• Cuando se consideren diferentes momentos de entrada en servicio de partes de una misma obra marítima, y el desfase de entrada en servicio sea menor que un cierto número de años, que a efectos de estas Recomendaciones se considera cinco años, se aplicará la misma vida útil a todas las partes de la construcción.• En aquellos casos en los que se prevé que, transcurridos M años, la ejecución de una segunda etapa pudiera alterar de manera significativa los valores representativos de algunos factores de proyecto, se podrá considerar que la duración de la fase de proyecto servicio es de M años. A efectos de estas Recomendaciones se considera $M > 5$ años. En estos casos, el titular de la obra deberá, |

1. Planificar y proyectar las sucesivas entradas en servicio o etapas previstas.
2. Si no se ejecuta o se postpone la segunda etapa de la obra, adecuar el tramo de la misma para que cumpla los requisitos de proyecto en la vida ampliada de la fase de servicio.
3. Si se ejecuta la etapa, verificar que se cumplen las condiciones de seguridad, servicio y uso y explotación requeridas para las etapas previas de una obra y una vez ejecutada la correspondiente etapa redactar, en caso necesario, el correspondiente proyecto de adecuación de las obras previamente construídas.

2.5.2.4 Vida útil ampliada de la obra

La duración de la fase servicio podrá ser superior a la vida útil de proyecto. En el caso en que así ocurra y la obra vaya a seguir cumpliendo una función, sea la original u otra nueva, se ampliará, al periodo de tiempo adicional durante el cual la obra puede seguir cumpliendo una función, aunque los requisitos de seguridad, servicio y explotación sean diferentes de aquellos con los que fue construida.

En estos casos, el titular de la obra deberá proyectar y verificar la obra teniendo en cuenta la vida útil ampliada, de acuerdo con los criterios generales de proyecto.

2.6 Condicionantes de Proyecto

Una alternativa de un tramo trata de responder a los condicionantes y las bases de cálculo, entre los que se incluyen,

- La ubicación espacial (emplazamiento) y temporal (fases de proyecto)
- Los requisitos de explotación
- La geometría del tramo y del terreno
- Las propiedades (parámetros) del medio físico y de los materiales
- Los agentes que pueden interferir con la obra y el entorno y sus acciones

Por lo general, no se conocen con certeza los parámetros y las variables de proyecto que actuarán en cada tramo de obra durante la vida de las fases de proyecto, ni su magnitud, ni, en su caso, su dirección y sentido. Es necesario, por tanto, proporcionar unos criterios para clasificar y dar valores a los factores de proyecto, acotando su variabilidad espacial y temporal. Los condicionantes de proyecto se describen en el capítulo 3.

2.7 Caracteres General y Operativo

Es habitual que el proyecto de una obra marítima se decida a partir de unos estudios previos de planificación exógenos, en los que se analizan, entre otros, las repercusiones económicas y sociales y ambientales, derivadas de su construcción. En estas Recomendaciones se definen, en función de aquellas repercusiones, el carácter general y el carácter operativo de un tramo de obra marítima, figura 2.3.

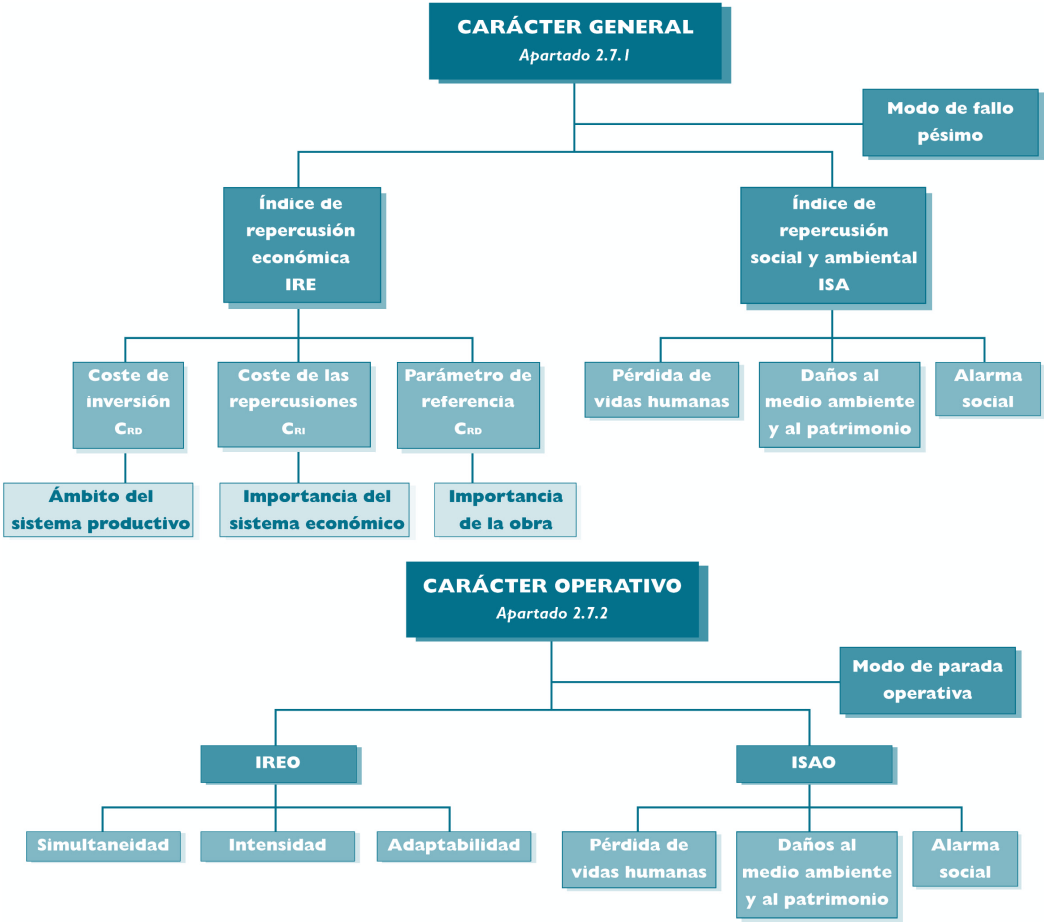


Figura 2.3:
Caracteres
general y
operativo del
tramo de obra.

2.7.1 **Carácter general: definición**

La importancia de un tramo de obra marítima, así como la repercusión económica, social y ambiental generada en caso de destrucción o pérdida de funcionalidad se valorará por medio del carácter general del tramo. Este carácter se evaluará seleccionando, de entre los principales adscritos a los estados límite últimos y de servicio, el modo que proporcione los índices más altos.

Comentario *El carácter general del tramo de la obra se determinará considerando un modo principal de fallo adscrito a un estado límite último, es decir será función de la seguridad. No obstante, habrá casos en los que el carácter de la obra se establecerá en función de un modo principal de fallo adscrito a un estado límite de servicio, es decir, dependerá de la funcionalidad.*

2.7.1.1 **Carácter general del tramo de la obra**

Todos los tramos de la obra cuya destrucción o pérdida total de servicio tenga similares repercusiones económicas, sociales y ambientales tendrán el mismo carácter general. Aquellos tramos de la obra cuyo fallo implique repercusiones significativamente diferentes, tendrán un carácter general propio.

2.7.1.2 Tramos de obra ejecutados por etapas

En aquellos casos, en los que se prevea una ejecución por etapas de la obra marítima, el carácter general de la misma se establecerá para cada una de las etapas siempre que el desfase de entrada en servicio de las diferentes etapas sea superior a un cierto número de años; a los efectos de estas Recomendaciones, el desfase mínimo será de cinco años. En otro caso, el carácter general del tramo de obra será único.

2.7.1.3 Índices para determinar el carácter general

Corresponde al promotor de la obra marítima, público o privado, especificar el carácter general de la obra. A falta de una definición específica, el carácter general de la obra se establecerá en función de los siguientes índices,

- Índice de repercusión económica, IRE
- Índice de repercusión social y ambiental, ISA

Comentario

Estos dos índices se establecen a priori, por tanto, constituyen una aproximación inicial o de partida al carácter general de la obra. En consecuencia, su evaluación debe realizarse con el alcance de un estudio previo. Ambos índices se obtienen suponiendo la ocurrencia de un modo de fallo relacionado con los estados límite último o de servicio.

2.7.1.4 Índice de repercusión económica, IRE

Valora cuantitativamente las repercusiones económicas por reconstrucción de la obra, C_{RD} , y por cese o afección de las actividades económicas directamente relacionadas con ella, C_{RI} , previsibles, en el caso de producirse la destrucción o la pérdida de operatividad total de la misma. El IRE se define por la siguiente expresión:

$$IRE = \frac{C_{RD} + C_{RI}}{C_O}$$

donde C_O es un parámetro económico de adimensionalización.

2.7.1.4.1 Evaluación aproximada del IRE

En aquellos casos en los que no se realice una determinación detallada de C_{RI} , bien por razones de complejidad desproporcionada respecto a la magnitud de la obra, bien por falta de estudios previos, el valor del IRE podrá estimarse cualitativamente por el método descrito en el Anejo a este capítulo.

2.7.1.5 Clasificación en función del IRE

En función del valor del Índice de Repercusión Económica IRE, las obras marítimas se clasificarán en tres tipos correspondientes a tres subintervalos R_i , $i = 1, 2, 3$,

- R_1 , obras con repercusión económica baja: $IRE \leq 5$
- R_2 , obras con repercusión económica media: $5 < IRE \leq 20$
- R_3 , obras con repercusión económica alta: $IRE > 20$

2.7.1.6 Índice de repercusión social y ambiental, ISA

Estima de manera cualitativa el impacto social y ambiental esperable en el caso de producirse la destrucción o la pérdida de operatividad total de la obra marítima, valorando la posibilidad y alcance de, (1) pérdidas de vidas humanas, (2) daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico y (3) de la alarma social generada, considerando que el fallo se produce una vez consolidadas las actividades económicas directamente relacionadas con la obra.

El ISA se define por el sumatorio de tres subíndices:

$$ISA = \sum_{i=1}^3 ISA_i$$

donde, ISA_1 , es el subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas; ISA_2 , el subíndice de daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico e ISA_3 , el subíndice de alarma social.

2.7.1.6.1 Evaluación aproximada del ISA

En aquellos casos en los que no se pueda realizar una determinación detallada de los ISA_i , sus valores podrán estimarse cualitativamente por el método descrito en el Anejo a este capítulo.

2.7.1.7 Clasificación en función del ISA

En función del valor del índice de repercusión social y ambiental ISA, las obras marítimas se clasificarán en cuatro tipos correspondientes a cuatro subintervalos, S_i , $i = 1, 2, 3, 4$,

- S_1 , obras sin repercusión social y ambiental significativa, $ISA < 5$
- S_2 , obras con repercusión social y ambiental baja, $5 \leq ISA < 20$
- S_3 , obras con repercusión social y ambiental alta, $20 \leq ISA < 30$
- S_4 , obras con repercusión social y ambiental muy alta, $ISA \geq 30$

2.7.1.8 Criterios de proyecto dependientes del carácter general

A falta de estudios específicos, en función del carácter general de la obra marítima se fijarán,

- La vida útil mínima de obras definitivas
- La máxima probabilidad conjunta de fallo del tramo y el nivel de operatividad
- Los métodos de verificación de la seguridad y del servicio frente a los modos de fallo adscritos a estados límite último y de servicio, y los métodos de verificación de la explotación frente a los modos de parada operativa
- Los planes de conservación, inspección, auscultación e instrumentación del tramo de obra

2.7.2 Carácter operativo: definición

Las repercusiones económicas y los impactos social y ambiental que se producen cuando una obra marítima deja de operar o reduce su nivel de operatividad, se valorarán por medio de su carácter operativo. Éste se evaluará seleccionando de entre los modos principales de parada operativa, aquel que proporcione el nivel mínimo de operatividad.

2.7.2.1 El carácter operativo según el tramo de la obra

El carácter operativo de la obra marítima se otorgará a todos los tramos de la misma cuya reducción o cancelación de la explotación, dé lugar a repercusiones económicas, sociales y ambientales similares. A las partes de la obra cuya parada operativa implique repercusiones diferentes, se les podrá asociar un carácter específico.

2.7.2.2 Índices para determinar el carácter operativo

Corresponderá al promotor de la obra marítima, público o privado, especificar su carácter operativo. A falta de una determinación específica, el carácter operativo de una obra marítima se establecerá en función de los siguientes índices,

- Índice de repercusión económica operativo, IREO
- Índice de repercusión social y ambiental operativo, ISAO

2.7.2.3 Índice de repercusión económica operativo, IREO

Valora cuantitativamente los costes ocasionados por la parada operativa del tramo de obra.

2.7.2.3.1 Evaluación aproximada del IREO

En aquellos casos en los que no se determinen estos costes, bien por razones de complejidad desproporcionada respecto a la magnitud de la obra, bien por falta de estudios previos, el valor del IREO podrá estimarse de forma cualitativa por el método descrito en el Anejo a este capítulo.

2.7.2.4 Clasificación en función del IREO

En función del valor del Índice de Repercusión Económica Operativo IREO, las obras marítimas se clasificarán en tres tipos correspondientes a tres subintervalos, RO_i , $i=1, 2, 3$,

- $RO_{1,}$ obras con repercusión económica operativa baja: $IREO \leq 5$
- $RO_{2,}$ obras con repercusión económica operativa media: $5 < IREO \leq 20$
- $RO_{3,}$ obras con repercusión económica operativa alta: $IREO > 20$

2.7.2.5 Índice de repercusión social y ambiental operativo, ISAO

Estima de manera cualitativa la repercusión social y ambiental esperable, en el caso de producirse un modo de parada operativa de la obra marítima, valorando la posibilidad y alcance de: (1) pérdidas de vidas humanas, (2) daños en el medio ambiente y el patrimonio histórico-artístico y (3) la alarma social generada.

$$ISAO = \sum_{i=1}^3 ISAO_i$$

donde, $ISAO_1$, es el subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas; $ISAO_2$, el subíndice de daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico e $ISAO_3$, el subíndice de alarma social.

2.7.2.5.1 Evaluación aproximada del ISAO

En aquellos casos en los que no se pueda realizar una determinación detallada de los ISAO_i, sus valores podrán estimarse de forma cualitativa por el método propuesto para el cálculo aproximado del ISA, apartados 2.7.1.7.1 y 2.11.3.

2.7.2.6 Clasificación en función del ISAO

En función del valor del índice de repercusión social y ambiental ISAO, los tramos de la obra marítima se clasificarán en cuatro tipos correspondientes a cuatro subintervalos, $S_{O,i}$, $i = 1, 2, 3, 4$,

- $S_{O,1}$, obras sin repercusión social y ambiental significativa, $ISAO < 5$
- $S_{O,2}$, obras con repercusión social y ambiental baja, $5 \leq ISAO < 20$
- $S_{O,3}$, obras con repercusión social y ambiental alta, $20 \leq ISAO < 30$
- $S_{O,4}$, obras con repercusión social y ambiental muy alta, $ISAO \geq 30$

Comentario

En la mayoría de las obras marítimas el ISAO será nulo ya que, producida una parada operativa, cesará la causa del impacto ambiental, si es que lo hubiera. Sin embargo, algunas obras, por ejemplo los emisarios submarinos y las tomas de agua para centrales térmicas o para plantas de desalinización, pueden ocasionar repercusiones sociales y ambientales significativas. En este caso el ISAO $\neq 0$, y su importancia se debe considerar en el proyecto en función del carácter operativo de la obra marítima.

2.7.2.7 Criterios de proyecto dependientes del carácter operativo

(8) En la mayoría de los casos, el año se considera la unidad de pulso o periodo meteorológico. En la hipótesis de independencia estadística de los estados de proyecto de cada año, el nivel de operatividad anual representa, asimismo, el nivel de operatividad del tramo de obra durante su vida útil.

A falta de estudios específicos, en función del carácter operativo de la obra marítima se recomiendan en el intervalo de tiempo considerado, que por lo general será de un año⁸,

- La operatividad mínima
- El número medio de paradas operativas
- La duración máxima de una parada operativa

2.8 Procedimiento de Verificación

Una de las tareas en el proyecto es verificar que el tramo de obra en su conjunto y todos sus elementos son fiables, funcionales y operativos durante cada una de las fases de proyecto. Para ello, se recomienda un procedimiento de verificación que incluirá, al menos, las siguientes actividades: (1) definición de los condicionantes de proyecto y las bases de cálculo que se desarrollan en el capítulo 3; (2) selección de los estados límite, definición de los modos de fallo y parada, formulación de la ecuación de verificación, de las condiciones de trabajo y establecimiento de los tipos de combinación, que se explican en el capítulo 4; y, (3) resolución de la ecuación de verificación y cálculo de la probabilidad de ocurrencia de cada modo y del conjunto de modos en la fase de proyecto, objeto de los capítulos 5, 6 y 7.

2.8.1 Definición de la alternativa de Proyecto y organización de los factores

Especificados los requerimientos funcionales de la obra y determinado su carácter general, se establecerán los condicionantes de Proyecto, definiendo geométricamente una alternativa y organizando por su origen y función y temporal, los factores de Proyecto.

2.8.2 Estados límite

Se considerarán los modos de fallo agrupados en los siguientes estados límite: últimos, ELU, que incluyen los modos de fallo que provocan la pérdida de capacidad estructural o resistente; de servicio, ELS, que incluyen los modos de fallo que inducen una pérdida de funcionalidad, y de parada operativa, ELO, que incluyen los modos de parada que provocan la pérdida de explotación sin fallo estructural o funcional.

2.8.3 Ecuación de verificación

La ocurrencia de cada uno de los modos se describirá mediante una relación funcional entre factores de proyecto que se conoce con el nombre de ecuación de verificación. Esta ecuación se podrá formular en diversos formatos: coeficiente de seguridad global, margen de seguridad, etc. En algunos casos la ecuación de verificación no existe o no es fiable; se recurrirá, entonces, a estudios experimentales en laboratorio o de campo o a otras técnicas.

2.8.3.1 Dominios de seguridad y de fallo

Están formados por los conjuntos de estados de proyecto para los cuales el resultado de la ecuación de verificación toma, respectivamente, valores superiores o inferiores a un cierto valor umbral. Si la ecuación de verificación es del tipo margen de seguridad, es decir $S = X_1 - X_2$, donde S es el margen de seguridad y X_1 y X_2 son los conjuntos de términos favorables y desfavorables, a impedir la ocurrencia del modo respectivamente, entonces, el dominio de seguridad es $S > 0$. El dominio de fallo está formado por todos los estados de proyecto para los cuales, $S \leq 0$.

Si la ecuación es de la forma de coeficiente de seguridad global, el dominio de seguridad es $Z > Z_c$; el dominio de fallo se define por $Z \leq Z_c$, donde Z_c es el coeficiente global mínimo para el modo.

Comentario

Las palabras seguridad y fallo deben entenderse en su sentido más amplio, haciendo referencia a satisfacer e incumplir los requisitos de seguridad, de servicio y de explotación, respectivamente.

2.8.4 Condiciones de trabajo

Los modos de fallo podrán ocurrir en los estados de proyecto más desfavorables o estados límite. Estos estados se agruparán en condiciones (de trabajo) representativas de las manifestaciones extremas de los agentes predominantes y de los requerimientos funcionales y de explotación de la obra y de sus instalaciones.

Una condición de trabajo, CT, es un conjunto de estados de proyecto caracterizados por la ocurrencia de algunos factores de proyecto en función de su simultaneidad y de su compatibilidad. En general, las condiciones de trabajo se especifican en términos de los agentes predominantes. En cada fase de proyecto se considerarán condiciones de trabajo normales operativas, CT_1 , extremas, CT_2 y excepcionales, CT_3 .

2.8.5 Tipos de combinación

Por lo general será suficiente definir tres tipos de combinación de factores y términos en la ecuación de verificación denominadas: poco probable o fundamental, frecuente y cuasi permanente o habitual.

2.8.6 Método de verificación

En él se definen los criterios para: (1) dar valores a los factores de proyecto y a los términos de la ecuación de verificación, (2) resolver la ecuación de verificación y (3) definir el criterio de fallo y, por tanto, declarar, cuando el tramo de obra satisface los requisitos de seguridad, servicio y uso y explotación.

Comentario El resultado de la aplicación de un método de verificación a un modo de fallo o parada, es una indicación de si el tramo de obra cumple o incumple aquellos requisitos, figura 2.4. Este resultado, depende de los valores de los factores de proyecto. La ocurrencia, la magnitud y la simultaneidad de los factores de proyecto son difícilmente predecibles, por lo que, en general, el resultado de la ecuación de verificación deberá ser tratado como una variable aleatoria con un modelo de probabilidad.

De acuerdo con la tabla 4.1, en función del carácter de la obra, se recomiendan cuatro métodos de verificación, ordenados en tres niveles, denominados Nivel I, II y III, que se describen en los capítulos 5 y 6. Los métodos verificación y cálculo de Nivel I no proporcionan la probabilidad de fallo o parada del modo y, por tanto, su evaluación debe hacerse estableciendo ciertas hipótesis que se describen en el capítulo 5. Los métodos de Nivel II y III proporcionan directamente la probabilidad de ocurrencia del modo en el intervalo de tiempo.

2.9 Seguridad, Servicio y Explotación

En cada fase de proyecto, la obra en su conjunto, sus tramos, elementos, subelementos, etc., deben cumplir los requisitos de proyecto en materia de seguridad, servicio y explotación, figura 2.4.

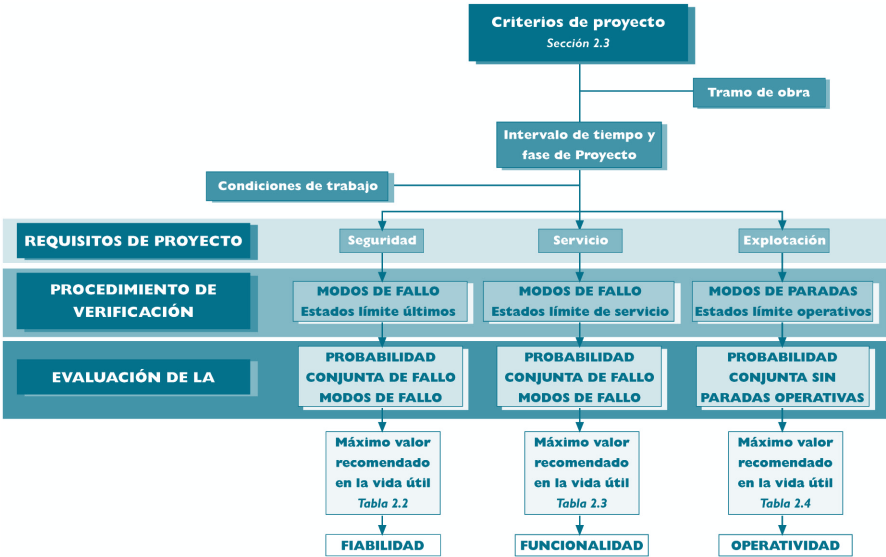


Figura 2.4:
Requisitos de
proyecto:
seguridad,
servicio y uso
y explotación.

2.9.1 Seguridad

Un tramo de obra se considera seguro, cuando cumple los requisitos de seguridad especificados en el proyecto y exigidos por la normativa vigente durante la ocurrencia de todos los estados que pueden presentarse en las fases de proyecto.

Cuando en un estado de proyecto no se satisfacen estos requisitos de seguridad y la obra, o alguno de sus elementos no es capaz de comportarse adecuadamente desde un punto de vista estructural o resistente, se dice que es insegura o no es fiable.

El fallo, en general, sobreviene en un corto plazo de tiempo y puede afectar al tramo de obra en su conjunto, o a algunos de sus elementos, subelementos, etc., en la forma o mecanismo descrito por un modo de fallo. Si el fallo o los fallos están motivados por la presentación de un mismo agente, pueden ocurrir varios modos de fallo en el intervalo de tiempo, de forma que, la ocurrencia de un modo, induzca otro u otros modos de fallo.

2.9.1.1 Seguridad por tramos

Se verificará la seguridad de la obra por tramos y, en su caso, en su conjunto.

2.9.1.2 Seguridad del tramo en el tiempo

Se verificará la seguridad del tramo de la obra en todas sus fases de proyecto, considerando los modos de fallo adscritos a los estados límite últimos. A tal efecto, la fase de proyecto se podrá dividir en intervalos de tiempo de duración inferior.

2.9.1.3 Probabilidad de fallo frente a la seguridad

La probabilidad de que un tramo de obra incumpla los requisitos de seguridad en un intervalo de tiempo mediante la ocurrencia de un modo de fallo, se denomina probabilidad de fallo (frente a la seguridad).

2.9.1.4 Fiabilidad

(9) El valor complementario de la probabilidad p , es $(1-p)$.

Es el valor complementario⁹ de la probabilidad de fallo en la fase de proyecto, frente a todos los modos de fallo principales, adscritos a todos los estados límite últimos. En el ámbito de esta ROM, aquella probabilidad se denomina probabilidad de fallo conjunta del tramo frente a los estados límite últimos.

2.9.1.4.1 Máxima probabilidad conjunta en los estados límite últimos

En un tramo de obra y en la vida útil, la probabilidad conjunta no podrá ser superior al valor dado en la tabla 2.2, en función del carácter general de la obra.

Comentario

Debido a las dimensiones geométricas de las obras marítimas y portuarias y a la diversidad espacial de los factores que afectan, se recomienda verificar la obra por tramos de acuerdo con la definición dada en el apartado 2.2.6. Esta forma de proceder lleva implícita la hipótesis de independencia estadística de los tramos de obra. En consecuencia, la probabilidad de fallo de toda la obra frente a todos los modos de fallo posibles, es la probabilidad de que, al menos un tramo de la obra, falle por la ocurrencia de al menos uno de los modos de fallo adscritos a uno de los estados límite últimos.

2.9.2 Servicio

Un tramo de obra está en servicio cuando cumple los requisitos funcionales (resistentes y formales) especificados en el proyecto y exigidos por la normativa vigente durante la ocurrencia de todos los estados que pueden presentarse en las fases de proyecto.

Cuando en un estado de proyecto no se satisfacen los requisitos funcionales, y el tramo o alguno de sus elementos, no son capaces de comportarse adecuadamente desde un punto de vista estructural y formal, se dice que no está en servicio o no es funcional. El fallo, en general, sobreviene gradualmente a lo largo del tiempo, y puede afectar al tramo de obra en su conjunto o a algunos de sus elementos, subelementos, etc., en la forma o mecanismo descrito por un modo de fallo. Si el fallo o los fallos están motivados por la presentación de un mismo agente, pueden ocurrir varios modos de fallo en el intervalo de tiempo, pudiéndose producir en cadena, de tal forma que la ocurrencia de un modo induzca otro u otros modos de fallo.

Comentario

La reducción o pérdida de funcionalidad puede sobrevenir por pérdida de durabilidad. Durabilidad es la capacidad del tramo de la obra y de sus materiales de construcción para soportar durante la fase de proyecto, sin degradación o pérdida de sus propiedades descritas y requeridas en el proyecto, las acciones de los agentes del medio físico, terreno, construcción, y uso y explotación.

2.9.2.1 Servicio por tramos

Se verificará el servicio de la obra por tramos y, en su caso, en su conjunto.

2.9.2.2 Servicio del tramo en intervalos de tiempo

Se verificará el servicio del tramo de la obra en todas sus fases de proyecto, considerando los modos de fallo adscritos a los estados límite de servicio. A tal efecto, la fase de proyecto se podrá dividir en intervalos de tiempo de duración inferior.

2.9.2.3 Probabilidad de fallo frente al servicio

La probabilidad de que un tramo de obra incumpla los requisitos de servicio en un intervalo de tiempo mediante la ocurrencia de un modo de fallo, se denomina probabilidad de fallo (frente al servicio).

2.9.2.4 Funcionalidad

Es el valor complementario de la probabilidad de fallo en la fase de proyecto frente a todos los modos de fallo principales adscritos a todos los estados límite de servicio. En el ámbito de esta ROM, aquella probabilidad se denomina probabilidad de fallo conjunta del tramo frente a los estados límite de servicio.

2.9.2.4.1 Máxima probabilidad conjunta en los estados límite de servicio

En un tramo de obra y en la vida útil, la probabilidad conjunta no podrá ser superior al valor dado en la tabla 2.3, en función del carácter general de la obra.

2.9.3 Uso y explotación

Una obra o tramo y sus instalaciones está en explotación cuando cumple los requisitos de uso especificados en el proyecto y los exigidos por la normativa vigente.

Cuando en un estado de proyecto no se satisfacen estos requisitos, o alguno de sus elementos no es capaz de comportarse adecuadamente, sin fallo estructural, se dice que la obra no está en explotación o no es operativa. La parada operativa suele ocurrir de forma inmediata por sobrepasar alguno de los factores de proyecto, en particular los agentes climáticos, el umbral de uso y explotación, y puede afectar al tramo, a algunos de sus elementos o subelementos, etc. Una vez que cesa la causa, el tramo vuelve a recuperar la capacidad de cumplimiento de los requisitos de explotación.

La forma o manera en la que se produce la parada se describe por un modo de parada operativa. Si la parada está motivada por la presentación de un mismo agente, pueden ocurrir paradas en varias instalaciones en el mismo intervalo, pudiéndose producir en cadena de tal forma que, la ocurrencia de una de ellas induzca otra en la misma u otras instalaciones.

2.9.3.1 Uso y explotación por tramos

Se verificará el uso y la explotación de la obra por tramos y, en su caso, en su conjunto.

2.9.3.2 Uso y explotación del tramo en intervalos de tiempo

Se verificará el uso y la explotación del tramo de la obra en todas sus fases de proyecto, teniendo en cuenta los modos adscritos a los estados límite de parada operativa. A tal efecto, la fase de proyecto se podrá dividir en intervalos de tiempo de duración inferior:

2.9.3.3 Probabilidad de parada

La probabilidad de que un tramo de obra incumpla los requisitos de explotación en un intervalo de tiempo mediante la ocurrencia de un modo de parada, se denomina probabilidad de parada operativa

2.9.3.4 Operatividad

Es el valor complementario de la probabilidad de parada en la fase de proyecto frente a todos los modos de parada principales adscritos a todos los estados límite de parada. En el ámbito de esta ROM, esta probabilidad se denomina operatividad (o nivel de operatividad) del tramo frente a los estados límite de parada.

Para un tramo de obra y una fase de proyecto, el nivel de operatividad es el tanto por ciento del tiempo en el que la obra o sus instalaciones están en explotación y por tanto se cumplen los requisitos de uso y explotación, independientemente de que se haga o no uso de ella.

2.9.3.4.1 Mínimo nivel de operatividad

En un tramo de obra y en la vida útil, el nivel de operatividad no podrá ser inferior al valor dado en la tabla 2.4, en función del carácter operativo de la obra.

2.9.3.5 Otras medidas de evaluación del uso y la explotación

Además del nivel de operatividad,la calidad de la explotación se evaluará por el número medio de paradas en la fase de proyecto u otro intervalo de tiempo y por la duración máxima de un modo de parada.

2.9.3.5.1 Número medio de paradas

En un tramo de obra y en un intervalo de tiempo, es el número de veces que en promedio el tramo de obra o sus instalaciones, dejan de cumplir los requisitos de explotación.

2.9.3.5.1.1 Número medio de paradas operativas recomendable

En un tramo de obra y en el intervalo de tiempo que se defina en el proyecto, y, que en general es el año, el número medio de paradas debido a la ocurrencia de todos los modos de parada no podrá exceder los valores dados en la tabla 2.5.

2.9.3.5.2 Duración de una parada

Es el tiempo que dura la parada y, por tanto, el tiempo que el tramo de obra o sus instalaciones dejan de cumplir los requisitos de uso y explotación.

Comentario La duración , de una parada operativa,es el tiempo que transcurre desde que se produce la parada de las instalaciones hasta que vuelven a estar en explotación. Esta duración es una variable aleatoria.

2.9.3.5.2.1 Duración máxima recomendable

Para cada modo de parada, la duración de cada modo de parada en la fase de proyecto servicio no podrá ser superior a los valores dados en la tabla 2.6.

Comentario La duración máxima $_{max}$ de una parada es el tiempo máximo que puede transcurrir desde que se produce la parada de las instalaciones hasta que vuelven a estar en explotación. La duración máxima es una variable aleatoria extremal. Un descriptor estadístico de esta distribución es la moda o valor más probable.

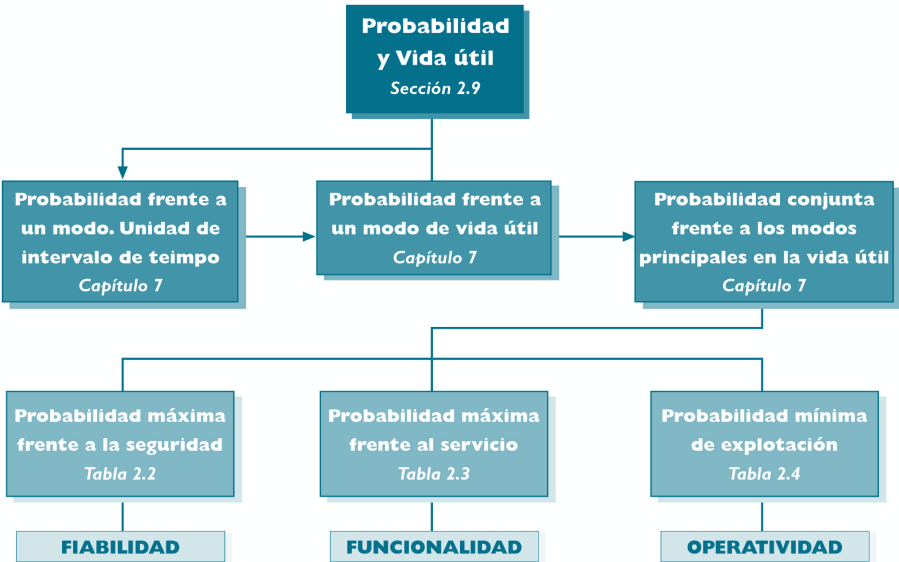


Figura 2.5:
Secuencia de cálculo de la probabilidad conjunta de fallo y parada.

2.9.4 Cálculo de la probabilidad conjunta de fallo y parada

El cálculo de la probabilidad conjunta de fallo y parada, se realizará siguiendo una secuencia en la que se determina: la probabilidad de ocurrencia de un modo en la unidad de intervalo de tiempo, la probabilidad de ocurrencia del modo en la fase de proyecto, en general la vida útil y la probabilidad conjunta de ocurrencia de todos los modos adscritos a los estados límite últimos, de servicio y operativos, en la fase de proyecto. La figura 2.5 es un esquema de esta secuencia de cálculo.

2.9.4.1 Diagrama de modos principales de fallo y parada

Un diagrama de modos principales es una simplificación del comportamiento de un tramo y proporciona una lista de los mismos; además, el diagrama puede describir la relación entre los diferentes modos, si es que lo hubiera. A estos efectos, un diagrama podrá ser en serie, paralelo o compuesto.

Comentario

El tramo de obra forma parte de un sistema proyectado y construido para dar un conjunto de servicios. En algunos casos es necesario evaluar la probabilidad global del sistema frente a los modos de fallo o parada. En esta ROM no se proponen métodos para evaluar esta probabilidad global ya que, para ello, se han de definir los árboles de fallo que tienen en cuenta las posibles respuestas del sistema frente a la ocurrencia de un fallo o conjunto de fallos, que dependen, entre otros, de los servicios, instalaciones y organización del sistema.

En estas Recomendaciones, el planteamiento y la formulación del cálculo de la probabilidad conjunta de fallo se basa en la independencia de cada tramo de obra y de los modos, tanto desde el punto de vista de la seguridad, del servicio y del uso y explotación.

2.9.4.2 Dominios de seguridad y de fallo

Está formado por los conjuntos de estados de proyecto para los cuales la ecuación de verificación toma valores superiores o inferiores con respecto a un cierto valor umbral. Si la ecuación de verificación es del tipo margen de seguridad, el dominio de seguridad es $S > 0$. El dominio de fallo está formado por todos los estados de proyecto para los cuales $S \leq 0$. Si la ecuación es de la forma de coeficiente de seguridad global, el dominio de seguridad es $Z > Z_c$; el dominio de fallo se define por $Z \leq Z_c$, donde Z_c es el coeficiente global mínimo para el modo.

2.9.4.3 Unidad de intervalo de tiempo

Marco temporal en el que se dispone de información estadística y modelos de probabilidad de los factores de proyecto y términos en el que se puede resolver la ecuación de verificación y la probabilidad de que el resultado pertenezca al dominio de fallo o de parada.

2.9.4.4 Probabilidad de presentación de un modo en la unidad de intervalo de tiempo

Se calculará evaluando la probabilidad de que el resultado de la ecuación de verificación se encuentre en el dominio de fallo. La probabilidad de fallo frente al modo A_{ij} , $p_{Aij} = \Pr[S_{Aij} \leq 0]$, donde $i = 1, \dots, M$ son los modos adscritos a cada uno de los $j = 1, \dots, N$ estados límite último, de servicio o de parada.

Comentario

Si la ecuación de verificación es lineal y los términos X_1 y X_2 , están normalmente distribuidos y son independientes, S es también una variable gaussiana. El dominio de fallo se define por $S \leq 0$. Si S , es una

variable normal de media μ_s , y de desviación estándar σ_s , la variable reducida $= \frac{0-\mu_s}{\sigma_s}$, se denomina índice de fiabilidad; la probabilidad de fallo $p_{Aij} = Pr[S \leq 0]$, se puede obtener a partir de la función de distribución de Gauss $\Phi(\cdot)$, $p_{Aij} = 1 - \Phi(\cdot) = \Phi(-\cdot)$, y la fiabilidad de la obra o tramo frente al modo es, $r_{Aij} = \Phi(\cdot) = 1 - \Phi(-\cdot)$.

El índice de fiabilidad también se puede calcular para ecuaciones de verificación no lineales con términos que no son variables aleatorias gaussianas. La técnica a seguir se describe en el capítulo 6 y se incluye en el denominado método de Nivel II.

2.9.4.5 Probabilidad de presentación de un modo en la fase de proyecto

Una vez conocida la probabilidad de presentación del modo para una unidad de intervalo de tiempo, se determinará la probabilidad de presentación del modo en la fase de proyecto, para la cual ésta se divide en un número finito de unidades de intervalo de tiempo.

2.9.4.6 Probabilidad conjunta y diagrama de modos

Se calculará, según se describe en el capítulo 7, la probabilidad conjunta de presentación de los modos principales adscritos a los estados límite últimos y a los estados límite de servicio, agrupados en diagrama, en serie, en paralelo o compuesto. De forma análoga se calculará el nivel de operatividad frente a los modos principales de parada adscritos a los estados límite operativos agrupados en diagrama. En el caso de disponer de información estadística adecuada, se podrán aplicar otros métodos de cálculo de la probabilidad conjunta.

Comentario Tal y como se explica en el capítulo 7, esta probabilidad conjunta es una aproximación a la probabilidad global de fallo, o parada, del tramo de obra.

2.10 Valores Recomendados

En esta sección se recomiendan valores de la vida útil mínima, las máximas probabilidades conjuntas de fallo frente a la seguridad y el servicio y la operatividad mínima, número medio de paradas máximo y duración máxima de una parada, figura 2.6.

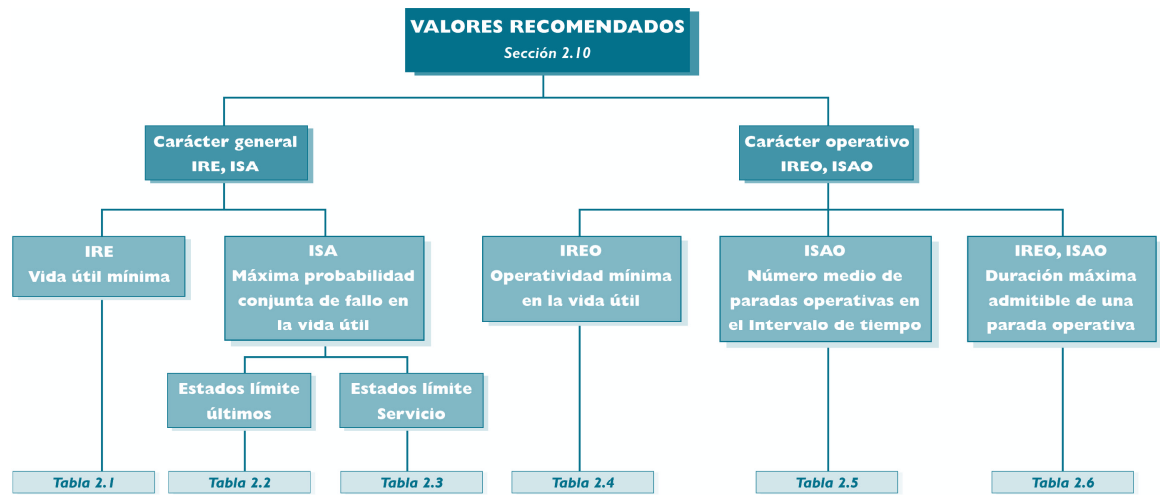


Figura 2.6:
Valores recomendados en función de los caracteres general y operativo del tramo de la obra.

2.10.1 Duraciones Mínimas

Para aquellos casos en los cuales la duración de la fase de proyecto no haya sido especificada a priori se considerarán las siguientes duraciones mínimas.

2.10.1.1 Vida útil mínima

La duración de la fase de proyecto servicio, V_m , o vida útil será, como mínimo, el valor consignado en la tabla 2.1, en función del IRE, índice de repercusión económica de la obra marítima.

Tabla 2.1:
Vida útil mínima en la fase de proyecto servicio

| IRE | 5 | 6 - 20 | > 20 |
|-------------------|----|--------|------|
| Vida útil en años | 15 | 25 | 50 |

2.10.1.2 Duración de la fase de construcción

La duración de esta fase se determinará teniendo en cuenta los medios técnicos y económicos necesarios, así como los procedimientos constructivos que, en cada caso, se establezcan para ejecutar la obra. En todas aquellas obras cuyo proceso constructivo implique la consolidación de suelos (cimientos, rellenos, núcleos de materiales sueltos, etc...), la duración mínima de la subfase correspondiente deberá ser tal, que permita reducir las deformaciones posteriores a niveles tolerables por las estructuras que sobre ella descansan.

2.10.1.3 Duración de la fase de desmantelamiento

En general, la duración de esta fase no deberá ser superior a la duración de la fase de construcción de la obra. En el caso en el que la obra haya sido construida en diferentes etapas, la duración de dicha fase no excederá la suma de las duraciones de las fases de construcción de cada una de ellas.

2.10.2 Máxima probabilidad conjunta de fallo en la vida útil

En cada tramo de la obra y durante la vida útil la máxima probabilidad conjunta de fallo se ajustará a los valores recomendados en las tablas 2.2 y 2.3. Estos valores son orientativos y podrán ser modificados en las Recomendaciones específicas.

Comentario

En el capítulo 7 se recomienda realizar estudios de optimización económica del tramo de obra. Uno de los resultados de dichos análisis es la probabilidad conjunta de fallo asociada a la tipología óptima económica del tramo. Dado que los valores de las tablas 2.2 y 2.3 se han determinado a partir de criterios distintos de los económicos, no debe resultar extraño encontrar algunas diferencias entre los resultados obtenidos de la estricta aplicación de los valores de las tablas 2.2 y 2.3 y los obtenidos por el análisis económico, tal y como se explica en la sección 7.8. En cualquier caso, los números de dichas tablas tienen un carácter experimental y, en consecuencia, su validez es temporal hasta que la aplicación de este Procedimiento proporcione información suficiente para su adopción definitiva, o, en su caso modificación.

En los documentos ROM el valor de la probabilidad no debe necesariamente entenderse como una frecuencia relativa que puede medirse u observarse en la realidad. En el programa ROM la probabilidad debe entenderse en su sentido bayesiano como una valoración expresa del grado de confianza o de "fé" de que así ocurra, teniendo en cuenta todas las incertidumbres que intervienen y como una ayuda para decidir.

2.10.2.1 En los estados límite últimos

La probabilidad conjunta de fallo $p_{f,ELU}$, del tramo de obra, frente a los modos de fallo principales adscritos a los estados límite últimos no podrá exceder los valores consignados en la tabla 2.2, en su vida útil.

Tabla 2.2:
Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio para los E.L.U.

| ISA | < 5 | 5 -19 | 20 -29 | 30 |
|-------------|------|-------|--------|--------|
| $p_{f,ELU}$ | 0.20 | 0.10 | 0.01 | 0.0001 |
| r_{ELU} | 0.84 | 1.28 | 2.32 | 3.71 |

Comentario

Los miembros de la comisión técnica de redacción han determinado los valores de la tabla 2.2 procurando, que estuviesen en sintonía con los usos y hábitos de las otras ramas de la ingeniería civil. Obsérvese, que la máxima probabilidad de fallo cambia un orden de magnitud al cambiar el índice de impacto social y ambiental, de bajo a alto, y de éste a muy alto. Para las obras marítimas cuya índice de impacto social y ambiental es muy alto, es decir, s_p , la probabilidad de excedencia se sitúa en 10^{-4} , que es el orden de magnitud de la máxima probabilidad de fallo admitida en las obras de edificación y obras civiles con alto riesgo de pérdida de vidas humanas.

De acuerdo con la definición de índice de fiabilidad $r_{f,ELU} = (r_{ELU})$, debe ser la fiabilidad mínima del tramo de obra en su vida útil, frente a todos los modos principales de fallo adscritos a los estados límite últimos.

La mayoría de las obras marítimas, especialmente las afectadas fundamentalmente por el oleaje, suelen tener un índice ISA bajo o muy bajo y normalmente se proyectan siguiendo métodos de optimización económica recomendados en esta ROM. Esos métodos, que deberán aplicarse a cada obra, proporcionarán otros valores de la probabilidad de fallo. El valor que se indica en la tabla precedente debe ser un tope superior que, salvo una justificación especial, no debe sobrepasarse.

En el otro extremo, existen obras en el ámbito del programa ROM cuyo índice ISA es alto o muy alto ($ISA > 20$) y en ellas no se pueden utilizar criterios de optimización sino proyectarse con todas las garantías de seguridad posibles, tal y como se hace en las obras comunes de uso público. La probabilidad teórica de fallo que se indica es sólo un índice de referencia que únicamente será de uso en algunas comprobaciones formales realizadas con técnicas probabilísticas.

2.10.2.2 En los estados límite de servicio

La probabilidad conjunta de fallo $p_{f,ELS}$, del tramo de obra frente a los modos de fallo principales adscritos a los estados límite de servicio, no podrá exceder los valores consignados en la tabla 2.3 durante la fase de proyecto servicio.

Tabla 2.3:
Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio para los E.L.S.

| ISA | < 5 | 5 -19 | 20 -29 | 30 |
|-------------|------|-------|--------|------|
| $p_{f,ELS}$ | 0.20 | 0.10 | 0.07 | 0.07 |
| r_{ELS} | 0.84 | 1.28 | 1.50 | 1.50 |

Comentario

No es habitual en la ingeniería marítima calcular un tramo de obra frente a modos de fallo adscritos a los estados límite de servicio, debido, principalmente, a la baja capacidad de modelado de la evolución temporal de la respuesta estructural y formal. Además, es escasa la información disponible, medida en el laboratorio o en el mundo real. Deberán pasar varios años antes de que se disponga de teoría y datos para que

la verificación del tramo frente a los modos adscritos a los estados límite de servicio sean tan habituales como la verificación de los modos adscritos a los estados límite últimos.

Para alcanzar este objetivo, que redundará en la consecución de obras más fiables y funcionales, es necesario establecer estrategias de inspección, auscultación e instrumentación que proporcionen información para el contraste de las formulaciones teóricas. Entre tanto, por coherencia expositiva y por criterios de funcionalidad y conservación del tramo, es conveniente incluir esta modalidad de verificación en un procedimiento general de cálculo.

A falta de mejor información, los valores de la probabilidad conjunta de fallo han sido obtenidos admitiendo que el índice de fiabilidad varía proporcionalmente con los intervalos del ISA. Por ello, las probabilidades conjuntas de fallo recomendadas en la tabla 2.3, deberán tomarse como valores indicativos; el paso del tiempo y la experiencia adquirida permitirán contrastar y adecuar sus valores.

De acuerdo con la definición de índice de fiabilidad $r_{f,ELS} = (r_{ELS})$, debe ser la funcionalidad mínima del tramo de obra frente a todos los modos principales de fallo adscritos a los estados límite servicio en su vida útil.

2.10.2.3 Entrada parcial en servicio

En el caso en que, durante la fase de construcción la obra entre, transitoriamente en servicio, la probabilidad conjunta de fallo será la que se especifique en el proyecto. En otro caso, será igual o inferior a la dada en la tabla 2.3.

2.10.3 Uso y explotación del tramo en la fase de servicio

En estas Recomendaciones la explotación del tramo de obra se puede especificar por los niveles mínimos de operatividad, el número medio de paradas y la duración máxima admisible de una parada. El primero de ellos, debe satisfacerse en el intervalo de tiempo definido por el resultado de los estudios económicos. El segundo de ellos, se satisfará en un intervalo de tiempo que, en general, estará vinculado a aspectos sociales y ambientales y su determinación deberá hacerse en función de éstos. Por último, la duración máxima admisible se analizará en un intervalo de tiempo que depende del resultado económico y del ciclo de la demanda; a falta de otra información se podrá considerar el año como intervalo de tiempo para el cálculo de las tres medidas.

Comentario

Las tres medidas o indicadores de la explotación, nivel de operatividad, número medio de paradas y duración máxima, cumplen diferentes objetivos y, en cada caso, deberán aplicarse (uno, dos o los tres) cuando sean relevantes para la funcionalidad del proyecto. El nivel de operatividad debe obtenerse de los estudios de rentabilidad económica de la instalación y por tanto está relacionado con el intervalo de tiempo en el que se hayan realizados dichos estudios.

Por otro lado, el número medio de paradas tiene su justificación, principalmente, por el impacto social y ambiental de la parada en sí, por lo que el intervalo de tiempo debe definirse a partir de éste. Finalmente, la duración máxima admisible de la parada afecta tanto a los aspectos económicos y del ciclo de la demanda como a aspectos sociales y ambientales. Por ello, el intervalo de tiempo debe definirse teniendo en cuenta ambos aspectos durante la fase de proyecto.

En general, las instalaciones marítimas y portuarias tienen un ciclo ambiental y económico anual, por lo que la operatividad y el número medio de paradas, se analizarán en el año. No obstante, existen casos en los que el ciclo puede ser estacional. La duración máxima probable está condicionada por diversos factores y, en general, se procurará que ésta no supere un cierto valor durante la fase de servicio. Si las tres medidas se especifican en el año, con los valores recomendados en las tablas siguientes bastará, en general, con cumplir con los dos valores pésimos pues el tercero se cumplirá de forma automática.

2.10.3.1 Operatividad mínima

En la fase de proyecto servicio y para los casos en los cuales no haya sido especificada a priori, la operatividad del tramo frente a los modos principales adscritos a los estados límite de parada en condiciones de trabajo operativas normales será, como mínimo, el valor consignado en la tabla 2.4, en función del IREO, índice de repercusión económico operativo del tramo.

Tabla 2.4:

Operatividad mínima en la fase de servicio

| IREO | 5 | 6 - 20 | > 20 |
|---------------------------|------|--------|------|
| Operatividad, $r_{f,ELO}$ | 0.85 | 0.95 | 0.99 |
| ELO | 1.04 | 1.65 | 2.32 |

Comentario

De acuerdo con la definición de índice de fiabilidad, $r_{f,ELO} = (\dots)$, será la operatividad mínima del tramo de obra frente a todos los modos principales adscritos a los estados límite de parada en su vida útil.

Normalmente los fallos de operatividad de una obra no tienen repercusiones socio-ambientales relevantes ($ISAO < 5$). En esas condiciones la operatividad puede no ser absoluta (garantía nominal del 100%) sino algo menor. La operatividad más conveniente puede deducirse de estudios económicos, pero se recomienda que no se sobrepasen los límites que se indican en este apartado.

2.10.3.2 Número medio de paradas

En el intervalo de tiempo que se especifique que, en general será el año, y para aquellos casos en los cuales no haya sido especificado a priori, el número medio de ocurrencias N_m , de todos los modos adscritos a los estados límite de parada, será, como máximo, el valor consignado en la tabla 2.5.

Tabla 2.5:

Número medio de paradas operativas en el intervalo de tiempo

| ISAO | < 5 | 5 - 19 | 20 - 29 | 30 |
|--------|-----|--------|---------|----|
| Número | 10 | 5 | 2 | 0 |

Comentario

En el caso en el que la parada operativa tenga una repercusión social y ambiental $s_{0,4}$, se exige que, salvo justificación, por término medio, no se produzca ninguna parada operativa en el intervalo de tiempo, evitando, de esa forma, que la instalación pare, salvo en condiciones excepcionales o imprevisibles. En algunas ocasiones para poder cumplir con este requisito será necesario duplicar la instalación.

Para las obras más convencionales en las que $ISAO < 5$, se deben realizar estudios económicos para analizar cuál es el número óptimo de paradas operativas. No obstante, conviene limitar, a priori, los resultados a los que esos estudios pueden conducir. Ese límite es el que se define en la tabla.

2.10.3.3 Duración máxima de una parada

En la fase de servicio y para aquellos casos en los que no haya sido especificado a priori, la duración máxima probable expresada en horas, una vez producida la parada, no podrá exceder el valor consignado en la tabla 2.6, en función del IREO e ISAO del tramo de obra.

Tabla 2.6:

Duración máxima probable (horas)

| IREO | ISAO | | | |
|--------|------|--------|---------|----|
| | < 5 | 5 - 19 | 20 - 29 | 20 |
| 5 | 24 | 12 | 6 | 0 |
| 6 - 20 | 12 | 6 | 3 | 0 |
| 20 | 6 | 3 | 1 | 0 |

Comentario

La duración es una variable aleatoria. El tiempo total de parada, a causa de la ocurrencia de un modo en una fase de proyecto cuya vida es V intervalos de tiempo independientes (p.ej. años), es igual a $V \cdot p_i$ siendo p_i la probabilidad de presentación del modo en el intervalo de tiempo. El número medio de paradas debido a la ocurrencia de este modo en V es $N_{m,i} = V \cdot p_i / t_{m,i}$, donde $t_{m,i}$ es la duración media de la parada. La duración media se puede obtener a partir de la función de distribución del modo de parada en el intervalo de tiempo, (véase la ROM 0.4).

Si los modos de parada son independientes, el tiempo total de parada debida a la ocurrencia de M modos en V es igual a $V \cdot \sum_{m=1}^M p_m$, donde p_m es la probabilidad de ocurrencia del modo de parada i en el intervalo de tiempo; el número medio de paradas del tramo en V intervalos de tiempo es $N_m = \sum_{m=1}^M V \cdot p_m / t_{m,i} = V \cdot \sum_{m=1}^M (p_m / t_{m,i})$

La duración máxima, t_{max} , de una parada en el tiempo máximo que puede transcurrir desde que se produce la parada de las instalaciones hasta que vuelven a estar en explotación. La duración máxima es una variable aleatoria extremal. Un descriptor estadístico de esta distribución es la moda o valor más probable.

Un valor cero de la duración máxima probable es una indicación del deseo, salvo justificación, de que no se produzca ninguna parada en los tramos de obra cuyo ISAO es $s_{0,4}$. En estos casos para cumplir esta recomendación será necesario duplicar la instalación.

2.10.4

Otros valores admisibles

Los valores recomendados de la probabilidad conjunta de fallo y operatividad se especifican para la fase de proyecto servicio, la cual, por lo general, se expresa en número de años.

Comentario

Si el año es la unidad de intervalo de tiempo y, si se puede considerar que los sucesivos intervalos de tiempo, años, son independientes, se puede hacer uso de esa propiedad estadística para simplificar el cálculo de la probabilidad conjunta y de la operatividad del tramo.

No obstante, en otras ocasiones podrá ser necesario evaluar la probabilidad de fallo o de parada en otros intervalos de tiempo. Un ejemplo es el caso del comportamiento de un dique en talud durante un temporal, (definido por una secuencia de estados de mar) o la operatividad de un muelle durante la temporada turística o durante la llamada operación de paso del Estrecho. En estos casos el promotor o el responsable de la explotación de la obra deberá especificar los requisitos de explotación en el intervalo de tiempo de interés.

2.11

Anejo: Cálculo de los Índices de Repercusión

La importancia económica, y social y ambiental del tramo de obra se valora mediante su carácter general y operativo. Corresponde al promotor de la obra marítima, público o privado, especificar el carácter del tramo de obra. A falta de una definición específica, el carácter se determinará en función de unos índices cuyo valor se calculará de forma aproximada según el método descrito en los apartados siguientes.

2.11.1

Cálculo aproximado del IRE

El IRE se define por la siguiente expresión,

$$IRE = \frac{C_{RD} + C_{RI}}{C_0}$$

donde, (C_{RD}) , valora cuantitativamente las repercusiones económicas por reconstrucción de la obra, (C_{RI}) , por cese o afección de las actividades económicas directamente relacionadas con ella,

esperables, en el caso de producirse la destrucción o la pérdida de operatividad total de la misma y, (C_0) , es un parámetro de adimensionalización. Estos costes se determinarán de acuerdo con los siguientes criterios.

2.11.1.1

Coste C_{RD}

Coste de inversión de las obras de reconstrucción de la obra marítima a su estado previo, en el año en que se valoren los costes por cese o afección de las actividades económicas directamente relacionadas con la obra. A falta de estudios de detalle, simplíficamente, podrá considerarse que este coste es igual a la inversión inicial debidamente actualizada al año citado.

2.11.1.2

Coste C_{RI}

Repercusiones económicas por cese e influencia de las actividades económicas directamente relacionadas con la obra, ya sean oferentes de servicios creados tras su puesta en servicio o demandantes y causadas por daños en los bienes defendidos. Se valorará en términos de pérdida de Valor Añadido Bruto (VAB), a precios de mercado durante el periodo que se estime dure la reconstrucción, tras la destrucción o pérdida de operatividad de la obra, considerando que ésta se produce una vez consolidadas las actividades económicas directamente relacionadas con la obra.

A falta de estudios de detalle, se considerará, en general que la consolidación de actividades económicas directamente relacionadas con la obra se produce transcurridos un cierto número de años desde su entrada en servicio que, a efectos de estas Recomendaciones y salvo justificación en otro sentido, será cinco años. De manera análoga, el periodo de reconstrucción se establecerá en un año.

Comentario

El VAB es lo que el conjunto de actividades económicas aporta a una economía y representa la diferencia entre inputs y outputs del proceso productivo asociado al conjunto de actividades. Esta diferencia está constituida por la fuerza laboral empleada y por los excedentes empresariales generados. En la contabilidad macroeconómica y de acuerdo con el Sistema Europeo de Cuentas, el VAB se calcula como la suma de las remuneraciones de asalariados (sueldos y salarios brutos y cotizaciones sociales) y el excedente bruto de explotación (descontándose de los costes de la cuenta de resultados de amortizaciones). Su valoración a precios de mercado requiere sumar, a los agregados macroeconómicos anteriores, los impuestos netos ligados a la producción (impuestos brutos menos subvenciones).

2.11.1.3

Coste C_0

Parámetro económico de adimensionalización. Su valor depende de la estructura económica y del nivel de desarrollo económico del país donde se vaya a construir la obra, variando, en consecuencia, con el transcurso del tiempo, tomándose, en España, para el año horizonte en los que se valoran los costes C_{RD} y C_{RI} , $C_0 = 3$ Meuros.

2.11.1.4

Evaluación aproximada de C_{RI} / C_0

En aquellos casos en los cuales no se realice una determinación detallada de C_{RI} , bien por razones de complejidad desproporcionada respecto a la magnitud de la obra, bien por falta de estudios previos, el cociente C_{RI} / C_0 , podrá estimarse cualitativamente y de forma aproximada, mediante la ecuación siguiente,

$$C_{RI}/C_0 = (C) * [(A)+(B)]$$

donde, (A) valora el ámbito del sistema económico y productivo, (B) la importancia estratégica del sistema económico y productivo, y, (C) la importancia de la obra para el sistema económico y productivo al que sirve. Estos coeficientes se determinarán de la siguiente manera.

2.11.1.4.1 Coeficiente del ámbito del sistema, (A)

El ámbito del sistema productivo al que sirve la obra marítima se valorará asignando los siguientes valores en función de que aquel sea un ámbito,

- Local, (1)
- Regional, (2)
- Nacional/Internacional, (5)

2.11.1.4.2 Coeficiente de la importancia estratégica, (B)

La importancia estratégica del sistema económico y productivo al que sirve la obra se valorará asignando los siguientes valores en función de que aquella sea,

- Irrelevante, (0)
- Relevante, (2)
- Esencial, (5)

2.11.1.4.3 Coeficiente de la importancia económica, (C)

La importancia de la obra para el sistema económico y productivo al que sirve se valorará asignando los siguientes valores en función de que aquella sea,

- Irrelevante, (0)
- Relevante, (1)
- Esencial, (2)

2.11.2 Clasificación en función del IRE

En función del valor del Índice de Repercusión Económica, IRE, las obras marítimas se clasificarán en,

- R_1 , obras con repercusión económica baja: $IRE \leq 5$
- R_2 , obras con repercusión económica media: $5 < IRE \leq 20$
- R_3 , obras con repercusión económica alta: $IRE > 20$

2.11.3 Cálculo aproximado del ISA

El ISA se define por el sumatorio de tres subíndices,

$$ISA = \sum_{i=1}^3 ISA_i$$

donde ISA_1 , es el subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas; ISA_2 , el subíndice de daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico e ISA_3 , el subíndice de alarma social.

Estos índices se evaluarán como se establece a continuación.

| | |
|---|---|
| 2.11.3.1 | Cálculo del subíndice ISA_1 |
| <div>(10) En la evaluación de este subíndice se deberá tener en cuenta la existencia, o no, de sistemas y planes de evacuación de las instalaciones.</div> <div>(11) P.ej.daños del tipo de accidente de tráfico grave.</div> | <p>Subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas. Se asignarán los siguientes valores en función de dicha posibilidad y alcance¹⁰,</p> <ul style="list-style-type: none">• Remoto, (0), es improbable que se produzcan daños a personas• Bajo, (3), la pérdida de vidas humanas es posible pero poco probable (accidental), afectando a pocas personas• Alto, (10), la pérdida de vidas humanas es muy probable pero afectando a un número no elevado de personas¹¹• Catastrófico, (20), la pérdida de vidas humanas y daños a las personas es tan grave que afecta a la capacidad de respuesta regional. |
| 2.11.3.2 | Cálculo del subíndice ISA_2 |
| | <p>Subíndice de daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico. Se asignarán los siguientes valores en función de la posibilidad, persistencia e irreversibilidad de daños en el medio ambiente o en el patrimonio histórico-artístico,</p> <ul style="list-style-type: none">• Remoto, (0), es improbable que se produzcan daños ambientales o al patrimonio.• Bajo, (2), daños leves reversibles (en menos de un año) o pérdidas de elementos de escaso valor.• Medio, (4), daños importantes pero reversibles (en menos de cinco años) o pérdidas de elementos significativos del patrimonio.• Alto, (8), daños irreversibles al ecosistema o pérdidas de unos pocos elementos muy importantes del patrimonio.• Muy Alto, (15) daños irreversibles al ecosistema, implicando la extinción de especies protegidas o la destrucción de espacios naturales protegidos o un número elevado de elementos importantes del patrimonio. |
| Comentario | <p>Se consideran daños irreversibles aquellos que no tienen recuperación, o, en el caso de que sea posible, requieran más de cinco años para la completa recuperación del ecosistema.</p> |
| 2.11.3.3 | Cálculo del subíndice ISA_3 |
| | <p>Subíndice de alarma social. Se asignarán los siguientes valores en función de la intensidad de la alarma social generada,</p> <ul style="list-style-type: none">• Bajo, (0), no hay indicios de que pueda existir una alarma social significativa asociada al fallo de la estructura• Medio, (5), alarma social mínima asociada a valores de los subíndices ISA_1 e ISA_2 altos.• Alto, (10), alarma social mínima debida a valores de los subíndices ISA_1, catastrófico e ISA_2, muy alto.• Máxima, (15), alarma social máxima |

2.11.4 Clasificación en función del ISA

En función del valor, del índice de repercusión social y ambiental, ISA, las obras marítimas se clasificarán en,

- S_1 , obras sin repercusión social y ambiental significativa, $ISA < 5$
- S_2 , obras con repercusión social y ambiental baja, $5 < ISA < 20$
- S_3 , obras con repercusión social y ambiental alta, $20 < ISA < 30$
- S_4 , obras con repercusión social y ambiental muy alta, $ISA > 30$

2.11.5 Cálculo del carácter operativo del tramo

Corresponde al promotor de la obra marítima, público o privado, especificar el carácter operativo del tramo de obra. A falta de una definición específica, este carácter se establecerá en función de los índices de repercusión económica operativo IREO y social y ambiental operativo, ISAO.

2.11.6 Cálculo aproximado del IREO

El Índice de Repercusión Económica Operativo, IREO, se evaluará mediante la ecuación siguiente,

$$IREO = (F) * [(D)+(E)]$$

donde, (D), (E) y (F), evalúan la simultaneidad, intensidad y adaptabilidad de la demanda a la situación de parada. Estos coeficientes se determinarán de la siguiente forma.

2.11.6.1 Coeficiente de simultaneidad, (D)

Caracteriza la simultaneidad del periodo de la demanda afectado por la obra y con el periodo de intensidad del agente que define el nivel de servicio. Esta simultaneidad se valorará por,

- Periodos no simultáneos, (0)
- Periodos simultáneos, (5)

2.11.6.2 Coeficiente de intensidad, (E)

Caracteriza la intensidad de uso de la demanda en el periodo de tiempo considerado, de acuerdo con el siguiente esquema,

- Poco intensivo, (0)
- Intensivo, (3)
- Muy intensivo, (5)

2.11.6.3 Coeficiente de adaptabilidad, (F)

Caracteriza la adaptabilidad de la demanda y del entorno económico al modo de parada operativa, según los siguientes valores,

- Adaptabilidad alta, (0)
- Adaptabilidad media, (1)

- Adaptabilidad baja, (3)

2.11.7 Clasificación en función del IREO

En función del valor del Índice de Repercusión Económica Operativo, IREO, las obras marítimas se clasificarán en,

- $R_{O,1}$, obras con repercusión económica operativa baja: $IREO \leq 5$
- $R_{O,2}$, obras con repercusión económica operativa media: $5 < IREO \leq 20$
- $R_{O,3}$, obras con repercusión económica operativa alta: $IREO > 20$

2.11.8 Cálculo aproximado del ISAO

El ISAO se define por el sumatorio de tres subíndices,

$$ISAO = \sum_{i=1}^3 ISAO_i$$

donde $ISAO_1$, es el subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas; $ISAO_2$, el subíndice de daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico e $ISAO_3$, el subíndice de alarma social.

El procedimiento a seguir será el mismo que el especificado en el apartado 2.11.3 para el cálculo aproximado del ISA.

2.11.9 Clasificación en función del ISAO

En función del valor, del índice de repercusión social y ambiental ISAO, los tramos de la obra marítima se clasificarán en:

- $S_{O,1}$, obras sin repercusión social y ambiental significativa, $ISAO < 5$
- $S_{O,2}$, obras con repercusión social y ambiental baja, $5 \leq ISAO < 20$
- $S_{O,3}$, obras con repercusión social y ambiental alta, $20 \leq ISAO < 30$
- $S_{O,4}$, obras con repercusión social y ambiental muy alta, $ISAO \geq 30$

Comentario

En la mayoría de las obras marítimas el ISAO será nulo, ya que, producida una parada operativa, cesará la causa del impacto ambiental, si es que lo hubiera. Sin embargo, algunas obras, p.ej. los emisarios submarinos y las tomas de agua para centrales térmicas o para plantas de desalinización, pueden ocasionar repercusiones sociales y ambientales significativas.

CAPITULO 3

Condicionantes de proyecto



3

CONDICIONANTES
DE PROYECTO

3.1

Introducción

El emplazamiento y la obra se pueden dividir en tramos, representativos de las escalas espaciales de variabilidad de los factores de proyecto, en particular de los predominantes. Análogamente, la vida de las diferentes fases de proyecto se puede dividir en intervalos de tiempo, representativos de las escalas temporales de variabilidad de los factores de proyecto. Un estado es el intervalo de tiempo en el que se puede admitir que cualquier manifestación del tramo de obra y del entorno es estacionaria en sentido estadístico. En cada fase de proyecto, la obra pasa por una secuencia temporal de estados caracterizados por diferentes valores de los factores de proyecto.

El proyecto de un tramo trata de responder a los condicionantes de proyecto, entre los que se incluyen,

- la ubicación espacial (emplazamiento) y temporal (fases de proyecto)
- los requisitos de explotación
- la geometría del tramo y del terreno
- las propiedades (parámetros) del medio físico y de los materiales
- los agentes que pueden interferir con la obra y el entorno y sus acciones

y verificar que cumple en todos los estados de proyecto los requisitos de seguridad, servicio y de uso y explotación. Es imposible verificar todos los estados posibles del tramo de obra; en primer lugar, porque no se conocen con certeza cuales van a ocurrir y, en segundo lugar, porque tampoco se conocen con certeza los parámetros y las variables de proyecto que actuarán en cada uno de ellos, ni su magnitud, ni, en su caso, dirección y sentido. Es necesario, por tanto, proporcionar unos criterios para clasificar y dar valores a los factores de proyecto, teniendo en cuenta su variabilidad espacial y temporal.

3.1.1

Contenidos y organización del capítulo

Este capítulo se dedica a la descripción de los parámetros que caracterizan, en un determinado emplazamiento y en un intervalo de tiempo, la geometría de la construcción y del terreno, las propiedades del medio físico, aire y agua, las del terreno y de los materiales de construcción y de las variables que caracterizan los agentes y sus acciones, sean cargas, deformaciones, movimientos impuestos, etc., que pueden afectar a la seguridad, el servicio y al uso y explotación de la obra marítima. El conjunto de todos ellos se denomina factores de proyecto. Esta descripción y caracterización se realiza teniendo en cuenta la incertidumbre y, en particular, cuantificando la variabilidad espacial y temporal de los distintos factores de proyecto.

El capítulo se inicia con la descripción de los parámetros para, seguidamente, describir los agentes y clasificarlos por su origen y función. A continuación se clasifican los factores de proyecto en función de su variabilidad temporal. Seguidamente se definen los diferentes tipos de valores que se pueden adscribir a un factor y se proporcionan los criterios para declarar un factor determinis-

ta o aleatorio. Después, se definen las clases estadísticas de valores que permiten desarrollar los tipos de combinación. Por último, se describen los estudios de los factores que todo proyecto debe contener. En la figura 3.1 se presenta la organización de este capítulo.

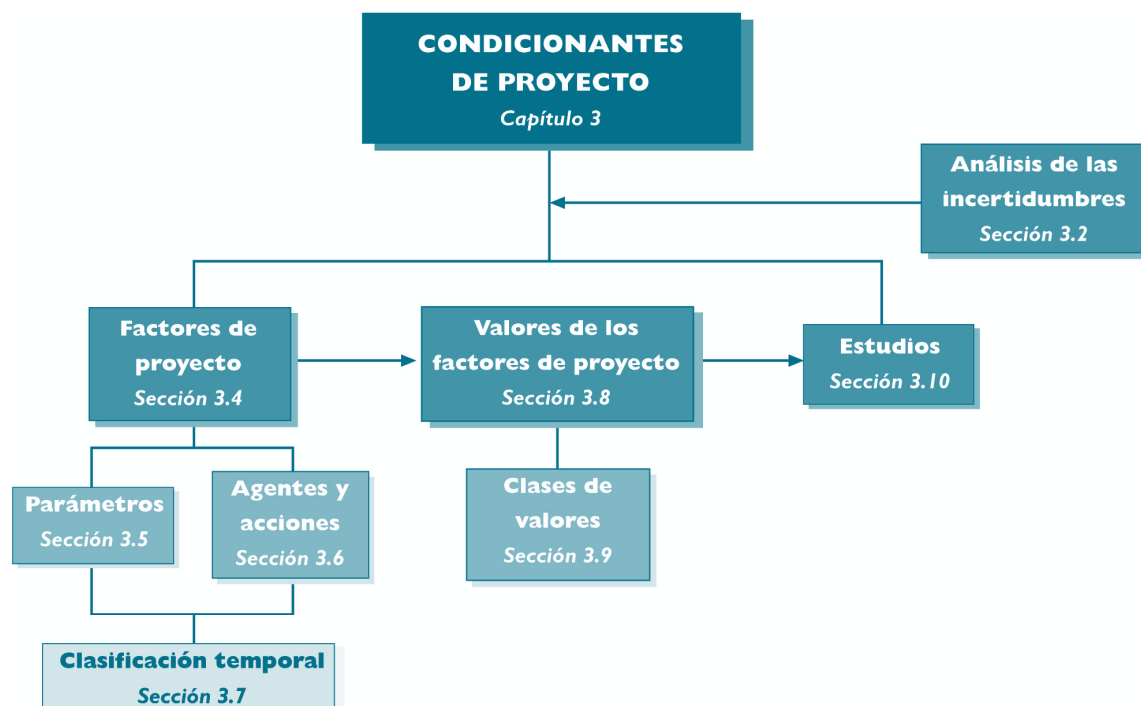


Figura 3.1:
Organización y
contenidos del
capítulo 3.

3.2 La Incertidumbre en el Proyecto

La decisión sobre el valor a asignar a un factor de proyecto conlleva incertidumbre. Si se espera que el valor asignado tenga pequeñas variaciones alrededor de una magnitud grande, y, si esas variaciones no son significativas en la seguridad, el servicio y la explotación de la obra, se puede ignorar la incertidumbre, adoptar un valor conocido y apropiado, y suponer que permanece constante, o que sigue una ley temporal conocida en el intervalo de tiempo.

Por el contrario, si no se cumple alguna de las dos condiciones anteriores, será necesario afrontar explícitamente la incertidumbre del factor o factores de proyecto y de los cálculos de verificación, y se deberá presentar en el estudio correspondiente, sección 3.10.

A tal efecto el análisis deberá considerar, al menos, las siguientes fuentes de incertidumbre, figura 3.2.

3.2.1 Fuentes de incertidumbre

En el proyecto de las obras marítimas la incertidumbre puede estar producida, entre otras, por la ocurrencia del fenómeno, los datos, el tratamiento estadístico y el modelo empleado.

3.2.2 Incertidumbre del fenómeno

Las manifestaciones extremas de la mayoría de los agentes del medio físico en un intervalo de

tiempo son sucesos raros cuya ocurrencia es necesario cuantificar. Asimismo, las manifestaciones extremas de la mayoría de los agentes del medio físico, varían considerablemente en el espacio. La ocurrencia y la magnitud o valor del factor de proyecto son inciertas, tanto temporal como espacialmente, y una manera de afrontar esta realidad es mediante el empleo de la probabilidad.

3.2.3

Incertidumbre en los datos

La mayoría de las magnitudes observadas tienen una variabilidad inherente al hecho observado o medido, con independencia del cuidado puesto en la medida. Además, el propio proceso de medida añade una cierta variabilidad que, puede reflejarse en forma de sesgo, ocasionada por un error sistemático en el instrumento, por el proceso de medida o de forma aleatoria. Se procurará calibrar apropiadamente los instrumentos lo que podrá reducir la incertidumbre asociada a la medida a unos límites tolerables.

3.2.4

Incertidumbre estadística

Una de las fuentes principales de incertidumbre es la información limitada de la que se dispone sobre una cantidad medida. Dado que tiempo y economía condicionan la cantidad de información que se puede recoger, esta información limitada implica incertidumbre acerca del hecho observado. Se deberá considerar la influencia de esta incertidumbre en el valor adoptado del factor de proyecto.

3.2.5

Incertidumbre del modelo

La ecuación de verificación o el ensayo de laboratorio empleado para analizar el comportamiento de la obra frente a unos determinados agentes, pueden representar solamente una parte de los fenómenos físicos partícipes. El modelo es una versión limitada o restringida de la realidad, desviándose de la misma. En consecuencia, las conclusiones obtenidas de la aplicación del modelo tienen un cierto margen de error o incertidumbre. Esta incertidumbre también está presente en el modelo de probabilidad, ya que, se elabora en función de una cierta cantidad de información. Se deberá considerar la influencia de esta incertidumbre en el valor adoptado del factor de proyecto y en el resultado.

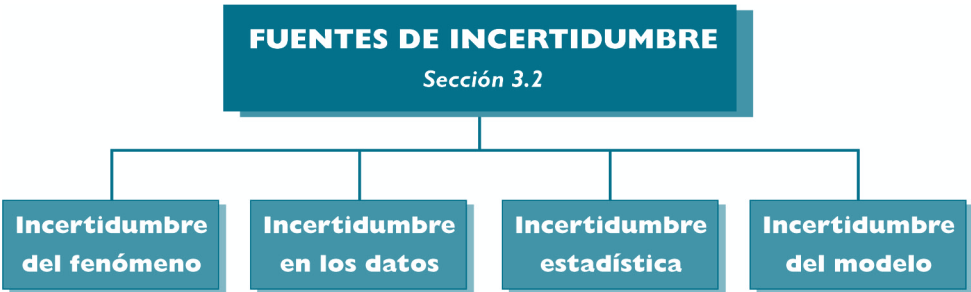


Figura 3.2:
Fuentes de incertidumbre en el proyecto.

3.3

Variabilidad Espacial y Temporal

El proyecto de una obra marítima, al igual que cualquier otra obra civil, se fundamenta en modelos matemáticos y físicos, los cuales sirven para proyectar y predecir su comportamiento a lo largo de su vida y para cuantificar los fenómenos físicos, químicos etc, que interfieren con ella. Para la aplicación de estos modelos se requiere información sobre los factores de proyecto que intervienen en ellos, directa o indirectamente. Por consiguiente, uno de los primeros pasos en el proyecto es la definición de los tramos de obra y de los intervalos de tiempo para los cuales los factores de proyecto se pueden considerar estadísticamente homogéneos y estacionarios.

3.3.1 Variabilidad espacial de los factores de proyecto

La magnitud (y la dirección, en su caso) de los factores de proyecto puede variar a lo largo de la obra. En este caso, se dividirá la obra en tramos en los cuales los factores de proyecto se puedan considerar variables aleatorias estadísticamente homogéneas y su valor (magnitud y/o dirección) estará asociado a la probabilidad de ser superado en el tramo. Valor y probabilidad de excedencia se relacionan por medio de la función de distribución de la variable aleatoria.

3.3.1.1 Correlación e interpolación espacial entre tramos

En algunas ocasiones se dispone de modelos matemáticos o físicos que evalúan un factor de proyecto en algunos de los tramos en los que se ha dividido el emplazamiento. Otras veces, se dispone de medidas del factor de proyecto en emplazamientos cercanos o en otros tramos. Esta información se puede utilizar para especificar el valor del factor de proyecto en otros tramos.

(1) A este respecto se recuerda que, en teoría, la aplicación de estos procedimientos estadísticos para el estudio de la variabilidad de un factor de proyecto en un tramo, requiere el cumplimiento de las hipótesis de homogeneidad en la media, en la función de covarianza, la isotropía estadística y la ergodicidad.

Para ello, siempre que sea posible, es recomendable establecer, entre los diferentes tramos la correlación espacial de los parámetros de los modelos probabilísticos y de los valores nominales asignados, siguiendo técnicas estadísticas¹, tales como la función de correlación espacial, el semi-variograma o el coeficiente de correlación espacial.

La aplicación de estas técnicas permite, además, realizar interpolaciones espaciales en regiones en las cuales no hay datos del factor o factores de proyecto disponibles.

3.3.2 Variabilidad temporal de los factores de proyecto

En un tramo de obra, la magnitud (y la dirección, en su caso) de los factores de proyecto puede variar en el intervalo de tiempo. En este caso, la vida útil del tramo se dividirá en intervalos de tiempo en los que los factores de proyecto se puedan considerar variables aleatorias estadísticamente estacionarias y su valor (magnitud y/o dirección) está asociado a la probabilidad de ser superado en el intervalo de tiempo. Valor y probabilidad de excedencia se relacionan por medio de la función de distribución de la variable aleatoria.

3.3.2.1 Correlación temporal, regresión y análisis multivariado

Para aplicar una ecuación de verificación de un modo de fallo es necesario definir el conjunto de factores de proyecto que pueden actuar simultáneamente en el estado de proyecto (estado límite). Es conveniente tener en cuenta la dependencia de uno o varios factores con uno de ellos,

(2) Debe entenderse que estas técnicas se desarrollan para estudiar la interdependencia entre factores de proyecto y no para establecer, a priori, una relación causa-efecto entre ellos

denominado factor de proyecto predominante o simplemente analizar la interdependencia entre varios factores de proyecto. Se recomienda, por tanto, utilizar, en el primer caso, técnicas estadísticas de regresión y, en el segundo, técnicas de análisis multivariado².

3.3.3 Determinismo y aleatoriedad

En un tramo y en un intervalo de tiempo, un factor de proyecto se podrá considerar determinista o aleatorio, dependiendo de su variabilidad con respecto a un valor representativo y de la sensibilidad del resultado de la ecuación de verificación a dicha variabilidad. A tal efecto, en el tramo de obra y en cada intervalo de tiempo, la variabilidad temporal del factor de proyecto se podrá acotar por medio de un intervalo de confianza, cuyos extremos sean los cuantiles, α y $(1 - \alpha)$, de la función de densidad respectivamente, adoptando, con carácter general, $\alpha = 0.05$.

En el caso en el que aquella sea pequeña y que la sensibilidad del resultado de la ecuación de verificación no sea significativa en el valor de la probabilidad de ocurrencia del modo, el factor de proyecto se podrá considerar determinista y su valor conocido. En otro caso, se considerará el factor de proyecto como una variable aleatoria con su función distribución, marginal, condicional o conjunta con otros factores de proyecto.

Comentario

En el término conocido se incluyen los casos en los que el valor se calcula a partir de una expresión matemática, fija y determinada de una o varias variables (p.ej. representativas de las coordenadas temporales y espaciales) o es un valor nominal.

3.4 Factores de Proyecto

Son un conjunto de parámetros, agentes y acciones con los que se define y se comprueba la seguridad, el servicio y la explotación de la obra y su entorno, figura 3.3. La magnitud (y dirección, en su caso) de los factores de proyecto y, en consecuencia, la respuesta estructural y formal de la obra y su explotación, evolucionan o pueden evolucionar en el tiempo.

3.4.1 Declaración del factor de proyecto

Durante el proceso de verificación de una alternativa de proyecto, y, en el momento en el que sea requerido, se debe declarar cada factor de proyecto como parámetro, agente o acción, en función del método, de la ecuación de verificación y de los datos disponibles u otras razones.

Comentario

La declaración de un factor como parámetro de proyecto o agente y acción, depende de la finalidad con la que vaya a ser utilizado. Por ejemplo, en la determinación del peso del bloque de hormigón en masa del manto principal de un dique en talud pueden intervenir, entre otros, las dimensiones geométricas del bloque, su densidad, y una altura de ola. En la verificación de la seguridad (estados límite últimos) de la obra en la fase de proyecto servicio, se puede suponer que la densidad del hormigón en masa es conocida, por lo que se declarará parámetro de proyecto, y así deberá ser en todo el proceso de verificación.

Sin embargo, en algunos casos, puede ser necesario, verificar la evolución del peso del bloque en la vida útil de la obra. Éste, puede variar porque cambia la forma del bloque, debido a golpes, redondeo, por modificaciones en su superficie por adherencia de elementos biológicos, por la pérdida de compacidad y aumen-

to de la porosidad, etc. Algunos de estos sucesos pueden producir variaciones temporales del valor de la densidad del hormigón, las cuales no son conocidas a priori. Para tener en cuenta su influencia en la seguridad de la obra, la densidad del hormigón se tomará como un agente (del material) y se verificará que en la fase de proyecto, la densidad no es menor que un valor umbral por debajo del cual se considera que se ha producido el fallo. Este modo de fallo se deberá adscribir a un estado límite de servicio.

3.5 Parámetros de Proyecto

(3) Si bien el terreno es un agente del medio físico, por su importancia en el proyecto y porque, tradicionalmente, su definición y caracterización difieren de aquellos correspondientes a la atmósfera y al mar, se define explícitamente el agente terreno separado de los restantes agentes del medio físico.

Sirven para definir y caracterizar la geometría de la obra y del terreno y las propiedades del medio físico³, del terreno y de los materiales. La figura 3.3 es un resumen de los contenidos de esta sección. Los parámetros de proyecto se podrán ordenar según se establece en los siguientes apartados.

3.5.1 Parámetros geométricos

Definen la geometría de los diferentes elementos estructurales de la obra y del terreno, así como su ubicación en el territorio.

3.5.2 Parámetros del medio físico, terreno y materiales

Se emplean para identificar y definir las propiedades y características del medio físico, terreno y de los materiales de construcción.

3.5.2.1 Clasificación

Estos parámetros se podrán clasificar en,

- Parámetros de identificación: permiten la identificación y el reconocimiento
- Parámetros de estado: especifican el estado en el que se encuentra el medio, el terreno o el material
- Parámetros mecánicos: definen su comportamiento mecánico
- Otros parámetros: ayudan en la descripción de comportamientos específicos

Comentario

La finalidad de clasificar los parámetros de proyecto es ayudar a establecer las propiedades del medio físico, del terreno y de los materiales, así como a ordenar las bases de datos de tal manera que sean fácilmente accesibles y puedan, en su caso, completarse con nueva información. Además, la declaración de un factor como parámetro o como agente y acción, ayudará en la comparación de diferentes alternativas de proyecto.

3.5.2.2 Interferencia con la obra y con el medio

En la identificación y caracterización de los parámetros de proyecto se deberán tener en cuenta los cambios esperables, especialmente, en las propiedades del medio físico y el terreno, inducidos por la presencia de la obra y por las actividades humanas e industriales desarrolladas.

3.5.2.2.1 Influencia en la durabilidad

(4) En la Instrucción de Hormigón Estructural, apartado 8.2, se detallan las clases específicas de exposición ambiental relacionados con los procesos de degradación de las armaduras y hormigones. Estas clases serán la guía en el análisis de la durabilidad de las propiedades de algunos parámetros de proyecto.

A este respecto se tendrá en cuenta la influencia del medio físico al que estarán sometidos los materiales de construcción y del terreno y que pueden producir la degradación de sus propiedades y por tanto comprometer su durabilidad⁴.

3.5.3 Parámetros del terreno

Para cada alternativa de proyecto se definirán las propiedades del terreno, teniendo en cuenta su variabilidad temporal y espacial, a partir de los resultados de la investigación geotécnica, estudios geológicos, datos disponibles, etc.

Comentario

En el ámbito geotécnico, para tener en cuenta la evolución temporal de las propiedades del terreno, es habitual considerar dos estados extremos del suelo: corto plazo, cuando el agua no ha podido moverse (sin drenaje) y largo plazo, cuando el agua intersticial ha alcanzado el régimen permanente. En el ámbito climático también se suelen utilizar corto y largo plazo para describir los agentes climáticos. En la sección 2.4, intervalos de tiempo, al objeto de evitar posibles confusiones, se proponen las denominaciones "corta duración y larga duración" para describir la variabilidad temporal de los factores de proyecto.

3.5.3.1 Algunos parámetros del terreno

(5) En la R.O.M.0.5 se proporciona una descripción detallada de los parámetros del terreno, suelos y rocas.

Entre otros, a título indicativo, se podrán considerar los siguientes parámetros del terreno⁵,

1. Parámetros de identificación: definen ciertas características que permiten clasificar los terrenos en grupos (estratos o niveles) con similar comportamiento. Entre ellos cabe citar la composición mineralógica en las rocas, y la granulometría y plasticidad de los finos en los suelos.
2. Parámetros de estado: definen el estado en el que se encuentra el terreno en el momento correspondiente a la situación de proyecto considerada. Son los relativos a su compacidad (densidad seca) y humedad (humedad natural y grado de saturación). Pueden incluirse como parámetro de estado, la presión intersticial (presión del agua en los poros) y la succión en los suelos semisaturados (presión del aire menos presión del agua en los poros del terreno).
3. Parámetros mecánicos: Definen el comportamiento del terreno frente a sollicitaciones exteriores. Principalmente son, la resistencia al corte sin drenaje en suelos cohesivos, los parámetros resistentes del modelo de Mohr-Coulomb en presiones efectivas, los parámetros de deformabilidad del esqueleto del suelo (módulos de elasticidad y de Poisson en modelos elásticos o índices de compresión y entumecimiento en el modelo edométrico) y los parámetros que rigen el movimiento del agua intersticial (permeabilidad, p.ej. cuando la ley de Darcy es aplicable).
4. Otros parámetros: Definen el comportamiento del terreno en situaciones específicas, expansividad, dispersividad, alterabilidad, agresividad, etc.

3.5.4 Parámetros del aire y del agua

Para cada alternativa de proyecto se definirán las propiedades del aire y del agua, teniendo en cuenta su variabilidad temporal y espacial, a partir de los datos disponibles, investigación climática, modelos analíticos o numéricos y ensayos, etc.

3.5.4.1 Algunos parámetros del aire y del agua

Entre los parámetros del aire y del agua⁶ se podrán considerar los siguientes,

1. Parámetros de identificación: Definen los componentes del aire y del agua y su contenido en sustancias y partículas
2. Parámetros de estado: Definen el estado en que se encuentran el fluido y sus componentes, tales como temperatura, salinidad, densidad, nutrientes, materia orgánica, etc.
3. Parámetros mecánicos: Definen el comportamiento del fluido frente a cambios tensionales. Entre ellos se encuentran: viscosidad cinemática, ν ; módulo de Poisson, velocidad de propagación del sonido, calor específico, etc.
4. Otros parámetros: definen el comportamiento del fluido en condiciones específicas, p. ej. en régimen turbulento, mediante la viscosidad de remolino, ν_t , los coeficientes de dispersión, etc.

3.5.5 Parámetros de los materiales de construcción

Para cada alternativa de proyecto se definirán las propiedades de los materiales, teniendo en cuenta su variabilidad temporal y espacial, a partir de los datos disponibles o normativa vigente, modelos analíticos o numéricos y ensayos, etc.

3.5.5.1 Algunos parámetros representativos

A título indicativo, los parámetros de los materiales se podrán ordenar en parámetros: de identificación, de estado, mecánicos y específicos. Entre otros, se podrán considerar los siguientes:

1. Escolleras naturales
 - Identificación: origen, composición mineralógica, granulometría
 - Estado: índice de huecos, grado de saturación, peso específico, grado de meteorización, etc.
 - Mecánicos: resistencia a compresión, resistencia a tracción indirecta, ángulo de rozamiento interno, deformabilidad, etc.
 - Específicos: resistencia a ciclos de humedad-sequedad, resistencia al desgaste, resistencia al ataque de sales, etc.
2. Hormigón
 - Identificación: clase de hormigón, composición
 - Estado: peso específico, compacidad, permeabilidad, absorción, etc.
 - Mecánicos: resistencia característica a compresión a 28 días, resistencia a tracción, módulo de deformación longitudinal, instantáneo y diferido, coeficiente de Poisson, etc.
 - Específicos: comportamientos diferidos retracción y fluencia; resistencia a ciclos de humedad

y sequedad; erosionabilidad superficial; resistencia a ciclos de carga y descarga rápidos, desgaste, docilidad, etc.

3. Aceros

- Identificación: denominación y composición
- Estado: peso específico, etc.
- Mecánicos: límite elástico, carga unitaria de rotura, alargamiento de rotura, resiliencia, etc.
- Específicos: resistencia a la corrosión, comportamiento a ciclos de humedad-sequedad y ciclos de carga, relación en ensayo de carga unitaria y límite elástico de rotura, etc.

4. Otros materiales: Pavimentos, metales, etc.

Comentario

En España, las especificaciones técnicas de los materiales para la construcción están reguladas, entre otras, por las siguientes Recomendaciones, Normas e Instrucciones,

- Instrucción de hormigón estructural, EHE
- Estructuras de acero en la edificación
- ROM 0.1, descripción y caracterización de los materiales de construcción (en redacción)

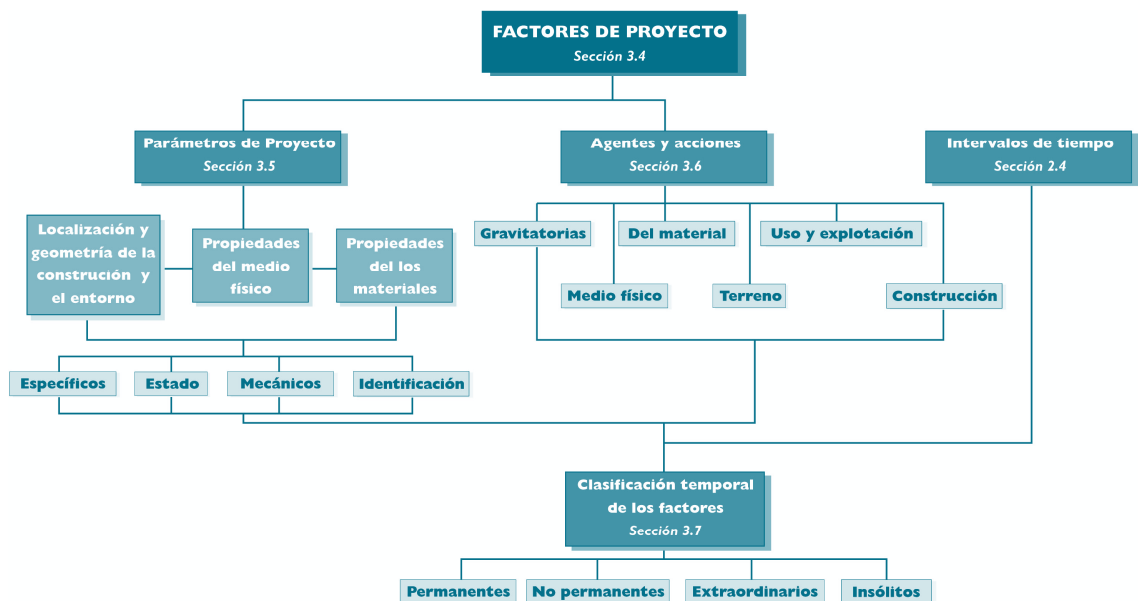


Figura 3.3:

Factores de proyecto: clasificación por su origen y función y clasificación temporal.

3.6 Agentes y Acciones

(7) A diferencia de «paciente», el agente es lo que realiza la acción en vez de sufrirla. Los agentes ponen en acción (en actividad) la obra, los elementos de la obra y el entorno.

Agente es todo lo que puede ejercer o producir en la obra o sobre la misma y su entorno efectos significativos en la fiabilidad, funcionalidad⁷ y operatividad.

Acción es cualquier efecto que un agente puede producir en la obra y su entorno como resultado de su mutua interferencia. En el término acción, por tanto, se pueden incluir, la fuerza, la carga aplicada sobre la estructura, los movimientos impuestos, las deformaciones impuestas, etc.

Comentario

El agente se define independientemente de la tipología de la obra o elemento. Por el contrario, para definir la acción, sea carga, movimiento o deformación impuesta, además del agente, es necesario tener en cuenta la obra, sus características geométricas (masa, volumen y formas), los materiales con los que está construida y el entorno en el que se encuentra. La acción, en cualquiera de sus manifestaciones, es el resultado de la interferencia agente-obra y entorno.

Dependiendo del emplazamiento, del tramo y la tipología de la obra y del intervalo de tiempo, algunos agentes podrán existir o no existir, y podrán actuar o no actuar. Según la tipología de la obra, del medio físico y de los materiales, estos agentes, en general, podrán o no, producir en la obra acciones tales como, cargas o fuerzas, movimientos impuestos y deformaciones impuestas, etc. Estas acciones se evalúan mediante uno o varios términos de la ecuación de verificación. La ecuación de verificación de un modo de fallo o parada es un funcional de términos de uno o varios factores de proyecto. Los valores de los factores que intervienen en los términos deben ser simultáneos y compatibles. Para ayudar en el establecimiento de factores simultáneos con valores compatibles, los agentes y, por extensión, los factores de proyecto, se ordenan y se clasifican por su origen y función.

3.6.1

Clasificación por el origen y la función

(8) Esta clasificación es heterogénea y no es exhaustiva, pero, a efectos prácticos, sirve de ayuda para establecer una secuencia de trabajo; por otro lado, se ciñe a la organización de los agentes que, con el paso del tiempo, se ha consolidado en los ámbitos ingenieriles.

Los agentes de proyecto se podrán clasificar⁸ por su origen o función en, figuras 3.3 y 3.4,

- Gravitatorios, q_g
- Medio físico, q_f
- Terreno, q_t
- Uso y explotación, q_v
- Asociados al material, q_m
- Construcción, q_c

Comentario

En estas Recomendaciones los agentes se citan con letras minúsculas, mientras que las acciones, sean cargas, deformaciones, etc. se identifican con letras mayúsculas.

3.6.1.1

Otros agentes

En función de la especificidad de la obra, además de los agentes dados en la clasificación anterior, se podrán proponer otros agentes con la debida justificación.

3.6.2

Agente gravitatorio, q_g

(9) Estas acciones son las que habitualmente se consideran producidas por el agente gravitatorio. No obstante, la gravedad aparece de forma explícita en otras acciones cuyo origen se puede identificar con la ocurrencia de otro agente, p.ej. el empuje o fuerza producida por el oleaje sobre un muro.

Este agente está asociado a la existencia de la gravedad terrestre. Estos agentes pueden ocasionar dos tipos de acciones: peso propio $Q_{g,1}$, y cargas o pesos muertos $Q_{g,2}$ ⁹.

Comentario

A efectos de estas Recomendaciones, el peso propio es la carga producida por los pesos de los diferentes elementos estructurales. Las cargas muertas son los pesos de los elementos no resistentes en sentido estructural, pero incluidos en la estructura resistente de forma permanente, tales como los pavimentos o las adherencias marinas. Las adherencias marinas evolucionan con el tiempo con lo que, el peso muerto puede ser, en algunas condiciones, una acción no permanente.

3.6.3 Agentes del medio físico, q_f

Proviene del entorno en el que se ubica la obra y se podrán clasificar en,

1. Climáticos, q_{fc}
2. Hidráulicos, q_{fh}
3. Sísmicos, q_{fs}
4. Biogeoquímicos, q_{fb}
5. Térmicos, q_{ft}

3.6.3.1 Agentes climáticos, q_{fc}

Las manifestaciones asociadas a la dinámica atmosférica se denominan agentes climáticos atmosféricos; aquellos otros, asociados a las manifestaciones de la dinámica marina se denominan agentes climáticos marítimos. Las acciones climáticas son aquellas debidas a la actuación directa de los agentes de origen climático sobre la estructura resistente o sobre elementos no estructurales.

Todo proyecto de obra marítima deberá llevar el anejo "Estudio de los agentes climáticos", en el cual se detallen los datos y los métodos utilizados para una correcta descripción y evaluación de los agentes climáticos incluyendo los ensayos de laboratorio, medidas de campo y datos utilizados.

3.6.3.1.1 Agentes climáticos, q_{fci} , $i = 1, 2, 3$

Estos agentes se podrán ordenar en los siguientes grupos,

- Aire en reposo, presión atmosférica y movimiento permanente y uniforme del aire, $q_{fc,1}$
- Movimiento variado y variable del aire, $q_{fc,2}$; entre ellas, se incluye el viento, las variaciones espaciales y temporales de presión atmosférica, etc.
- Precipitación, lluvia, nieve y hielo, $q_{fc,3}$

3.6.3.1.2 Agentes climáticos, q_{fci} , $i = 4, 5, 6$

Estos agentes se podrán ordenar en los siguientes grupos,

- Agua en reposo y movimiento permanente y uniforme del agua, $q_{fc,4}$
- Movimientos variado y variable del agua, $q_{fc,5}$, entre ellos, se incluyen las corrientes, las variaciones espaciales y temporales de densidad, etc.
- Movimientos oscilatorios⁽¹⁰⁾, corto ($3 < T(s) < 30$), intermedio ($1/2 < T(\text{min}) < 120$), largo ($T(h) > 2$), $q_{fc,6}$

(10) Los intervalos de periodos deben considerarse a título indicativo; en cada caso, se definirá cada banda oscilatoria en función del objetivo de verificación.

(11) T es un periodo representativo del movimiento oscilatorio

3.6.3.1.3 Agentes hidráulicos, q_{fhi} , $i = 1, 2$

Incluyen los asociados a la presencia de fluidos, líquidos o gases, no relacionados con los agentes climáticos, marítimos y atmosféricos, en reposo y en movimiento variable.

- Fluido en reposo, $q_{fh,1}$
- Fluido en movimiento, $q_{fh,2}$

Comentario

Cuando los agentes hidráulicos estén asociados al uso y explotación del tramo de obra o de las instalaciones, se incluirán en la relación de uso y explotación. Por ejemplo el gasóleo en un depósito es un fluido no relacionado con los agentes climáticos pero su consideración debe hacerse como agente de uso y explotación. En otros casos, p. ej. en el terreno, el fluido en reposo o en movimiento permanente es un agente hidráulico del medio físico.

3.6.3.3 Agentes sísmicos, $q_{fs,i}$, $i = 1, 2$ y 3

Incluyen los asociados a los movimientos sísmicos. Éstos pueden producir oscilaciones en las obras, provocando acciones que se pueden ordenar en: cargas directas $Q_{fs,1}$, movimientos impuestos o vibraciones $Q_{fs,2}$, y deformaciones impuestas $Q_{fs,3}$.

3.6.3.4 Agentes biogeoquímicos, $q_{fb,i}$, $i = 1, 2$

Incluyen aquellos procesos biogeoquímicos que pueden provocar variaciones espaciales y temporales en los factores de proyecto $q_{fb,1}$, pudiendo imponer además, deformaciones y alteraciones en la geometría de la obra y en el terreno $q_{fb,2}$.

3.6.3.5 Agentes térmicos, $q_{ft,i}$, $i = 1, 2$

Son todos aquellos que pueden ocasionar gradientes térmicos espaciales $q_{ft,1}$, y gradientes térmicos temporales $q_{ft,2}$, en la obra y sus materiales, en el medio físico y en el terreno.

3.6.4 Agentes del terreno, q_{ti} , $i = 1, 2$

El terreno se considera como agente cuando pueda provocar acciones tales como, presiones, empujes y demás esfuerzos, movimientos y deformaciones sobre los distintos elementos de una estructura resistente. Estas acciones se podrán ordenar según sean debidas a su actuación directa $Q_{t,1}$, (por ejemplo empujes sobre muros) o indirecta debidas a movimientos del terreno $Q_{t,2}$, (por ejemplo efectos parásitos en pilotes).

3.6.5 Agentes de uso y explotación, q_{vi} , $i = 1, 2$ y 3

Son aquellos derivados del servicio y normal uso de la estructura resistente, tales como el almacenamiento de mercancías, $q_{v,1}$, el movimiento de mercancías y tráfico, $q_{v,2}$, incluyendo la manipulación, el transporte y la operatividad del buque, $q_{v,3}$, tales como el atraque, el amarre, la carena y la botadura y varada del buque.

3.6.6 Agentes asociados al material, q_{mi} , $i = 1, 2$

Se incluyen en agentes asociados al comportamiento físico, mecánico, químico, térmico y biológico de los materiales de construcción que pueden provocar cambios en sus propiedades y, en consecuencia, producir acciones sobre la obra o en sus elementos. Por conveniencia, aunque no por necesidad, estos agentes asociados a las propiedades de los materiales de construcción se podrán ordenar en térmicos, $q_{m,1}$ y reológicos, $q_{m,2}$.

Comentario

Algunos agentes térmicos provienen de los procesos químicos y termodinámicos desarrollados en el material, p.ej. el hormigón, para adquirir sus propiedades resistentes. De manera análoga, los agentes reológicos están producidos por la evolución temporal de las propiedades del material. Estos agentes pueden

provocar, al menos tres modalidades de acción: cargas, movimientos y deformaciones impuestas que, por su origen, su magnitud depende del tiempo y del material.

3.6.7 Agentes asociados al método constructivo, q_c

Son aquellos asociados y debidos, específicamente, a los distintos procesos que, durante la construcción,fabricación,transporte,montaje y desmontaje, reparación o desmantelamiento de la obra o de alguno de sus elementos pueden producir acciones, instantáneas, temporales, transitorias, permanentes o residuales sobre ellos.

Para cada una de las alternativas de proyecto deberá realizarse un estudio del método construc-tivo, considerando los procedimientos y medios necesarios para la ejecución de la obra, sea cons-trucción, reparación o desmantelamiento.

Si durante la ejecución se esperan acciones que influyan de forma significativa en la seguridad de la obra, ésta se deberá verificar tal y como se indica en la sección 4.10.

3.6.7.1 Modificaciones en el método constructivo

Si el método constructivo adoptado en la construcción de la obra es diferente del considerado en el proyecto y se esperan acciones que influyan de forma significativa en la seguridad de la obra, ésta se deberá verificar de acuerdo con el procedimiento aplicado en en esta ROM.

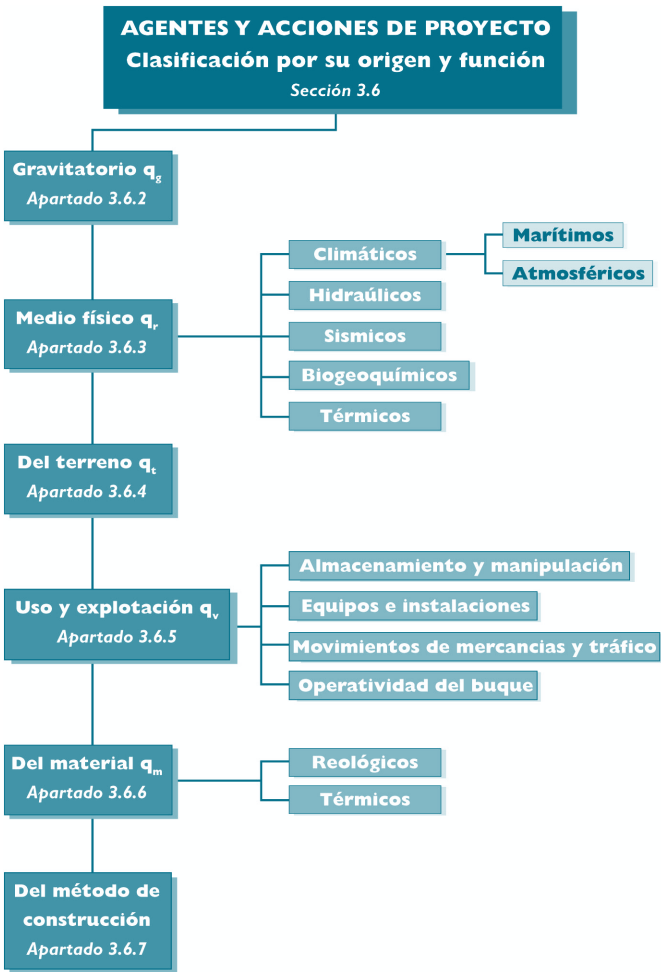


Figura 3.4:
Clasificación de
los agentes y
sus acciones
por su origen y
función.

3.7

Clasificación Temporal

Para seleccionar los factores de proyecto que en un intervalo de tiempo, pueden intervenir simultáneamente en la ecuación de verificación de un modo, se recomienda emplear la clasificación temporal de los agentes y sus acciones, de acuerdo con los siguientes criterios.

Comentario

La clasificación temporal se aplica a los agentes y a sus acciones, pero puede también ser utilizada para clasificar los parámetros de proyecto cuando se considere su variabilidad temporal. Por tanto, con carácter general, la clasificación temporal se puede aplicar a todos los factores de proyecto.

3.7.1

Criterios para la clasificación

En cada intervalo de tiempo, sea de corta duración, larga duración o fase de proyecto, los factores de proyecto se pueden clasificar en función de,

1. la probabilidad de excedencia de un valor umbral representativo del factor de proyecto y cuya ocurrencia sea significativa para la seguridad, el servicio y la explotación de la obra, de sus elementos o del entorno.
2. la persistencia o tiempo medio de la excedencia de aquél valor umbral.

3.7.1.1

Clasificación de los factores de proyecto

En un intervalo de tiempo de duración T_L , en función de la probabilidad de excedencia del valor umbral y de la persistencia o tiempo medio de la excedencia, los factores de proyecto se clasifican en, figura 3.3,

- Permanentes
- No Permanentes
- Extraordinarios
- Insólitos

3.7.1.1.1

Factores de proyecto permanentes

Serán aquellos cuya probabilidad de excedencia sea igual a la unidad y, cuyo tiempo medio de ocurrencia o de actuación t_m , sea aproximadamente igual a la duración del intervalo, es decir $t_m \approx T_L$.

3.7.1.1.2

Factores de proyecto no permanentes

Serán aquellos cuya probabilidad de excedencia sea próxima a la unidad y, cuyo tiempo medio de actuación, t_m , sea menor que la duración T_L , es decir $t_m < T_L$.

3.7.1.1.3

Factores de proyecto extraordinarios

Serán aquellos cuya probabilidad de excedencia sea considerablemente menor que la unidad y menor que la probabilidad de excedencia del valor característico del factor de proyecto predominante¹² y, cuyo tiempo medio de actuación t_m , sea mucho menor que la duración T_L , es decir $t_m \ll T_L$.

(12) El valor característico y el factor de proyecto predominante se definen en la sección 3.8

3.7.1.1.4 Factores de proyecto insólitos

Serán aquellos cuya probabilidad de excedencia sea mucho menor que la unidad y que la probabilidad de excedencia del valor característico del factor de proyecto predominante y , cuyo tiempo medio de actuación, t_m , sea mucho menor que la duración T_L , es decir $t_m \ll T_L$.

Comentario

Por lo general los factores de proyecto extraordinarios estarán asociados a las condiciones de trabajo extremas, mientras que los factores de proyecto insólitos se considerarán en las condiciones de trabajo excepcionales.

3.7.2 Tabla resumen de la clasificación temporal

De acuerdo con los apartados anteriores, la clasificación temporal de los factores de proyecto se resume en la tabla 3.1

Tabla 3.1:
Clasificación temporal de los factores de proyecto

| Duración | Probabilidad de excedencia | | |
|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| | Prob ≈ 1 | Prob < 1 | Prob $\ll 1$ |
| $t_m \approx T_L^{(1)}$ | Permanente | | |
| $t_m < T_L$ | No permanente | | |
| $t_m \ll T_L$ | | Extraordinario ⁽²⁾ | Insólito ⁽³⁾ |

- Notas a la
tablas 3.1:
1. T_L representa la duración del intervalo de tiempo en el cual se realiza la clasificación temporal

2. Además, la probabilidad de excedencia debe ser menor que la probabilidad de excedencia del factor de proyecto predominante

3. Además, la probabilidad de excedencia debe ser mucho menor que la probabilidad de excedencia del factor de proyecto predominante

3.7.3 Presentación de un factor de proyecto

Los factores de proyecto permanentes actúan durante todo el intervalo de tiempo. Sin embargo los factores de proyecto no permanentes,extraordinarios o insólitos,actúan en algunas ocasiones durante el intervalo de tiempo. En algunos casos, el instante de presentación del factor de proyecto en el intervalo de tiempo será conocido; en otros, no es predecible. En estos casos, tampoco se puede predecir ni la duración ni la magnitud del factor de proyecto. Por ello, tanto la presentación como el valor de estos factores deberán ser tratados como variables aleatorias y , en cada caso, adoptar un modelo de probabilidad para describir el instante de presentación del factor en el intervalo de tiempo.

Comentario

En muchas ocasiones se podrá considerar que el instante de presentación de un factor de proyecto no permanente, extraordinario o insólito,es una variable aleatoria con función de distribución uniforme en el intervalo de tiempo,es decir que la presentación en cualquier instante de tiempo en el intervalo es igualmente probable. No obstante, en casos específicos, p.ej.la ocurrencia de temporales excepcionales o sucesos "raros", esta simplificación puede ser incorrecta.

3.7.3.1 Presentación de un factor como un suceso raro

La presentación de algunos factores de proyecto, en general relacionados con procesos naturales

en condiciones extremas, tales como los agentes del medio físico climáticos, o la arribada de barcos, puede considerarse como un suceso estadísticamente raro, por lo que podrá describirse, entre otras, por una distribución de Poisson, cuyo parámetro es el número medio de ocurrencias del factor en el intervalo de tiempo.

3.8 Valores de un Factor de Proyecto

En el ámbito de estas Recomendaciones se definen varios valores de los factores de proyecto dependiendo, entre otras razones, del método de verificación. Algunos de ellos son: valor nominal, valor representativo, valores característicos superior e inferior, valores máximo y mínimo, valor de cálculo, valor de comprobación, etc. El valor de un factor de proyecto se puede asignar de forma nominal, a partir de un modelo de probabilidad o por algún otro procedimiento, como puede ser la experiencia previa, un prediseño, experimentación, etc, figura 3.5.

Comentario

Para determinar el valor de un factor a partir de su modelo de probabilidad se procede de la siguiente manera. De una o varias muestras y mediante inferencia estadística se obtiene un modelo de probabilidad a partir del cual, se selecciona un valor del factor de proyecto. Este proceso es inductivo puesto que, de una o varias muestras se induce el comportamiento de la población, se infiere un modelo probabilístico y, a partir de él, se predice el comportamiento del mismo.

Otras veces, el valor del factor se puede determinar nominalmente o se selecciona en función de un prediseño, de un cálculo, de la experiencia, de datos previos o está establecido en la normativa vigente. En su caso, se puede suponer un modelo de probabilidad el cual, una vez ejecutada la obra, debe de ser comprobado. A partir de él, se pueden definir otros valores del factor de proyecto, tal y como se detalla en la sección siguiente. Este procedimiento es deductivo ya que, supuesta la función de distribución del factor de proyecto, ésta y los valores asignados se comprueban mediante una campaña de toma de muestras.

En esta sección se definen diversos valores de un factor de proyecto los cuales se emplean en el procedimiento de verificación, tal y como se describe en el capítulo 4.

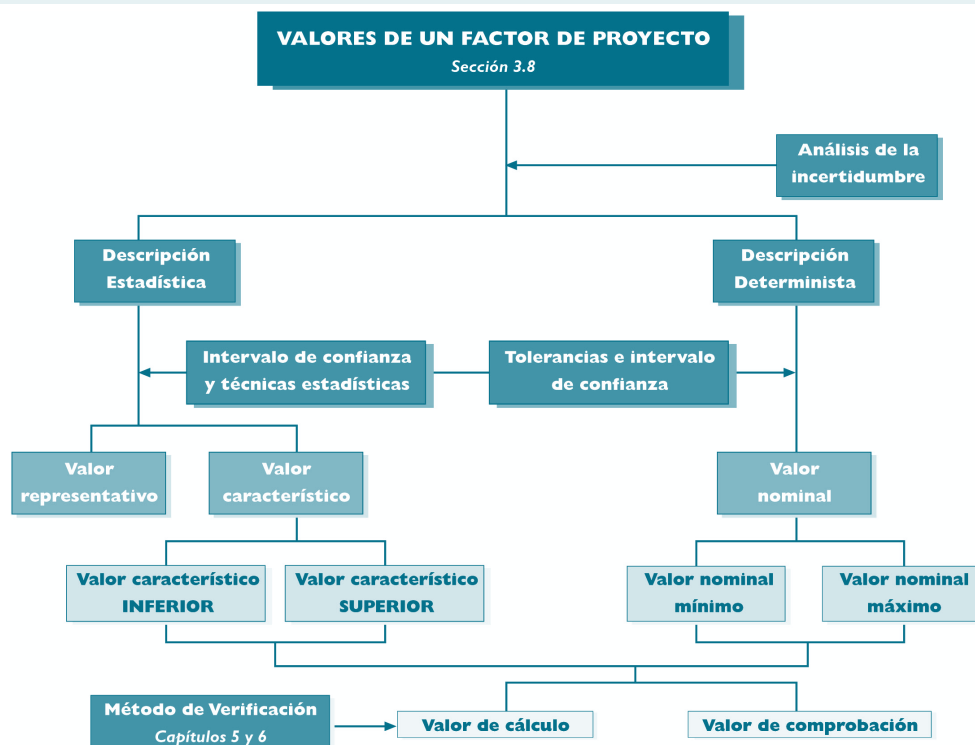


Figura 3.5:
Valores de un factor de proyecto.

3.8.1 Valor definido a partir de un modelo de probabilidad

Cuando el valor del factor de proyecto se selecciona de la función de distribución de la población, éste se corresponde con un cuantil o con un descriptor estadístico de dicha función. Entre otros, se considerarán los siguientes valores.

3.8.1.1 Valor representativo

Es el valor del cuantil que proporciona un orden de magnitud del valor que el factor de proyecto puede tomar en la verificación de los modos.

3.8.1.2 Valor característico

Es el principal valor representativo del factor de proyecto.

3.8.1.2.1 Valor característico superior e inferior

Para factores de proyecto acotados en un intervalo de confianza, los valores extremos del intervalo se denominan valores característicos superior e inferior, respectivamente.

3.8.1.2.2 Intervalo de confianza

Salvo prescripción de otra cosa en las Recomendaciones, Normas e Instrucciones específicas, los valores característicos superior e inferior de un factor de proyecto se determinarán como los valores extremos del intervalo de confianza mínimo, $(1 -) = 0.90$.

3.8.2 Valor sin modelo de probabilidad

El valor del factor se definirá por procedimientos no estadísticos, tales como experiencia previa, prediseño, cálculos, normativa vigente, etc.

Comentario

El valor seleccionado no tiene, en principio, un significado estadístico, aunque cuantifique un factor de proyecto que sea aleatorio. Este procedimiento suele emplearse para dar valor a parámetros de proyecto de elementos geométricos, parámetros de materiales, agentes de uso y explotación tales como tren de cargas de grúas, sobrecargas de almacenamiento, etc. o factores de proyecto cuyo valor real no se conoce hasta que se ejecute la obra. Por ello, en algunos casos, una vez ejecutado, será necesario comprobar mediante una campaña de medidas realizada a tal efecto, que el valor adscrito al factor es correcto.

3.8.2.1 Valor nominal

(13) En parámetros geométricos es la dimensión del elemento a construir; en parámetros de los materiales, puede ser la resistencia mecánica, etc.

Es el valor que se adjudica en la definición del factor de proyecto¹³ en todos aquellos casos en los que aquél no se seleccione a partir de su función de distribución. A todos los efectos, este valor nominal será el valor representativo del factor de proyecto.

3.8.2.1.1 Modelo probabilístico a partir del valor nominal

Cuando sea necesario o esté establecido en las Recomendaciones, Normas e Instrucciones espe-

cíficas, bien por experiencia previa, cálculo analítico o numérico, o simplemente, como hipótesis de trabajo, se podrá adoptar un modelo probabilístico o función de distribución del factor de proyecto que permita la definición de otros valores del factor de proyecto. En este caso, será necesario definir la relación entre el valor nominal del factor de proyecto y los descriptores estadísticos del modelo de probabilidad.

La definición de otros valores del factor de proyecto, tales como los valores característicos, se ajustará a lo establecido en los apartados 3.8.1.2 y siguientes.

3.8.3 Valores mínimo y máximo

En los casos en que los factores de proyecto, tales como los parámetros geométricos, las propiedades de los materiales de construcción, algunos agentes de uso y explotación, etc., deban cumplir unos valores mínimos o máximos, que dependen, entre otros, del modo de fallo o de parada operativa a verificar, del estado límite y de las condiciones de trabajo, su determinación se ajustará a lo siguiente:

Cuando el factor de proyecto esté definido mediante un modelo de probabilidad, los valores máximo y mínimo se determinarán estadísticamente, bien como valores característicos superior e inferior del intervalo de confianza o por estadísticos de orden.

Cuando el factor de proyecto haya sido definido mediante un valor nominal, será necesario proporcionar la relación entre éste valor y los valores máximos o mínimos α , suponer una función de distribución del factor y definir éstos por un intervalo de confianza o como estadísticos de orden. En general, el nivel del confianza no será inferior al 0.90.

Comentario

Estos valores pueden ser impuestos por el promotor de la obra o porque sean de obligado cumplimiento, debiendo ajustar los valores a lo establecido por aquél o por las Recomendaciones, Normas e Instrucciones¹⁴ específicas, respectivamente.

(14) En la Instrucción EHE, artículo 30.5, se acota la resistencia a compresión de proyecto de los hormigones en masa y armados o pretensados.

3.8.4 Valor de cálculo

Es el valor utilizado en la evaluación de la ecuación de verificación del modo de fallo o parada. El procedimiento a seguir para la asignación del valor de cálculo de los factores de proyecto depende del método de verificación tal y como se detalla en los capítulos 5 y 6 de estas Recomendaciones. Este valor se define en términos de la función de distribución, de un valor cuantil de ella o del valor nominal, según corresponda a un factor de proyecto con o sin modelo de probabilidad, respectivamente.

Los factores de proyecto que, en el intervalo de tiempo y en la región o tramo de obra, toman valores acotados en un intervalo de confianza, y cuya participación en la ocurrencia del modo de fallo no es significativa, se les podrá asignar un valor de cálculo fijo, independientemente del método de verificación. A estos efectos, tales factores de proyecto se tratarán como deterministas.

3.8.5 Valor de comprobación

El valor nominal asignado a un factor de proyecto y, en su caso, el modelo de probabilidad adop-

tado, podrán ser comprobados mediante una campaña de toma de muestras, para aquellos casos que se recomiendan en éstas u otras Recomendaciones, Normas e Instrucciones específicas. Otros factores de proyecto definidos a partir de un modelo probabilístico también podrán ser objeto de comprobación.

A tal efecto, con carácter general, se especificarán valores de comprobación de los factores de proyecto definiendo un intervalo o rango, en el cual deberán entrar los valores muestrales con un cierto nivel de confianza, que en todo caso, salvo prescripción de otra cosa en las Recomendaciones y Normativas específicas, no será inferior a 0.90. Los extremos del intervalo se podrán definir, (1) por tolerancias, o desviaciones, con respecto al valor representativo en el intervalo o (2) por los cuantiles de una función de distribución, adoptando, en este caso, como valores extremos, los característicos superior e inferior del factor de proyecto.

Para comprobar los valores de los factores de proyecto definidos por un valor nominal se establecerá la relación entre dicho valor nominal y los parámetros de la función de distribución adoptada y los extremos del intervalo de confianza.

Comentario

La decisión de adoptar un valor de un factor de proyecto comporta unas determinadas consecuencias económicas, sociales, ambientales, etc. Puesto que la información sobre la que se apoya la decisión es limitada, está afectada de incertidumbre estadística y, por tanto, entraña un riesgo. Por ello, para decidir el valor de un factor de proyecto, es necesario disponer de herramientas estadísticas que permitan medir cuantitativamente la incertidumbre asociada a tal decisión.

3.9 Clases Estadísticas de Valores

Un factor de proyecto, ya sea parámetro, agente, o acción, puede tomar valores que varían en amplio rango. Si esta variabilidad se describe estadísticamente, los valores que puede tomar el factor de proyecto se pueden ordenar alrededor de un valor medio y, por tanto, pertenecen a una distribución o régimen medio, o alrededor de ocurrencias extremas, superior o inferior, y, por tanto, pertenecen a las distribuciones de máximos y mínimos, es decir, a regímenes de extremos.

En cualquiera de estos rangos medio y de extremos, de máximos o de mínimos, y, en función de la magnitud de los valores que puede tomar con respecto a un valor centrado del rango, se pueden definir tres clases de valores denominadas: (1) de la cola inferior, (2) centrada y (3) de la cola superior, figura 3.6.

Estas clases se aplican en el método de verificación y, en particular, en el método de los coeficientes parciales, para establecer la compatibilidad de los valores de los factores y términos que intervienen en la ecuación de verificación en cada tipo de combinación.



3.9.1 Clase de la cola inferior

Contiene los valores de la cola inferior de la función de distribución correspondiente, media o de extremos, de máximos o de mínimos y, por tanto, representa los valores del factor o término cuya excedencia en el intervalo de tiempo es habitual y muy probable. El valor nominal inferior pertenecería a esta clase.

3.9.2 Clase centrada

Incluye los valores de la zona central de la función de distribución correspondiente, media o de extremos, de máximos o mínimos y, por tanto, contiene los valores que se ordenan alrededor del valor medio, moda y mediana de la distribución, es decir, alrededor de los valores frecuentes y más probables que puede tomar el factor o término en el intervalo de tiempo. El valor nominal medio pertenecería a esta clase.

3.9.3 Clase de la cola superior

Contiene los valores de la cola superior de la función de distribución correspondiente, media o de extremos, de máximos o de mínimos y, por tanto, representa los valores del factor o término cuya excedencia es rara y poco probable en el intervalo de tiempo. El valor nominal superior pertenecería a esta clase.

Comentario

Obsérvese que las tres clases se definen en un intervalo de tiempo. Por tanto, en el caso de un factor o término con descripción estadística, la función de distribución a aplicar para la definición de cada una de las clases, debe ser estadísticamente representativa del factor o término en el intervalo de tiempo, la condición de trabajo y el estado límite al cual está adscrito el modo verificado.

Bajo ciertas hipótesis se puede admitir que, en un estado de mar, las alturas de ola siguen una distribución de Rayleigh de parámetro la altura de ola media cuadrática, H_{rms} . Este valor es un valor centrado de las olas que se pueden presentar en el estado de mar (o intervalo de tiempo). Por tanto, las olas cuya altura se encuentra alrededor de la altura de ola media cuadrática, pertenecen a la clase de valores centrados. Supóngase que $H_{rms} = 3\text{m}$, la probabilidad de excedencia de este valor es $\Pr(H > H_{rms}) = 1 - \Pr(H \leq H_{rms}) = 1 - e^{-1} = 0.63$. Las probabilidades de no excedencia de la altura de ola significativa, $H_S \approx \sqrt{2}H_{rms}$ y de $H_{\frac{1}{20}} \approx 2.07 H_{rms}$, son respectivamente, 0.87 y 0.99. Es claro que, esta última altura de ola se encuentra muy alejada del valor centrado y, por tanto, la evaluación de su probabilidad de excedencia a partir de la función de distribución de los valores medios no es estadísticamente correcto. Por el lado inferior, la probabilidad de no excedencia de olas cuya altura es $H_{rms}/4$, es igual a 0.06. Alturas de ola inferiores a ésta, se encuentran en la cola inferior de la función de distribución de Rayleigh.

Los valores de altura de ola en el rango $0.25H_{rms} < H < 1.5H_{rms}$, pertenecen a la clase centrada de las alturas de ola en un estado de mar o intervalo de tiempo. Los valores de altura de ola en el rango $1.5H_{rms} < H < 3H_{rms}$, pertenecen a la clase de la cola superior de las alturas de ola en un estado de mar. De manera análoga, los valores en el rango $0 < H < 0.25H_{rms}$, pertenecen a la clase de la cola inferior de las alturas de ola en un estado de mar. Ambas colas no están estadísticamente bien representadas por la función de distribución de Rayleigh.

Si se supone que la presentación de olas consecutivas son sucesos independientes, las olas máximas del estado de mar siguen una distribución de Rayleigh elevada a la potencia N , donde N es el número de olas en el estado de mar. La moda, o valor más probable, de las alturas de ola máxima entre 10.000 olas es 9.1 m, y entre 500 olas es 7.6 m. Estos valores de altura de ola pertenecen a la clase centrada de las alturas de ola máximas en un estado de mar o intervalo de tiempo, y en el intervalo de tiempo o estado de mar se pueden definir, asimismo, las colas superior e inferior, de forma análoga a como se ha hecho

para las alturas de ola "medias". Los rangos de valores no son absolutos y dependen de la variabilidad del factor o término y de su función de distribución.

Considérese, ahora, la descripción de la altura de ola significativa en el intervalo de tiempo año; en este caso, se pueden definir al menos dos distribuciones, la correspondiente a valores medios o régimen de oleaje y de extremos (máximos) o régimen de temporales. En cualquiera de los dos regímenes se pueden identificar las tres clases de valores: centrados, de la cola superior y de la cola inferior. Además, suponiendo que cada año es independiente, se puede calcular en la vida útil del tramo la función de distribución de los estados de mar. Del mismo modo, en este régimen se presentan las tres clases de valores, cola inferior, valores centrados y cola superior.

El papel que desempeña la cola superior para algunos factores, para otros lo realiza la cola inferior. Por ejemplo, en el agente precipitación, la cola inferior representa los periodos de sequía. Cuando se desea considerar los valores pésimos de sequía, es necesario trabajar con la función de distribución de mínimos; en este caso, la cola mínima de dicha distribución tiene valores centrados y valores adscritos a las colas superior e inferior, siendo ésta la que proporciona las condiciones mínimas de precipitación.

En aquellos casos en los que los valores de las colas estén asociados a probabilidades de no excedencia muy pequeñas o muy grandes, será necesario realizar un ajuste de las colas con una función de distribución adecuada.

Por último, es necesario destacar que la existencia de valores centrados no implica, necesariamente, la existencia de la clase superior o inferior. Esto ocurre, p.ej. en el agente gravitatorio, peso propio del elemento o de la obra que, en la mayoría de las ocasiones interviene en la ecuación de verificación con valores pertenecientes a la clase centrada o, con agentes que están limitados por valores umbrales, como es el caso de la velocidad del viento cuando se considera su acción sobre una grua en condiciones de trabajo operativas normales.

3.10

Estudio de los Factores

En su caso, para cada uno de los factores de proyecto y en concreto para los agentes dados en la clasificación por su origen y función, se redactará un Estudio que se incluirá en el proyecto, en el que se detallen los procesos de presentación del agente y, si procede, su interferencia con el medio físico, el terreno, los materiales y la geometría de la obra; se incluirá cuanto información se requiera para justificar su presencia en el proyecto, los datos empleados y su fuente y, en su caso, los trabajos de campo y los ensayos realizados. Además, en dicho Estudio se incluirá la evaluación de las acciones que provoca el agente en la obra y su entorno. A tal efecto, se seguirán las indicaciones recogidas en las Recomendaciones de Obras Marítimas específicas.

3.10.1

Contenidos recomendados del estudio

Entre otros, se considerarán los siguientes contenidos,

1. Factores de uso y explotación
2. Factores del medio físico
3. Factores del terreno
4. Factores asociados a los procesos constructivos
5. Factores asociados al comportamiento de los materiales de construcción

3.10.2 Fuentes de datos

Se deberá consignar la fuente de los datos de los factores de proyecto, tanto si el valor adoptado es determinista, como si es una variable aleatoria. En cualquiera de las dos descripciones se consignará la fuente de información. En otro caso, si son objeto de una campaña de investigación y de toma de datos, se deberá explicar en detalle las técnicas de medida, registro y análisis de los datos y las técnicas aplicadas en la inferencia estadística.

3.11 Anejo: Algunos Valores de los Factores de Proyecto

En este anejo se presentan algunos aspectos específicos relacionados con los valores de los parámetros, agentes y acciones y que pueden servir de ayuda para la aplicación de lo recomendado en este capítulo.

3.11.1 Valores de un parámetro de proyecto

En un tramo de obra y en un intervalo de tiempo se determinarán los valores de los parámetros de proyecto que definen la geometría del emplazamiento y del tramo, las propiedades del medio físico, del terreno y de los materiales, de acuerdo con lo recomendado en la sección 3.8 y en los apartados siguientes, para algunos aspectos específicos.

3.11.1.1 Parámetros geométricos

Los parámetros geométricos permiten definir las dimensiones del emplazamiento, medio físico y terreno y las dimensiones de los elementos de la obra. En el primer caso, a partir de unas medidas se definen los valores geométricos conjuntamente con el error asociado a la medida o la función de distribución de la misma. En el segundo caso, se define un valor nominal y tras adoptar una función de distribución o una tolerancia, se especifican las desviaciones admisibles en el elemento construido. Estas desviaciones deberán ser comprobadas en obra.

3.11.1.1.1 Valor geométrico medido

Salvo que se disponga de mejor información, se supondrá que los parámetros geométricos medidos del medio físico y del terreno, siguen una distribución gaussiana de valor medio, V_μ el valor consignado en la medida y de desviación típica, “ % ” parte de dicho valor medio estimado en el proceso de medida. El valor de V_μ depende del parámetro geométrico considerado y del método de medida, debiendo estar especificado en la memoria de la campaña de medidas.

A partir de esta información, se definirá el valor geométrico representativo y, en su caso, se podrán definir valores geométricos característicos, teniendo en cuenta el error asociado al proceso de medida.

3.11.1.1.2 Valor geométrico de comprobación

Los criterios del apartado anterior serán, asimismo, de aplicación a los parámetros geométricos construidos que están sujetos a comprobación experimental. En este caso, se deberá observar lo especificado sobre desviaciones admisibles.

| | |
|---|--|
| 3.11.1.1.3 | Valor geométrico representativo de proyecto |
| Los planos se dibujarán con el valor geométrico con el que se propone ejecutar la obra.Éste será el valor nominal. | |
| 3.11.1.1.4 | Valor geométrico característico de proyecto |
| Salvo justificación el valor característico geométrico será el valor nominal.En aquellos casos en los que se definan valores característicos distintos del valor nominal, éstos se definirán en función de la desviación admisible. | |
| 3.11.1.1.5 | Desviación admisible en los parámetros geométricos |
| <div>(15) es la desviación estándar de la medida geométrica</div> <p>La desviación admisible de la medida geométrica se especificará en términos de una tolerancia admisible, Δ, o de un coeficiente de variación¹⁵, Δ/V_μ. Éstos se deberán consignar en el plano o en el pliego de prescripciones técnicas, aunque a efectos de seguridad se recomienda que se especifique en ambos.</p> <p>La tolerancia se especificará en las mismas unidades que la medida geométrica o por un tanto por ciento de ella, e indicará la magnitud de la desviación admisible con respecto al valor nominal. Por medio del signo se definirá el intervalo de variación admisible de la medida.</p> <p>El coeficiente de variación es adimensional, pero al igual que la tolerancia, su signo permitirá definir el intervalo de variación admisible de la medida.Salvo justificación,el valor nominal será el valor medio, V_μ, del parámetro geométrico.</p> <div>Comentario <i>Por lo general, para especificar la tolerancia se tendrá en cuenta que ésta debe ser suficientemente generosa para que se pueda construir el elemento o la obra y, a ser posible, suficientemente pequeña para que la desviación con respecto al valor nominal no produzca efectos significativos en su seguridad y operatividad.En otro caso,se tendrá en cuenta lo especificado en el apartado siguiente,segundo párrafo,sobre la verificación con otros valores característicos.Además, la magnitud de la tolerancia especificada deberá poder comprobarse con los métodos de control disponibles.</i></div> | |
| 3.11.1.1.6 | Valor geométrico de cálculo |
| <p>Salvo expresión concreta de lo contrario, se supondrá que el valor de las dimensiones geométricas de la obra y del terreno, aplicado en los cálculos de verificación será el consignado en los planos.</p> <p>En algunos casos particulares, puede ser necesario durante la realización de la verificación aplicar otros valores característicos, los cuales se determinarán modificando su valor mediante la tolerancia, Δ, admisible, o el coeficiente de variación,en más o en menos, según sea favorable o desfavorable en la verificación.</p> | |
| 3.11.1.2 | Parámetros del terreno |
| En general, los parámetros del terreno varían espacial y temporalmente en el emplazamiento. Por ello, la determinación de su valor se realizará mediante trabajos de campo y de laboratorio tal y como se describe en la R.O.M. 05. La extensión y profundidad de la investigación geotécnica | |

(16) Véase Parte II de la citada R.O.M 0.5

dependerá,entre otros factores,de:(1) la heterogeneidad horizontal y vertical esperada del terreno, (2) el carácter y (3) de la tipología y disposición en planta de la obra marítima¹⁶ y, en lo posible, la información obtenida deberá permitir su tratamiento por métodos estadísticos.

No obstante, en la verificación de algunos de los modos de fallo de las obras marítimas, los parámetros del terreno pueden cumplir los criterios recomendados para su consideración como deterministas.

3.11.1.2.1 Valor representativo

Salvo justificación, se supondrá que el valor representativo de las propiedades del terreno es el valor medio, V_{μ} de los resultados obtenidos en la investigación geotécnica.

Cuando no se considere necesario realizar investigación geotécnica o la información disponible no sea suficiente para su tratamiento estadístico, el valor representativo del parámetro del terreno será un valor nominal V_n , definido a partir de los datos del reconocimiento geotécnico con la ayuda de experiencias previas, correlación espacial u otros criterios. En el caso de ser necesario se podrá suponer un modelo de probabilidad del parámetro o parámetros del terreno.

Determinados los valores representativos de los parámetros del terreno en los diferentes tramos o zonas, se estudiará la correlación espacial entre los valores de los diferentes tramos.

3.11.1.2.2 Valor característico

Se obtendrá este valor a partir de la función de distribución del parámetro, cuyo dominio espacial de aplicación debe estar acotado. En otro caso, el valor característico será el valor nominal.

3.11.1.2.2.1 Valor característico superior e inferior

Cuando se conozca la función de distribución del parámetro de proyecto, se podrán determinar los valores característicos superior e inferior como los extremos de un intervalo de confianza cuyo nivel será, como mínimo, 0.90.

En los casos en que, no se conozca la función de distribución de la propiedad, el valor representativo del parámetro del terreno se haya definido por un valor nominal,y sea necesario en los cálculos de la verificación, se podrán determinar valores característicos superior e inferior en función del valor nominal y de unos coeficiente que se proporcionan, para los parámetros del terreno más usuales, en la R.O.M. 0.5.

3.11.1.3 Valor de los parámetros del aire y agua

En general, el valor de los parámetros del aire y del agua siguen los ciclos climáticos, por lo que, en general,su descripción debe seguir métodos estadísticos aplicado a los datos recogidos en campañas de medida.

No obstante, en la verificación de algunos de los modos de fallo de las obras marítimas, los parámetros del aire y del agua pueden cumplir los criterios recomendados para su consideración como deterministas.

3.11.1.3.1 Valor representativo

Salvo justificación, se supondrá que el valor representativo de las propiedades del agua y del aire es el valor medio, V_{μ} de sus funciones de distribución, media o de extremos, según el caso, obtenidas mediante inferencia estadística de la muestra.

Cuando no sea necesario realizar una campaña de toma de muestras o no se disponga de información suficiente para su tratamiento estadístico, el valor representativo del parámetro del aire o agua será un valor nominal, V_n , definido a partir de datos de reconocimiento en la zona, apoyado en experiencias previas, correlación espacial u otros criterios. En el caso de ser necesario, se podrá suponer un modelo de probabilidad del parámetro del aire o agua.

Determinados los valores representativos de los parámetros del aire y del agua en las diferentes regiones o zonas, se estudiará la correlación espacial entre los valores de las diferentes zonas.

3.11.1.3.2 Valor característico

Se obtendrá este valor a partir de la función de distribución, media o de extremos, del parámetro y cuyo dominio espacial debe estar acotado. En otro caso, el valor característico será el valor nominal.

3.11.1.3.2.1 Valor característico superior e inferior

Cuando se conozca la función de distribución del parámetro del aire o agua, se podrán determinar los valores característicos superior e inferior como los extremos de un intervalo de confianza cuyo nivel será, como mínimo, 0.90.

En los casos en que no se conozca la función de distribución de la propiedad y el valor representativo del parámetro se haya definido por un valor nominal, se podrán determinar valores característicos, superior e inferior, suponiendo una función de distribución, por correlación espacial, modelos analíticos, estadísticos, etc., la cual deberá ser comprobada con la correspondiente campaña de campo.

3.11.1.4 Valor de los parámetros de los materiales

En general, el valor de los parámetros que identifican y caracterizan los materiales de construcción no se conocen hasta que se construye el material, tanto si es prefabricado en una industria como si se construye in situ. En ambos casos, el valor del parámetro ejecutado es una variable aleatoria que puede variar tanto espacial como temporalmente.

No obstante, en la verificación de algunos de los modos de fallo de las obras marítimas los parámetros de los materiales pueden cumplir los criterios recomendados para ser tratados como deterministas.

3.11.1.4.1 Parámetros de materiales contruídos mediante un proceso industrial

Cuando se trata de materiales contruídos en un proceso industrial sujeto a control de calidad, el valor de los parámetros del material estarán determinados y garantizados por el fabricante, proporcionando o la función de distribución, o los valores característicos superior e inferior del intervalo de confianza y el nivel de confianza, o las tolerancias con respecto a un valor nominal.

En el primer caso la determinación de los valores, representativo y característico, deberá hacerse siguiendo la normativa vigente específica o, en su defecto, siguiendo los criterios generales dados en la sección 3.8. En el segundo caso, la normativa vigente suele especificar el valor representativo; y en su defecto, se tomará como valor representativo uno de los valores característicos, superior o inferior, según intervenga en la verificación. En el tercer caso se aplicarán las tolerancias para definir el intervalo de confianza y se procederá como en el caso anterior.

3.11.1.4.2 Parámetros de materiales contruídos in situ

El valor del parámetro, especificado en el proyecto antes de su ejecución, será el valor nominal.

3.11.1.4.2.1 Valor representativo

Se tomará el valor nominal del parámetro del material.

3.11.1.4.2.2 Valor característico

Es el principal valor representativo del material, que salvo justificación, será el valor nominal.

3.11.1.4.2.2.1 Valor característico superior e inferior

Salvo prescripción en otras Normas e Instrucciones de rango superior, el valor característico superior e inferior de ejecución de un parámetro de los materiales de construcción será el cuantil del 0.95 y 0.05 de la función de distribución, respectivamente. Entre estos dos valores, se define un intervalo de confianza cuyo nivel es del 0.90.

Ya que se desconoce la función de distribución del parámetro antes de su ejecución, para especificar los valores característicos será necesario suponer una función de distribución a partir de modelos analíticos, estadísticos, etc., o de acuerdo con la normativa vigente. La función de distribución adoptada deberá ser comprobada con la correspondiente campaña de toma de muestras. En cualquier caso, se especificará la relación entre el valor nominal y los parámetros de la función de distribución.

3.11.1.4.3 Durabilidad y valor de los parámetros del material

A efectos de durabilidad, en la determinación del valor nominal o de otros valores representativos, se tendrá en cuenta la evolución de las propiedades del material sometidas a los agentes del medio físico, en especial, a ciclos de carga y descarga con frecuencias análogas a las de las oscilaciones del mar y del viento (ráfagas) y a ciclos de humedad-sequedad similares a los producidos por la marea astronómica y otras oscilaciones de periodo largo. Este análisis se podrá realizar con técnicas experimentales o modelos analíticos y numéricos debidamente contrastados o consignados en las Recomendaciones y Normas específicas.

Comentario

A este respecto se tendrá en cuenta lo especificado en la tabla 8.2.2 "Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras" y la tabla 37.3.2b "Resistencias mínimas compatibles con los requisitos de durabilidad" de la Instrucción de hormigón estructural.

3.11.1.5 Valor de otros parámetros

Salvo justificación, para determinar el valor de otros parámetros de proyecto se seguirán criterios análogos a los descritos en los apartados anteriores.

3.11.1.6 Variabilidad espacial y temporal de los parámetros

A tal efecto, y con carácter general, se tendrá en cuenta lo recomendado en la sección 3.3.

3.11.2 Valores de un agente

En un tramo de obra y en un intervalo de tiempo la determinación de los valores de los agentes y sus acciones sobre la obra y el entorno, se ajustará a lo recomendado en la sección 3.8 y en los siguientes apartados para algunos aspectos específicos.

3.11.2.1 Valor con modelo de probabilidad

Con carácter general, la mayoría de los agentes, en particular los del medio físico y del terreno, se definirán a partir de la función de distribución de la población, siguiendo los criterios desarrollados en la sección 3.8.

3.11.2.1.1 Valor representativo

Es aquel que proporciona un orden de magnitud del valor que el agente puede tomar en la verificación del modo de fallo.

3.11.2.1.2 Valor característico

Es el principal valor representativo del agente.

3.11.2.1.2.1 Valor característico superior e inferior

Para factores de proyecto acotados en un intervalo de confianza, los valores extremos del intervalo se denominan, respectivamente, valores característicos superior e inferior. En general para agentes del medio físico, el valor característico superior es el valor del cuantil del 0.95 de la función de su distribución. El valor característico inferior puede ser un valor umbral o simplemente cero, es decir la no ocurrencia del valor. En otras ocasiones, el valor característico inferior podrá ser el valor del cuantil del 0.05.

3.11.2.1.3 Valor sin modelo de probabilidad

Los agentes gravitatorios, algunos de los agentes de uso y explotación y los debidos a la construcción, en general, se cuantifican por medio de un valor nominal, definido en la normativa vigente, experiencias previas u otros procedimientos debidamente contrastados. En estos casos, para la determinación de otros valores del agente, se seguirá lo recomendado en la sección 3.8 sobre factores de proyecto definidos por un valor nominal.

3.11.2.1.4 Variabilidad espacial y temporal del agente

A tal efecto, y con carácter general, se tendrá en cuenta lo recomendado en la sección 3.3.

3.11.3 Valores de una acción

(17) El agente predominante y por extensión el factor de proyecto predominante es aquél que contribuye de manera determinante en la consecución del modo de fallo.

El valor de la acción se obtiene mediante una relación funcional de uno o varios agentes predominantes¹⁷, otros agentes y un cierto número de parámetros de proyecto, o mediante una experimentación en la naturaleza o en un modelo físico. Esta evaluación dependerá de si los factores de proyecto han sido definidos mediante las funciones de distribución o por valores nominales. En general, una acción está representada matemáticamente por uno o más términos de una ecuación de verificación. Su evaluación se ajustará a lo recomendado en la sección 3.8 y en los siguientes apartados para algunos aspectos específicos.

3.11.3.1 Valor con modelo de probabilidad

La función de distribución de una acción se puede obtener por vía experimental, con una campaña de medidas específica en la naturaleza o en un modelo físico, o por medio de un cálculo matemático. En este caso, a partir de la función de distribución de los factores de proyecto que intervienen en el cálculo de la acción, se puede obtener, de forma analítica o numérica, la función de distribución de la acción. Conocida la función de distribución de la acción, se podrán determinar los valores representativos, y característicos, superior e inferior, de la misma, siguiendo los criterios recomendados en la sección 3.8.

3.11.3.1.1 Modelo de probabilidad de la acción con un agente predominante

Si en el cálculo de la acción interviene solamente un agente predominante cuya función de distribución es conocida, se puede aproximar la función de distribución de la acción a partir de la función de distribución del agente predominante, y adjudicando a los demás factores de proyecto por valores representativos compatibles con el valor del agente. A partir de la función de distribución de la acción se pueden definir los valores representativo, y característicos, superior e inferior, de la misma, siguiendo los criterios recomendados en la sección 3.8.

3.11.3.2 Valor nominal de la acción

Algunas veces, el valor nominal de la acción está definida en la normativa vigente, por condiciones impuestas por la explotación, por experiencias previas u otros procedimientos debidamente contrastados. En estos casos se deberá seguir lo recomendado en la sección 3.8 para determinar otros valores de la acción, en particular, los valores representativos, característicos, máximos, mínimos, etc.

En los casos en los que no se conozca un valor nominal de la acción, pero, ésta, se pueda cuantificar mediante una función de factores de proyecto, definidos todos ellos por su valor nominal, se podrá suponer que el valor obtenido es un valor nominal de la acción.

3.11.3.3 Variabilidad espacial y temporal de la acción

A tal efecto, y con carácter general, se tendrá en cuenta lo recomendado en la sección 3.3

CAPITULO 4

Procedimiento de verificación



4

PROCEDIMIENTO
DE VERIFICACIÓN

4.1

Introducción

Un procedimiento de verificación se aplica para comprobar cuando y cómo un tramo de obra deja de cumplir en una fase de proyecto los requisitos del proyecto. Para ello, el procedimiento debe incluir una secuencia de actos que, finalmente, permitan declarar, o no, que un proyecto es fiable y funcional frente a todos los modos de fallo últimos y de servicio, y operativa frente a todos los modos de parada.

4.1.1

Objetivos del procedimiento

El proyecto de una obra marítima y portuaria, ejecutado de acuerdo con estas Recomendaciones, debe demostrar que en cada una de las fases de proyecto, el tramo de la obra satisface los requisitos de seguridad, de servicio y de uso y explotación, de acuerdo con los valores recomendados en la sección 2.10.

Comentario

En la sección 2.4 se definen los requisitos de seguridad, de servicio y de uso y explotación de un tramo de obra y la probabilidad de que se satisfagan esos requisitos en un intervalo de tiempo, esto es, la fiabilidad, la funcionalidad y la operatividad.

4.1.2

Actividades que se incluyen en el procedimiento de verificación

Éstas son las siguientes: (1) un metodología de trabajo, (2) la forma de describir el modo de fallo o parada, que, en general, será una ecuación, denominada de verificación; (3) la ordenación de los factores de proyecto que pueden aparecer, explícita o implícitamente, en los diferentes términos de la ecuación; (4) los criterios para determinar los valores compatibles de los términos y establecer tipos de combinación para unas condiciones de trabajo, y, (5) un método para verificar el proyecto frente a un modo, evaluar su probabilidad de ocurrencia y la probabilidad conjunta de presentación de todos los modos principales.

4.1.3

Contenidos y organización del capítulo

El capítulo comienza con el planteamiento de los objetivos del procedimiento de verificación y una descripción del método de los estados límite. Se presentan, a continuación, las diferentes formas de la ecuación de verificación, coeficiente de seguridad y margen de seguridad global y la ordenación de los factores de proyecto. Seguidamente, se describen las condiciones de trabajo y los criterios para la combinación de los factores y términos de la ecuación de verificación. Después, en función del carácter general de la obra, se presentan los métodos de verificación de un modo de fallo o parada operativa que se aplican en estas Recomendaciones y que se desarrollan en los capítulos 5 y 6. Por último, se resumen, brevemente, los criterios para evaluar la probabilidad de presentación de un modo y la probabilidad conjunta de todos los modos; estos criterios se desarrollan en el capítulo 7. La figura 4.1 contiene un esquema de la organización de este capítulo.

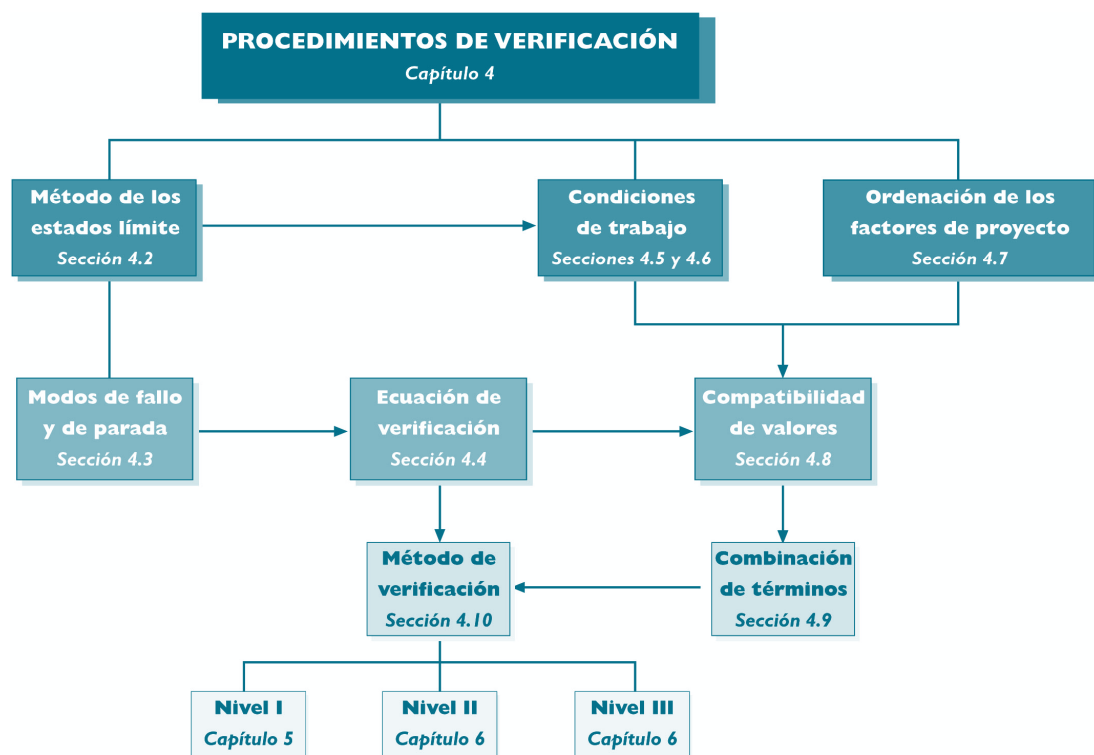


Figura 4.1:
Ordenación y
contenidos
del capítulo 4.

4.2 Método de los Estados Límite

El estado de proyecto define y describe el comportamiento de un tramo de obra en un intervalo de tiempo. Durante su ocurrencia se admite que la respuesta estructural y formal y la explotación del tramo son procesos estacionarios. La duración de cada una de las fases de proyecto por las que pasa la obra: construcción, servicio, conservación y reparación y desmantelamiento, se puede dividir en una secuencia de estados de proyecto.

El objetivo de los cálculos del proyecto es verificar que el tramo cumple los requisitos de proyecto en todos y cada uno de los estados. Al objeto de simplificar la verificación de un tramo de obra, de todos los estados posibles se comprueban solamente algunos de ellos que se supone representan situaciones límite del tramo, desde el punto de vista estructural, formal y de uso y explotación. Por ello, estos estados se denominan estados límite.

Se definen, respectivamente, tres conjuntos de estados límite relacionados con la seguridad estructural, el servicio y la explotación. Los primeros se denominan estados límite últimos y de servicio. Los estados que describen el uso y la explotación del tramo se denominan estados límite operativos, figura 4.2.

4.2.1 Definición de estado límite

Son todos aquellos estados de proyecto en los que las combinaciones de factores de proyecto pueden producir uno o varios modos, de fallo o parada operativa, que ocurren de la misma forma o con el mismo mecanismo.

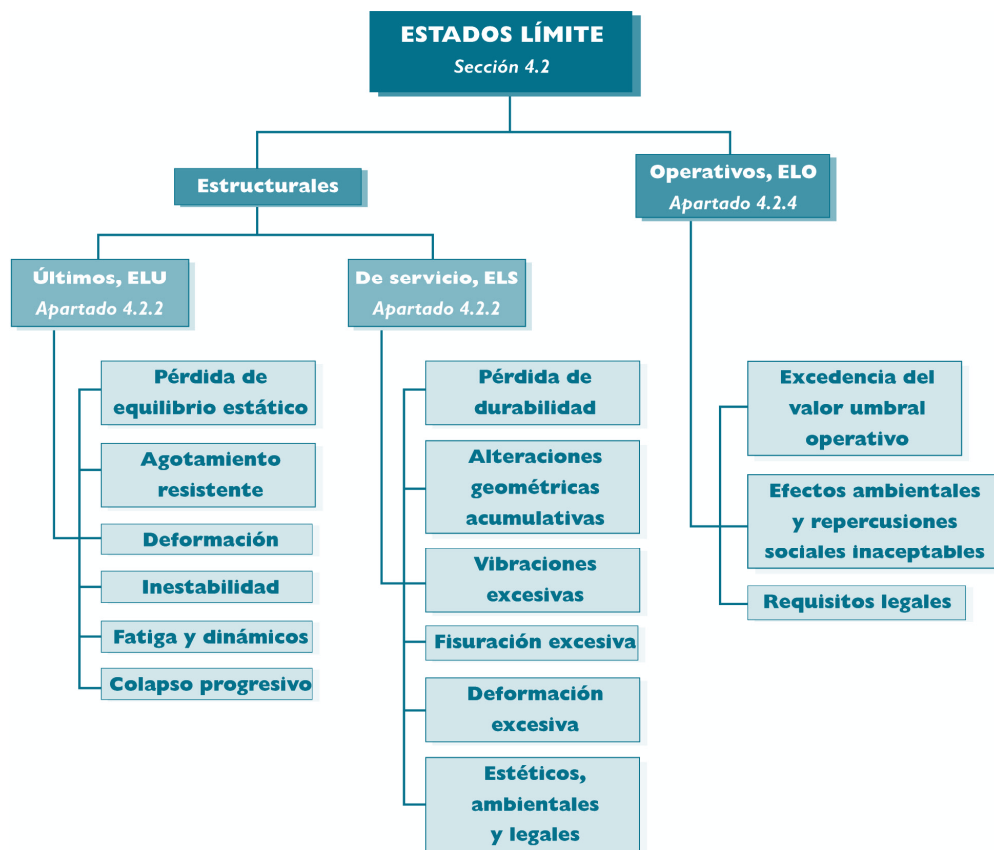


Figura 4.2:
Estados límite
últimos, de
servicio y
operativos.

4.2.1.1 Tipos de estado límite

Se distinguen dos tipos de estados límite; los relacionados con la seguridad estructural y formal, que definen los modos de fallo en la estructura y la forma de la obra y, aquellos otros, relacionados con la explotación de la obra, en los cuales no hay fallo estructural; es decir, una vez que cesa la causa de la parada, la obra recupera totalmente los requisitos de explotación.

Los estados límite relacionados con la seguridad estructural y formal se ordenan en estados límite últimos y estados límite de servicio.

4.2.2 Estados límite últimos, ELU

Son aquellos estados que producen la ruina, por rotura o colapso estructural de la obra o de una parte de ella. En los estados límite últimos se consideran todos aquellos modos de fallo debidos a,

- 1. Pérdida de equilibrio de la estructura o parte de ella, considerada como un sólido rígido
- 2. Deformaciones plásticas excesivas, rotura o pérdida de la estabilidad de la estructura o parte de ella
- 3. Acumulación de deformaciones, fisuración progresiva, fatiga bajo cargas repetidas

4.2.2.1 Clasificación de los estados límite últimos

(1) Al objeto de mantener la coherencia conceptual y la conexión de estas Recomendaciones con otras Normas e Instrucciones, esta clasificación sigue los criterios recogidos en la Instrucción de Hormigón Estructural

Siempre que sean significativos, en cada fase de proyecto, deberán tomarse en consideración los siguientes estados límite últimos¹,

- Pérdida de equilibrio estático
- Agotamiento resistente o rotura
- Deformación
- Inestabilidad
- Fatiga y dinámicos
- Colapso progresivo

En función de las particularidades, en general relacionadas con los factores de proyecto, la forma en planta y tipología de la obra y la seguridad de la obra y del entorno, se podrán proponer otros estados límite últimos que se deberán ajustar a la definición dada en el apartado 4.2.2.

Comentario

En algunas obras marítimas los estados límite últimos suelen estar asociados, entre otros, a la ocurrencia de agentes climáticos que pueden producir acciones estáticas y dinámicas, por ejemplo el oleaje o el viento. En estos casos, la obra puede oscilar forzada por el agente y, en algunos casos, se puede acoplar con él. Una oscilación acoplada o resonante ocurre cuando coinciden el periodo principal de oscilación del agente o su acción y de la respuesta de la obra. En este caso, las amplitudes de la oscilación en teoría pueden ser ilimitadas. En el caso de oscilaciones forzadas, éstas se acoplan y desacoplan con la oscilación forzadora y cesan rápidamente en cuanto cesa el agente que la provoca.

Por otra parte, el fallo de la obra tiene una probabilidad de ocurrir. En el caso de modos de fallo debidos al oleaje, todos los estados de mar tienen una cierta probabilidad de producir el daño ya que, en todos ellos, hay una probabilidad de que se presenten olas mayores que las de cálculo. No obstante, solamente los estados de mar más energéticos contribuyen con una probabilidad significativa en la probabilidad de fallo. A estos efectos, es conveniente definir un estado de mar umbral, a partir del cual, todos los estados mayores que él contribuyen significativamente en la probabilidad de fallo.

Este concepto se puede extender a todos los agentes cuya presentación lleva asociada una probabilidad. Se pueden definir, entonces, valores umbrales de las variables de estado cuya excedencia pueda producir valores significativos de la probabilidad de ocurrencia del modo de fallo.

4.2.2.1.1 Pérdida de equilibrio estático

Agrupar los modos de fallo relacionados con la pérdida de estabilidad estática de la obra, en su conjunto o en alguno de sus elementos estructurales, considerados como un cuerpo rígido. La ecuación de verificación se debe aplicar solamente cuando la idealización de sólido rígido sea representativa de las condiciones de trabajo del conjunto estructural y, por tanto, son de aplicación los métodos de la Mecánica Racional.

Comentario

La pérdida de equilibrio estático puede ocurrir por superarse la resistencia a la fricción o al vuelco. En este estado límite se podrán incluir, entre otros, los siguientes modos de fallo: vuelco rígido, deslizamiento sin deformación, levantamiento de apoyos, flotación, etc.

4.2.2.1.2 Agotamiento resistente

Recoge los modos de fallo que pueden ocurrir cuando se alcanza la capacidad resistente o se produce una deformación plástica excesiva de una o varias secciones (o partes de la misma) de algu-

no de los elementos estructurales de la obra. Este estado se verificará para las secciones de los diferentes elementos estructurales.

Comentario

El agotamiento de la sección puede ocurrir por axiles, cortantes, torsión, punzonamiento o rasante. En este estado límite se incluyen, entre otros, los siguientes modos: fallo de la sección estructural, deslizamiento o hundimiento del espaldón, hundimiento del terreno, deslizamiento profundo, etc.

4.2.2.1.3 Inestabilidad

Agrupar los modos de fallo asociados a la deformación local o global de la obra en alguno de sus elementos estructurales que pueden inducir el agotamiento resistente del elemento estructural.

Comentario

La inestabilidad del elemento estructural podrá producir pandeo, abolladura y alabeo del mismo. Este estado límite se verificará para las secciones de los diferentes elementos de la obra, en general, estudiando la capacidad del elemento para soportar las acciones inducidas por su deformación mediante la utilización de modelos de segundo orden.

4.2.2.1.4 Fatiga y dinámico

Agrupar los modos de fallo producidos bajo cargas dinámicas que actúan sobre un elemento o sobre el terreno.

Comentario

La fatiga en muchas obras marítimas suele estar asociada a la ocurrencia de los agentes climáticos marinos y atmosféricos. El fallo se produce por agotamiento resistente de la sección y por tanto puede ocurrir por axiles, cortantes, torsión, punzonamiento o rasante. En obras marítimas de abrigo, un ejemplo clásico es la rotura por fatiga de piezas esbeltas del manto principal, tales como dolos, tetrápodos, etc. Si bien, en general la fatiga produce un agotamiento resistente de la estructura, dadas las peculiaridades de sus procesos es habitual considerar aquella como un estado límite independiente del agotamiento resistente.

4.2.2.1.5 Deformación

Recoge los modos de fallo en los que, la obra en su conjunto o en alguno de sus elementos estructurales, alcanza cambios en su geometría que no garantizan su seguridad estructural.

Comentario

Este estado límite incluye los modos de fallo de la obra relacionados con la deformación de la misma o de alguno de sus elementos que ocurren en intervalos de tiempo de duración mucho menor que la vida útil de la obra. En este caso, la deformación es un indicio racional del inmediato fallo estructural de la obra, o de alguno de sus elementos, por agotamiento resistente. Los cambios de geometría considerados en los estados límite de deformación provocan modificaciones importantes en la forma de la obra convirtiendo ésta, esencialmente en otra diferente a la proyectada y, por tanto, con comportamiento estructural diferente al supuesto en su verificación.

En este estado límite se podrán incluir, entre otros, los siguientes modos de fallo: erosión de la berma de pié, asientos y deformaciones del terreno o del manto principal, asientos de un pilote en una estructura, etc.

En el caso del dique en talud, la acción del temporal de cálculo puede provocar la salida de piezas de la primera capa, deformando el manto principal y modificando su geometría. Este “nuevo” talud es diferente al proyectado de modo que, su interferencia con los estados de mar del temporal es también diferente, ya que produce el adelantamiento hacia el mar y el cambio de la forma de la rotura de las olas.

En el apartado 4.2.3 se definen los estados límite de servicio y entre ellos aquellos asociados a alteraciones geométricas acumulativas que conducen, al igual que los estados límite últimos por deformación, a

un fallo estructural por cambios en la geometría, incompatibles con la seguridad de la obra. Este estado límite de servicio se alcanza por el uso y la explotación de la obra en el medio físico durante su vida útil.

4.2.2.1.6 Colapso progresivo

Se incluye en este estado límite último la secuencia progresiva y condicionada de modos de fallo de uno o varios elementos estructurales de la obra, hasta provocar el colapso, bien sea por la transformación de la obra en un mecanismo, bien por la alteración de la geometría y las dependencias resistentes de los distintos elementos estructurales.

Comentario

El colapso progresivo de la obra se define mediante secuencias (árboles) de fallo en serie, en paralelo y compuestas. En el primer caso, a cada fallo de un elemento estructural le sigue otro y otro hasta alcanzar el colapso de la obra, si bien, la ocurrencia de un solo modo puede provocar el fallo de la obra. En la secuencia en paralelo se producen subsecuencias de fallo de elementos estructurales, según líneas independientes; para que se produzca el colapso deben producirse todos los modos pertenecientes a una de las líneas paralelas de fallo. Finalmente, en la secuencia mixta, se definen combinaciones de secuencias de fallo en serie, algunas de las cuales se podrán desdoblar en secuencias paralelas, continuando con otra secuencia en serie, etc., hasta alcanzar el colapso de la obra.

4.2.3 Estados límite de servicio, ELS

Engloban aquellos estados que producen la pérdida de funcionalidad de la obra o de una parte de ella, de forma reversible o irreversible, debido a un fallo estructural, estético, ambiental o por condicionante legal. En el caso de ser permanentes, es necesaria la reparación para recuperar los requerimientos del proyecto. Estos estados límite pueden alcanzarse durante la vida de la obra como consecuencia de su uso y explotación, así como por su ubicación en el medio físico y en el terreno.

En los estados límite de servicio se considerarán todos aquellos modos de fallo que reducen o condicionan el uso y explotación de la obra y que pueden significar una reducción de la vida útil o de la probabilidad de supervivencia de la obra, debidos a,

1. Degradación de las propiedades de los materiales de construcción o terreno
2. Deformaciones o vibraciones excesivas en la estructura para el uso y explotación de la obra
3. Alteraciones geométricas acumulativas

4.2.3.1 Clasificación de los estados límite de servicio

En cada fase de proyecto deberán comprobarse, siempre que sean significativos, los siguientes estados límite de servicio,

- Pérdida de durabilidad
- Alteraciones geométricas acumulativas
- Vibraciones excesivas
- Fisuración excesiva
- Deformaciones excesivas
- Estéticos, ambientales y legales

En función de las particularidades de la obra, asociadas a los factores de proyecto, la forma en planta y tipología, la funcionalidad de la obra y del entorno, se podrán proponer otros estados límite de servicio de acuerdo con la definición dada en el apartado 4.2.3.

Comentario

Los modos de fallo de la obra adscritos a los estados límite de servicio, no suelen alcanzarse como resultado de una patología, si no por el deterioro progresivo de su capacidad resistente y forma asociadas a las propiedades de los materiales de construcción y del terreno.

El discernimiento entre estados límite último y de servicio es algunas veces difícil; los dos criterios esenciales son la modalidad de fallo y la temporalidad. Cuando el modo de fallo responde a una patología, o se produce por la acción de uno o varios agentes durante un intervalo de tiempo mucho menor que la vida útil de la obra, el modo de fallo debe adscribirse a un estado límite último; en otro caso se adscribirá a un estado límite de servicio.

Si la ocurrencia del modo de fallo se puede retrasar o impedir mediante una adecuada estrategia de conservación de la obra y de sus elementos, entonces el modo pertenece a un estado límite de servicio.

Por otra parte, de manera análoga con los estados límite últimos y de parada, existen valores umbrales de los agentes, los cuales, una vez superados, contribuyen significativamente a la probabilidad de fallo. A estos efectos, es conveniente definir estos valores umbrales para el análisis de los estados límite últimos. En algunos casos, será necesario definir valores umbrales inferiores y superiores. Los primeros podrían estar asociados a la ocurrencia de modos de fallo reversibles (p.ej. fisuración reversible), mientras que los segundos podrían tener relación con modos de fallo irreversibles.

4.2.3.1.1 Pérdida de durabilidad

Durabilidad es la capacidad de la obra y sus materiales de construcción para soportar, sin alteraciones significativas de las especificaciones técnicas exigidas en el proyecto, las acciones de los agentes del medio físico, terreno, construcción, y uso y explotación, durante cada una de las fases de proyecto. Esta degradación es diferente de la provocada por las acciones consideradas en el análisis estructural u operativo.

Comentario

En este estado límite se incluyen todos aquellos modos caracterizados por el deterioro progresivo estructural, formal, estético, etc... de la obra o de sus elementos. Los modos de fallo incluidos en este estado son, entre otros: fisuración reversible, corrosión, abrasión, pérdida de impermeabilidad y de compacidad (porosidad), absorción de agua, difusión de gases e iones, acción combinada de iones sulfato y magnesio, etc.

4.2.3.1.1.1 Normas de buena práctica

En muchas ocasiones es difícil o imposible establecer una ecuación fiable que permita verificar un modo de fallo adscrito a un estado límite de pérdida de durabilidad. En estos casos, se recomienda la aplicación de criterios y normas de buena práctica para el proyecto, ejecución y explotación de la obra. Se podrá admitir que la obra es durable si se aplican correctamente estas normas de buena práctica.

Comentario

Una forma de asegurar la durabilidad del hormigón de un cajón flotante es la fabricación de hormigón con permeabilidad reducida; para ello es necesario una relación agua cemento suficientemente baja, un contenido adecuado de cemento, vibrado adecuado y en el que se permite una hidratación suficiente. Si se aplican estas normas correctamente se podrá admitir que el hormigón del cajón flotante cumple con los requisitos de pérdida de durabilidad.

4.2.3.1.2 Alteraciones geométricas acumulativas

Recogen las situaciones alcanzadas por la obra o alguno de sus elementos en las que se genera una acumulación de cambios geométricos que, reducen o impiden satisfacer los requisitos de servicio especificados en el proyecto.

Comentario

Como ejemplos de modos de fallo que se pueden incluir en este estado se encuentran los siguientes: deformaciones y erosiones del firme motivadas por rebases del espaldón, variaciones longitudinal o transversal del calado en el canal de navegación, por acumulación o por erosión, socavaciones en muelles u otro tipo de estructuras, lavado de rellenos en explanadas causado por el oleaje o la marea astronómica, asientos en pavimentos, etc.

Las variaciones longitudinal y transversal del calado en un canal de navegación puede ilustrar la adscripción de un modo de fallo a un estado límite último, o a uno de servicio. Supóngase un área portuaria sometida a dos regímenes de oleaje direccionalmente diferenciados, uno dominante y otro reinante. El inicio de movimiento y transporte de sedimentos hacia el canal de navegación se produce una vez superado un cierto valor umbral de la altura de ola significativa y del periodo medio.

La ocurrencia de los estados de mar reinantes con valores superiores a los umbrales, provoca variaciones geométricas acumulativas del calado en el canal de navegación, que ocurren de forma progresiva y, en general, irreversible. Estas variaciones pueden ser controladas con una adecuada estrategia de conservación. El modo de fallo, pérdida progresiva del calado en el canal de navegación, se debe adscribir al estado límite de servicio por alteraciones geométricas acumulativas.

Por otro lado, el estado de mar máximo “o de cálculo”, perteneciente al conjunto de los estados de mar dominantes, puede inducir el transporte de un volumen de sedimentos suficiente para reducir, “rápida o instantáneamente”, el calado en el canal de navegación hasta un nivel inferior al requerido en el proyecto. La recuperación del calado de proyecto solo se consigue mediante el dragado completo del sedimento acumulado. El modo de fallo, pérdida “rápida o instantánea” del calado en el canal de navegación se debe adscribir al estado límite último de deformación.

4.2.3.1.3 Vibraciones excesivas

Este estado caracteriza las situaciones alcanzadas por la obra, o alguno de sus elementos estructurales, en los que la amplitud o frecuencia de vibración produce daños en los elementos o en las instalaciones.

Comentario

Un ejemplo de modos de fallo adscritos a estos estados límite son: daños en las rampas flotantes por impactos del buque durante las operaciones de carga y descarga, vibraciones en el espaldón por impacto de las olas que producen la rotura del hormigón de recubrimiento y la exposición de las armaduras, vibraciones en un edificio o puente por efecto del viento que limitan el acceso al mismo o el paso de vehículos, hinca de tablestacas en las proximidades de obras ya construidas, muelles en claraboya bajo la acción del oleaje, etc.

4.2.3.1.4 Fisuración excesiva

Este estado sirve para caracterizar las condiciones para las cuales las dimensiones geométricas de la fisura, aunque sean reversibles, pueden inducir fallos en el comportamiento del material u otros materiales protegidos.

Comentario

La inspección visual (longitud, dirección y apertura) de las fisuras es una práctica habitual en la ingeniería civil. Este análisis permite evaluar la evolución de las fisuras a lo largo del tiempo. En general se pue-

den dar dos situaciones. En la primera, la fisura abre y cierra en función de la sollicitación del material bajo condiciones extremas; en este caso, si la duración de las condiciones extremas está acotada, los riesgos derivados de la apertura de la fisura pueden ser despreciables; en otro caso será necesario evaluar las consecuencias de la apertura temporal de la fisura.

A este respecto cabe señalar que, siempre que la fisuración no se corresponda con un estado de rotura, la tensión de trabajo del acero se mantiene suficientemente alejada de su límite elástico, cuando desaparecen las cargas la fisura se cierra y, en consecuencia, la fisuración es un estado reversible a corto plazo. En general, el ancho máximo de fisura deberá fijarse en función de la agresividad del medio y de las acciones y su duración.

Supóngase el caso de un paramento de hormigón armado que, solicitado por las oscilaciones del mar, abre y cierra fisuras durante los temporales más fuertes. En general, la frecuencia y la duración de estos temporales es pequeña por lo que, el ataque del agua de mar a las armaduras, debido a la apertura de la fisura, suele ser despreciable. Si la apertura de la fisura ocurre con los estados de mar frecuentes, entonces, el tiempo de exposición durante la vida útil de la obra puede ser suficiente para que, de no tenerse en cuenta, provoque la corrosión de las armaduras y el deterioro estructural de la obra.

En la segunda situación, la fisura puede progresar continuamente durante la vida útil de la obra; en este caso, será necesario calcular cuándo alguna de las dimensiones geométricas de la fisura supera el criterio de fallo preestablecido.

4.2.3.1.5 Deformaciones excesivas

Son aquellos estados en los que se producen deformaciones que, sin ser acumulativas, pueden poner en peligro la funcionalidad del tramo de obra o de alguno de sus elementos.

Comentario

Este estado se puede producir en una viga flotante de una grúa que presente deformaciones superiores a las tolerancias para el uso y explotación de la grúa, admitidas y especificadas por el suministrador.

4.2.3.1.6 Estéticos, ambientales y legales

Son aquellos estados límite en los que la obra incumple los requisitos de servicio por pérdida formal, de atractivo, ambiental o legal.

Comentario

Algunos de los modos de fallo adscritos a estos estados límite son, flechas excesivas en elementos prefabricados, deformaciones de la viga cantil del muelle, etc.

4.2.4 Estados límite operativos, ELO

Se incluyen en la denominación de estados límite operativos todos aquellos en los que, se reduce o se suspende temporalmente la explotación por causas externas a la obra o a sus instalaciones, sin que haya daño estructural en ellas o en alguno de sus elementos. En general, la explotación se detiene para evitar que se produzcan daños estructurales en la obra o en las instalaciones, o consecuencias ambientales y sociales inaceptables. Una vez cesada la causa, la obra y sus instalaciones, recuperan totalmente los requisitos de explotación de proyecto.

Deben considerarse en los estados límite de parada operativa todos aquellos modos que pueden ocasionar,

1. Una reducción temporal de la fiabilidad y la funcionalidad de la obra y sus instalaciones.
2. Efectos ambientales y repercusiones sociales temporalmente inaceptables.

4.2.4.1 Clasificación de los ELO

Siempre que sean significativos, en cada fase de proyecto, deberán tomarse en consideración los siguientes estados límite de parada operativa por,

- Excedencia del valor umbral de uno o varios agentes
- Efecto ambiental o repercusión social inaceptable
- Requisito legal

En función de las particularidades relacionadas con de los factores de proyecto, forma en planta y tipología de la obra, la explotación del tramo y del entorno, se podrán proponer otros estados límite de parada operativa que deberán ajustarse a la definición dada en el apartado 4.2.4.

Comentario

Todas las obras civiles tienen una cierta probabilidad de dejar de operar por causas relacionadas con el medio físico, como sucede p.ej. en los aeropuertos, las carreteras, etc. No es posible construir una obra que tenga garantizada su explotación durante la totalidad de su vida útil. Por ello es necesario definir unos estados límite operativos. En las obras marítimas, la magnitud de los agentes ambientales, en particular los climáticos, oleaje, viento y niebla, suelen ser determinantes de su operatividad. Superada una cierta magnitud de los mismos o de sus acciones, denominada valor umbral, la obra o sus instalaciones deben parar, si no se quiere producir daños en la obra, las instalaciones, los usuario o el medio ambiente. Una vez que el agente o su acción se manifiesta por debajo del valor umbral, el servicio puede ser restablecido. Por tanto, los estados límite operativos no producen daños en la obra, sino que se adoptan para prevenirlos.

Los estados límite de operatividad sirven para evaluar las condiciones de explotación y de gestión de la obra marítima, y, por consiguiente, deberán ser analizados y evaluados en el proyecto.

Es recomendable redactar un Manual de Uso y Explotación de la obra para orientar al técnico responsable de los estados límite operativos y los respectivos modos de parada operativa.

4.2.4.1.1 Excedencia del valor umbral de los agente

Incluyen los modos de parada motivados por la excedencia de un valor umbral de uno o varios agentes del medio físico, en particular los climáticos.

Comentario

Este estado límite es intrínseco a la ubicación de la obra en el medio ambiente ya que es económicamente inviable proyectar una obra que mantenga la explotación toda la vida útil, para cualquier magnitud de los agentes del medio físico o de sus acciones. En este estado se incluyen todos los modos de parada operativa que los agentes del medio físico pueden inducir en la obra o en sus instalaciones.

Por ejemplo, a partir de un cierto umbral y al aumentar la velocidad del viento, una grúa reduce su nivel de explotación, disminuyendo su capacidad de carga hasta alcanzar un cierto umbral superior para el que la grúa debe dejar de operar. En la actualidad la legislación española obliga a que la grúa deje de trabajar, una vez superado el umbral de velocidad especificado. Otro caso similar ocurre cuando la agitación por oleaje o por ondas largas produce movimientos excesivos en el barco pudiéndose perder el control de las operaciones de carga y descarga. En esas condiciones es conveniente suspender la explotación.

Algunas veces la explotación queda suspendida porque el barco no puede llegar al muelle debido a la presencia de niebla. Ante la falta de visibilidad es aconsejable esperar para atracar el barco al muelle.

4.2.4.1.2 Efecto ambiental o repercusión social inaceptable

En este estado límite operativo se incluyen los modos de parada realizados para evitar daños a las personas, al patrimonio histórico y artístico o al medio ambiente.

Comentario

En algunos muelles de descarga de graneles es necesario limitar los volúmenes y el tiempo de descarga con vientos de determinadas direcciones, para minimizar la propagación de las partículas en suspensión. Conviene resaltar que en muchas ocasiones estos modos de parada surgen después de varios años de servicio de la obra, por la evolución de la actitud y conducta social, por el desarrollo urbanístico alrededor del área portuaria, por la entrada en vigor de nuevas normas legales, etc.

4.2.4.1.3 Requisito legal

En este estado límite operativo se incluyen los modos de parada realizados para cumplir con los requisitos legales de cualquier naturaleza.

Comentario

Al igual que con los estados límite anteriores, en muchas ocasiones los modos de parada adscritos a este estado surgen después de llevar la obra varios años en funcionamiento, al entrar en vigor nuevas normas legales o al modificar los límites de aplicación de las existentes. Un ejemplo de este caso es la normativa sobre emisión de efluentes al mar que, con el paso de los años, ha disminuido los límites admisibles de vertido de efluentes al mar.

4.3 Modos de fallo y de parada

Un modo describe la forma o mecanismo en que se produce el fallo o la parada operativa del tramo de obra o de un elemento de la misma.

4.3.1 Caracterización de un modo

Para caracterizar un modo de fallo o de parada operativa es necesario definir,

1. Forma o mecanismo en que se produce
2. Los factores de proyecto que pueden intervenir simultáneamente en su ocurrencia
3. Forma de verificación: (1) ecuación que describe la forma o el mecanismo y la relación funcional entre los factores de proyecto que intervienen en el modo o (2) experimentación
4. Las hipótesis para la aplicación y el rango de validez de la ecuación o de la experimentación

4.3.2 Adscripción de un modo a un estado límite

Los modos que ocurran de forma semejante o por el mismo mecanismo se adscribirán al mismo estado límite, estructural u operativo.

La adscripción de un modo, a uno u otro estado límite, se consignará en las Recomendaciones específicas. En otro caso, se procurará adscribir el modo con los siguientes criterios: (1) al estado límite cuya verificación sea la mas pesimista de las posibles, (2) al estado límite que describa mejor el trabajo desempeñado por el agente predominante en la consecución del modo y (3) en función de la ecuación de verificación a aplicar.

Comentario

La adscripción de un modo a uno u otro estado límite no es absoluta y, un mismo modo puede encajar en mas de un estado. Por ejemplo, la salida de piezas del manto principal de un dique de abrigo en talud puede adscribirse a dos estados límite últimos: pérdida de equilibrio estático y deformación acumulada.

En el primer caso, se considera la extracción de piezas individuales (como sólido rígido) del manto principal, sea bloque de hormigón, escollera, tetrápodo, etc., al ser superadas las resistencias a fricción y de engarce entre estas y las demás piezas del manto; en estas condiciones se supone que se produce el fallo cuando un número, absoluto o relativo, de piezas han sido extraídas del manto.

En el segundo caso, se considera la variación de la geometría (deformación acumulada) de la primera capa del manto principal debido a la salida de las piezas; en estas condiciones se supone que se produce el fallo cuando quedan al descubierto piezas de la segunda capa del manto que pueden ser extraídas.

La ecuación de verificación en cada caso debe cuantificar lo que define el fallo o criterio de fallo, número de piezas extraídas o deformación geométrica del manto principal. Si las respectivas ecuaciones de verificación son representativas del fenómeno que cuantifican, el resultado de la verificación debe ser el mismo.

En este ejemplo, ambas expresiones representan diferentes criterios de fallo cuya cuantificación se realiza mediante experimentación en modelo físico y, por tanto, ambas están relacionadas ya que parten de la misma base de datos. Es indiferente trabajar con una u otra.

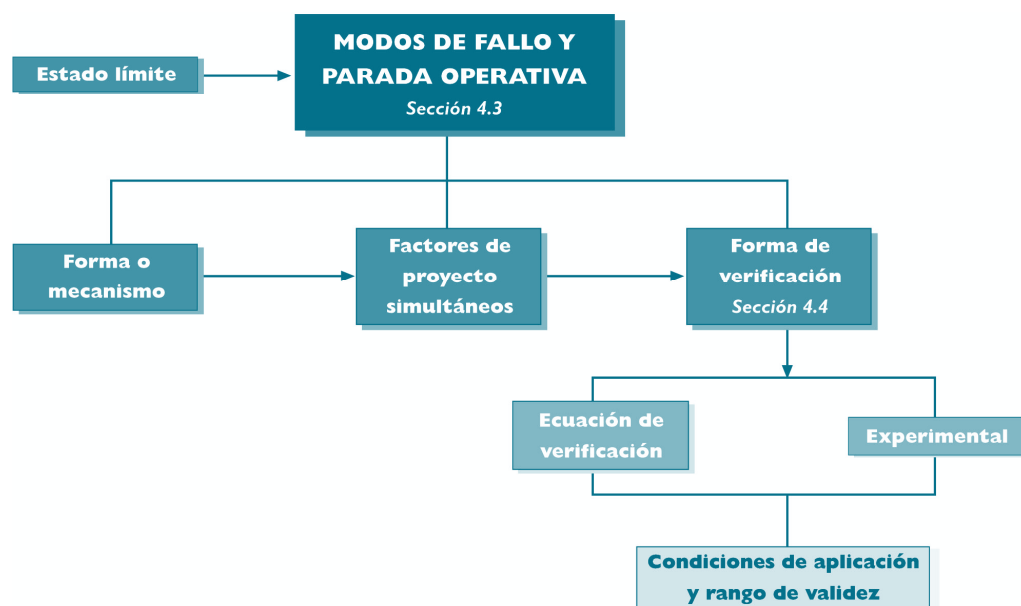


Figura 4.3:
Modos de fallo
y parada y
formas de
verificación.

4.4 Formas de la Ecuación de Verificación

Para cada modo de fallo adscrito a un estado límite, último o de servicio y para cada modo de parada de un estado límite operativo, se establecerá una ecuación de verificación, formada por un conjunto de términos. Esta ecuación es, por regla general, una ecuación de estado, y, por tanto, se aplica con la hipótesis de que las manifestaciones del conjunto de los factores de proyecto son estacionarias y uniformes desde un punto de vista estadístico.

4.4.1 Términos de la ecuación

Se forman por una combinación mediante operaciones matemáticas de factores de proyecto: parámetros y agentes y acciones. Por tanto, la palabra término se debe entender en su sentido matemático. Cada término puede estar formado, a su vez, por otros términos.

4.4.1.1 Términos favorables y desfavorables

Los términos se pueden ordenar en: favorables, X_1 , y desfavorables, X_2 , entendiendo por favorables aquellos que contribuyen a que no se produzca el modo y, por desfavorables, aquellos otros que inducen o provocan el modo. La intervención favorable o desfavorable de un factor de proyecto depende del modo analizado; este comportamiento no es generalizable a otros modos.

4.4.1.2 Clasificación temporal de los términos

Siguiendo los criterios elaborados en la sección 3.7, los términos de la ecuación de verificación se podrán clasificar en permanentes, no permanentes, extraordinarios e insólitos en función de la probabilidad de excedencia y de la persistencia de un valor umbral del factor de proyecto relevante en el término.

4.4.2 Formatos recomendados

Se recomiendan dos maneras de establecer la ecuación de verificación: Coeficiente de Seguridad Global y Margen de Seguridad. Tradicionalmente en Ingeniería, la verificación del cumplimiento de los requisitos de seguridad estructural de una obra frente a un modo de fallo, se realiza por medio de una ecuación en la forma de coeficiente de seguridad global.

4.4.2.1 Coeficiente de seguridad, Z

El coeficiente de seguridad, Z , es el cociente entre los términos favorables, X_1 , y los desfavorables, X_2 .

4.4.2.1.1 Coeficiente de seguridad mínimo

Con carácter general, para considerar que la obra o el elemento ha sido verificado favorablemente frente al modo, se deberá cumplir que el coeficiente de seguridad supere un cierto valor mínimo, $Z > Z_c$.

Comentario

El valor mínimo, Z_c , del coeficiente de seguridad depende, entre otros, del carácter de la obra, del modo de fallo, del estado límite, de las condiciones de trabajo y del tipo de combinación. En cada R.O.M. específica se definirán los valores que habrán de aplicarse en cada caso. Si se cumple que, $Z > Z_c$, el diseño se puede dar por válido, al menos desde el punto de vista de la seguridad, lo cual, no implica su validez desde el punto de vista ambiental, social o económico.

4.4.2.2 Margen de seguridad, S

Es la diferencia entre los términos favorables, X_1 , y los desfavorables, X_2 .

4.4.2.2.1 Margen de seguridad mínimo

Con carácter general, para considerar que la obra o el elemento ha sido verificado favorablemente frente al modo, se deberá cumplir que, $S > 0$.

Comentario

En el caso de las obras marítimas en general, la estructura de la ecuación de verificación se establece con pares de términos que pueden representar por ejemplo, acciones debidas a las oscilaciones del mar

y peso del bloque, tasa de arribada de buques y capacidad de la línea de muelle, tensiones calculadas y tensiones admisibles, nivel alcanzado por la lámina de agua y francobordo del dique.

Para verificar el requisito de rebase de un dique, es necesario definir el francobordo F_c y la altura de la lámina de agua en la obra provocada por las oscilaciones del mar R_w . El francobordo F_c es un parámetro de proyecto geométrico por ejemplo, cota con respecto a un nivel fijo de referencia y, salvo desviaciones esperables en el proceso constructivo, toma un valor determinado y fijo conocido a priori. La altura de la lámina de agua R_w , depende de las características de la obra, tales como porosidad, geometría, etc. y de las características de las oscilaciones del mar y, entre ellas, el oleaje. Si el requisito de proyecto o criterio de fallo es que no haya rebase, la ecuación de verificación es, margen de seguridad $S = F_c - R_w > 0$, ó coeficiente de seguridad $Z = F_c/R_w > Z_c; Z_c > 1$.

4.4.3 Valor de los términos de la ecuación de verificación

La ecuación de verificación es una ecuación de estado, por tanto, los factores de proyecto que intervienen en ella podrán tomar valores nominales o serán variables estadísticas. El valor de los términos de la ecuación depende del método de verificación que se selecciona en función del carácter general de la obra.

Comentario

En el caso del rebase del comentario precedente, la verificación del rebase se realiza en un estado de mar. El agente predominante es el oleaje; la ola se define por, la altura, el periodo y la dirección. En el estado se supone que el oleaje es un proceso estacionario, y, además, estadísticamente homogéneo en el tramo de obra. Es posible proceder de forma determinista eligiendo unos valores nominales de la altura, el periodo y la dirección de las olas. Pero también es posible, y en general más correcto, suponer que la altura, el periodo y la dirección de cada ola individual son variables aleatorias que se describen por un modelo de probabilidad.

En el caso de descripción determinista, la respuesta de la ecuación de verificación es, si hay $S \leq 0$, o no $S > 0$, rebase; en el caso de descripción probabilista, se puede obtener además, la probabilidad de que se produzca el rebase en el estado de mar.

4.4.4 Otras formas de verificación

En algunas ocasiones será necesario verificar el tramo mediante ensayos in situ o en laboratorio. Estas técnicas no se desarrollan en estas Recomendaciones. En estos casos, a efectos de aceptación de la verificación y de evaluación de la probabilidad de presentación de uno o todos los modos, deberán analizarse los resultados experimentales de la misma forma que los factores de proyecto y los términos de la ecuación de verificación, observando los aspectos relativos a su incertidumbre, describiéndola, en su caso, mediante modelos de probabilidad.

Comentario

El resultado de un experimento también conlleva incertidumbre que debe ser evaluada. Para ello, es necesario y conveniente repetir el experimento un número de veces suficiente para obtener una muestra estadísticamente representativa.

4.5 Condiciones de Trabajo

La obra se construye para cumplir unos determinados requisitos; entre ellos están, proporcionar las condiciones y medios necesarios para realizar las operaciones normales de uso y explotación, y resistir, sin daño ni deformaciones estructurales y formales, las acciones extremas y extraordi-

narias originadas por la mutua interferencia de la obra y el entorno. Los estados de proyecto que caracterizan aquellas condiciones y medios se agrupan en condiciones de trabajo, figura 4.4.

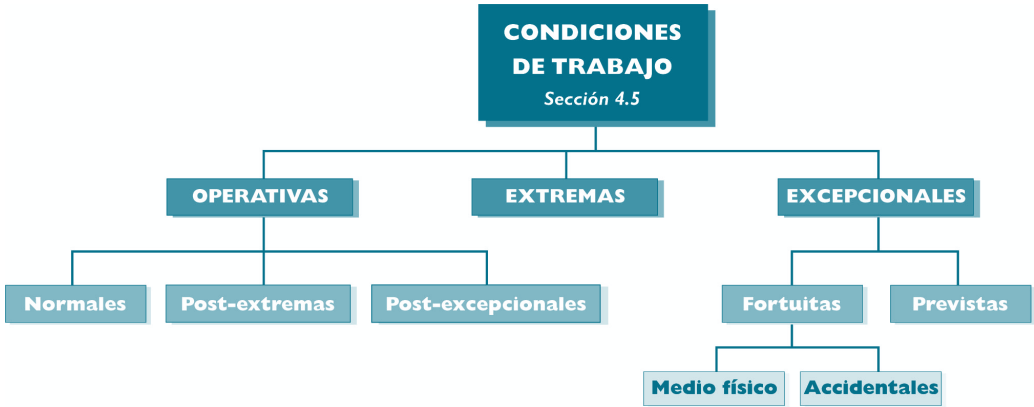


Figura 4.4:
Condiciones
de trabajo.

4.5.1

Definición

Una condición de trabajo, CT, es un conjunto de estados de proyecto caracterizados por la ocurrencia de algunos factores de proyecto en función de su simultaneidad y de su compatibilidad. En general, las condiciones de trabajo se especifican a partir de los agentes predominantes.

4.5.2

Condiciones de trabajo recomendadas

Para cada fase de proyecto e intervalo de tiempo se considerarán las siguientes condiciones de trabajo, CT_i , ($i = 1, 2, 3$), dadas en la tabla 4.1:

Tabla 4.1:
Condiciones
de trabajo en
el procedi-
miento de
verificación

| Condiciones de Trabajo | |
|------------------------|---------------|
| CT_1 | Operativas |
| CT_2 | Extremas |
| CT_3 | Excepcionales |

4.5.2.1

Condiciones operativas normales, CT_1

Incluyen los estados de proyecto que se dan habitualmente y en los cuales la obra presta el servicio para el cual ha sido concebida. Los agentes predominantes suelen ser los de uso y explotación, pudiendo actuar, simultáneamente, los restantes agentes. Para garantizar la operatividad de la obra, se acotarán los valores compatibles de los agentes simultáneos distintos de los predominantes. Cuando éstos superan los valores umbrales, se supondrá que la obra deja de estar temporalmente en explotación. Además de las condiciones normales, se considerarán, en su caso, las siguientes condiciones de trabajo operativas:

4.5.2.1.1

Operativas post-extremas, $CT_{1,2}$

En aquellos casos en que se admitan deformaciones parciales de la obra o de alguno de sus elementos, después de la presentación de unas condiciones de trabajo extremas, se deberán considerar condiciones de trabajo operativas post-extremas, al objeto de verificar que la obra en su

conjunto y cada uno de sus elementos, incluyendo la deformación parcial esperada, cumplen los requisitos de seguridad, de servicio y de explotación requeridos en las condiciones operativas CT_1 .

4.5.2.1.2 Operativas post-excepcionales, $CT_{1,3}$

Son las condiciones que se dan después de la presentación de unas condiciones de trabajo excepcionales. Si éstas han sido previstas, la obra en su conjunto y cada uno de sus elementos deben satisfacer los requisitos de seguridad, de servicio y de explotación requeridos en el proyecto para todas las condiciones de trabajo.

4.5.2.2 Condiciones extremas, CT_2

Incluyen los estados de proyecto asociados a las acciones más rigurosas debidas a los factores de proyecto. Los agentes predominantes que, en general en las obras marítimas son los ambientales climáticos, pueden tomar valores extremos y extraordinarios. En estas circunstancias, la obra no suele estar en explotación. En estos supuestos, se podrá considerar que los agentes de uso y explotación no son simultáneos con los agentes ambientales climáticos, o sus valores de compatibilidad son despreciables.

Comentario

Se pueden considerar valores extremos aquellos, (1) asociados a una probabilidad de ocurrencia "razonable" en el intervalo de tiempo considerado que, (2) sean físicamente posibles, (3) representativos de los datos desde un punto de vista estadístico y (4) consistentes con las hipótesis de partida.

4.5.2.3 Condiciones excepcionales, CT_3

Son el conjunto de estados de proyecto asociados a algunos valores de los factores de proyecto que tienen: (1) una probabilidad de presentación de ser superados muy pequeña y mucho menor que la probabilidad de presentación de los valores de los factores predominantes que definen las condiciones de trabajo extremas, (2) su presentación es inesperada y accidental o (3) ocurren por razones previstas de uso y explotación. Se podrán definir las siguientes condiciones excepcionales:

4.5.2.3.1 Excepcionales fortuitas, $CT_{3,1}$

Incluyen las condiciones fortuitas del medio físico y las condiciones fortuitas accidentales. Estas condiciones se especificarán en términos de los factores de proyecto excepcionales y de un número reducido de agentes simultáneos, acotando sus valores por criterios de compatibilidad. Tanto la reducción del número de agentes simultáneos como la limitación de valores compatibles se realizarán en función del carácter de la obra.

4.5.2.3.2 Fortuitas del medio físico, $CT_{3,1,1}$

Son el conjunto de estados de proyecto asociados a manifestaciones de la dinámica marina, atmosférica u otras acciones del medio físico de nivel extraordinario aunque previsible. En ellas, en general, se podrán admitir fallos parciales de la obra o de alguno de sus elementos.

4.5.2.3.3 Fortuitas accidentales, $CT_{3,1,2}$

Están formadas por los estados de proyecto originados por un accidente o mal uso de la instalación. En ellas, en general, podrá no haber explotación y se podrán admitir fallos parciales de la obra.

o de alguno de sus elementos.

4.5.2.3.4 Excepcionales previstas, CT_{3,2}

Incluyen los estados de proyecto provocados por una necesidad de uso o explotación, planificados y bajo control, que pueden exigir el refuerzo de la obra o de alguno de sus elementos. Remitida la situación de excepcionalidad, la obra y cada uno de sus elementos deben satisfacer los requisitos de seguridad, de servicio y de explotación. Los agentes simultáneos y sus valores de compatibilidad con los factores predominantes; se adoptarán en función del carácter de la obra y de la duración del intervalo de tiempo en el cual se dan las condiciones de trabajo excepcionales previstas.

4.5.2.3.5 Especificación de las condiciones de trabajo excepcionales

Siempre que no se esté obligado por la legislación vigente, las condiciones de trabajo excepcionales serán definidas por el promotor, en función del carácter de la obra, las características del medio físico y la tipología de las instalaciones construidas al amparo de la misma.

Comentario

En general, las condiciones de trabajo excepcionales están producidas por la presentación o la consideración en el proyecto de factores de proyecto insólitos.

4.6 Condiciones de Trabajo y Estados Límite

En cada tramo de obra y para cada fase de proyecto, la verificación de los modos de fallo adscritos a los estados límite últimos y de servicio y de los modos de parada operativa se realizará para las condiciones de trabajo preestablecidas en función del carácter general y el carácter operativo de la obra marítima.

4.6.1 Condiciones de trabajo a verificar

En cada fase de proyecto, se deberán verificar los requisitos de seguridad, servicio y explotación del tramo para las condiciones de trabajo especificadas con un "SI" en la tabla 4.2

Tabla 4.2:
Condiciones
de trabajo y
estados límite

| Condiciones de trabajo | | Estados Límite | | |
|------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|-----------|
| | | Último | Servicio | Operativo |
| Operativas | Normales | Si | Si | Si |
| | Post-extremas/excepcionales | (2) y (5) | (1), (2) y (5) | (1) y (4) |
| Extremas | | Si | Si | No |
| Excepcionales | Fortuitas | (3) | (3) | No |
| | Previstas | (3) | (3) | (2) |

- Notas a la
tabla 4.2
1.

Después de la ocurrencia de unas condiciones extremas, se verificará que el tramo es funcional y operativo
2.

Las condiciones operativas serán las requeridas por la situación excepcional prevista; finalizadas éstas la obra deberá satisfacer las condiciones de trabajo normales y extremas

3. Se verificará que durante la ocurrencia de las condiciones de trabajo excepcionales, CT_3 , no se superan los niveles de daño especificados en el proyecto
4. Después de la ocurrencia de las condiciones de trabajo excepcionales, se verificará que se satisfacen los requisitos de operatividad parcial, especificados en los objetivos del proyecto y que la obra es funcional frente a los modos de fallo adscritos al estado límite de servicio de daños permanentes
5. Después de la ocurrencia de las condiciones de trabajo excepcionales, se verificará que la obra es fiable frente a los modos de fallo adscritos al estado límite último de colapso progresivo

4.6.2 Condiciones de trabajo y estados límite últimos

Por lo general y salvo justificación, además de lo recomendado en la tabla 4.1 del apartado 4.6.1, se verificará que la obra es segura frente a los modos de fallo de los estados límite últimos durante las fases de proyecto y para las condiciones de trabajo dadas en la tabla 4.3.

Tabla 4.3:
Condiciones de trabajo y estados límite últimos

| Condiciones de trabajo | | Fase de proyecto | | |
|------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------|--------------|
| | | Construcción | en la Vida Útil | Reparación |
| Operativas | Normales | Si (1) | Si | Si (1) y (3) |
| | Post-extremas/excepcionales | No | (2) | (3) |
| Extremas | | Si | Si | (3) |
| Excepcionales | Fortuitas | (4) | (4) | (3) y (4) |
| | Previstas | (5) | (5) | (3) y (4) |

- Notas a la tabla 4.3
1. Solo cuando haya entrada en servicio parcial y para la comprobación de los elementos que intervienen significativamente en los procesos de construcción y reparación
 2. Cuando se admitan modificaciones en los factores de proyecto
 3. A especificar en el proyecto de reparación y desmantelamiento
 4. Solamente cuando se definan las condiciones excepcionales
 5. Cuando ocurran condiciones excepcionales previstas

4.6.3 Condiciones de trabajo y estados límite de servicio

Por lo general y salvo justificación, además de lo recomendado en la tabla 4.1 del apartado 4.6.1, se verificará que la obra es segura frente a los modos de fallo de los estados límite de servicio, durante las fases de proyecto y para las condiciones de trabajo dadas en las tablas 4.4.

Tabla 4.4:
Condiciones de trabajo y estados límite de servicio

| Condiciones de trabajo | | Fase de proyecto | | |
|------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------|--------------|
| | | Construcción | en la Vida Útil | Reparación |
| Operativas | Normales | Si (1) | Si | Si (1) y (3) |
| | Post-extremas/excepcionales | No | (2) | (3) |
| Extremas | | (1) | Si | (3) |
| Excepcionales | Fortuitas | (4) | (4) | (3) y (4) |
| | Previstas | (5) | (5) | (3) y (5) |

- Notas a la tabla 4.4
1. Solo cuando haya entrada en servicio parcial y para la comprobación de los elementos que intervienen significativamente en los procesos de construcción y reparación

- 2. Cuando se admitan modificaciones en los factores de proyecto
- 3. A especificar en el proyecto de reparación o desmantelamiento
- 4. Solamente cuando se definan las condiciones excepcionales
- 5. Cuando ocurran condiciones excepcionales previstas

4.6.4

Condiciones de trabajo y estados límite operativos

Por lo general y salvo justificación, la obra deberá estar en explotación, al menos, durante la vida útil en condiciones de trabajo operativas normales CT₁, tabla 4.5. Por razones de uso y explotación, la obra podrá estar en explotación en otras condiciones de trabajo, debiéndose, en ese caso, especificar en el proyecto las condiciones de trabajo y la operatividad.

Tabla 4.5:
Condiciones
de trabajo y
estados límite
operativos

| Condiciones de trabajo | | Fase de proyecto | | |
|------------------------|-----------------------------|------------------|----------|--------------|
| | | Construcción | Servicio | Reparación |
| Operativas | Normales | Si (1) | Si | Si (1) y (3) |
| | Post-extremas/excepcionales | No | (4) | (3) |
| Extremas | | No | (2) | (3) |
| Excepcionales | Fortuitas | No | (4) | (3) y (4) |
| | Previstas | (5) | (5) | (3) y (5) |

- Notas a la
tabla 4.5
- 1. Solo cuando haya entrada en servicio parcial y para la comprobación de los elementos que intervienen significativamente en los procesos de construcción y reparación
 - 2. Si se requiere y se especifica en el proyecto
 - 3. Si se requieren durante la reparación y el desmantelamiento
 - 4. Solamente cuando se definan las condiciones excepcionales
 - 5. Cuando ocurran condiciones excepcionales previstas

4.7

Ordenación de Factores y Términos

En cada tramo de obra, y para todos los métodos de verificación que se vayan a aplicar, es conveniente reducir el número de factores de proyecto que intervienen en los términos de la ecuación de verificación.En el caso de los métodos probabilistas,si se conoce la función de distribución conjunta de los factores, la ordenación de los factores está implícita en el propio método y contribuye a simplificar la aplicación de los métodos de verificación probabilistas.

En el caso de los métodos de verificación deterministas,la ordenación es estrictamente necesaria. En la figura 4.5 se esquematiza en forma de diagrama una secuencia para la ordenación de factores y términos, aplicable a cualquier método de verificación y que se concreta mediante la selección secuencial de los factores de proyecto que pueden intervenir, de manera simultánea, en la ocurrencia de un modo de fallo.

Comentario

En los siguientes apartados se precisan los criterios de ordenación que pueden aplicarse, tanto a los factores de proyecto, como a los términos de la ecuación. Se aplicarán, a uno u otro conjunto, dependiendo de la información y de los datos disponibles; no obstante, la ordenación por factores o por términos no son excluyentes o redundantes, sino complementarias.

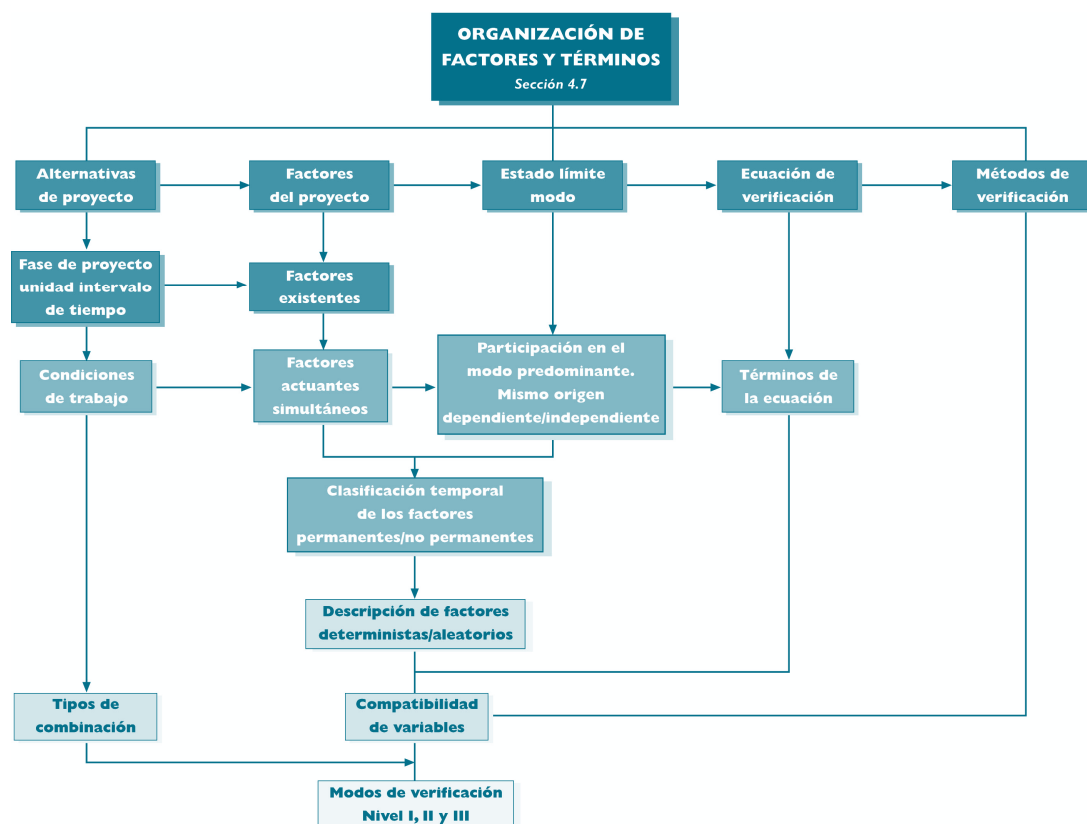


Figura 4.5:
Ordenación
de factores
y términos

4.7.1 Esquema para la ordenación

Se recomienda ordenar los factores de proyecto y los términos de la ecuación de verificación de acuerdo con el siguiente esquema,

1. Criterios generales de proyecto: fase y condición de trabajo
2. Intervalo de tiempo y tramo de obra
3. Método de trabajo, estado límite y modo
4. Factores y término de la ecuación de verificación

4.7.1.1 Según la fase y la condición de trabajo

Por lo general, los factores de proyecto en una fase se podrán ordenar por razones físicas y operativas en no existentes y existentes² y éstos en actuantes y no actuantes en función de las condiciones de trabajo consideradas.

(2) Esta definición es complementaria de la definición de factor despreciable. En este caso las razones de declarar un factor actuante son de origen físico y operativo, independientemente del modo analizado y del factor predominante.

Comentario

El sismo puede ser declarado como factor no existente en obras ejecutadas en el litoral cantábrico, pero debe ser declarado factor existente en obras ejecutadas en el litoral almeriense;no obstante, el sismo puede ser declarado no actuante en la fase de proyecto construcción, debido a la corta duración de dicha fase y, sin embargo,ser declarado factor existente en la fase de servicio.Además, en la fase de servicio y en condiciones de trabajo operativas normales, el sismo puede ser declarado como factor existente pero no actuante, mientras que puede ser declarado existente y actuante en condiciones de trabajo extremas.

4.7.1.2 Según el intervalo de tiempo

En cada una de las fases de proyecto, condición de trabajo e intervalo de tiempo en los cuales se vaya a verificar la obra y sus elementos, se ordenarán los factores o términos de acuerdo con el siguiente esquema

4.7.1.2.1 Simultáneos

Son aquellos que, en un intervalo de tiempo, pueden coexistir al no estar impedidos por causas naturales, operativas u otras razones. De éstos, los que actúan, acompañan o colaboran en el mismo sentido, se dice que son concomitantes.

4.7.1.2.1.1 Permanentes y no permanentes

Del conjunto de factores o términos simultáneos y aplicando la clasificación temporal, sección 3.7, se formarán los conjuntos permanentes y los no permanentes, según la duración y cadencia de su actuación durante el intervalo de tiempo.

4.7.1.3 Según el estado límite y el modo

Del conjunto de factores o términos, existentes, actuantes, simultáneos, permanentes y no permanentes, para cada estado límite y modo, se definirán los siguientes factores o términos, según magnitud o importancia de su participación en la ocurrencia del modo.

4.7.1.3.1 Predominantes

Aquellos cuyo efecto es determinante en la ocurrencia del modo y, por tanto, son decisivos en la tipología, ubicación espacial, dimensiones geométricas, formas y función de la obra o del tramo de obra.

4.7.1.3.1.1 Factores relacionados con el predominante

De los restantes, se definirán los subconjuntos de factores o términos que tienen el mismo origen que el predominante, o son dependientes funcional o estadísticamente de él, y los independientes. De este último subconjunto se definirán, de forma análoga, los subconjuntos de factores o términos que tienen el mismo origen o tienen dependencia funcional o estadística entre sí, así como aquellos totalmente independientes.

4.7.1.4 Según la ecuación de verificación

Del conjunto de factores o términos existentes, actuantes simultáneamente, permanentes y no permanentes, se definirán los siguientes subconjuntos, según su magnitud relativa y según el sentido de su participación en la ocurrencia del modo.

4.7.1.4.1 Despreciables frente al predominante

Se considerarán despreciables, aquellos cuyo efecto, o variabilidad del mismo, sobre la obra o sobre alguno de sus elementos estructurales, no es significativo comparado con el efecto producido por el factor predominante.

Comentario

Cuando el término de la ecuación de verificación en el que interviene el factor es menor que el "n %" de la magnitud debida al término predominante, se puede decir que su efecto es despreciable. El valor de n depende del carácter de la obra marítima, de la fase de proyecto y de la condición de trabajo y se acotará en las Recomendaciones específicas.

4.7.1.4.2

Favorables y desfavorables

(3) Obsérvese que la declaración del factor de proyecto o término, como favorable o desfavorable, no es absoluta y puede depender del modo, del estado límite, de la condición de trabajo y de la fase de proyecto.

De los conjuntos de términos que pueden estar presentes en la ecuación de verificación, se construirá el conjunto de aquellos que contribuyen a evitar que se produzca el modo, llamados favorables y el conjunto de los que favorecen la ocurrencia del modo, llamados desfavorables³.

Comentario

En algunos casos, un factor que, generalmente, será un parámetro de proyecto, podrá aparecer simultáneamente en términos favorables y desfavorables.

Aunque los factores y términos puedan pertenecer al subconjunto de existentes, actuantes simultáneamente, permanentes y no permanentes, no despreciables y favorables y desfavorables, los valores con los que participan en la ecuación de verificación deben ser compatibles. En los apartados siguientes se desarrollan algunos criterios para ayudar en la determinación de valores compatibles de los factores y términos.

4.8

Compatibilidad de Valores

Los valores de los factores de proyecto y de los términos, magnitud y en su caso dirección, que coexisten, directa o indirectamente, en una ecuación de verificación, deben ser compatibles entre sí. Se entiende por valores compatibles, aquellos que están "en armonía" con otros que intervienen, de forma simultánea, en la ecuación de verificación y, por tanto, en la ocurrencia del modo. En el caso de verificar el modo mediante la aplicación de un método determinista es necesario regular la compatibilidad de valores de factores y términos. En los métodos probabilistas, la compatibilidad de los valores es un resultado del método. No obstante, en muchas ocasiones, los términos de la ecuación de verificación contienen factores deterministas y aleatorios, por lo que el análisis de la compatibilidad de los valores es siempre conveniente.

La compatibilidad se realizará teniendo en cuenta las clases estadísticas de valores de los términos definidas en la sección 3.9, clases de la cola inferior, centrada y de la cola superior.

Una vez realizada la ordenación de factores y términos que pueden intervenir en un modo se establecerán las equivalencias entre las clases de valores de los diferentes términos y, en particular, con respecto al predominante.

4.8.1

Equivalencia de clases

A partir de la clase de valores del factor o término predominante, se determinarán para cada uno de los subconjuntos, el rango de valores compatibles con el predominante de acuerdo con los siguientes criterios.

Para el subconjunto de factores o términos con el mismo origen y dependientes, funcional o esta-

dísticamente, del predominante, la clase equivalente se obtendrá aplicando la relación funcional o estadística al conjunto de valores posibles del término predominante.

La clase equivalente para el subconjunto de factores y términos independientes del predominante, la compatibilidad se realizará por razones de su naturaleza física, química, por su proceso de construcción, etc. En cualquier caso, se deberá tener en cuenta la equivalencia de clases para todos aquellos términos o factores que tienen una relación de dependencia entre sí, considerando la clase de uno de ellos de referencia, y, determinando sus equivalentes de forma análoga a la descrita en el párrafo anterior.

Estas equivalencias de clases se deberán realizar en cada intervalo de tiempo y para todas las descripciones estadísticas: valores centrados, máximos y mínimos.

4.8.1.1 Eliminación de valores de la clase equivalente

Por último, para cada una de las clases equivalentes obtenidas, se eliminarán los valores que el factor o término no puede tomar por estar impedido o limitado por causas naturales, operativas u otras razones.

4.8.2 Otras clases de valores

Se podrán definir previa justificación otras clases de valores en las que se incluyan factores y términos simultáneos que pueden intervenir en la ocurrencia de un modo. Una vez definida la nueva clase, se establecerá en su caso, su equivalencia con el término predominante y se delimitarán sus valores.

4.9

Combinación de Factores y Términos

En un tramo de la obra, un modo de fallo o de parada puede ocurrir en cualquier estado y condición de trabajo durante una fase de proyecto; no obstante, en la fase de proyecto servicio, los modos adscritos a los estados límite últimos serán más probables durante las condiciones de trabajo extremas y excepcionales, mientras que los modos adscritos a los estados límite de servicio y de parada operativa, tendrán mas posibilidad de ocurrir durante las condiciones de trabajo normales operativas.

No es necesario verificar todos y cada uno de los estados de proyecto que pueden ocurrir durante cada una de las fases de la obra y condiciones de trabajo, sino, solamente, aquellos para los que la probabilidad de ocurrencia del modo sea significativa. La participación en la ecuación de verificación de los diferentes factores y términos y sus respectivos valores se establezcan para ciertas combinaciones que se concretan en unos tipos de combinación que se forman mediante factores y términos que pueden intervenir, con simultaneidad con valores compatibles en la ocurrencia de un modo.

Comentario

La combinación de factores y términos para la verificación de un modo en un intervalo de tiempo se puede formular determinísticamente, de acuerdo con la denominada “regla de Turksta”. En general, la forma más sencilla de realizar la combinación es la simple adición de términos simultáneos, sin observar

su probabilidad de ocurrencia en el intervalo, ni la compatibilidad de sus valores. Supóngase, que el modo de fallo puede ocurrir por la presentación de uno de los dos factores de proyecto predominantes e independientes, $i = 1, 2$, y que cada uno de ellos interviene en el término $X_{2,i}$. De acuerdo con lo anterior, el valor máximo del término X_2 , sería:

$$\max (X_2) = \max (X_{2,1}) + \max (X_{2,2})$$

Se comprende que esta simplificación puede producir obras sobredimensionadas. Por lo tanto, un resultado más razonable es:

$$\max (X_2) = \max [(\max X_{2,1} + X_{2,2}^*); (\max X_{2,2} + X_{2,1}^*)]$$

es decir, el término desfavorable del modo se selecciona entre, (1) el valor máximo del término asociado al factor predominante $i = 1$, más el valor del término asociado al factor predominante $i = 2$, cuando ocurre el valor máximo de aquel; y, (2) el valor máximo del término asociado al factor predominante $i = 2$ más el valor del término asociado al factor predominante $i = 1$, cuando ocurre el valor máximo de aquel. Este resultado se puede generalizar para n términos desfavorables,

$$\max (X_2) = \max [(\max X_{2,i} + \sum_{j=1}^n X_{2,j}^*), j \quad i; i = 1, \dots, n]$$

La dificultad reside ahora en la determinación del valor máximo de $X_{2,i}$ y de los valores "acompañantes" o concomitantes, $X_{2,j}^*$, que dependen del método de verificación.

En el método determinista de Nivel I, por ejemplo el de los coeficientes parciales el valor máximo es, en general, el valor característico asociado al cuantil del 95%, mientras que los valores acompañantes dependen de los tipos de combinación, tal y como se establece en los apartados siguientes.

En los métodos de verificación probabilistas, denominados Nivel II y III, al menos en teoría, la combinación de los valores de los términos que proporciona la probabilidad de fallo pésima, se obtiene como resultado de la aplicación del método. En la práctica, bien por falta de información estadística, bien por la dificultad o la envergadura del cálculo, es conveniente reducir el número de estados a verificar, definiendo, a priori, unos tipos de combinación. En cualquier caso, para establecer la compatibilidad de los valores de los factores y términos se recomienda seguir el patrón de trabajo de la sección 4.7.

4.9.1 Tipos de combinación

Se definen tres tipos de combinación de factores y términos: poco probable o fundamental, frecuente y cuasi-permanente o habitual 4, figura 4.6.

(4) Estas denominaciones se ajustan al significado de las palabras; habitual es lo que se hace por hábito, uso o costumbre; frecuente es algo que se repite a menudo y cuasi-permanente se denomina a lo que es casi permanente.

4.9.1.1 Combinaciones poco probables o fundamentales

Describen la ocurrencia de factores de proyecto o términos predominantes cuyo rango de valores pertenece a la clase de la cola superior, (o en su caso de la inferior), combinada con la ocurrencia de otros factores o términos pertenecientes a las clases centrada y de la cola inferior. Por consiguiente, en este tipo de combinación, además del predominante y de los dependientes de él, suelen intervenir pocos factores o términos más, con valores de las clases centrada y, rara vez, de la cola inferior.

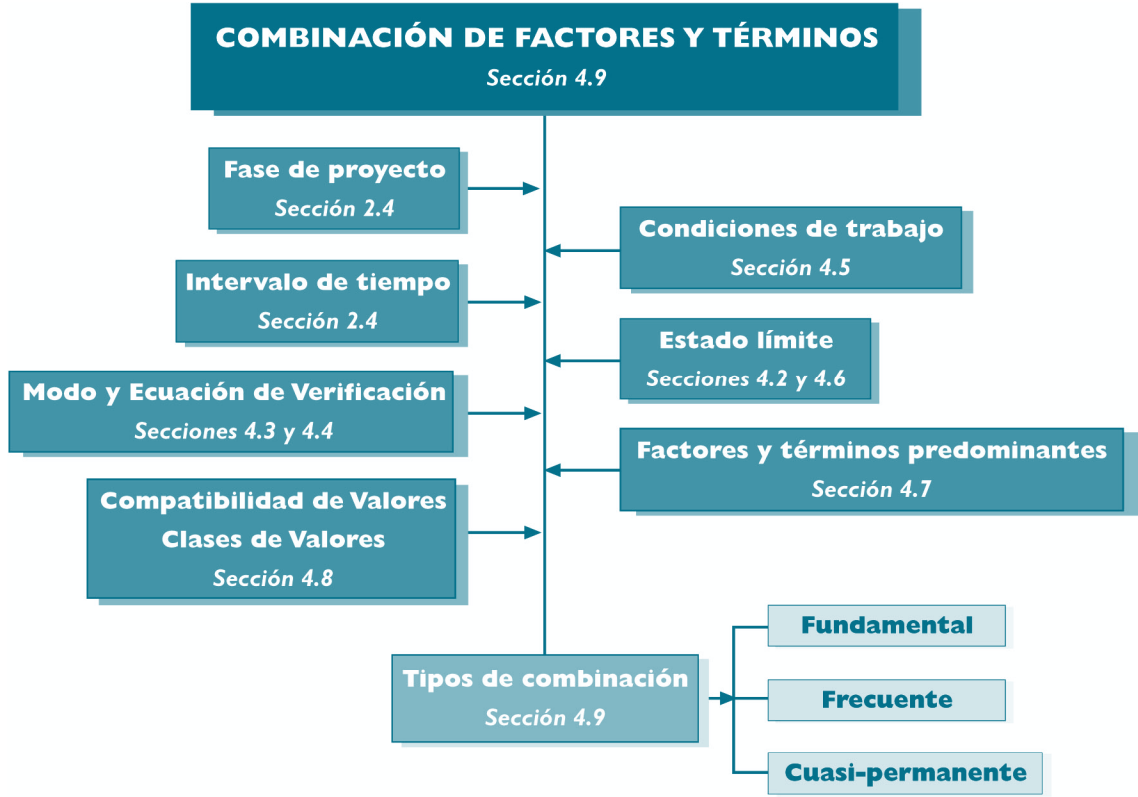


Figura 4.6:
Combinación
de factores
y términos

4.9.1.2 Combinaciones frecuentes

Describen la ocurrencia de factores de proyecto o términos predominantes con valores correspondientes a la clase centrada, combinados con otros factores y términos, algunos de la cola inferior y varios de la clase centrada. Dado que los valores predominantes pertenecen a la clase centrada, con este tipo se pretende ampliar el número de factores y términos simultáneos y compatibles que intervienen en la verificación del modo. Esta combinación se aplica, entre otros, para los casos en los que haya factores y términos con umbrales de operatividad.

4.9.1.3 Combinaciones cuasi-permanentes o habituales

Describen la ocurrencia de factores de proyecto predominantes con valores centrados, combinados con valores de factores y términos, algunos de la clase centrada y varios de la cola inferior. Se pretende con este tipo de combinación ampliar, aún más, el número de factores y términos que intervienen en la verificación, pero ninguno de ellos con valores de la clase de la cola superior.

Comentario

La denominación de los tipos de combinación es diferente a la utilizada en la ROM 0.2 y en la EHE. En aquella, los tres tipos de combinación se denominaban para los estados límite de servicio: rara o poco frecuente, frecuente y cuasi-permanente; por su parte en la EHE, para los estados límite de servicio, la denominación propuesta es, poco probable, frecuente y cuasi-permanente. En esta ROM se añade la denominación de fundamental para las combinaciones raras, poco probables o poco frecuentes, y habitual al tipo de combinaciones cuasi-permanentes. Cualquiera que sea su denominación, los tres tipos de combinación tienen un ámbito de aplicación análogo, al menos para la verificación de los estados límite de servicio. No obstante, no existe razón alguna para no aplicar los mismos tipos de combinación para verificar los estados límite últimos y de parada operativa. Esta aplicación común debe redundar en una homogeneización de las combinaciones de términos y factores en la verificación de una alternativa de proyecto.

4.9.2 Secuencia para construir un tipo de combinación

Definidas una fase de proyecto y un estado límite, el modo adscrito a él se verificará para diversos tipos de combinación de factores y términos; éstos se construirán identificando,

1. Los factores predominantes, del mismo origen, dependientes y condicionantes de ellos
2. Los factores independientes
3. De ellos, los permanentes y no permanentes, extraordinarios e insólitos (si los hubiere)
4. De ellos, los favorables y los desfavorables

Para cada factor predominante, i , se verificarán las condiciones de trabajo operativas (CT_1), extremas (CT_2) y excepcionales (CT_3), si las hubiere, y, para cada una de ellas, se considerarán las combinaciones fundamentales (1), frecuentes (2) y cuasi-permanentes (3). De esta manera, en cada fase de proyecto, estado límite y modo, se pueden adscribir las siguientes ternas de números, que representan los tipos de combinación: $(i, CT_1, 1)$, $(i, CT_1, 2)$, $(i, CT_1, 3)$, $(i, CT_2, 1)$, $(i, CT_2, 2)$, $(i, CT_2, 3)$, y si las hubiere, $(i, CT_3, 1)$, $(i, CT_3, 2)$, $(i, CT_3, 3)$, donde la letra, i , representa el término predominante, y los dos restantes elementos indican la condición de trabajo y los tipos de combinación. De manera justificada, se podrá no verificar algunas de estas ternas o tipos de combinación.

Comentario

Algunas de estas combinaciones son muy poco probables, por ejemplo, la $(i, CT_2, 3)$, $(i, CT_3, 2)$, $(i, CT_3, 3)$ y, por tanto, no se considerarán. En general, siguiendo la ROM 0.2-90, apartado 4.2.2, no se construirán tipos de combinación con más de dos términos debidos a agentes de uso y explotación y dos términos debidos a agentes del medio físico.

4.9.3 Tipos de combinación a considerar

Para las fases de proyecto construcción y servicio y los estados límite últimos, servicio y parada operativa, se deberán considerar, al menos, los siguientes tipos de combinación.

4.9.3.1 Combinación $(i, CT_1, 1)$

En general, este tipo se aplica a modos adscritos a los estados límite últimos. Analiza el modo frente a valores umbrales de los términos del medio físico, por lo general compatibles con otros términos, (por ejemplo de uso y explotación), que podrán ser los predominantes. Aplicada a condiciones de trabajo operativas verifica el modo frente a la presentación de valores máximos de los términos de uso y explotación. Estos valores dependen del régimen de explotación. Los valores umbrales de los términos estarán asociados en general, a ocurrencias poco frecuentes pero no extremas, por lo que su determinación se realizará a partir de la clase de valores centrados.

4.9.3.2 Combinación $(i, CT_2, 1)$

Por lo general esta hipótesis se aplica a modos adscritos a los estados límite últimos. Se considerará la presencia de varios términos predominantes simultáneos e independientes entre sí con otros términos simultáneos. Aplicada a las condiciones de trabajo extremas verifica el modo frente a la presentación de valores máximos de los términos predominantes. Los valores de los términos o factores predominantes pertenecerán a la clase de valores de la cola superior (o, en su caso, a la cola inferior) de la correspondiente función de distribución.

4.9.3.3 Combinación (i, CT₃,1)

Analiza la presencia de los términos asociados al factor extraordinario o insólito. Aplicada a condiciones de trabajo excepcionales, verifica el modo frente a la presentación de valores excepcionales del factor predominante, simultáneamente con otros términos, que se podrán considerar por sus valores pertenecientes a las clases centrada o de la cola inferior; dependiendo de la duración y de la cadencia del estado de proyecto excepcional. Los valores de los factores o de los términos excepcionales suelen pertenecer a la clase de la cola superior.

4.9.3.4 Combinación (i, CT₂,2) e (i, CT₁,3)

En general este tipo de combinación se aplicará a modos adscritos a los estados límite de servicio y operativos. Analiza la ocurrencia de varios factores y términos de diferente origen. Aplicada a condiciones de trabajo operativas verifica el modo frente a la presentación de valores centrados de los términos de uso y explotación que dependen de régimen de explotación, con valores umbrales de los términos asociados a factores del medio físico.

Comentario *Los tipos de combinación deben considerarse como una guía o ayuda para definir la simultaneidad de los factores de proyecto y los términos que pueden intervenir en los diferentes estados de proyecto y sus valores compatibles. En el método de los coeficientes parciales, el tipo de combinación es parte del método ya que los términos de la ecuación se ven afectados por un coeficiente de compatibilidad. Con él, se trata de compatibilizar los rangos de valores adscritos a los factores de proyecto que intervienen en los diferentes términos.*

En los métodos de verificación probabilistas, en el caso de disponer de la función de distribución conjunta de los factores de proyecto, no sería necesario establecer tipos de combinación. Esta situación, está lejos de ser una realidad ya que, en el mejor de los casos, se dispone de la distribución conjunta de algunos factores, distribuciones marginales de otros y valores nominales de otros. En estos casos, los tipos de combinación pueden ayudar a verificar un modo y a evaluar la probabilidad de fallo, por cuanto de forma determinista, se pueden establecer la simultaneidad y la compatibilidad de los factores de proyecto descritos por valores nominales.

4.10 Métodos de Verificación y Cálculo

En el ámbito de estas Recomendaciones, para verificar la obra frente a un modo de fallo adscrito a un estado límite último o de servicio y de un modo de parada adscrito a un estado límite de parada operativa, se proponen los siguientes métodos de verificación y de cálculo, figura 4.7,

- Métodos de Nivel I
 1. Coeficiente de seguridad global, [1]
 2. Coeficientes parciales, [2]
- Métodos de Nivel II y III
 3. Momentos estadísticos y técnicas de optimización, Nivel II, [3]
 4. Integración y simulación numérica, Nivel III, [4]

4.10.1 Métodos de Nivel 1, [1] y [2]

Incluyen los métodos del coeficiente de seguridad global [1] y de los coeficientes parciales [2]; en ambos métodos, los factores de proyecto y los valores de los términos de la ecuación de verificación se determinan, por lo general, con criterios deterministas.

En el método de los coeficientes parciales, los términos de la ecuación se multiplican por unos coeficientes que ponderan su simultaneidad y compatibilidad, así como el sentido (favorable o desfavorable) de su participación en la ocurrencia del modo.

En el método del coeficiente de seguridad global, los términos favorables y desfavorables no se afectan de ningún coeficiente de ponderación, aunque si de compatibilidad, concentrando en el coeficiente de seguridad todos los aspectos relacionados con la incertidumbre en el proceso de verificación, excepto la relacionada con el tipo de combinación.

No obstante, al menos en el ámbito de las obras marítimas, la determinación de los valores de los agentes del medio físico debe de realizarse, en la medida de lo posible, por criterios probabilistas.

Comentario

La palabra determinista debe entenderse en el sentido de que esencialmente los factores de proyecto y los resultados se tratan como variables deterministas, lo que no quiere decir que no haya algunos factores que se traten como variables aleatorias, por ejemplo, la resistencia del hormigón a compresión simple y a tracción, la altura y periodo del oleaje, la velocidad del viento, etc.

4.10.1.1 Evaluación del criterio de fallo

Se considera que una alternativa de proyecto cumple los requisitos de proyecto frente a un modo de fallo en el intervalo de tiempo, cuando el coeficiente de seguridad, Z supere un valor mínimo, Z_c , que se fijará en las Recomendaciones específicas y, en el caso del método de los coeficientes parciales, el margen de seguridad satisface, $S > 0$.

4.10.1.2 Resultado de la aplicación de los métodos de Nivel 1

El resultado de la aplicación de los métodos de Nivel I es un valor que indica el comportamiento del tramo frente al modo.

4.10.2 Métodos de Nivel 1I, [3]

Se formula la ecuación de verificación en términos del margen de seguridad. Para aplicar este método se deben conocer en el intervalo de tiempo, las funciones de distribución y de covarianza de los factores de proyecto (o en su caso establecer hipótesis de trabajo sobre las mismas, en particular sobre la independencia estadística de los términos de la ecuación de verificación). Ésta, se define en función de los momentos estadísticos de primer orden y, mediante transformaciones funcionales, se expresa en términos de variables gaussianas, reducidas e independientes.

En este sistema de variables, la probabilidad de fallo está relacionada con la distancia mínima del origen de coordenadas a la superficie de fallo, $G=0$, que es una ecuación de verificación en formato de margen de seguridad. Por ello, en general, el resultado es aproximado. No obstante, en la actualidad existen otras formas de resolver el problema de minimización que no requieren transformar las variables en gaussianas.

| | |
|--|--|
| 4.10.2.1 | Evaluación del criterio de fallo |
| La ecuación de verificación es del tipo margen de seguridad, por tanto, con carácter general, el tramo cumple los requisitos de proyecto frente al modo cuando, $S > 0$. | |
| 4.10.2.2 | Resultado de la aplicación del método de Nivel II |
| El resultado de la aplicación de un método de Nivel II, es el valor de los términos, y de los factores de proyecto y la probabilidad de fallo frente al modo. | |
| 4.10.3 | Métodos de Nivel III, [4] |
| Para aplicar un procedimiento de Nivel III se deben conocer, en el intervalo de tiempo, las funciones de distribución conjunta de los factores de proyecto que intervienen en los términos de la ecuación. La solución se obtiene integrando una función multidimensional en el dominio del fallo. En general, esta integración es una tarea compleja, por lo que la probabilidad de fallo y los valores de los factores de proyecto pueden obtenerse mediante técnicas de simulación numérica, p. ej., Monte Carlo. | |
| 4.10.3.1 | Criterio de fallo |
| Por lo general, la ecuación de verificación es del tipo margen de seguridad, por tanto, con carácter general, la situación de proyecto se considera verificada frente al modo cuando, $S > 0$. | |
| 4.10.3.2 | Resultado de la aplicación del método de Nivel III |
| El resultado de la aplicación de un método de Nivel III es la función de distribución del margen de seguridad de tramo en el intervalo de tiempo. Integrando esta función en el dominio de fallo, $S \leq 0$, se obtiene la probabilidad de fallo del tramo frente al modo. | |
| 4.10.4 | Método de verificación y carácter del tramo |
| <p>En la tabla 4.6, se recomiendan los siguientes métodos para verificar o comprobar los requisitos de seguridad, servicio y explotación de una alternativa de proyecto frente a un modo de fallo o de parada operativa, en función del carácter general del tramo de obra:</p> <p>En los capítulos siguientes se describen estos métodos y se desarrolla su aplicación en el ámbito de las obras marítimas.</p> | |

Tabla 4.6:
Método de verificación recomendado en función del carácter del tramo de obra

| IRE | ISA | | | |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | s_1 | s_2 | s_3 | s_4 |
| r_1 | [1] | [2] | [2] y [3] o [4] | [2] y [3] o [4] |
| r_2 | [2] | [2] | [2] y [3] o [4] | [2] y [3] o [4] |
| r_3 | [2] y [3] o [4] | [2] y [3] o [4] | [2] y [3] o [4] | [2] y [3] o [4] |

Comentario

El método del coeficiente de seguridad global es, quizás, el método más conocido pero, también, el de menor precisión en la valoración de los factores y términos, en muchas ocasiones asociado a la falta de información. A medida que se asciende en la clasificación es de esperar una mayor calidad del resultado obtenido pero, también, una menor experiencia en su aplicación. Por ello, el método recomendado en la tabla debe entenderse como el mínimo, pero que, en el caso de disponer de información y de tener experiencia, podrá verificarse la obra por un método de mayor nivel.

En aquellos casos en los que al aplicar dos métodos los resultados sean contradictorios, se recomiendan adoptar el resultado que la experiencia acumulada y los datos disponibles aconsejen.

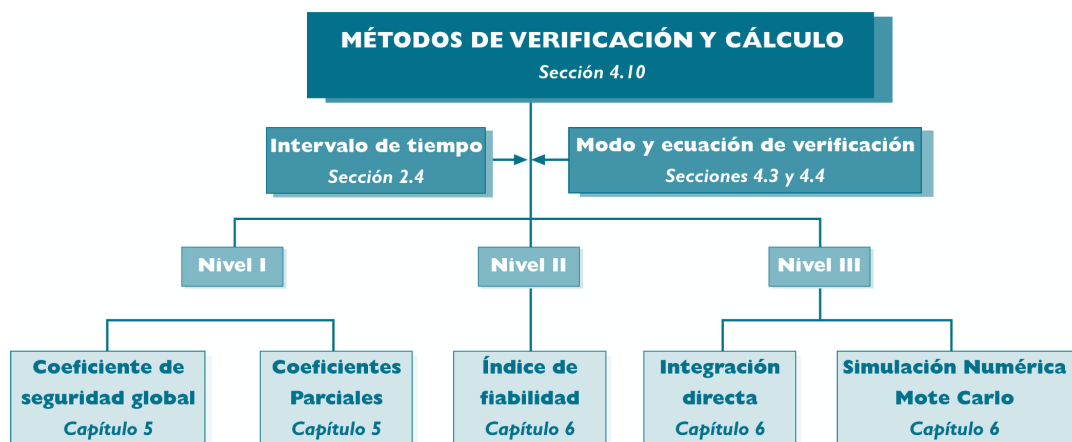
4.10.4.1 Obras de carácter general alto

Las obras cuyo carácter general sea $[r_3, s_1]$ y $[r_1, s_3]$, deberán verificarse al menos con dos métodos, el de los coeficientes parciales y otro, de jerarquía superior.

Comentario

Las dificultades para la verificación por el método de los coeficientes parciales de las obras marítimas sometidas a las acciones de factores predominantes aleatorios se deben a que los coeficientes de ponderación y compatibilidad no fueron, inicialmente, definidos para estos supuestos. Es por lo que las Recomendaciones específicas proponen coeficientes parciales de ponderación y compatibilidad debidamente contrastados.

Figura 4.7:
Métodos de verificación en el programa ROM.



4.11 Probabilidad y Fase de Proyecto

El procedimiento de cálculo debe verificar que el tramo satisface los requisitos de seguridad y servicio en su vida útil, con una probabilidad conjunta de fallo que no supere los valores dados en las tablas 2.2, 2.3, en función del carácter general del tramo y que satisface los requisitos de uso y explotación con un nivel de operatividad superior al valor de la tabla 2.4, en función del carácter operativo del tramo.

Comentario

En estas Recomendaciones la palabra modo puede definir la ocurrencia de un fallo (estructural o formal) adscrito a uno de los estados límite últimos o de servicio y la ocurrencia de una parada operativa, adscrita a uno de los estados límite operativos. El término "probabilidad de ocurrencia o presentación del modo" en el intervalo de tiempo se refiere tanto a la probabilidad de fallo como a la probabilidad de parada operativa.

4.11.1 Probabilidad e intervalo de tiempo

La evaluación de la probabilidad de fallo, frente a un modo en la fase de proyecto, depende del método y la forma de la ecuación de verificación. Esta ecuación se expresa en función de las variables de estado y, por tanto, aquella depende de la evolución temporal de los valores de los términos. Para calcular la probabilidad, es necesario conocer los modelos de probabilidad que permiten cuantificar la incertidumbre de los términos en la fase de proyecto; por lo general esta información no suele estar disponible. La definición de la unidad de intervalo de tiempo ayuda en este objetivo.

4.11.2 Unidad de intervalo de tiempo

Periodo de tiempo en el que se conoce o se puede inferir el modelo de probabilidad de los parámetros de estado de los factores de proyecto y de los términos de la ecuación. La duración del intervalo unidad suele estar asociada a la variabilidad climática o al régimen económico y de explotación. Los intervalos de tiempo y la fase de proyecto se pueden suponer como secuencias de intervalos de tiempo unidad. Cualquiera de los intervalos de tiempo definidos en la sección 2.4 puede actuar como unidad de intervalo de tiempo.

Comentario

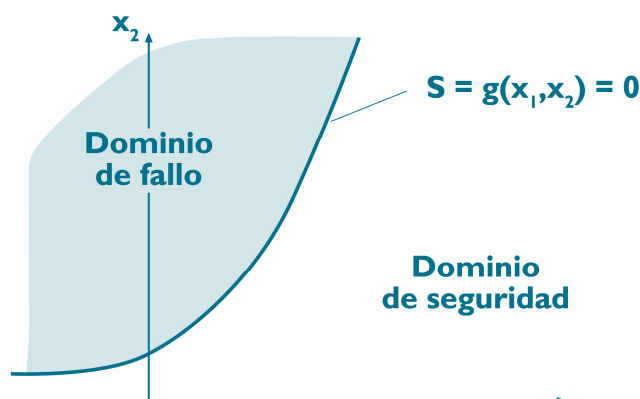
La vida de las fases de proyecto se suele definir en años, y conociendo la variabilidad anual del clima en el litoral español, el año puede ser la unidad de intervalo de tiempo. La vida útil se define entonces en V unidades de intervalo de tiempo o años. Suponiendo la independencia estadística entre los años sucesivos, se puede calcular la probabilidad del tramo frente al modo durante la vida útil de la obra.

4.11.3 Dominios de seguridad y de fallo

En la unidad de intervalo de tiempo se resolverá la ecuación de verificación. Los dominios de seguridad y fallo, figura 4.8, son los conjuntos de estados de proyecto para los cuales la ecuación de verificación toma valores superiores o inferiores a un cierto valor umbral, respectivamente. Si la ecuación de verificación es del tipo margen de seguridad, es decir $S = X_1 - X_2$, donde S es el margen de seguridad y X_1 y X_2 son los conjuntos de términos favorables y desfavorables, entonces, el dominio de seguridad es $S > 0$. El dominio de fallo está formado por todos los estados de proyecto para los cuales, $S \leq 0$. Si la ecuación es de la forma de coeficiente de seguridad global, el dominio de seguridad es $Z > Z_c$; el dominio de fallo se define por $Z \leq Z_c$, donde Z_c es el coeficiente global mínimo para el modo.

Comentario

Las palabras seguridad y fallo deben de entenderse en su sentido más amplio, haciendo referencia a satisfacer e incumplir los requisitos de seguridad, de servicio y de explotación.

**Figura 4.8:**

Definición de los dominios de seguridad y fallo

CAPITULO 5

Métodos de Nivel I



5

MÉTODOS DE NIVEL I

5.1

Introducción

Los métodos de verificación se emplean para comprobar cuando y cómo un tramo de obra deja de cumplir los requisitos de proyecto, debido a la ocurrencia de un modo de fallo o de parada operativa, adscritos a unos estados límite y sometidos a una condición de trabajo que puede presentarse durante una fase de proyecto. Los métodos de verificación presentados en este capítulo se encuadran en los llamados de Nivel I entre los que se incluyen los métodos del coeficiente de seguridad global y de los coeficientes parciales.

Previamente a la aplicación de cualquier método se debe conocer una ecuación de verificación que represente y cuantifique la ocurrencia del modo de fallo. Seleccionados la fase de proyecto, el estado límite, la condición de trabajo y el tipo de combinación, se podrán obtener los valores de los términos y el resultado de la ecuación siguiendo la secuencia de trabajo descrita para cada uno de los dos métodos.

Estos métodos no proporcionan información sobre la probabilidad de incumplimiento de los requisitos de proyecto. El cálculo de la probabilidad se debe realizar de forma independiente, y, en general, teniendo en cuenta la probabilidad de presentación del factor predominante en la ocurrencia del modo.

En el capítulo 6 se presentan los métodos de Nivel II y Nivel III. Estos métodos, además de verificar el tramo frente al modo, proporcionan la probabilidad de fallo.

5.1.1

Contenidos del capítulo 5

Se inicia el capítulo presentando el método del coeficiente de seguridad global, un método tradicional en la ingeniería civil y, aun de uso generalizado en muchas de sus áreas. A continuación, se describe el método de los coeficientes parciales, que inspiró la ROM 0.2-90, se aplica en la Instrucción de Hormigón Estructural, EHE y en otras muchas Normas e Instrucciones. En la figura 5.1, se representa la organización y los contenidos de este capítulo.



Figura 5.1:
Ordenación y
contenidos del
capítulo 5.

5.2 Coeficiente de Seguridad Global

Este método de verificación se aplica cuando el tramo de obra tiene un carácter bajo, $[r_1, s_1]$ o el alcance de los trabajos es el de un Estudio Previo. La secuencia para el empleo de este método de verificación se recoge en la figura 5.2.

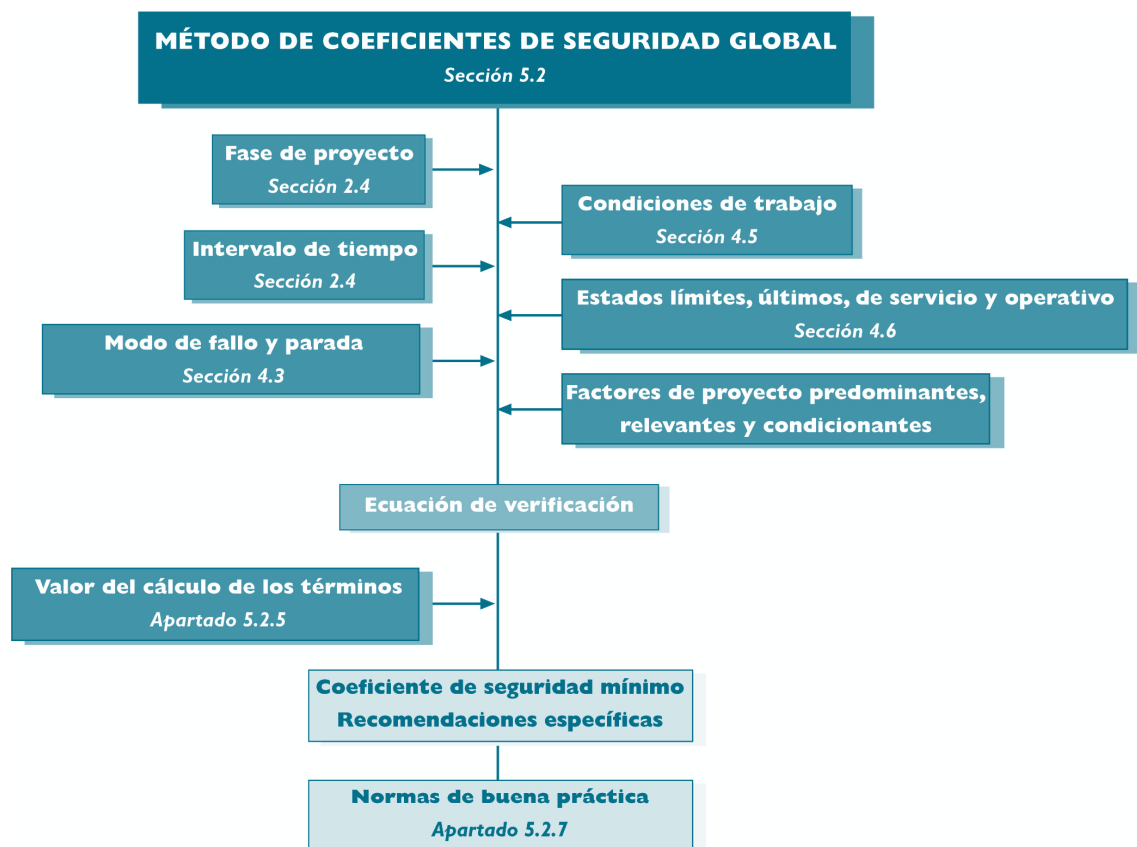


Figura 5.2:
Secuencia de aplicación del método del coeficiente global.

5.2.1 Definiciones

El método consiste, en evaluar la ecuación de verificación escrita en formato de cociente y comparar este resultado con un coeficiente, Z_c , llamado de seguridad global.

5.2.1.1 Ecuación de verificación

La forma es del tipo de coeficiente de seguridad, $Z = X_1/X_2$, donde, por lo general, el numerador contiene los términos favorables a evitar la ocurrencia del modo y el denominador los términos desfavorables; X_1 y X_2 , pueden ser combinaciones de varios términos.

5.2.1.1.1 Condición de comprobación

Se admitirá que el modo, de fallo o de parada operativa, no ocurre cuando se cumpla que, $Z > Z_c$, donde Z_c es un valor mínimo admisible que se denomina coeficiente de seguridad global.

Las incertidumbres conocidas y desconocidas asociadas al proceso de cálculo, la disponibilidad de datos, la validez de la ecuación, etc., se deben evaluar mediante el valor del coeficiente, Z_c . La experiencia ha sancionado valores mínimos del coeficiente de seguridad para ciertos modos de fallo típicos. Algunos de ellos, están recogidos en reglamentos técnicos y recomendaciones.

Comentario

Por lo general, el término de la ecuación representa la acción de un factor de proyecto, p. ej. un agente, y puede ser una fuerza, carga, deformación, desplazamiento, etc. Algunas veces un término, favorable o desfavorable, representa la acción de más de un factor, incluyendo agentes y parámetros.

En este método se suelen considerar todos los términos deterministas, aunque hay algunas alternativas de uso para los casos en los que algunos factores o términos sean aleatorios. Entre ellas se encuentran los coeficientes de seguridad centrado y característico. Dichos coeficientes pueden ser de utilidad en la verificación de modos cuya ocurrencia depende exclusivamente de términos que tienen modelo de probabilidad; no obstante si se dispone de esta información es recomendable aplicar otros métodos de verificación, Niveles II y III.

El coeficiente de seguridad centrado es,

$$Z_E = \frac{E[X_1]}{E[X_2]}$$

donde $E[X_1]$ y $E[X_2]$, representan, respectivamente¹ los valores medios de los términos favorables y desfavorables. Este valor centrado deberá ser, en todos los casos, igual o superior al valor recomendado para cada tipología de obra marítima.

El coeficiente de seguridad característico Z_k , es,

$$Z_k = \frac{X_{1,k}}{X_{2,k}}$$

donde, $X_{1,k}$ y $X_{2,k}$ son los valores característicos de los términos favorables y desfavorables, respectivamente².

Cuando éstos se definen a partir de su valor medio, μ , y de su coeficiente de variación, V , los términos favorables se expresarán por su valor característico inferior, mientras que los términos desfavorables, se expresarán por su valor característico superior de modo que, el coeficiente de seguridad característico se expresa por,

$$Z_k = \frac{\mu_{x1}(1 - k_{x1} V_{x1})}{\mu_{x2}(1 + k_{x2} V_{x2})}$$

en la que los extremos superior e inferior de los intervalos de confianza están asociados a los valores de los cuantiles del 5% y del 95%, respectivamente.

(1) Z_E es una aproximación útil del coeficiente de seguridad. Este coeficiente centrado, en general, es diferente del valor medio del cociente de X_1 y X_2 , $E[X_1/X_2] \neq E[X_1]/E[X_2]$.

(2) De manera análoga, el valor característico del cociente no es igual al cociente de los valores característicos.

5.2.1.1.2 Consideraciones sobre el formato de la ecuación

La ecuación de verificación de un modo principal y el coeficiente de seguridad mínimo, se presenta en las Recomendaciones específicas. Con carácter general, su aplicación deberá seguir la secuencia descrita en los apartados siguientes para determinar los valores de los factores y términos.

En otro caso, si se aplica una ecuación de verificación que originariamente se obtuvo con el formato de coeficiente de seguridad global, se respetarán los mismos criterios e hipótesis con los que fue propuesta y, en particular, en lo que se refiere a las dimensiones de los términos.

Si la ecuación de verificación que se vaya a aplicar no se obtuvo originariamente con este forma-

to, y no se tiene información sobre el orden de magnitud del valor del coeficiente, se deberá aplicar un método de Nivel II o III para obtener dicho valor, de acuerdo con la sección 6.5.

5.2.1.2 Modos principales

Son aquellos que la experiencia ha sancionado como los más importantes y mas exigentes de la obra desde un punto de vista estructural y operativo y, por tanto, condicionan la tipología del tramo y se describen en las Recomendaciones específicas. La ocurrencia de algunos de ellos provoca el fallo o la parada del tramo de la obra con repercusiones económicas, sociales y ambientales que se pueden clasificar mediante los índices de repercusión económica, social y ambiental, IRE, ISA, IREO e ISAO.

Los modos principales adscritos a los estados límite últimos, de servicio y de uso y explotación, son los que se consideran para evaluar de la probabilidad conjunta de fallo o parada en la vida útil.

Comentario

El muelle de Levante del Puerto de Almería está construido con bloques de hormigón en masa y cumple con la función de atraque de barcos de pasajeros. Uno de los objetivos del proyecto es verificar que la obra en su conjunto y cada una de sus elementos, no incurre en ninguno de los modos principales de fallo. Para los estados límite últimos, los modos principales son: deslizamiento entre hiladas y banquetas y vuelco como sólido rígido, pérdida de estabilidad global, hundimiento del terreno y licuefacción del terreno por sismo. La ocurrencia de algunos de ellos tiene repercusiones económicas, sociales y ambientales que, valoradas de acuerdo con la sección 2.7, dan al muelle un carácter general comprendido en el intervalo, $6 < IRE \leq 20$; $5 \leq ISA < 20$.

Por otra parte, algún elemento del muelle p.ej. los bolardos y las defensas pueden fallar, pero su ocurrencia no tiene consecuencias significativas en la fiabilidad, la funcionalidad y la operatividad del tramo de obra, por ello no se consideran principales, y aunque su probabilidad de ocurrencia en la vida útil debe estar acotada, no se tiene en cuenta su contribución en el cálculo de la probabilidad conjunta del tramo, (ver capítulo 7).

5.2.1.3 Factores de proyecto

La aplicación del método del coeficiente de seguridad global se apoya en los siguientes factores de proyecto:

5.2.1.3.1 Factor predominante en el modo

Son todos aquellos cuya presentación desencadena la ocurrencia del modo.

5.2.1.3.2 Factores relevantes del término

Son aquellos que, (1) caracterizan la acción o respuesta, la geometría de la obra o las propiedades del medio físico, el terreno y los materiales, (2) dan sentido y justifican la presencia del término en la ecuación de verificación, y (3) suelen ser los más influyentes³ en el valor del término.

(3) La palabra influyente hace referencia a los efectos del factor de proyecto sobre el valor absoluto y la variabilidad del término.

5.2.1.3.3 Factor condicionante de otro factor

Son aquellos que no intervienen directamente en ningún término de la ecuación de verificación pero que pueden condicionar el valor de otro, u otros factores y, por tanto, condicionan el valor del término en el que intervienen, por lo que se denominan factores condicionados. Los valores de éstos

deberán ser compatibles con los valores de los factores condicionantes. Si el factor condicionado es predominante en el modo, el factor condicionante deberá ser tratado como predominante.

Comentario

En muchas ocasiones, el tramo de obra se encuentra en profundidades reducidas, donde, en general, la altura de ola está acotada por la profundidad. Ésta, puede no aparecer explícitamente en la ecuación de verificación, p. ej. en la fórmula de Iribarren para el cálculo del peso de las piezas del manto principal. Para comprobar este peso, el valor de la profundidad deberá ser elegido como si de un factor predominante se tratara y, por tanto, perteneciente a la clase de la cola superior. Se dice que el nivel del mar es el factor de proyecto condicionante y la altura de ola, H , es el factor condicionado.

5.2.2 Estados límite, condiciones de trabajo y tipos de combinación

En general, el método del coeficiente de seguridad global se podrá aplicar para comprobar los modos adscritos a los estados límite últimos y operativos.

Salvo justificación, en cada fase de proyecto, se verificarán las condiciones de trabajo extrema y operativa y estados límite últimos y operativos, de acuerdo con el apartado 4.6.2, aplicando los tipos de combinación de la sección 4.9.

Comentario

Este método también puede aplicarse a los estados límite de servicio, si bien en la mayoría de los casos, las ecuaciones de verificación de los modos de fallo adscritos a estos estados están en el formato de margen de seguridad, lo que conlleva el paso previo de transformación de la ecuación a aquella forma, sección 6.5. Asimismo, en su caso y con la debida justificación, se podrá aplicar a condiciones de trabajo excepcionales.

5.2.3 Valores de los factores y términos

Con carácter general, el valor de los factores y términos se determinará considerando las mismas hipótesis y los mismos criterios con los que se obtuvo la ecuación de verificación que se vaya a aplicar. En la mayoría de los casos, cada término de la ecuación de verificación será una expresión matemática de los factores de proyecto, cuantificados, cada uno de ellos, por sus valores nominales.

5.2.4 Valor de los factores de proyecto

Para su determinación se seguirán las recomendaciones de las secciones 3.7, 3.8 y 3.9. Además, para los factores del medio físico y terreno y factores condicionantes se tendrán en cuenta los siguientes subapartados.

5.2.4.1 Valor de los factores del medio físico

Cuando no se disponga de reglamentación específica o de datos estadísticamente representativos, los factores del medio físico, parámetros y agentes, se representarán por un valor nominal o un valor medio. En otro caso se podrán definir valores característicos superior e inferior de los factores del medio físico a partir de su función de distribución.

5.2.4.1.1 Valor del factor condicionante

A los efectos de obtener el valor representativo y el valor de cálculo del factor condicionante, éste, tendrá el mismo tratamiento que el término y el factor o factores que condiciona.

5.2.5 Valor de los términos de la ecuación

Para su determinación se seguirán las recomendaciones de la sección 3.8. Con carácter general, el valor de los términos favorables y desfavorables, permanentes y no permanentes, será el nominal. En su caso, además, se podrán considerar valores nominales máximo y mínimo.

5.2.5.1 Valor de los términos favorable y desfavorable del medio físico

Cuando los agentes del medio físico se obtengan a partir de un modelo de probabilidad se podrán definir valores característicos inferior y superior.

En todos los supuestos, el valor del término asociado a agentes del medio físico dependerá del sentido, favorable o desfavorable, de su participación en la ecuación de verificación.

5.2.5.2 Valor de los términos controlados por la resistencia del terreno

Con carácter general y cuando no haya reglamentación específica, o datos estadísticamente representativos, las propiedades del terreno se representarán por un valor nominal o un valor medio. Estos valores se determinarán de acuerdo con lo especificado en la ROM 0.5, o en otras Recomendaciones, Normas e Instrucciones específicas. En todos los casos, se observarán, estrictamente, los criterios con los que se obtuvo la formulación aplicada.

5.2.5.3 Valor de los términos permanentes⁴

(4) Para la definición de término permanente véase la sección 3.7

Cuando el término permanente sea el peso de los elementos estructurales, tendrá un valor único, definido por un valor nominal y calculado a partir de las dimensiones geométricas del elemento y el peso específico medio de los materiales.

Cuando el término permanente represente los pesos propios no estructurales, se determinarán los valores nominales máximo y mínimo y, éstos, podrán ser los valores característicos superior e inferior.

Los términos permanentes, cuyos valores nominales máximo y mínimo no difieran en más de un 5%, podrán tener un valor nominal igual al valor medio de los dos valores nominales.

5.2.6 Valor de cálculo de los términos

Es aquel que se aplica en la evaluación de la ecuación de verificación. El valor de cálculo de cada término se obtendrá multiplicando su valor nominal por el coeficiente de compatibilidad. La determinación del valor de este coeficiente se realizará con los mismos criterios que se establecen para el método de los coeficientes parciales, apartados 5.3.7.1 y siguientes.

Las incertidumbres del proyecto, excepto las relacionadas con la compatibilidad y combinación de términos, se cuantificarán mediante el valor mínimo del coeficiente de seguridad global, Z_c ; cuánto mayores sean aquellas, mayor deberá ser el valor del coeficiente de seguridad.

5.2.6.1 Coeficiente reductor de propiedades mecánicas

Los valores de los parámetros de proyecto que expresen propiedades mecánicas del material, (y

(5) El coeficiente reductor multiplica el valor de la propiedad mecánica, por ello, c_r .

en su caso del terreno), y que aparezcan en términos desfavorables, se minorarán con un coeficiente reductor⁵, c_r . A efectos orientativos, el valor del correspondiente coeficiente podrá ser el que aparece en las tablas 5.6 y 5.7, con las limitaciones de aplicación indicadas.

5.2.7

Normas de buena práctica y condiciones de aplicación

Cuando la verificación del modo se realice aplicando el método del coeficiente de seguridad global, se deberán tener siempre presentes sus limitaciones y, sobre todo, los criterios con los que se determinan los valores de los factores y de los términos. Por ello, el método del coeficiente de seguridad global deberá aplicarse siempre teniendo en cuenta las normas que durante los años han regido su uso. Además, su utilización deberá ir acompañada por normas de buena práctica, tanto en la fase de proyecto como en la de construcción, las cuales deberán observarse escrupulosamente.

5.2.8

Resumen del método del coeficiente de seguridad global

A continuación se resumen los criterios mas importantes en la aplicación del método del coeficiente de seguridad global, para verificar los modos de fallo y los modos de parada operativa,

- Se aplicará a obras o tramos de obra de carácter pequeño, $[r_i, s_i]$ o en estudios previos.
- Se podrá aplicar la verificación de todos los modos de los estados límite últimos y de servicio, y de los estados de parada operativa.
- En todos los casos, se verificarán los tipos de combinación de términos correspondientes a las condiciones de trabajo operativas y extremas sección 4.6, y, en su caso, a las excepcionales.
- Los coeficientes de seguridad mínimos admisibles se recomiendan en las R.O.M. específicas, para cada tipología, modo, condición de trabajo, estado límite y tipo de combinación.
- Los términos tomarán valores nominales. En el caso de los agentes del medio físico el valor del término se podrá determinar a partir de la probabilidad de excedencia del agente.
- No se ponderarán los términos de la ecuación de verificación y se determinará su valor siguiendo estrictamente los criterios con los que se estableció la ecuación de verificación.
- Los coeficientes de compatibilidad de términos se ajustará a lo recomendado para el método de los coeficientes parciales.
- Las propiedades de los materiales se ajustarán a lo especificado en la normativa vigente. En los casos que no haya normativa vigente se tomará un valor nominal. Las propiedades mecánicas se minorarán mediante un coeficiente reductor, c_r .
- Se recomienda seguir las normas de buena práctica en el proyecto y la construcción.
- No se aplicará este método en todas aquellas situaciones que sean claramente una extrapolación del estado del conocimiento o no se tenga experiencia en su utilización.

Comentario

La verificación de un dique vertical frente al estado límite último, pérdida de equilibrio estático, tiene tres modos principales de fallo: deslizamiento por la base y vuelco como sólido rígido y vuelco plástico. Cuando el dique se construye con la finalidad de crear una zona abrigada uno de los agentes predominantes es el oleaje. Si el dique se construye en aguas suficientemente profundas para garantizar que ninguna ola rompe por fondo y con altura suficiente para comportarse como irrebasable, el oleaje incidente se refleja en el dique y la interferencia de los trenes de olas incidente y reflejado produce un tren de olas estacionario. La acción de las olas del tren estacionario se concreta en presiones horizontales en la pared frontal y subpresiones o presiones verticales en la base del dique que, una vez integradas en horizontal y vertical, proporcionan sobre el dique los empujes horizontal, F_H , y vertical, F_V . Los valores máximos y mínimos de la fuerza horizontal en la cara frontal del dique se producen bajo la cresta y el seno del tren estacionario, respectivamente.

Una de las leyes de presiones, horizontal y vertical, de más amplio uso fue propuesta por Goda, 1973 y, desde entonces con algunas modificaciones se han utilizado de forma general en Japón para el cálculo de diques verticales. Las leyes de presiones dependen de la altura de ola del tren e intervienen diversos factores que tienen en cuenta el periodo de las olas, la incidencia oblicua del oleaje incidente, la profundidad sobre la berma, la altura de coronación del dique etc.

Una vez determinadas las leyes de presiones, la verificación de la sección del dique frente a los modos de fallo, deslizamiento y vuelco como sólido rígido, se puede hacer aplicando el método del coeficiente de seguridad global, con los criterios prácticos y de aplicación con que fue propuesto originariamente. Estos son:

Coeficiente de seguridad global frente al deslizamiento:

$$Z_{d,c} = \frac{\mu (Mg - F_V)}{F_H} = \frac{X_1}{X_2}$$

Coeficiente de seguridad global frente al vuelco como sólido rígido:

$$Z_{c,v} = \frac{Mgs - M_V}{M_H} = \frac{M_1}{M_2}$$

donde, M es la masa del dique vertical por unidad de longitud con el nivel medio del mar de cálculo en reposo, μ , es el coeficiente de fricción entre la banqueta de enrase y la base del dique, s es la distancia horizontal entre el centro de gravedad del dique y el punto de rotación, g es la aceleración de la gravedad, y, M_H y M_V son los momentos exteriores de las fuerzas horizontal y vertical, respectivamente. X_1 y X_2 y M_1 y M_2 , son los términos favorables y desfavorables de la ecuación de verificación del modo deslizamiento y del modo vuelco como sólido rígido, respectivamente que se aplican con coeficiente de ponderación igual a la unidad. Ya que el oleaje es el único agente predominante y no se consideran otros agentes, no es necesario considerar los coeficientes de compatibilidad de los términos.

Se recomienda calcular las fuerzas horizontal y vertical con una altura de ola, $H_{mx} = 1.8 H_s$, donde H_s es la altura de ola significativa del estado de mar "de cálculo". El valor de 1.8 del coeficiente multiplicador de la altura de ola significativa, aunque tiene un fundamento estadístico, en realidad se adopta como un resultado de la experiencia, por lo que, se puede decir, que la altura de ola de cálculo, H_{mx} , se define por un valor "nominal", estimado con una base estadística. Se puede demostrar, que el valor más probable o moda de la altura de ola máxima en un estado de mar con N olas es, aproximadamente, $H_{mx} \cong (0.706 \sqrt{\ln N}) H_s$; si $N \cong 750$ olas, $0.706 \sqrt{\ln N} \cong 1.8$.

El periodo asociado a la altura de ola de cálculo será, por definición del método, el periodo significativo, es decir, $T_{mx} = T_s$. Esta decisión tiene un fundamento estadístico, pues las olas mayores del estado de mar suelen tener, en promedio, un periodo igual al periodo significativo. No obstante, hay olas altas en el estado de mar que pueden presentarse con periodos mayores o menores que el periodo significativo.

Además, el valor nominal del coeficiente de fricción normalmente es $\mu = 0.6$, y el cálculo de los pesos, emergido y sumergido del dique se realizará adoptando unos pesos específicos medios, p. ej a título indicativo, 2.300 kg/m^3 para el hormigón armado del espaldón, 2.100 y 1.100 kg/m^3 para el cajón de hor-

migón armado relleno de arena, emergido y sumergido, respectivamente y 1.030 kg/m^3 para el agua de mar. Finalmente, el espaldón se suele coronar en Japón a una cota de $0.6 H_s$ sobre el nivel medio del mar de cálculo y la altura sobre el fondo y la anchura de la berma será tal que no se produzca la rotura de las olas.

Adoptados estos criterios, los valores de los coeficientes de seguridad global al deslizamiento y al vuelco no serán inferiores a 1.2, es decir, $Z_{c,d} > 1.2$ y $Z_{c,v} > 1.2$.

5.3

Método de los Coeficientes Parciales

El método de los coeficientes parciales se recomienda para verificar los modos de fallo y de parada operativa de las obras marítimas cuyo carácter general u operativo esté en el intervalo, $[r_1, r_2]$, tabla 4.6. Este método se podrá aplicar siguiendo la secuencia descrita en la figura 5.3.

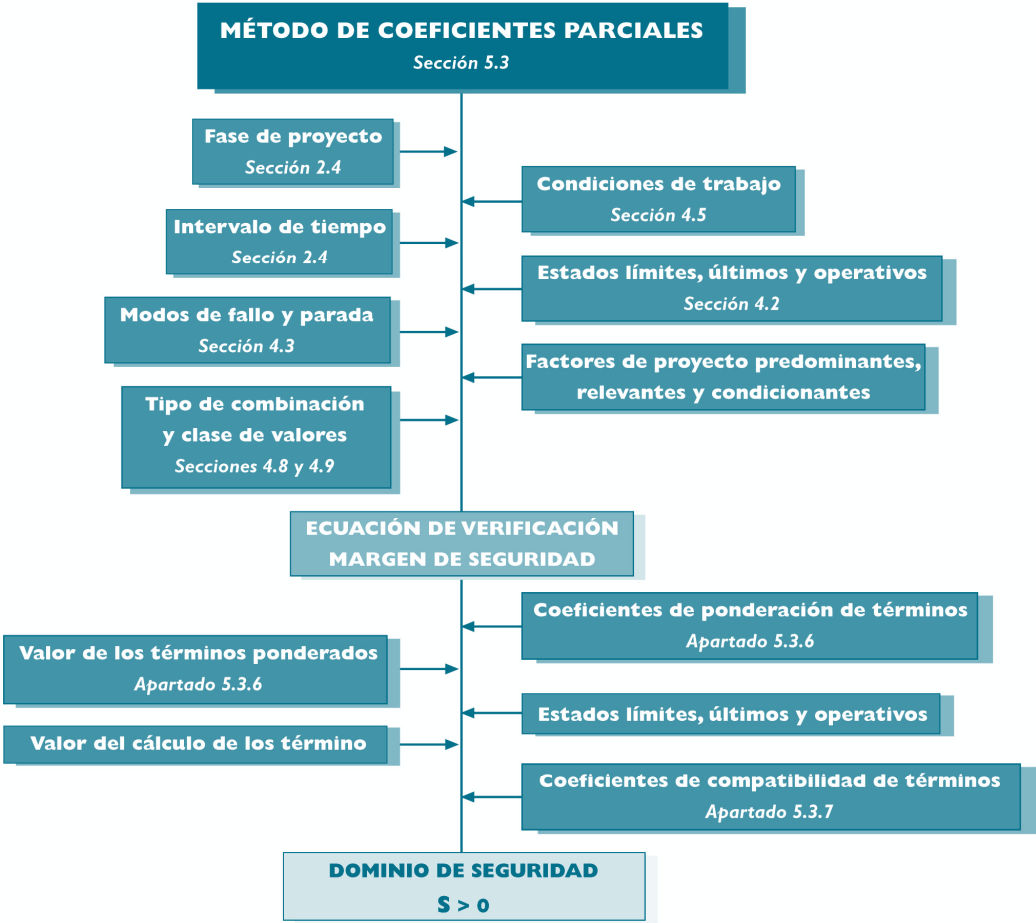


Figura 5.3:
Secuencia de aplicación del método de los coeficientes parciales.

5.3.1

Definiciones

(6) En el método de los coeficientes parciales se ponderan los términos; no obstante en algunas ocasiones, con la debida justificación, se podrán ponderar los agentes que intervienen en el término.

El método consiste en evaluar la ecuación de verificación escrita en formato de margen de seguridad, afectando los términos por unos coeficientes denominados parciales que ponderan y compatibilizan los términos⁶, y comparar el resultado, con un valor del margen de seguridad que con carácter general es $S = 0$. Los criterios para asignar valores a los términos y los coeficientes parciales son el objeto de esta sección.

5.3.1.1 Ecuación de verificación

Se establece, por lo general, por la diferencia entre los términos favorables y desfavorables que intervienen en el modo; es decir, es una ecuación del tipo denominado margen de seguridad que, en general, se escribirá de la siguiente forma:

$$S = \sum_{i=1}^I a_i X_{1,i} - \sum_{j=1}^J b_j X_{2,j} = \sum_{i=1}^I X_{1,i,d} - \sum_{j=1}^J X_{2,j,d}$$

donde a_i y b_j son coeficientes parciales que ponderan y compatibilizan el valor característico de los I términos favorables, $X_{1,i}$ y de los J términos desfavorables, $X_{2,j}$. $X_{1,i,d}$ y $X_{2,j,d}$ son los I y J valores de cálculo de los términos, también llamados favorables y desfavorables, respectivamente. S , es el margen de seguridad.

Comentario

$X_{1,i}$ y $X_{2,j}$ son los términos de la ecuación y pueden representar cualquier factor de proyecto, parámetro, agente, acción, respuesta estructural o del medio físico, terreno, o una relación funcional de ellos. $X_{1,i}$ y $X_{2,j}$ pueden representar magnitudes físicas, mecánicas, químicas, biológicas, etc. Todos los términos deben tener las mismas unidades, que son las que toma el margen de seguridad, S . Los subíndices 1 y 2 , identifican los términos, favorables y desfavorables, respectivamente; la letra "d" identifica el valor de cálculo del término.

5.3.1.1.1 Condición de comprobación

Para declarar el tramo comprobado frente al modo de fallo o de parada operativa, el resultado de la ecuación de verificación deberá ser $S > 0$.

5.3.1.1.2 Consideraciones sobre el formato de la ecuación

La ecuación de verificación de los modos principales y los coeficientes de ponderación y compatibilidad de diversas tipologías de obras marítimas, se presentan en las Recomendaciones específicas. Con carácter general, su aplicación deberá seguir la secuencia descrita en los apartados siguientes.

Si se aplica una ecuación de verificación que se obtuvo originariamente con el formato de coeficientes parciales, se respetarán los mismos criterios e hipótesis con los que fue propuesta y, en particular, en lo que se refiere a las dimensiones de los términos.

Si la ecuación de verificación que se vaya a aplicar no se obtuvo originariamente con el formato de coeficientes parciales, y no se tiene información sobre el orden de magnitud de los coeficientes, se deberá aplicar un método de Nivel II o III para obtener los coeficientes parciales, de acuerdo con la sección 6.10⁷.

(7) Estos coeficientes se proporcionan en las Recomendaciones específicas. En su defecto, deberá ser el proyectista el que los determine siguiendo el procedimiento establecido en el capítulo 6.

5.3.1.2 Factores de proyecto

En la aplicación del método de los coeficientes parciales los siguientes factores de proyecto desempeñan un papel relevante.

5.3.1.2.1 Factor relevante de cada término

Por lo general, entre los factores de proyecto que aparecen en cada término hay uno (y, en su caso, varios) que: (1) caracteriza la acción o respuesta, la geometría de la obra o las propiedades del

medio físico, el terreno y los materiales, (2) da sentido y justifica la presencia del término en la ecuación de verificación, y (3) suele ser el que influye más en el valor del término. Este factor se denomina factor relevante del término.

5.3.1.2.2 Factor condicionante

Hay casos en los que un factor, denominado condicionante, no interviene directamente en ningún término de la ecuación de verificación, pero condiciona el valor de otro factor, y, por tanto, el valor del término en el que interviene éste último. El valor de éste, que se denomina condicionado, deberá ser compatible con los valores del factor condicionante. Si el factor condicionado es predominante en el modo, el factor condicionante deberá ser considerado predominante.

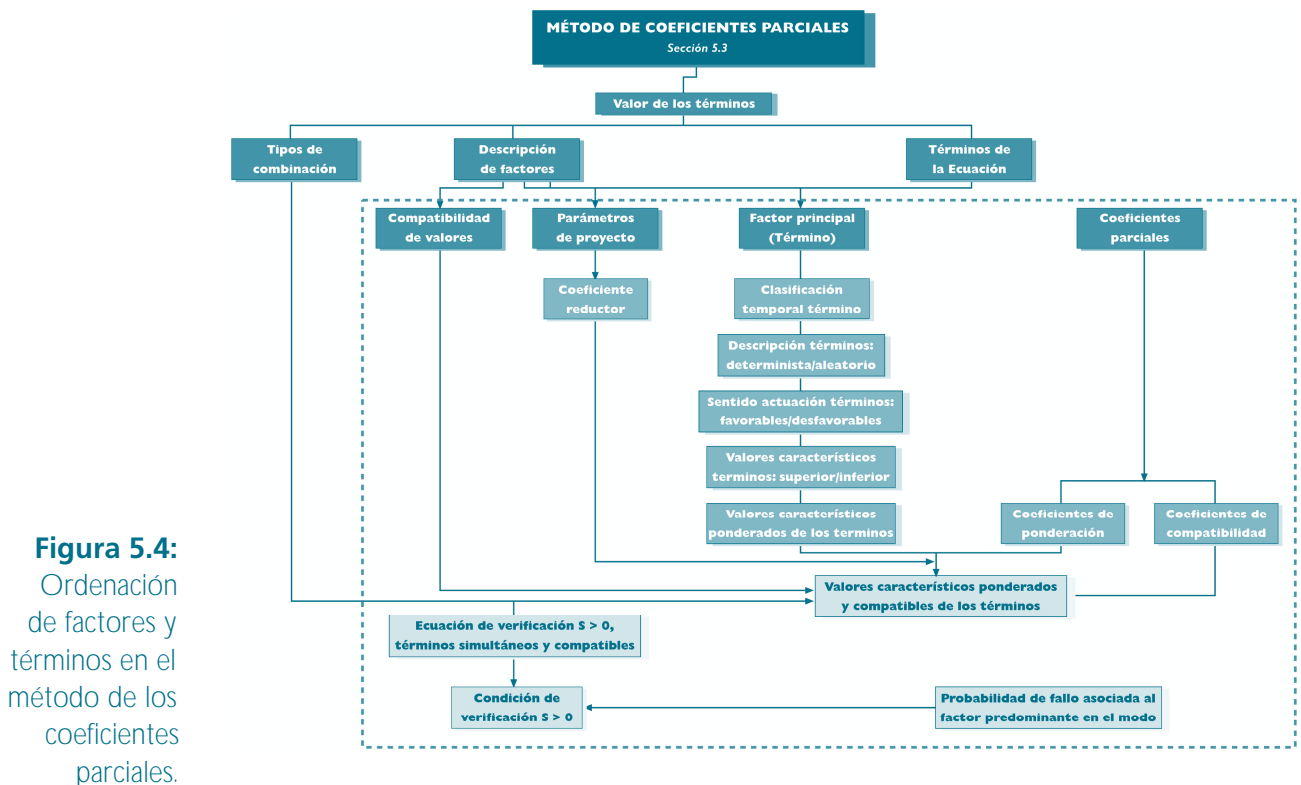
Comentario

A este respecto se recomienda leer el comentario del apartado 5.2.1.3.3.

5.3.2 Estados límite, condiciones de trabajo y tipos de combinación

Se podrá aplicar el método de los coeficientes parciales para verificar el tramo de obra frente a los modos adscritos a los estados límite últimos, de servicio y operativos.

Salvo justificación, en cada fase de proyecto, se verificarán las condiciones de trabajo extrema y operativa y estados límite últimos, de servicio y operativos de acuerdo con el apartado 4.6.2, aplicando los tipos de combinación de la sección 4.9, y, en su caso, las condiciones de trabajo excepcionales.



5.3.3

Secuencia para obtener el valor de cálculo de un término de la ecuación

Este cálculo se puede desglosar en tres secuencias parciales, figura 5.4:(1) cálculo del valor característico de los términos, $X_{1,i}$ y $X_{2,j}$; el que dependen, entre otros, del sentido de participación del término en la ocurrencia del modo, (2) cálculo del valor característico ponderado de los términos aplicando los coeficientes de ponderación, $p_{1,i}$ y $p_{2,j}$ y (3) aplicación del coeficiente de compatibilidad, $a_{1,i}$ y $a_{2,j}$ para obtener el valor de cálculo del término; este coeficiente depende de la clase estadística de valores a que pertenece el término y del tipo de combinación. Además, los términos que contengan parámetros de proyecto que cuantifiquen propiedades del medio físico, de los materiales y del terreno, deberán incluir un coeficiente reductor, c_r aplicado a cada parámetro que minore su valor característico.

Comentario

El coeficiente parcial, $a_{1,i}$ para el término favorable se calcula por, $a_{1,i} = p_{1,i} / p_{1,p}$; además, si el término tiene algún parámetro de proyecto que cuantifica su capacidad resistente su magnitud debe multiplicarse entonces, por un coeficiente reductor⁸, $c_r < 1$. El valor de cálculo, $X_{1,i,p}$ del término, $X_{1,p}$ se obtiene finalmente por la siguiente expresión, $X_{1,i,p} = p_{1,i} / p_{1,p} \cdot X_{1,i}$

Existen diferencias importantes entre este método y el del coeficiente de seguridad global. En éste, el valor del término es, en general, un valor nominal que, además, es el valor de cálculo del término, sin afectar por coeficientes ponderación. En el método de los coeficientes parciales, el valor del término se determina a partir de los valores característicos que, por definición, son valores de cuantiles del modelo de distribución; sólomente cuando no se dispone de información adecuada, se admite la utilización de valores nominales. Además, el valor de cálculo de cada uno de los términos se obtiene, aplicando unos coeficientes de ponderación y de compatibilidad que permiten acotar de forma determinista, la presentación simultánea de agentes y parámetros en la ocurrencia de un modo de fallo. Por ello, la aplicación del este método es más compleja, pero, por otra parte, proporciona una mayor “calidad” y confianza en el resultado.

Los criterios para compatibilizar valores de términos y su aplicación no están exentos de ambigüedad y, en consecuencia, de subjetividad. En esta sección se desarrollan los criterios de compatibilización. Al final de este capítulo se incluye una breve recopilación sobre otros métodos de nivel I que, en cierto modo, se encuentran entre los dos métodos que se desarrollan y se proponen en estas Recomendaciones.

5.3.4

Valor de un término de la ecuación

En la mayoría de los casos el valor de un término de la ecuación de verificación se obtendrá a partir de una relación funcional o expresión matemática de factores de proyecto, parámetros y agentes. Estas expresiones, en general, se proporcionan en otras Recomendaciones, Normas e Instrucciones específicas. En otros casos, el valor del término se podrá obtener o directamente o por una experimentación específica.

5.3.4.1

Valor del término en función de los factores de proyecto

Pueden darse alguna de las situaciones siguientes: (1) todos los factores de proyecto se definen por un valor nominal sin modelo de probabilidad, (2) algunos factores de proyecto, entre ellos el relevante, tienen modelo de probabilidad y otros tienen un valor nominal sin modelo de probabilidad, y (3) todos los factores de proyecto tienen asociado un modelo de probabilidad individual o conjunta. En cualquiera de las tres situaciones es conveniente definir el factor principal del término.

5.3.4.1.1

Todos los factores se definen por valores nominales: caso (1)

El valor del término se obtendrá tomando los valores nominales de todos los factores. A tal efecto

(8) Al objeto de mantener el mismo criterio de aplicación que los otros dos coeficientes, en estas Recomendaciones el coeficiente reductor multiplica al valor del parámetro y, por tanto, debe ser menor o igual que la unidad.

to, se tendrán en cuenta las relaciones de dependencia funcional y estadística entre los diferentes factores de proyecto de acuerdo con la ordenación dada en la sección 4.7.

Comentario *Este caso se suele dar en términos relacionados con agentes gravitatorios, de usos y explotación y del terreno.*

5.3.4.1.2 El factor relevante tiene un modelo de probabilidad: caso (2)

En este caso se recomienda obtener la función de distribución del término analítica o numéricamente, a partir de la función de distribución del factor relevante, y, en su caso, teniendo en cuenta las funciones de distribución conjuntas, condicionales o marginales de los factores de proyecto con modelo de probabilidad.

Para determinar los valores de los restantes factores, se tendrán en cuenta las relaciones de dependencia funcional y estadística entre los diferentes factores de proyecto de acuerdo con la ordenación dada en la sección 4.7 y si tienen, o no, un modelo de probabilidad.

En algunos casos, la obtención del modelo de probabilidad del término puede ser engorrosa, complicada o imposible, por lo que se podrán considerar aproximaciones de acuerdo con el subapartado siguiente.

Comentario *El valor del término se determinará teniendo en cuenta la clase de valor a que pertenece: cola superior, centrada o cola inferior. La pertenencia a una u otra clase depende del tipo de combinación y del papel que está desempeñando en la ecuación de verificación, predominante, del mismo origen, dependiente o independiente. Este caso se da en los términos asociados a la ocurrencia de agentes del medio físico.*

Si el oleaje es predominante en la ocurrencia del modo y se está verificando la obra en condiciones de trabajo extremas, el modelo de probabilidad es un régimen extremal; su valor pertenece, en general, a la clase superior. Si no es el predominante, pero acompaña a otro término asociado a un agente del medio físico, p.ej. el sismo, su valor pertenecerá a la cola superior del régimen medio anual.

Si el término debido al oleaje no es predominante y se está verificando una condición de trabajo normal operativa, el modelo de probabilidad es un régimen medio anual que representa adecuadamente el valor umbral de explotación del estado de mar; su valor pertenecerá, en general, a la clase centrada.

5.3.4.1.2.1 Simplificación en la obtención del modelo de probabilidad

Cuando los factores de proyecto distintos del relevante se puedan considerar deterministas, o su variabilidad no contribuya significativamente a la variabilidad del valor característico del término, su valor podrá ser un valor nominal o el valor más probable. En cualquier caso, se tendrán en cuenta las relaciones de dependencia funcional y estadística entre los diferentes factores de proyecto de acuerdo con la ordenación dada en la sección 4.7.

Esta simplificación no se podrá aplicar a aquellos factores cuyo valor venga impuesto por otras Normas e Instrucciones.

Comentario *Cuando se aplique esta simplificación se recomienda estudiar la variabilidad de los valores característicos del término para diferentes valores nominales, en particular para aquellos que estén definidos por valores nominales máximos y mínimos. Si se obtienen del estudio desviaciones significativas del valor del término, será necesario realizar el cálculo por métodos más precisos o definir los factores de proyecto por modelos de probabilidad adecuados.*

5.3.4.1.3 Todos los factores tienen modelo de probabilidad: caso (3)

En este caso, se puede obtener la función estadística del término, bien analítica o numéricamente, teniendo en cuenta las funciones de distribución conjuntas, condicionales y marginales de los factores de proyecto. En algunas ocasiones será necesario hacer hipótesis de independencia entre factores de proyecto. A tal efecto, se tendrán en cuenta las relaciones de dependencia funcional y estadística entre los diferentes factores de proyecto de acuerdo con la ordenación dada en la sección 4.7.

Comentario

El valor del término se determinará para cada una de las clases en función del tipo de combinación y del papel que desempeña el término en la ecuación de verificación del modo. Si todos los factores de proyecto que intervienen en el término tienen modelo de probabilidad, es recomendable realizar la verificación por un método probabilista, Nivel II o Nivel III.

5.3.4.2 Valor del término mediante experimentación específica

En algunas ocasiones el valor del término se obtiene mediante una experimentación específica de algunos de los factores de proyecto o del término. Para determinar el valor del término se tendrá en cuenta lo recomendado en el capítulo 3 sobre tratamiento de datos experimentales, incertidumbre experimental y modelos de probabilidad.

5.3.4.3 Valor del término obtenido directamente

En otras ocasiones el valor del término se determina por experiencias previas, datos disponibles o, simplemente, la mejor estimación posible. Para determinar el valor de cálculo se recomienda tener en cuenta lo dispuesto en el capítulo 3 sobre las fuentes de incertidumbre y su valoración mediante un modelo de probabilidad.

5.3.5 Valor característico del término

Con carácter general, la ecuación de verificación se resolverá dando valores característicos a los términos afectados por los coeficientes de ponderación y de compatibilidad. Salvo justificación, los valores característicos superior e inferior del término serán los valores de los cuantiles del 0.95 y 0.05 de su modelo de probabilidad.

Cuando el término esté calculado por un valor nominal, caso (I), los valores característicos superior e inferior podrán ser los valores máximo y mínimo, o un valor único tal como la media, el valor más probable, etc. según lo recomendado en la sección 3.7 y, en otras Recomendaciones, Instrucciones y Normas.

Además, se tendrán en cuenta los siguientes aspectos.

5.3.5.1 Valor característico de los términos favorable y desfavorable

En todos los supuestos, el valor característico del término depende del sentido, favorable o desfavorable, de su participación en la ecuación de verificación. Con carácter general, el valor de un término favorable o desfavorable será un valor característico inferior o superior, respectivamente, obtenido de su modelo de probabilidad.

En el caso de que el término esté definido por un valor nominal sin modelo de probabilidad, éste, será el valor característico único, salvo que se disponga de valores nominales máximo y mínimo, en cuyo caso, éstos serán, respectivamente, los valores característicos superior e inferior.

5.3.5.2 Valor característico de los términos permanentes

Cuando el término permanente sea el peso de los elementos estructurales, el valor característico será un valor único definido a partir de un valor nominal y calculado mediante las dimensiones geométricas del elemento y el peso específico medio de los materiales.

Cuando el término permanente represente los pesos propios no estructurales, se determinarán los valores nominales máximo y mínimo y éstos serán los valores característicos superior e inferior. En la mayoría de las ocasiones el valor inferior se podrá tomar igual a cero.

En los términos permanentes cuyos valores nominales máximo y mínimo no difieran significativamente, el valor característico podrá ser igual al valor medio de los dos valores nominales.

5.3.5.3 Valor característico de términos no permanentes

En general estos términos tendrán asociados dos valores característicos, uno superior y otro inferior, aunque éste último podrá ser nulo o despreciable, excepto, salvo justificación, para términos debidos a factores cuyo origen y función sea el medio físico, terreno y asociados al material.

5.3.5.4 Valor característico de términos debidos a factores del medio físico

Estos términos tendrán valores característicos, superior e inferior, y deberán ser definidos a partir de su función de distribución, y en su defecto, a partir de la función de distribución del factor de proyecto principal. En cualquier caso el modelo de probabilidad deberá ser representativo de la ocurrencia del término en el intervalo de tiempo en el cual se está verificando el modo y de los tipos de combinación.

5.3.5.5 Valor característico de términos debidos a factores del terreno

Los valores característicos de los términos se determinarán de acuerdo con lo que se especifique en cada caso en la ROM 0.5, o en otras Recomendaciones específicas.

5.3.5.6 Valor característico de términos debidos a factores de uso y explotación

Siempre que sea posible, los términos de uso y explotación se definirán mediante modelos de probabilidad y a partir de ellos se definirán los valores característicos superior e inferior. En otro caso, los valores de estos términos serán nominales. El valor nominal máximo especificado en el proyecto o exigido por Normas, Instrucciones y Recomendaciones específicas podrá ser el valor característico superior. Los valores característicos inferiores serán nulos o un valor nominal mínimo para aquellos factores, que deben mantenerse obligatoriamente, por encima de un cierto umbral.

5.3.5.7 Valor característico de términos debidos a factores de los materiales

Siempre que sea posible, a la hora de determinar valores característicos de los materiales, se procurará tener en cuenta su evolución temporal en la vida útil mediante modelos analíticos, numé-

ricos y de probabilidad. Si en los modelos intervienen valores característicos de parámetros del material, y no existe legislación que los reglamente, éstos serán sus valores medios. En otro caso, los valores característicos superior e inferior se determinarán a partir de dos valores nominales máximo y mínimo, respectivamente, que representen la evolución temporal del término.

5.3.5.8 Valor característico de términos debidos a factores de la construcción

En general, sólo se considerarán los valores característicos superiores de los términos inducidos por el proceso constructivo, los cuales podrán ser valores nominales máximos para los términos desfavorables. El valor característico inferior, en general será un valor nominal mínimo que, salvo justificación, será igual a cero.

Comentario

Una vez que se conoce el valor característico de cada término de la ecuación de verificación, bien como un valor aleatorio de su modelo de probabilidad, o bien por un valor nominal, el siguiente paso en la aplicación del método de los coeficientes parciales es la determinación de los coeficientes de ponderación, $p_{1,i}$ y $p_{2,j}$. El objetivo de estos coeficientes es minorar o mayorar, según corresponda, los términos en función, entre otros, de: (1) su sentido de participación en la ocurrencia del modo, (2) de las clasificaciones, temporal y por su origen de los factores de proyecto intervinientes, (3) del estado límite, (4) de la condición de trabajo y (5) de la fase de proyecto.

5.3.6 Determinación del coeficiente de ponderación del término

El coeficiente de ponderación de cada término se ajustará a lo establecido en las Recomendaciones específicas o en otras Instrucciones y Normas. En otro caso, se calculará el coeficiente de ponderación teniendo en cuenta su dependencia de los siguientes aspectos, figura 5.5,

- Aspectos relacionados con los criterios generales de proyecto
 - Fase de proyecto: construcción, servicio, reparación y mantenimiento y desmantelamiento
 - Condiciones de trabajo: operativas, extremas y excepcionales
- Aspectos relacionados con el estado límite
 - Último, de servicio y operativo
- Aspectos relacionados con el término y sus factores de proyecto
 - Clasificación temporal: permanentes, no permanentes
 - Clasificación por su origen o función
 - Sentido de actuación del término: favorable y desfavorable
- Aspectos relacionados con la ecuación de verificación

Comentario

Es conveniente recordar que la ecuación de verificación de un modo de fallo o de parada se obtiene tras una derivación teórica, un análisis dimensional, un experimento, etc., que impone los criterios y restricciones para su aplicación, tanto de los factores como de los términos. En general, esta ecuación conlleva una incertidumbre y representa, exclusivamente, las condiciones para las cuales ha sido obtenida. Por ello, cuando se vaya a aplicar una ecuación de verificación se debe conocer, con precisión, su campo de validez y la forma y criterios de utilización.

Si la ecuación por ejemplo, ha sido derivada y contrastada en un formato de coeficiente global, su aplicación al método de los coeficientes parciales deberá realizarse aplicando unos coeficientes de ponderación específicos, que se obtendrán de acuerdo con lo que se recomienda en la sección 6.5. En todos los

casos, se tendrá en cuenta la dimensión de los términos de la ecuación de verificación original, para conservar la ponderación de los diferentes términos de la ecuación de verificación en su nuevo formato.

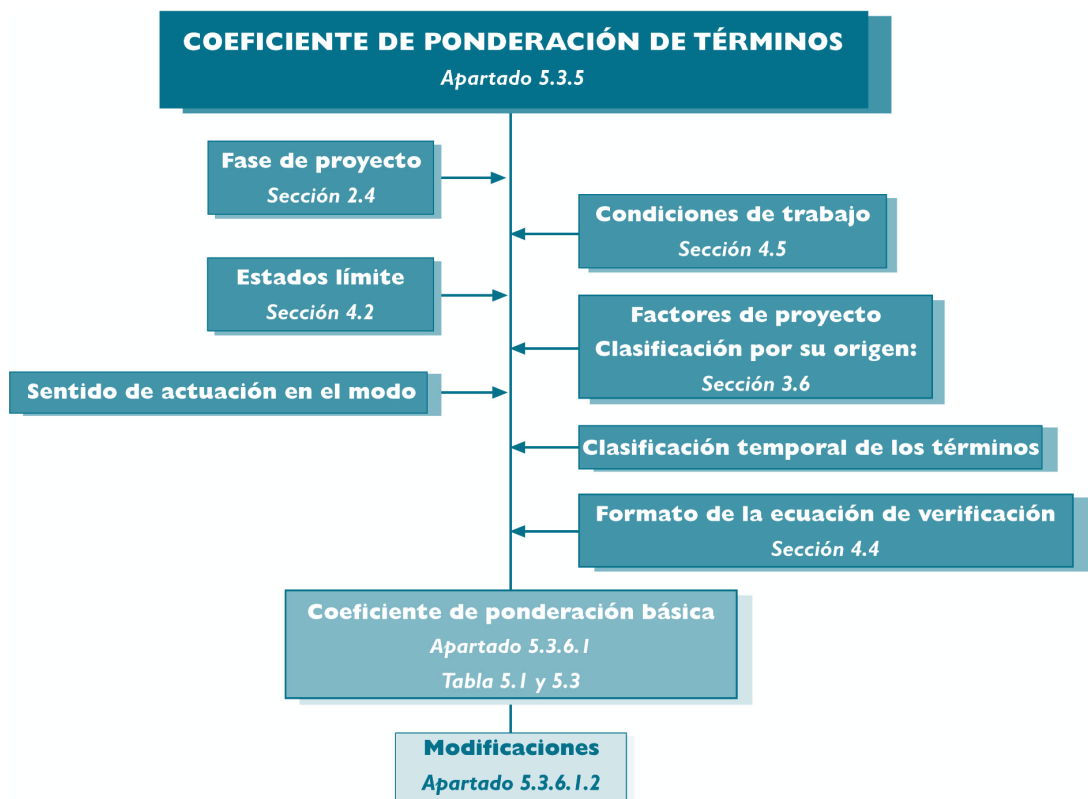


Figura 5.5:
Secuencia para
calcular el
coeficiente de
ponderación
básico.

5.3.6.1 Coeficiente de ponderación básico

Al objeto de ayudar en la determinación del coeficiente de ponderación, se define un coeficiente de ponderación básico cuyo valor se determina en función de los aspectos más comunes relacionados en el apartado anterior. Este coeficiente es de carácter general, salvo lo dispuesto en Recomendaciones, Normas e Instrucciones específicas.

5.3.6.1.1 Fase de servicio, condiciones de trabajo operativa y extrema y estado límite último

Seleccionada la fase de proyecto servicio, las condiciones de trabajo operativa y extrema y el estado límite último, el coeficiente de ponderación del término depende, solamente, (1) de las clasificaciones temporal y por el origen de los factores, y (2) de su sentido de participación en la ocurrencia del modo, favorable o desfavorable, de acuerdo con las siguientes tablas 5.1, 5.2 y 5.3.

Tabla 5.1:
Coeficiente de
ponderación
básico. Todos
los términos
excepto
deformación
y terreno

| Sentido actuación | Favorable, $p_{1,i}$ | Desfavorable, $p_{2,j}$ |
|-------------------|----------------------|-------------------------|
| Permanente | 1.00 | 1.35 |
| No Permanente | 1.00 | 1.50 |

Tabla 5.2:

Coefficiente de ponderación básico. Términos asociados a factores de deformación

| Sentido actuación | Favorable, $p_{1,i}$ | Desfavorable, $p_{2,j}$ |
|-------------------|----------------------|-------------------------|
| Permanente | 1.00 | 1.35 |
| No Permanente | 0.90 | 1.20 |

Tabla 5.3:

Coefficiente de ponderación básico. Términos asociados a factores del terreno

| Sentido actuación | Favorable, $p_{1,i}$ | Desfavorable, $p_{2,j}$ |
|-------------------|----------------------|-------------------------|
| Permanente | 1.00 | 1.35 |
| No Permanente | 0.90 | 1.20 |

Nota a la tabla 5.3

El valor del coeficiente de ponderación básico de 1.50 para los términos desfavorables y no permanentes, asociados al terreno es indicativo. En cada caso, el valor que se adopte satisfará las condiciones más exigentes establecidas en la normativa vigente y en las Recomendaciones específicas.

Comentario

Estos coeficientes tienen carácter general y se aplicarán solamente cuando la ecuación de verificación haya sido obtenida para el formato de coeficientes parciales. En otro caso se deberán obtener los coeficientes de ponderación específicos.

Se recomienda mantener el valor habitual del coeficiente de ponderación, es decir 1.50, para los términos permanentes asociados a factores del terreno que representen empujes de tierras en el cálculo estructural de muros; cuando esos términos representen peso propio se podrán ponderar con el coeficiente de 1.35.

No obstante, para el análisis de modos de fallo o parada cuya ocurrencia está controlada por los parámetros resistentes del terreno, los coeficientes de ponderación serán los que indique la ROM 0.5 o los documentos del programa ROM específicos.

5.3.6.1.2 Modificación del coeficiente de ponderación básico

El coeficiente de ponderación básico de la tabla 5.1, se aplicará en la verificación de los modos adscritos a los estados límite últimos, para las condiciones de trabajo operativas y extremas y la fase de servicio. Para otros estados límite y condición de trabajo se adoptarán los siguientes coeficientes de ponderación.

5.3.6.1.2.1 Modificación por el estado límite

Los coeficientes de ponderación para la verificación de modos de fallo adscritos a los estados límite de servicio y modos de parada adscritos a los estados límite operativos, serán igual a la unidad para todos los términos, independientemente de su sentido de actuación y de su clasificación temporal.

5.3.6.1.2.2 Modificación por la condición de trabajo

Para la verificación de los modos en las condiciones de trabajo excepcionales, fortuitas o previstas para los estados límite, último y de servicio y, en su caso, para los estados límite operativos, el valor de todos los coeficientes de ponderación podrán ser iguales a la unidad para todos los términos, independientemente del sentido de actuación y de la clasificación por el origen del término. Esta modificación no se aplicará a los términos permanentes.

5.3.6.1.2.3 Modificación por la fase de proyecto

Para la verificación de los modos durante la fase de proyecto de construcción, se podrán reducir los coeficientes de ponderación para todas las condiciones de trabajo, estados límite y origen de los términos, en función de las características de la obra y de su proceso constructivo, siempre que, se cumpla lo establecido en otras Instrucciones, Normas y Recomendaciones específicas. Esta modificación no será de aplicación para los términos permanentes.

Los coeficientes de ponderación en la verificación de modos en otras fases de proyecto deberán determinarse, en cada caso, en función de su especificidad.

En ningún caso, los coeficientes de ponderación desfavorables serán inferiores a la unidad y los favorables superiores a ella.

Comentario

Una vez que se conocen el valor característico de cada término de la ecuación de verificación bien como un valor del cuantil de su modelo de probabilidad bien por un valor nominal, y el coeficiente de ponderación, $p_{1,i}$ y $p_{2,j}$, el siguiente paso en la aplicación del método de los coeficientes parciales es la determinación de los coeficientes de compatibilidad de los términos, $\gamma_{1,i}$ y $\gamma_{2,j}$. El objetivo de estos coeficientes es compatibilizar los valores de los términos en función del tipo de combinación, de las clasificaciones temporal y por su origen de los factores de proyecto intervinientes, del estado límite, de la condición de trabajo y de la fase de proyecto.

5.3.7 Compatibilidad de los términos

El coeficiente de compatibilidad de cada término se ajustará a lo establecido en las Recomendaciones específicas o en otras Instrucciones y Normas. En otro caso, el coeficiente de compatibilidad se calculará teniendo en cuenta su dependencia de los siguientes aspectos, figura 5.6,

- Aspectos relacionados con los criterios generales
 - Fase de proyecto: construcción, servicio, reparación y mantenimiento y desmantelamiento
 - Condiciones de trabajo: operativas, extremas y excepcionales
- Aspectos relacionados con los estados límite
 - Último, de servicio y operativo
- Aspectos relacionados con el término y los factores de proyecto
 - Sentido de actuación: favorable y desfavorable
 - Clases de valores: centrado y de las colas superior e inferior
 - Participación en la ecuación: predominante, mismo origen o dependiente de él e independiente
 - Clasificación temporal del término: permanente y no permanente
 - Clasificación por el origen y función del término
 - Descripción del término: determinista o aleatoria
- Aspectos relacionados con la ecuación de verificación
 - Formato con el que ha sido propuesta

5.3.7.1 Coeficiente de compatibilidad para términos permanentes

El coeficiente de compatibilidad de los términos permanentes, tanto favorables como desfavorables será, en todos los casos, igual a la unidad.

5.3.7.2 Coeficiente de compatibilidad para términos no permanentes aleatorios

El coeficiente de compatibilidad de estos términos será la unidad, siempre que se determinen a partir de su modelo de probabilidad y de acuerdo con los subapartados siguientes⁹.

(9) El criterio y algunos de los valores recomendados fueron propuestos, inicialmente, en la ROM 0.4-95.

5.3.7.2.1 Coeficiente de compatibilidad del término predominante

El coeficiente de compatibilidad del término predominante será igual a la unidad siempre que el valor del término se tome del régimen extremal, clase de la cola centrada o superior, teniendo en cuenta el cumplimiento de la probabilidad conjunta de fallo o de operatividad tal y como se describe en el capítulo 7.

5.3.7.2.2 Coeficiente de compatibilidad de los restantes términos

El coeficiente de compatibilidad de los otros términos desfavorables, no permanentes y aleatorios sin relación de dependencia con el predominante, pero simultáneos y compatibles o concomitantes con él, será igual a la unidad siempre que el valor del término se determine con los siguientes criterios en función del tipo de combinación, o se justifique,

- Combinaciones fundamentales, $(i, CT_2, 1)$: el valor del término concomitante será el valor cuantil de la probabilidad de no excedencia del 0.70, tomada de su régimen extremal, clase centrada, y, en el caso de condiciones de trabajo operativas, $(i, CT_1, 1)$, será el valor del umbral operativo.
- Combinaciones frecuentes, $(i, CT_2, 2)$: el valor del término concomitante será el valor cuantil con la probabilidad de no excedencia del 0.85 (clase centrada), tomada del régimen medio o el valor cuantil con la probabilidad de no excedencia del 0.50-0.60, (clase centrada) tomada del régimen extremal, y, en el caso de condiciones de trabajo operativas, $(i, CT_1, 2)$, será el valor del umbral operativo.
- Combinaciones cuasi-permanentes, $(i, CT_1, 3)$ y $(i, CT_2, 3)$: el valor del término concomitante, será el valor cuantil con la probabilidad de no excedencia del 0.50-0.60 (clase centrada), del régimen medio o el valor cuantil con la probabilidad de no excedencia del 0.25 (clase de la cola inferior), del régimen extremal, en cada caso se adoptará el criterio que mejor represente las condiciones de trabajo, operativa normal y extrema que se están verificando.

Comentario

Los valores de la probabilidad de no excedencia del 0.85, 0.70, 0.60, 0.50 y 0.25 se han establecido a priori, para poder iniciar la aplicación de criterios probabilistas en el método de los coeficientes parciales. Para determinar de forma correcta los valores de la probabilidad de no excedencia de otros términos distintos del predominante, se deberá aplicar lo recomendado en la sección 6.5, relación entre los niveles I, II y III. Estos valores se dan en las Recomendaciones específicas.

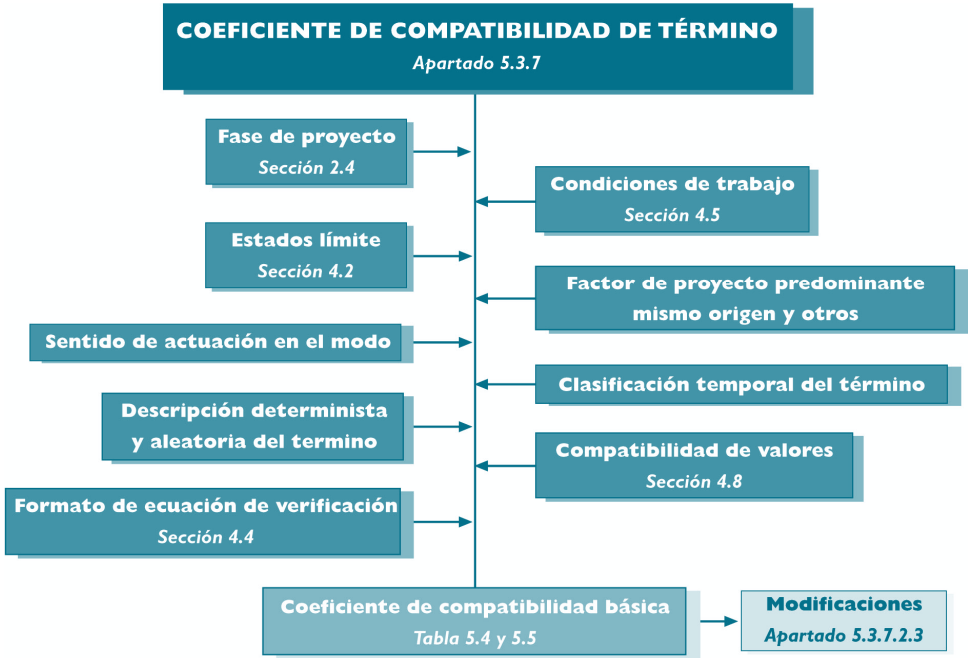


Figura 5.6:
Secuencia para el cálculo del coeficiente de compatibilidad.

5.3.7.3 Coeficiente de compatibilidad para términos no permanentes deterministas

El coeficiente de compatibilidad, básico o modificado, para estos términos se determinará según se indica en los apartados siguientes, determinando, en primer lugar, el coeficiente básico y seguidamente, en su caso, el modificado.

5.3.7.3.1 Coeficiente de compatibilidad básico

El coeficiente de compatibilidad básico se determinará en función de los siguientes aspectos:

5.3.7.3.2 Fase servicio, condiciones de trabajo operativa y extrema

Seleccionada la fase de proyecto servicio, las condiciones de trabajo operativa y extrema y todos los estados límite, último, de servicio y de parada, el coeficiente de compatibilidad depende, solamente, (1) de las clasificaciones temporal y por el origen de los factores, (2) del tipo de combinación y (3) de la participación del término en la ocurrencia del modo: predominante, dependiente de él o independiente.

En ese supuesto, el valor del coeficiente de compatibilidad, se tomará de la siguiente tabla 5.4. El subíndice p se refiere a un término predominante o dependiente del mismo, mientras que el superíndice 0 se refiere la participación en la combinación fundamental y los superíndices 1 y 2 a la participación en las combinaciones frecuente o cuasi-permanente.

Tabla 5.4:
Coeficiente de compatibilidad básico por la participación del término

| Participación | fundamental | frecuente | cuasipermanente |
|------------------------------|-------------|-----------|-----------------|
| Predominantes y dependientes | 0 p | 1 p | 2 |
| Independientes | 0 | 2 | 2 |

Los coeficientes de compatibilidad, α_0 , α_1 y α_2 , se encuentran en la tabla 5.5 de acuerdo con la clasificación por el origen y función de los factores que intervienen.

Tabla 5.5:
Coeficiente de
compatibilidad
básico por el
origen del
término

| | fundamental | | frecuente | | cuasipermanente |
|-------------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|
| Origen | α_0 P | α_0 | α_1 P | α_2 | α_2 |
| Gravitatorio | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Medio físico | 1.0 | 0.7 | 0.3 | 0.2-0.0 | 0.2-0.0* |
| Terreno | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Uso y Explotación | 1.0 | 0.7 | 0.6 | 0.5-0.0 | 0.5-0.0* |
| del Material | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Construcción | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |

Comentario

De acuerdo con la ROM 0.2-90, apartado 4.2.2, rara vez será necesario compatibilizar dos términos debidos a agentes de uso y explotación con dos términos asociados a los agentes del medio físico. Por ello, siguiendo aquella Recomendación y la Instrucción de Hormigón Estructural se recomienda aplicar el coeficiente, α_1 , al término predominante y el coeficiente de compatibilidad, α_2 , a los restantes términos frecuentes concomitantes.

Obsérvese que el coeficiente de compatibilidad no depende del sentido de actuación del término y, por tanto, afecta por igual a los términos favorables como a los desfavorables.

El coeficiente de compatibilidad para los tipos de combinación frecuente y cuasi permanente que afecta a los términos de los agentes del medio físico y de uso y explotación, se define mediante un intervalo con el objeto de acotar su valor y permitir su participación en los diferentes tipos de combinación.

5.3.7.3.3 Modificación del coeficiente de compatibilidad básico

El coeficiente de compatibilidad básico de las tablas 5.4 y 5.5 se aplicará a todos los términos con descripción determinista para la verificación de los modos adscritos a todos los estados límite, para las condiciones de trabajo operativas y extremas, en la fase de servicio.

5.3.7.3.4 Modificación por la condición de trabajo

Salvo justificación, en la verificación de los modos para las condiciones de trabajo excepcionales, fortuitas o previstas, para los estados límite, último y de servicio y, en su caso, para los estados límite operativos, el coeficiente de compatibilidad de los términos no relacionados con el factor extraordinario o insólito podrá ser el correspondiente a un tipo de combinación frecuente o cuasi permanente, según sea, predominante y dependiente o independiente, respectivamente.

5.3.7.3.5 Modificación por la fase de servicio

Salvo justificación en la verificación de los modos durante la fase de proyecto de construcción, el coeficiente de compatibilidad de los términos no relacionados con el factor predominante podrá ser el correspondientes a un tipo de combinación cuasi-permanente.

5.3.8 Valor de cálculo de los parámetros de proyecto

En general, el valor de los parámetros de proyecto que intervienen en un término de la ecuación de verificación se determinarán de acuerdo con lo establecido en las Normas, Instrucciones y

Recomendaciones específicas.

En otro caso, su determinación se realizará de acuerdo con los siguientes subapartados.

5.3.8.1 Valor característico de los parámetros geométricos

Si el parámetro de proyecto es una magnitud geométrica, el valor característico será el valor nominal definido en el plano. En general, éste será el valor que se aplique en el cálculo del término. Si se esperan desviaciones y éstas tienen una incidencia significativa en la verificación del modo, se podrán definir valores característicos superior e inferior a partir de las tolerancias admitidas o a partir de un modelo de probabilidad; en estos casos, el término se calculará con el valor que contribuya de forma más desfavorable en la verificación del modo.

5.3.8.2 Valor característico de parámetros que definen propiedades de identificación y estado

Salvo justificación los valores característicos de los parámetros que definen propiedades de identificación y de estado del terreno y del aire y agua, se determinarán de acuerdo con lo recomendado en el capítulo 3 y en las Normas, Instrucciones y Recomendaciones específicas.

Con carácter general, aquellos valores se determinarán a partir de su modelo de probabilidad, considerando según los casos, el valor mediana, media o moda. En otros casos, se podrá tomar como valor característico, un valor nominal que sea representativo del comportamiento medio del parámetro en el intervalo de tiempo.

5.3.8.3 Valor característico de los parámetros que definen propiedades mecánicas

En la mayoría de los casos, los valores característicos de los parámetros que definen las propiedades mecánicas, las del terreno y las de los materiales en particular, se determinarán de acuerdo con lo recomendado en el capítulo 3 y cumpliendo lo especificado en las Normas, Instrucciones y Recomendaciones. Con carácter general, se determinarán dos valores característicos uno superior y otro inferior, como el valor de dos cuantiles de su función de distribución.

Comentario

De acuerdo con la Instrucción de Hormigón Estructural EHE, el valor característico de la resistencia a compresión del hormigón y resistencia a compresión y tracción de los aceros, son los cuantiles correspondientes a una probabilidad del 0.05. Los valores característicos superior e inferior de la resistencia a compresión del hormigón, son los cuantiles asociados a la probabilidad de excedencia del 0.95 y 0.05, respectivamente. En otros casos, por ejemplo cuando el peso específico del hormigón en masa, sea un parámetro de estado, su valor característico será el valor medio.

5.3.8.3.1 Coeficiente reductor de las propiedades mecánicas

Para los parámetros que definen propiedades mecánicas y de comportamiento de los materiales y, en su caso, del terreno, el valor característico se verá afectado por un coeficiente reductor, c_{rm} , que lo minore, el cual depende de los siguientes aspectos del procedimiento general de verificación,

- Aspectos relacionados con los criterios generales
 - Fase de proyecto: construcción, servicio, reparación y mantenimiento y desmantelamiento
 - Condición de trabajo: operativa, extrema, excepcional

- Aspectos relacionados con los estados límite
 - Último, de servicio y operativo
- Aspectos relacionados con el término
 - Clases de valores: centrada y de las colas superior e inferior
- Aspectos relacionados con el factor de proyecto
 - Parámetro de propiedades mecánicas del material y del terreno
 - Parámetros naturales: tratamiento, variabilidad y repercusión en la verificación.
 - Nivel de control de la ejecución: intenso, normal y reducido
- Aspectos relacionados con la ecuación de verificación
 - Formato en la que ha sido propuesta.

5.3.8.3.1.1 Coeficiente reductor básico

Al objeto de ayudar en la determinación de éste coeficiente, se define el coeficiente reductor básico cuyo valor se determina en función de algunos de los aspectos relacionados en el apartado anterior.

| Resistencia del material | Condición de trabajo | |
|-----------------------------|----------------------|-------------|
| | operativa y extrema | excepcional |
| hormigón | 0.65 | 0.70 |
| acero armaduras | 0.85 | 1.00 |
| acero construcción | 1.00 | 1.00 |
| conectores E.M. | 0.75 | 0.90 |
| madera | 0.70 | 0.90 |
| escolleras | 1.00 | 1.00 |
| Otras propiedades | | |
| módulo elasticidad | 1.00 | 1.00 |
| módulo rigidez | 1.00 | 1.00 |
| coef. Poisson | 1.00 | 1.00 |
| coef. dilat. térmica | 1.00 | 1.00 |

Tabla 5.6:

Coeficiente reductor básico: propiedades de los materiales

| Parámetros | Condición de trabajo | |
|---|----------------------|-------------|
| | operativa y extrema | excepcional |
| Tang. ángulo rozamiento efectivo | 0.80 | 1.00 |
| Cohesión efectiva | 0.65 | 1.00 |
| Resistencia al corte sin drenaje | 0.70 | 1.00 |
| Resistencia a compresión simple | 0.70 | 1.00 |

Tabla 5.7:

Coeficiente reductor básico: propiedades del terreno

5.3.8.3.1.1.1 Todas las fases y condiciones de trabajo y estados límite últimos, ejecución intensa

Para la verificación de los estados límite últimos en las condiciones de trabajo extremas y operativas y excepcionales, en todas las fases de proyecto y cuando el nivel de control de la ejecución

(10) Estos valores se analizan con más detalle en la ROM 0.5. En caso de conflicto de valores, se adoptarán los recogidos en las Recomendaciones específicas

es normal, el coeficiente reductor del valor característico del parámetro mecánico de los materiales y del terreno se ajustará a los valores recogidos en las tablas 5.6 y 5.7¹⁰:

| | |
|--|---|
| 5.3.8.3.1.2 | Modificación del coeficiente reductor básico |
| Los coeficientes de reducción básicos de las tablas 5.6 y 5.7 se aplicarán a los términos favorables en la verificación de los modos adscritos a los estados límite últimos, para las condiciones de trabajo operativas, extremas y excepcionales y todas las fases de proyecto. Para otros estados límite y condición de trabajo, se adoptarán las siguientes modificaciones. | |
| 5.3.8.3.1.2.1 | Modificación para los términos desfavorables |
| Para todos los materiales y propiedades del terreno, el coeficiente reductor de los parámetros pertenecientes a un término desfavorable será igual a la unidad. | |
| 5.3.8.3.1.2.2 | Modificación por el estado límite |
| El coeficiente reductor de los parámetros de los materiales y del terreno en la verificación de modos adscritos a estados límite de servicio y operativos serán igual a la unidad, independientemente del término en el que intervengan. | |
| 5.3.8.3.1.2.2.1 | Modificación para el estado límite último de fatiga |
| Para todos los materiales, el coeficiente reductor para la verificación de estados límite de fatiga será, para condiciones de trabajo operativas y extremas, igual a 0.80, y para las condiciones de trabajo extraordinarias igual a la unidad. | |
| 5.3.8.3.1.2.2.2 | Modificación para el estado límite último de colapso progresivo |
| Para todos los materiales, el coeficiente reductor para la verificación de estados límite de colapso progresivo será, para condiciones de trabajo operativas y extremas, igual a 0.90, y para las condiciones de trabajo extraordinarias, igual a la unidad. | |
| 5.3.8.3.1.2.3 | Modificación por el nivel de control en la ejecución |

(11) Véase EHE artículo 95

Se consideran tres niveles de control de la ejecución¹¹: intenso, normal y reducido. En función del nivel de control adoptado, el valor de las tablas 5.6 y 5.7, se podrá multiplicar por el siguiente coeficiente corrector de la tabla 5.8.

Comentario

En la Instrucción de Hormigón en masa y estructural, se consideran tres niveles de control de la ejecución del hormigón, intenso, normal y reducido, en función del número de probetas y frecuencia de muestreo y, en función de él se propone un coeficiente reductor que afecta a las propiedades mecánicas del material. Con carácter general, en esta Recomendación se adopta este criterio.

Tabla 5.8:
Modificación
del coeficiente
reductor básico

| Intenso | Normal | Reducido |
|---------|--------|----------|
| 1.00 | 0.90 | 0.85 |

5.3.9

Resumen de los criterios para determinar los coeficientes parciales

Con carácter general, los criterios para determinar los coeficientes parciales: de ponderación y de compatibilidad dependen de algunos de los aspectos siguientes,

- Aspectos relacionados con los criterios generales de proyecto
 - Fase de proyecto: construcción, servicio, reparación y mantenimiento
 - Condición de trabajo: operativa, extrema, excepcional
- Aspectos relacionados con los estados límite
 - Último, de servicio, operativo
- Aspectos relacionados con la ecuación y el término:
 - Participación en la ecuación: predominante, dependiente, independiente
 - Descripción del término: modelo probabilista, valor determinista
 - Sentido de actuación del término: favorable o desfavorable
 - Clases de valores: centrada y de las colas superior e inferior
 - Tipo de combinación
- Aspectos relacionados con el factor de proyecto
 - Clasificación temporal¹²: permanente, no permanente
 - Clasificación por su origen o función¹³
 - Tipo de factor: parámetro, agente.
- Aspectos relacionados con la ejecución de la obra
 - Nivel de control de la ejecución: intenso, normal, reducido
- Aspectos relacionados con la ecuación de verificación
 - Formato con la que ha sido propuesta

(12) Se clasifica según los agentes que intervienen y se toma lo más desfavorable para la verificación.

(13) Se adjudica la clasificación del agente principal en el término o acción de la ecuación de verificación.

Comentario

De acuerdo con la lista anterior hay casi cuarenta aspectos diferentes a tener en cuenta para determinar los coeficientes parciales, de ponderación y de compatibilidad, que intervienen en una ecuación de verificación. Mediante las tablas que se adjuntan en esta sección y con el programa de apoyo elaborado a partir del texto de esta R.O.M.0.0, y con los valores que se especifiquen en otras Normas, Instrucciones y Recomendaciones, se espera ayudar en la aplicación del método de los coeficientes parciales.

5.3.10

Valor de cálculo del término

Se obtendrán multiplicando el valor del término, $X_{1,i}$ y $X_{2,j}$ en su caso el valor característico, por los coeficientes, de ponderación, p_i y de compatibilidad, p_j . Para cada modo, el valor de cálculo del término depende del valor de aquellos coeficientes, $a_i = p_i$ y $b_j = p_j$, que, a su vez, dependen del estado límite, de la condición de trabajo, del tipo de combinación y de la fase de proyecto. Además, las propiedades mecánicas de los materiales se multiplicarán por un coeficiente corrector, c_{rm} .

5.3.10.1

Ecuación de verificación y tipo de combinación

La forma general de la ecuación de verificación en formato de margen de seguridad para los estados límite últimos es,

$$S = \sum_{i=1}^I a_i X_{1,i} - \sum_{j=1}^J b_j X_{2,j} = \sum_{i=1}^I X_{1,i,d} - \sum_{j=1}^J X_{2,j,d}$$

Dependiendo del tipo de combinación, esta ecuación toma la siguiente forma:

- Combinación fundamental (poco probable o poco frecuente):

$$\begin{aligned} X_{1,i,d} &= p_{1,1} X_{1,1} + p_{1,2} X_{1,2} + \dots \\ X_{2,j,d} &= p_{2,1} X_{2,1} + p_{2,2} X_{2,2} + p_{2,3} X_{2,3} + p_{2,4} X_{2,4} + \dots \end{aligned}$$

es decir, un término predominante se toma como fundamental principal, y otros términos predominantes se toman como fundamentales. Rara vez habrá que combinar más de dos términos predominantes del medio físico o más de dos términos de uso y explotación o más de un término predominante del medio físico y otro de uso y explotación.

- Combinación frecuente

$$\begin{aligned} X_{1,i,d} &= p_{1,1} X_{1,1} + p_{1,2} X_{1,2} + \dots \\ X_{2,j,d} &= p_{2,1} X_{2,1} + p_{2,2} X_{2,2} + p_{2,3} X_{2,3} + p_{2,4} X_{2,4} + \dots \end{aligned}$$

es decir, un término predominante se toma como frecuente, y el resto de los términos predominantes independientes y no predominantes se toman como cuasi-permanentes. De manera esporádica habrá que combinar más de dos términos predominantes del medio físico con más de dos términos de uso y explotación.

- Combinación cuasi-permanente

$$\begin{aligned} X_{1,i,d} &= p_{1,1} X_{1,1} + p_{1,2} X_{1,2} + \dots \\ X_{2,j,d} &= p_{2,1} X_{2,1} + p_{2,2} X_{2,2} + p_{2,3} X_{2,3} + p_{2,4} X_{2,4} + \dots \end{aligned}$$

es decir, todos los términos predominantes, dependientes de él, independientes y no predominantes se toman como cuasi-permanentes.

Para estados límite de servicio y operativos, los coeficientes de ponderación serán iguales a la unidad para todos los tipos de combinación.

Comentario

En el caso de la verificación del modo de fallo deslizamiento como sólido rígido de un muelle de ribera construido con un cajón sobre una banqueta de escollera en condiciones de trabajo operativas normales durante la vida útil, se pueden considerar los siguientes agentes:

Agente gravitatorio: Acción, Peso propio, P_p

Agente del terreno: Acción, E_p , empuje horizontal del terreno

Agentes de uso y explotación:

Almacenamiento: Acción, E_s , empuje horizontal de la sobrecarga

Elementos de carga y descarga, grúa: Acción, H_g , Fuerzas horizontal y, V_g , vertical

Barco atracado: Acción, H_b , tiro (horizontal) del bolardo, H_d , y empuje (horizontal) sobre la defensa

El peso propio es una acción permanente y las restantes son no permanentes.

Son acciones o términos favorables, los asociados al peso propio, el peso de la grúa y el empuje sobre la defensa, y desfavorables los restantes. Son agentes y acciones predominantes los debidos al terreno y a la sobrecarga de almacenamiento.

- Ecuación de verificación

Modo deslizamiento horizontal se escribe con el formato de margen de seguridad,

$$S = \sum_{i=1}^I a_i X_{1,i} - \sum_{j=1}^I b_j X_{2,j}$$

Términos

favorables verticales: $X_{1,1} = P_p$; $X_{1,2} = V_G$

favorables horizontales: $X_{1,2} = H_D$

desfavorables verticales: no hay

desfavorables horizontales: $X_{2,1} = E_T$; $X_{2,2} = E_S$; $X_{2,3} = H_G$; $X_{2,4} = H_B$

- Coeficientes de ponderación básico:

Fase servicio, condiciones de trabajo operativa y extrema y estado límite último

Términos

permanentes favorables: P_p , $p_{1,1} = 1.00$

no permanentes favorables: V_G , $p_{1,2} = 1.00$

permanentes desfavorables: E_T , $p_{2,1} = 1.35$

no permanentes desfavorables: E_S , $p_{2,2} = 1.50$; H_G , $p_{2,3} = 1.50$; H_B , $p_{2,4} = 1.50$

- Tipo de combinación: Fundamental

Agente predominante terreno

Coefficiente de compatibilidad básico:

Fase servicio, condiciones de trabajo operativa y extrema.

Término predominante

debido al empuje del terreno, $\phi_p = 1.00$

Otros agentes simultáneos independientes:

sobrecarga de almacenamiento, grua y barco, $\phi = 0.70$

Agente gravitatorio: $\phi_l = 1.00$

La ecuación de verificación para el modo de deslizamiento, adscrito a un estado límite último, en condiciones de trabajo operativas normales, con el tipo de combinación fundamental durante la fase de proyecto servicio es,

$$S = \mu(p_{1,1} P_p + \phi_p p_{1,2} V_G) - \{(\phi_p p_{2,1} E_T + \phi_p p_{2,2} E_S) + \phi_p (p_{2,3} H_G + p_{2,4} H_B)\}$$

$$S = \mu(P_p + 0.7 V_G) - \{(1.35 E_T + 0.7 * 1.50 E_S) + 0.7 (1.50 H_G + 1.50 H_B)\}$$

Obsérvese que el terreno y la sobrecarga de almacenamiento se consideran términos permanentes y desfavorables, por lo que el coeficiente de ponderación es de 1.35 y 1.50, respectivamente. No obstante el coeficiente de compatibilidad para cada uno de ellos es diferente; el término, debido al terreno, tiene un coeficiente de agente predominante, mientras que la sobrecarga lo tiene de agente simultáneo y compatible, o concomitante.

5.4

Anejo: Otros Métodos de Nivel I

En “medio” de los métodos del coeficiente de seguridad global y de los coeficientes parciales se encuentran otros, entre ellos, el llamado método “de diseño por carga y factor de resistencia”, propuesto por Ravindra y Galambos, 1978, que es el que se aplica por regla general en los EEUU, con el formato de comprobación de la seguridad de la ACI. En él, los criterios para la combinación de términos y la determinación de los coeficientes de ponderación y de compatibilidad están regulados y son de obligado cumplimiento.

Para las edificaciones se definen cuatro tipos de combinaciones de cargas (términos) que se deben verificar, aunque no se garantiza que sean suficientes, para algunas situaciones especiales. En ellas, se consideran las siguientes cargas (acciones): peso muerto y las máximas cargas vivas, debidas al viento y a la nieve, en la vida útil. Estas cargas se cuantifican por el valor (máximo) medio y se ponderan y compatibilizan por medio de un coeficiente, particular para cada una de ellas, que se denomina factor de carga. Los cuatro tipos de combinación de cargas son: (1) cargas muertas y vivas; (2) cargas muertas, viento y cargas vivas afectadas de un coeficiente que convierta el valor máximo medio en una carga “sostenida”, que en la nomenclatura de estas Recomendaciones sería un valor frecuente; (3) cargas muertas, cargas vivas “sostenidas” y nieve; y (4) viento y carga muerta mínima.

En los cuatro casos la condición de verificación es la superposición de las cargas afectadas de su factor debe ser menor que la resistencia nominal, afectada por un factor de resistencia.

Un método más cercano al de los coeficientes parciales es el adoptado en Canadá para la verificación de edificaciones, NRCC y CSA. Su estructura es análoga a la del factor de diseño de la ACI, en lo que se refiere al factor de resistencias que es único, pero amplía notablemente el número de combinaciones de cargas. Además, incluye coeficientes de compatibilidad para las cargas debidas a factores del medio físico concomitantes: para el primer factor el valor del coeficiente de compatibilidad es $=1$, mientras que para los dos siguientes admite valores de 0.7 y 0.6, respectivamente. Los coeficientes de ponderación se determinan en función del valor de un coeficiente o factor de importancia que sirve de medida de la importancia del fallo de la obra.

Por último, se encuentra el método propuesto por el Comité Europeo del Hormigón, CEB, que es el más cercano al método de los coeficientes parciales, tal y como se desarrolla en estas Recomendaciones. En él se definen: (1) coeficientes de minoración y coeficientes (reductores) de las propiedades resistentes de los materiales que se aplican con valores característicos; (2) coeficientes de ponderación y de compatibilidad de las cargas que afectan, en cada caso, a valores característicos. La ecuación de verificación es una desigualdad en la que se comparan los términos resistentes con los términos de cargas.

Se proponen diferentes coeficientes de ponderación y de compatibilidad para los estados límite últimos y de servicio, y se clasifican las cargas en fundamentales y accidentales para la comprobación de los estados límite últimos, y en frecuentes, cuasi-permanentes e infrecuentes para la comprobación de los estados límite de servicio. Además, se aplican diferentes coeficientes de compatibilidad a la carga más desfavorable y a las restantes cargas, distintas de las cargas muertas y vivas. Éstas, se aplican con valores máximos y mínimos afectados por coeficientes de ponderación que dependen del sentido de participación en el resultado de la ecuación de verificación.

Tabla 5.9:

Tabla de
Coeficientes de
Compatibilidad,
CEB (1976)

| Estado límite | Carga | i_1 | $i_i, i > 1$ |
|---------------|------------------|-------|--------------|
| Último | Fundamental | 1.0 | A |
| | Accidental | B | C |
| | Infrecuente | 1.0 | B |
| de Servicio | Cuasi-permanente | C | C |
| | Frecuente | B | B |

Los valores de A, B y C dependen del tipo de edificio y agente según la siguiente tabla,

Tabla 5.10:

Tabla de
Coeficientes de
Compatibilidad
2, CEB (1976)

| | A | B | C |
|-----------------|------------|-----|-----|
| Viviendas | 0.5 | 0.7 | 0.4 |
| Oficinas | 0.5 | 0.8 | 0.4 |
| Otros Edificios | 0.5 | 0.9 | 0.4 |
| Aparcamientos | 0.6 | 0.7 | 0.6 |
| Viento | 0.55 | 0.2 | 0.0 |
| Nieve | 0.55 | | |
| Viento y Nieve | 0.55 y 0.4 | | |

La aplicación de uno u otro método conduce a un número diferente de verificaciones. Así, por ejemplo para el caso de un edificio sometido a cargas muertas y vivas, viento y nieve, por el método del factor de diseño (EEUU) se comprueban cuatro combinaciones de cargas, y por los métodos del NRCC y del CEB se comprueban respectivamente, catorce y treinta y dos combinaciones de cargas. El método de los coeficientes parciales, tal y como se propone en estas Recomendaciones, deja el número de comprobaciones abierto, dependiendo, principalmente, de la experiencia del que lo aplica que es, a la postre, el que decide.

CAPITULO 6

Métodos de Nivel II y III



6

MÉTODOS DE NIVEL
II Y III

6.1

Introducción

Dada una alternativa de proyecto y elegido un intervalo de tiempo, se deben verificar los requisitos de seguridad, de servicio y explotación del tramo de obra frente a todos los modos adscritos a los estados límite últimos, servicio y operativos. Los métodos de Nivel II y III verifican el tramo frente a un modo y evalúan su probabilidad de ocurrencia en el intervalo de tiempo. El presente capítulo se dedica a presentar estos métodos.

6.1.1

Organización y contenidos del capítulo

Este capítulo comienza con la formulación general del problema: cálculo de la probabilidad de ocurrencia de un modo de fallo o de parada en un tramo de obra en un intervalo de tiempo. Se presenta a continuación un método de Nivel II, elaborado a partir de los momentos estadísticos de segundo orden, media y varianza. Este método se puede aplicar con varios órdenes de aproximación, siendo el más popular el que se deriva linealizando la ecuación de verificación, por lo que se conoce como aproximación de primer orden o lineal que, en esta ROM se identifica por las siglas APO. Después se elaboran los métodos de Nivel III que incluyen los llamados de simulación; de estos últimos en esta ROM se propone el método apoyado en el algoritmo de Monte Carlo. La figura 6.1 es un esquema de las secciones de este capítulo y de sus relaciones.

Comentario

En la segunda parte de estas Recomendaciones se presentan en un capítulo específico los aspectos teóricos de los métodos de Nivel II y III que sirven de justificación al articulado de este capítulo, así como algunas formulaciones estadísticas que son de interés para la aplicación de estas Recomendaciones.

Figura 6.1:
Organización y
contenidos del
capítulo 6.



6.2

Formulación general de problema

Considérese un modo de fallo de un tramo de obra en el que intervienen n factores de proyecto, definidos por el vector n -dimensional $X (X_1, X_2, \dots, X_n)$, con función de densidad conjunta en el intervalo de tiempo, $f_{X_1, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n)$. Sea la ecuación de verificación del modo, $S = G(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$, que define una hipersuperficie crítica en el espacio n -dimensional tal que, $S = G > 0$, es el dominio de seguridad y $S = G = 0$, define el dominio de fallo. En un intervalo de tiempo de duración conocida T_L , la probabilidad de ocurrencia del modo, i , denominada $p_{f,i}$ y la fiabilidad, $r_{f,i}$, se

calculan por las siguientes integrales n-múltiples,

$$P_{f,i}(T_L) = \int_{G(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0} \dots \int f_{x_1, x_2, \dots, x_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n$$

$$r_{f,i}(T_L) = 1 - p_{f,i} =$$

$$\int_{G(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0} \dots \int f_{x_1, x_2, \dots, x_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n$$

La evaluación de la integral o de la probabilidad de fallo se puede hacer, entre otros, por integración directa (lo cual rara vez es posible), por simulación numérica, p.ej. Monte Carlo (Nivel III) o por transformación del integrando para trabajar con variables gaussianas independientes (Nivel II), figura 6.2.

6.2.1 Aplicación y limitaciones

Previamente a la aplicación de cualquier método, Nivel I, II o III, se debe conocer una ecuación de verificación que permita cuantificar la ocurrencia del modo de fallo. Seleccionados la fase de proyecto, el estado límite, la condición de trabajo y el tipo de combinación los valores de los términos y el resultado de la ecuación se podrán obtener siguiendo la secuencia de trabajo descrita para cada uno de los dos métodos, Niveles II y III.

Se supone que las funciones de densidad y distribución y los parámetros estadísticos de los factores de proyecto no evolucionan con el tiempo durante el intervalo en el cual se verifica el modo. De manera análoga, se supone que la ecuación de verificación aplicada para analizar el modo es válida en el intervalo. En otro caso, es necesario dividir el intervalo en intervalos de tiempo más pequeños en los cuales se pueda admitir la hipótesis de proceso estacionario en sentido estadístico.

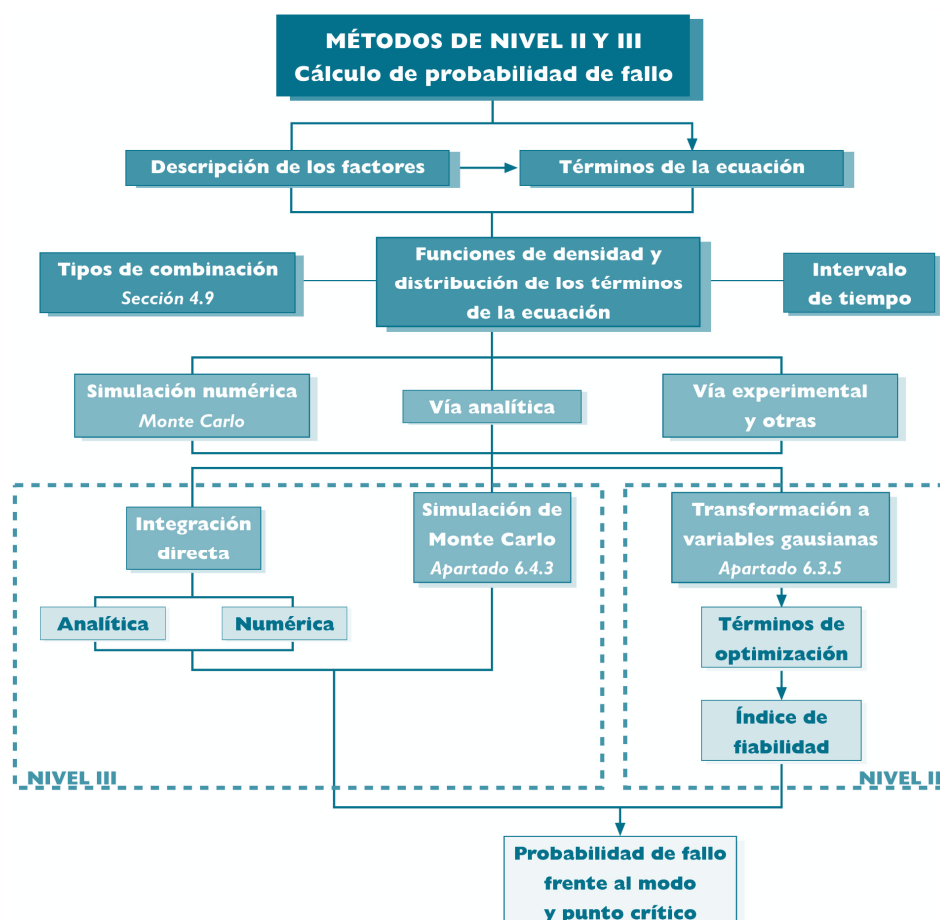


Figura 6.2:
Métodos de
verificación de
Nivel II y III

6.2.2 Probabilidad conjunta de fallo en la vida útil

En el capítulo 2 de estas Recomendaciones, en función del carácter de la obra se proponen los valores máximos de la probabilidad de fallo de la obra frente a los modos principales adscritos a los estados límite últimos y de servicio (ver tablas 2.2 a 2.3), y, la operatividad mínima frente a los modos principales de parada que pueden ocurrir en la fase de proyecto servicio. En este capítulo 6 se desarrollan los métodos para evaluar la probabilidad de ocurrencia de un sólo modo en un intervalo de tiempo. A partir de ella, el cálculo de la probabilidad conjunta del tramo se hará siguiendo lo recomendado en el capítulo 7.

6.3 Método de Nivel II

Se recomienda un método de Nivel II para verificar los modos de fallo y de parada operativa de las obras marítimas cuyo carácter general u operativo esté en el intervalo, $[r = r_3, s = s_2]$ o $[r=r_3]$ o $[s = s_3]$, tabla 4.6. En la figura 6.3 se esquematiza la secuencia de actividades a realizar para la aplicación de un método del Nivel II.

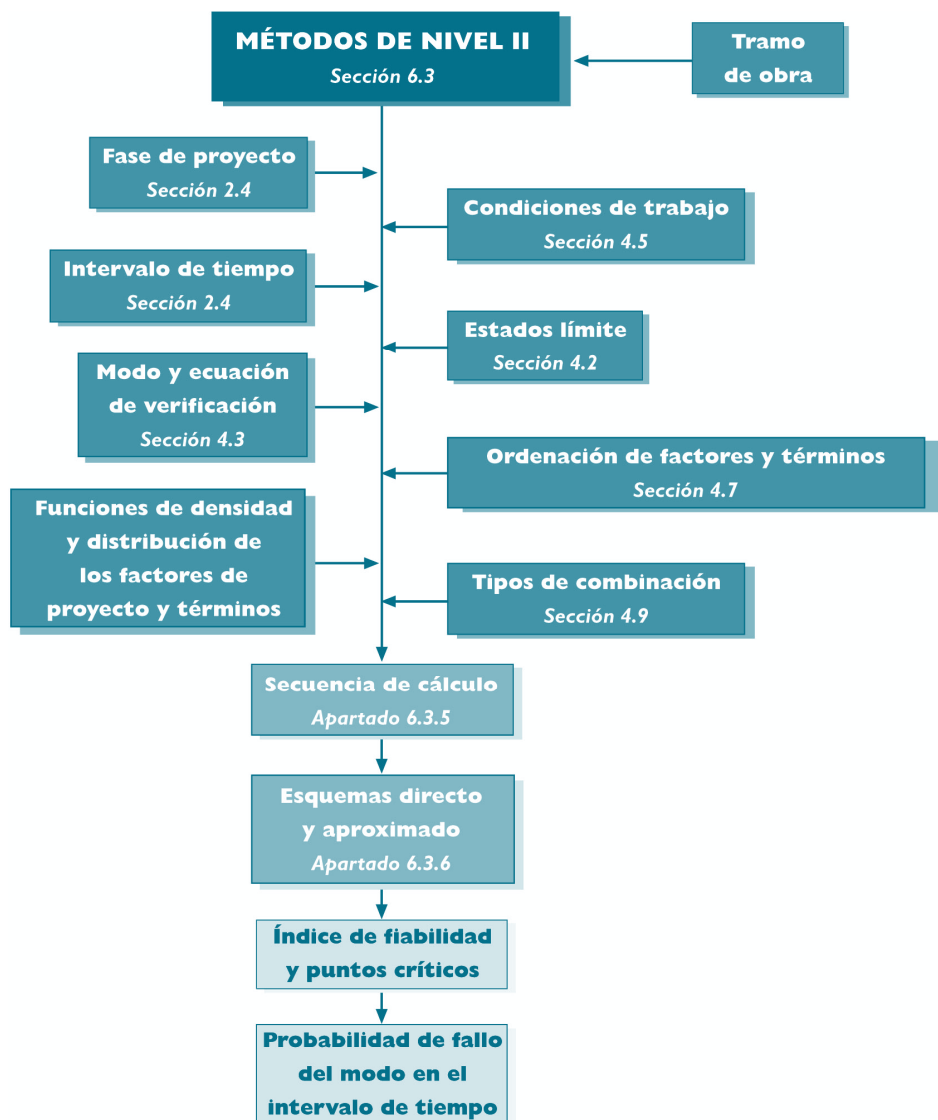


Figura 6.3:
Secuencia para la aplicación de un método de Nivel II.

6.3.1 Introducción y definiciones

El método consiste en obtener la probabilidad de fallo mediante la evaluación de la distancia mínima del origen de coordenadas a la superficie de fallo o parada, definida por la ecuación de verificación, $G(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$. Con carácter general, los factores de proyecto son variables aleatorias con funciones de densidad y de distribución conocidas.

Comentario

A diferencia de los métodos de Nivel I en los que algunos de los parámetros de proyecto, tales como las propiedades mecánicas de los materiales y el terreno, deben llevar un coeficiente de minoración asociado al valor característico (si intervienen en un término desfavorable), en los métodos de Nivel II y III, los parámetros de proyecto se describen estadísticamente de forma análoga a los restantes factores de proyecto.

Además, los términos no estarán afectados por coeficientes de ponderación y de compatibilidad tal y como ocurre en el método de los coeficientes parciales del Nivel I. Dado que algunas veces la verificación de un modo lleva asociado un gran número de factores de proyecto, es conveniente simplificar al máximo el número de variables consideradas.

6.3.2 Ordenación de los factores de proyecto

A tal efecto se seguirá la ordenación de factores propuesta en la sección 4.7. Para cada fase de proyecto e intervalo de tiempo se seleccionarán los factores existentes y, teniendo en cuenta la condición de trabajo, se creará el conjunto de factores de proyecto que actúan simultáneamente. Después, para cada estado límite y modo de fallo, el conjunto se ordenará según la participación del factor en la ocurrencia del fallo, en primer lugar el predominante y los del mismo origen y dependientes de él, a continuación los factores independientes, y, de entre éstos, aquellos que tienen el mismo origen y son mutuamente dependientes y por último los factores completamente independientes. A partir de este conjunto se definirán los tipos de combinación, sección 4.9.

6.3.2.1 Valor de los factores con modelo de probabilidad

La ordenación de factores se concretará, según la disponibilidad de información, en las funciones de distribución conjuntas, condicionales y marginales de los diferentes factores de proyecto. En aquellos casos en los que se cumplan las condiciones establecidas en la sección 3.5, se declarará el factor como determinista.

6.3.2.2 Valor de factores sin modelo de probabilidad

Algunos factores, por su propia naturaleza, o porque no hay información estadística disponible, no tendrán un modelo de probabilidad y tomarán un valor nominal. En cualquier caso, para dar generalidad al método y al resultado obtenido, es conveniente asociar a este valor nominal un modelo de probabilidad que, siempre que sea posible y justificable, será un modelo normal, lognormal u otro, que se seleccionará en función del valor nominal y de su posible dispersión.

Comentario

Si el valor nominal es un valor medio, es inmediato asociar un modelo gaussiano tras estimar una desviación típica. Si el valor nominal es un mínimo o máximo, el modelo de probabilidad también puede ser normal, pero en este caso, se podrá considerar que el valor nominal es el valor de un cuantil superior, (0.90, 0.95, 0.99) o inferior (0.01, 0.05, 0.10) de la distribución; estimando la desviación típica se obtendrá el valor medio de la función de distribución gaussiana.

De forma análoga se puede proceder cuando el factor de proyecto pertenece por ejemplo, a la clase de la cola superior y se le puede adscribir como modelo de probabilidad la distribución de Gumbel. En

estos casos se pueden estimar los dos parámetros de la distribución y a partir de ellos obtener cualquier otro valor.

6.3.2.3 Correlación entre factores o términos

A efectos de la aplicación del método de Nivel II, se considerarán los siguientes rangos de correlación entre los factores o los términos:

6.3.2.3.1 Factores o términos no correlacionados o con correlación débil

Cuando el coeficiente de correlación entre dos factores o términos sea menor que 0.2, $[r_{x_i x_j} < 0.2]$, se podrá considerar que las dos variables son estadísticamente independientes y la función de densidad conjunta es igual al producto de las funciones de densidad marginales.

6.3.2.3.2 Factores o términos con correlación fuerte

Cuando el coeficiente de correlación entre dos factores o términos sea mayor que 0.8, $[r_{x_i x_j} > 0.8]$, se considerará que las dos variables son totalmente dependientes y se podrá reemplazar una de ellas en función de la otra.

6.3.2.3.3 Factores o términos correlacionados

Cuando el coeficiente de correlación entre dos factores o términos se encuentre en el intervalo $[0.2, r_{x_i x_j}, 0.8]$, deberán ser tratadas como correlacionadas y se procederá a aplicar uno de los métodos de transformación que se recomienda más adelante.

6.3.2.4 Coeficiente reductor de los parámetros de proyecto

Los parámetros de proyecto seguirán el mismo tratamiento estadístico que cualquier otro factor de proyecto, incluyendo su posible relación funcional y estadística con otros factores.

6.3.3 Ecuación de verificación

A efectos de aplicación, la ecuación de verificación se establecerá en el formato de margen de seguridad, teniendo en cuenta los criterios, las hipótesis y las dimensiones de los términos con los que fue propuesta originariamente.

Comentario

Además, para aplicar un método de Nivel II es necesario conocer el modelo de probabilidad de cada término de la ecuación.

6.3.3.1 Función de distribución conjunta, condicional y marginal de los términos

Siempre que sea posible, las funciones de distribución de los términos se obtendrán por vía analítica, de tal forma que la probabilidad de ocurrencia del modo se pueda calcular por integración directa en el dominio de la función de densidad del margen de seguridad. En otro caso se continuará con el método que se describe a continuación.

Comentario

En los casos en los que no haya información estadística suficiente de los términos de la ecuación, es conveniente especificar el factor relevante de cada término, pues de él se puede obtener la función de den-

sidad del término, considerando valores representativos o deterministas de los restantes factores que intervienen en el término, de acuerdo con los apartados, 5.3.1.2 y 5.3.4.1.2.

6.3.4 Tipos de combinación

Hasta que se disponga de información estadística de las funciones de distribución conjunta de los factores de proyecto que intervienen en la verificación de un modo, el método de Nivel II se aplicará teniendo en cuenta las clases de valores y tipos de combinación de términos recomendados en las secciones 4.7, 4.8 y 4.9. Mediante ellos, se puede reducir el número de factores y términos y, en consecuencia, la necesidad de funciones de distribución conjuntas de todos los factores y términos.

6.3.5 Secuencia de cálculo

La solución al problema planteado en la sección 6.2, por el método de Nivel II, se obtiene minimizando una función sujeta a ciertas restricciones. Este cálculo se puede hacer directamente; no obstante en algunos casos, es necesario recurrir a técnicas de aproximación tal y como se describe en esta sección.

Para encontrar una solución, se propone, en estas Recomendaciones, un esquema iterativo en el que a partir de los datos especificados en los apartados anteriores, se obtienen los valores de los factores de proyecto del punto crítico de la superficie de fallo y la probabilidad asociada.

La secuencia de cálculo incluye: (1) la transformación de todas las variables que participan con un modelo de probabilidad en variables gaussianas reducidas no correlacionadas, (2) la transformación de la ecuación de verificación a las nuevas variables, y (3) el cálculo de la distancia mínima del origen de coordenadas a la superficie de fallo representada por la ecuación de verificación. Esta secuencia se concreta en esquemas de cálculo que se detallan en los apartados siguientes.

Comentario

En el paso (1) se decide cómo son las colas de las distribuciones probabilísticas y esto puede tener una influencia notable en el resultado, especialmente cuando el índice de fiabilidad es alto. Por eso se recomienda que para los proyectos que deban ser muy fiables ($ISA > 20$), se verifique la seguridad, además, con algún procedimiento de nivel I.

Por otra parte, en los últimos años con el desarrollo de los ordenadores personales, los problemas de optimización con restricciones se pueden resolver de forma directa con paquetes de programas que en muchos casos son de dominio público. Cuando estas técnicas numéricas se implanten en el ámbito de la ingeniería civil, la aproximación que se propone en los apartados siguientes no será necesaria.

6.3.5.1 Resultados de la aplicación del método

El resultado de la aplicación del método es, (1) el punto crítico de fallo, expresado en variables reducidas y variables originales, (2) el índice de fiabilidad y la probabilidad de fallo o parada y (3) los índices de sensibilidad de los factores. La verificación de la obra o el tramo de obra requiere realizar el cálculo para todos los modos posibles, en todas las fases de proyecto, estados límite, condiciones de trabajo y tipos de combinación de términos.

6.3.5.2 Factores de proyecto deterministas en función de los índices de sensibilidad

El índice de sensibilidad varía entre $[-1, 1]$. Su valor proporciona una indicación de la importancia

relativa (o contribución relativa) de la variabilidad del factor (o del término) a la probabilidad de ocurrencia del modo. Si la contribución es pequeña (índice de sensibilidad cercano a cero), comparada con la de otros factores, el factor se podrá considerar determinista y, según los casos, trabajar con un valor representativo, media, moda, valor característico superior o inferior, etc.

6.3.6 Esquemas para el cálculo

Siempre que sea posible el cálculo de la distancia mínima se realizará directamente aplicando técnicas numéricas de optimización; no obstante, en algunos casos complicados, se podrá recurrir a técnicas aproximadas, en particular a la aproximación de primer orden que linealiza la superficie de fallo alrededor del punto crítico. En estos casos es conveniente utilizar otros métodos, Nivel I o III, para obtener una primera estimación del punto crítico y después, con esa información aplicar la aproximación lineal de Nivel II.

6.3.6.1 Esquema directo

Cuando el cálculo se pueda realizar mediante técnicas de optimización será necesario, previamente, transformar todas las variables aleatorias en gaussianas reducidas no correlacionadas y, en su caso, en deterministas. El esquema de trabajo será el siguiente,

1. Transformar las variables, (X_1, X_2, \dots, X_n) , en variables normales reducidas, $(Y_1^*, Y_2^*, \dots, Y_m^*)$, $m \leq n$
2. Expresar la ecuación de verificación, $G(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$, en variables reducidas, $g(Y_1^*, Y_2^*, \dots, Y_m^*) = 0$
3. Estimar un punto crítico inicial, por otros métodos, (Nivel I o III), o una raíz de la ecuación de verificación
4. Aplicar un algoritmo de optimización

6.3.6.2 Esquema en el caso de una aproximación lineal de $G = 0$

(1) véase apartado 6.3.2.3

En el supuesto que la ecuación de verificación, $G(X)=0$, no sea lineal, pero los términos, $X_i, i=1, \dots, n$, sean variables aleatorias normales no correlacionadas¹, se puede aplicar un esquema iterativo que, al menos, ejecute los siguientes pasos,

1. Transformar las variables normales, (X_1, X_2, \dots, X_n) , en variables normales reducidas, $(Y_1^*, Y_2^*, \dots, Y_m^*)$, $m \leq n$
2. Expresar la ecuación de verificación, $G(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$, en variables reducidas, $g(Y_1^*, Y_2^*, \dots, Y_m^*) = 0$
3. Estimar un punto crítico inicial, en general, una raíz de la ecuación
4. Hacer un desarrollo en serie de Taylor de $g = 0$ alrededor de esta raíz, tomando solamente el término lineal
5. Calcular el índice de fiabilidad, β , y los índices de sensibilidad, β_i

6. Calcular un nuevo punto crítico

7. Continuar con la iteración hasta que los resultados se estabilicen

Finalmente se debe comprobar que, efectivamente, el punto crítico satisface la ecuación de verificación.

6.3.7 Programa de cálculo por métodos de Nivel II

Dado que en la mayoría de las ocasiones la aplicación de un método de Nivel II debe realizarse mediante técnicas numéricas, en la Parte II de las Recomendaciones y adjunto al programa de gestión y guía, se incluyen algunos códigos numéricos que ayudan evaluar la probabilidad de ocurrencia de un modo una vez definida la ecuación de verificación, los factores de proyecto y las funciones de distribución conjunta, condicional y marginal. En cada caso se recomienda un esquema de cálculo en función de la irregularidad de la superficie de fallo.

Comentario

Tal y como se verá en la siguiente sección, uno de los métodos de Nivel III utiliza la técnica de simulación numérica de Monte Carlo. Esta técnica es muy potente pero tiene limitados el número de factores de proyecto que se pueden considerar aleatorios. Esta limitación proviene principalmente del tiempo de computación. Una manera de resolver este problema consiste en aplicar el método de Nivel II para obtener el índice de sensibilidad de los factores y adoptar, para aquellos menos relevantes, el valor obtenido de este método. Así se reduce el número de factores de proyecto aleatorios que, en general, conviene que no sea mayor que cinco.

6.4 Método de Nivel III

Se recomienda un método de Nivel III para verificar los modos de fallo y de parada operativa de las obras marítimas cuyo carácter general u operativo esté en el intervalo, $[r - r_3, s - s_2]$ o $[r = r_3]$ o $[s - s_3]$, tabla 4.6. En la figura 6.4 se esquematiza la secuencia de actividades a realizar para la aplicación del método de Nivel III.

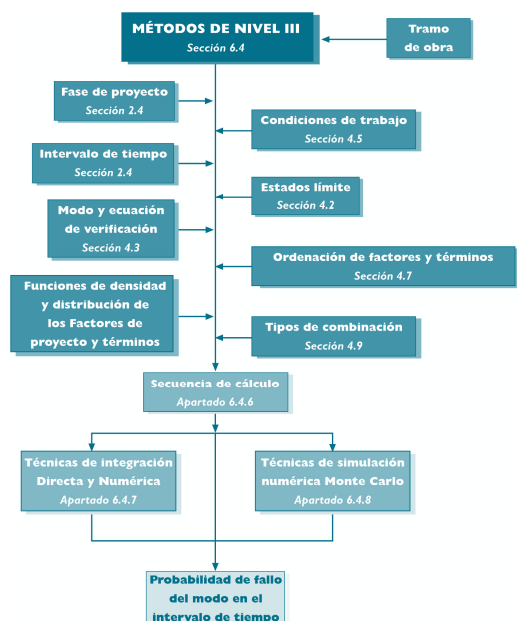


Figura 6.4:
Secuencia para la aplicación de un método de Nivel III.

6.4.1 Introducción y definiciones

Los métodos que resuelven la integral para evaluar la probabilidad de fallo, bien mediante técnicas de integración, bien mediante técnicas de simulación, se encuadran dentro de los denominados de Nivel III. En general, la integración necesaria para obtener la probabilidad de fallo, sólo puede hacerse por vía analítica para algunos casos particulares. En consecuencia, los procedimientos de Nivel III están formados, normalmente, por técnicas numéricas aplicadas tanto al proceso de integración en sí mismo, como al integrando o a la definición del dominio de fallo.

Cuando no se pueda integrar analíticamente o numéricamente la función de densidad conjunta, se simularán numéricamente los valores de los términos de la ecuación de verificación obteniéndose la función de densidad del margen de seguridad. Esta simulación se podrá hacer mediante la técnica de Monte Carlo.

6.4.2 Ordenación de factores

A tal efecto, se seguirá la ordenación de factores propuesta en la sección 4.7. Para cada fase de proyecto e intervalo de tiempo, se seleccionarán los factores existentes y, teniendo en cuenta la condición de trabajo, se creará el conjunto de factores de proyecto que actúan simultáneamente. Después, para cada estado límite y modo de fallo, el conjunto se ordenará según la participación del factor en la ocurrencia del fallo, en primer lugar el predominante y los factores del mismo origen y dependientes de él, después los independientes, y de entre éstos, los que tienen el mismo origen y son mutuamente dependientes y, por último, los factores completamente independientes. A partir de este conjunto se definirán los tipos de combinación, sección 4.9.

Comentario

Dado que en general no se dispone de la función de densidad conjunta de los factores de proyecto que intervienen en cada uno de los términos y que la técnica de simulación demanda muchas horas de computación, se recomienda utilizar la ordenación de los factores para definir aquellos términos y factores que son independientes, dependientes, del mismo origen de los otros factores o términos y, en particular del predominante.

6.4.3 Ecuación de verificación

A efectos de aplicación, la ecuación de verificación se establecerá por lo general en el formato de margen de seguridad, teniendo en cuenta los criterios, las hipótesis y las dimensiones de los términos con las que fué propuesta originariamente.

Comentario

Además, para aplicar un método de Nivel III es necesario conocer el modelo de probabilidad de cada factor de proyecto que interviene en la ecuación o de cada término de la ecuación de verificación.

6.4.3.1 Valor de los factores con modelo de probabilidad

La ordenación de factores se concretará, según la disponibilidad de información, en las funciones de distribución conjuntas, condicionales y marginales de los diferentes factores de proyecto. En aquellos casos en los que se cumplan las condiciones establecidas en la sección 3.5, se declarará el factor como determinista.

6.4.3.2 Valor de los factores sin modelo de probabilidad

Algunos factores, por su propia naturaleza, o porque no hay información estadística disponible, no tienen un modelo de probabilidad, por lo que, en general, tomarán un valor nominal. En cualquier caso, para dar generalidad al método y al resultado obtenido, suele ser conveniente asociar a este valor nominal un modelo de probabilidad que, siempre que sea posible y justificable, será un modelo normal, lognormal u otras, que se seleccionará en función del valor nominal y de su posible dispersión.

6.4.3.3 Correlación entre factores o términos

A estos efectos se seguirá lo recomendado en la aplicación del método de Nivel II, subapartado 6.3.2.3 y siguientes.

6.4.3.4 Coeficiente reductor de los parámetros de proyecto

Los parámetros de proyecto seguirán el mismo tratamiento estadístico que cualquier otro factor de proyecto, incluyendo su posible relación funcional y estadística con otros factores.

6.4.4 Función de distribución conjunta, condicional y marginal de los términos

Siempre que sea posible, las funciones de distribución de los términos se obtendrán por vía analítica, de tal forma que la probabilidad de ocurrencia del modo se pueda calcular por integración directa en el dominio de la función de densidad del margen de seguridad. En otro caso, se continuará con el método que se describe a continuación.

Comentario

En los casos en los que no haya información estadística suficiente de los términos de la ecuación, es conveniente especificar el factor relevante de cada término, pues de él se puede obtener la función de densidad del término, considerando valores representativos o deterministas de los restantes factores que intervienen en el término, de acuerdo con los apartados, 5.3.1.2 y 5.3.4.1.2.

6.4.5 Tipos de combinación

Hasta que se disponga de información estadística de las funciones de distribución conjunta de los factores de proyecto que intervienen en la verificación de un modo, el método de Nivel III se aplicará teniendo en cuenta las clases de valores y tipos de combinación de términos recomendados en las secciones 4.7, 4.8 y 4.9. Mediante ellos, se puede reducir el número de factores y términos y, en consecuencia, la necesidad de funciones de distribución conjuntas de todos los factores y términos.

6.4.6 Secuencia de cálculo

En cualquiera de sus modalidades, el método de Nivel III se aplica numéricamente en la mayoría de los casos. En estas Recomendaciones se propone un esquema secuencial que, a partir de los datos especificados en los apartados anteriores, proporciona los valores de los factores pertenecientes al punto crítico de la superficie de fallo y la probabilidad asociada.

La secuencia de cálculo incluye: (I) la determinación, analítica o mediante simulación de las funciones de densidad y distribución conjunta de los factores de proyecto en función de la ordena-

ción de los mismos, (2) la determinación, analítica o mediante simulación, de las funciones de densidad y distribución conjunta de los términos de la ecuación a partir de la función de distribución todos los factores que participan, (3) cálculo de la probabilidad de fallo mediante integración numérica o simulación.

6.4.6.1 Resultados de la aplicación del método

Los resultados de la aplicación del método son: el punto crítico de fallo y la probabilidad de fallo o parada de la obra o elemento frente a un modo, adscrito a un estado límite, presentado durante una fase de proyecto en una condición de trabajo para un tipo de combinación. A partir de esta información y mediante un análisis de sensibilidad, se puede estudiar la contribución al resultado de cada factor y de cada término.

Comentario

En los casos en los que haya escasa información estadística o superficies de fallo con múltiples extremos, se recomienda realizar una primer tanteo del punto crítico de fallo mediante la aplicación de la simulación de Monte Carlo, considerando variables aleatorias los factores relevantes de cada término. Los valores de las variables asociadas al punto crítico pueden utilizarse como valores iniciales en el esquema iterativo de cálculo del Nivel II. De esta forma ambos métodos de Nivel II y III son complementarios y su utilización puede permitir una optimización de los tiempos de ejecución y un mejor conocimiento del comportamiento del tramo de obra.

6.4.7 Técnicas de integración numérica

Siempre que sea posible se obtendrá la probabilidad de fallo por integración analítica de la función de densidad del margen de seguridad. Para ello será necesario obtener analíticamente dicha función a partir de las funciones de densidad de los términos de la ecuación de verificación. Este cálculo, por lo general conducirá a una integral n-múltiple.

Se procurará resolver la integral n-múltiple mediante n integrales simples, teniendo en cuenta la posible independencia estadística de los términos; en estos casos, en general, las integrales se podrán resolver analíticamente. Cuando esto no sea posible se recurrirá a métodos numéricos contrastados y basados, p. ej. en la regla de Simpson, cuadratura, técnicas polinomiales, etc.

6.4.8 Simulación de Monte Carlo

El valor de una integral podrá obtenerse aplicando la técnica de simulación de Monte Carlo; para ello deberán considerarse, al menos, los siguientes aspectos relacionados con la generación de números aleatorios uniformes, tamaño de la muestra y la convergencia del método.

Comentario

Para estimar la probabilidad de fallo es necesario conocer el rango de valores para los cuales se cumple la condición de fallo, es decir $G(x) \leq 0$. La estimación de p_f se puede mejorar ajustando una función de distribución solamente a los puntos x , para los cuales se cumple la condición de fallo. En general, el fallo se produce para valores de la variable que se encuentran en la cola de la distribución que es donde el ajuste suele ser más complicado, por la falta de datos y por el comportamiento de la variable aleatoria en la cola de la distribución. Esto es particularmente importante cuando se está trabajando con valores pertenecientes a la clase de la cola superior o inferior. El ajuste de las colas es siempre un aspecto crítico en la utilización de un método de simulación numérica.

6.4.8.1 Generación de números aleatorios

La generación de números aleatorios uniformes a partir de cualquier función de distribución se hará de acuerdo con el teorema de la transformación integral de probabilidad.

Comentario

Por lo general, la generación de números aleatorios con distribución uniforme en $(0,1)$, se suele hacer mediante un generador lineal basado en el cálculo recursivo de enteros, k_1, k_2, \dots , comprendidos en el intervalo $(0, m-1)$, a partir de los cuales se obtiene el valor de u ,

$$u_{i+1} = \frac{k_{i+1}}{m} = u_i - \text{ent} \left[\frac{u_i}{m} \right]$$

$$u_i = \frac{ak_i + c}{m}$$

donde a y c son el multiplicador y el incremento respectivamente. Los resultados dependen de la magnitud de las constantes a , c y m .

Esta generación es determinista en el sentido que, la serie se repite con un cierto periodo o ciclo no mayor que m . Para iniciar el proceso de generación se requiere especificar a , c , m y el primer valor k_0 , teniendo en cuenta que, m debe ser lo mayor posible, c y m no deben tener factores comunes, y a debe ser suficientemente grande; k_0 puede ser cualquier valor entre 0 y $m-1$. Se comprende que una vez especificados estos valores, se puede predecir la serie completa; por eso, debe hablarse de generación de números pseudo-aleatorios; en otras palabras, el proceso es determinista. No obstante, la serie de números u_i (i m) así obtenida, se ajusta a una distribución uniforme y aquéllos son estocásticamente independientes.

6.4.8.1.1 Otros aspectos relacionados con la generación

En muchas ocasiones será necesario generar números aleatorios de distribuciones discretas o de distribuciones conjuntas. En estos casos se recomienda lo siguiente.

6.4.8.1.1.1 Generación de variables discretas

Salvo justificación, se obtendrá la variable discreta (x_i) correspondiente al número aleatorio (u_i), aplicando la transformación inversa de la función de probabilidad acumulada, $F(x_i)$, (obtenida como suma de las probabilidades) limitando el intervalo de valores de u entre, $[F_x(x_i - 1) < u \leq F_x(x_i)]$, siendo x_i el valor del número aleatorio. Debidamente justificado, se podrán aplicar otras técnicas de generación.

6.4.8.1.1.2 Generación de variables mutuamente dependientes

Si n términos en la ecuación de verificación son mutuamente dependientes, la generación de números aleatorios se podrá realizar en cascada teniendo en cuenta la relación entre las funciones de distribución conjuntas marginales y condicionales.

6.4.8.1.1.3 Otros métodos de generación con variables continuas

Cuando la obtención de la función inversa, $x = F_x^{-1}(u)$, de una función de distribución $u = F_x(x)$, presenta dificultades y no se puede derivar por métodos analíticos, (tal y como es el caso de las distribuciones normal, log-normal, beta y gamma), se podrá recurrir a otras técnicas de generación tales como los métodos de Box Muller, de rechazo y de descomposición. En cualquier caso, será necesario comprobar los requisitos de uniformidad e independencia de la muestra.

6.4.8.1.2 Ajuste de la función de distribución, $F_x(x)$

En todos los casos es recomendable ajustar la función de distribución a la muestra en los que se vaya a producir el fallo, y optimizar sus parámetros mediante técnicas de ajuste.

6.4.8.1.3 Comprobación de la uniformidad e independencia estadística de la muestra

(2) P.ej. chi cuadrado,
Kolmogorov-Smirnov, etc...

En todos los casos, se comprobará que la muestra generada se ajusta a una distribución uniforme y los números son estocásticamente independientes. A tal efecto, se aplicarán técnicas estadísticas² para evaluar su ajuste a la distribución uniforme e independencia estadística (paramétricas y no paramétricas).

6.4.8.2 Número de muestras requeridas

Elegido un nivel de significancia, α , y un error ϵ , el tamaño mínimo de muestra necesaria, N , se obtendrá evaluando,

$$N = \frac{z_{\frac{\alpha}{2}}^2 (1 - p)}{\epsilon^2 p}$$

donde $z_{\alpha/2}$, es el valor de la variable normal reducida que se excede con la probabilidad de $(1 - \alpha/2)\%$, y p es la probabilidad de que ocurra el modo. Ya que ésta es desconocida antes de realizar la simulación, será necesario hacer una estimación de p a priori.

Comentario

Para el caso de $\alpha = 5\%$, (lo que equivale a una probabilidad acumulada de excedencia para $\alpha/2$ del 97.50%) $\alpha = 0.05$, y, $p = 0.1$, $N > 13400$.

6.4.8.2.1 Tamaño de la muestra y convergencia

En muchas ocasiones, en vez de evaluar a priori el tamaño de la muestra necesaria para alcanzar una determinada precisión en el cálculo de la probabilidad de fallo, es recomendable dibujar las sucesivas evaluaciones de, p_p , y la estimación de su varianza, en función del tamaño de la muestra, N . Esta curva deberá ser decreciente y las oscilaciones (es decir la estabilidad del cálculo) deberá reducirse al aumentar el tamaño de la muestra. En todos los casos, es conveniente emplear información a priori del problema a resolver, y, en particular, aquella que permite acotar la región de fallo.

6.4.9 Programa de cálculo por métodos de Nivel III

Dado que en la mayoría de las ocasiones la aplicación de un método de Nivel III debe realizarse mediante técnicas numéricas, en la parte II de estas Recomendaciones y, junto al programa de ayuda, se comentan algunos códigos numéricos que permiten evaluar la probabilidad de ocurrencia del modo una vez definida la ecuación de verificación, los factores de proyecto y las funciones de distribución conjunta, condicional y marginal para cada fase de proyecto, estados límite, condición de trabajo y tipo de combinación.

En cada caso, en función de la información disponible, se decidirá el tipo de aplicación: integración numérica de la función de densidad o simulación de la función de densidad del margen de seguridad y de cada uno de los términos de la ecuación.

6.5

Relación entre los Niveles I y II y III

La incorporación de los métodos de Nivel II y III debe ir de la mano de la investigación aplicada. La mayoría de las ecuaciones de verificación de los modos de fallo y de parada operativa están obtenidas para su aplicación con los métodos de Nivel I, en general, el método del coeficiente de seguridad global. El paso de este formato de ecuación de verificación a otro de coeficientes parciales no debe modificar los estándares de seguridad adquiridos y comprobados. Por ello, es necesario establecer unos criterios generales para la adecuación de un formato de ecuación a otro, en general, asociado a un método de jerarquía superior.

6.5.1

Determinación de los coeficientes de ponderación

En las Recomendaciones específicas se proporcionan las ecuaciones de verificación que se deben utilizar en cada uno de los modos de fallo o parada. En el caso de que la ecuación tenga la forma de coeficiente de seguridad global, y no exista información sobre su aplicación con forma de coeficientes parciales, será necesario obtener los coeficientes de ponderación. Una vez definidos, la alternativa de proyecto, el tramo de obra, la fase de proyecto, el estado límite, la condición de trabajo y el tipo de combinación, para obtener los coeficientes de ponderación, se procederá de la manera siguiente.

Con carácter general, se procurará obtener analíticamente una relación entre los coeficientes de una ecuación de verificación expresada en función de valores característicos de los factores de proyecto y los índices de sensibilidad y el índice de fiabilidad obtenido mediante un método de Nivel II. A partir de ella, se minimizará el error medio cuadrático del índice de fiabilidad buscado y obtenido. En otro caso, se procederá numéricamente siguiendo la secuencia indicada más adelante.

Comentario

Uno de los objetivos de las Recomendaciones específicas es proporcionar coeficientes parciales para la verificación de modos de fallo cuya ecuación no tiene ese formato. En los casos en los que estos coeficientes no existan y el tramo deba verificarse por el método de los coeficientes parciales deberá ser el técnico el que determine el valor de los coeficientes siguiendo los criterios presentados en esta sección.

6.5.1.1

No unicidad de los coeficientes de ponderación

En cualquier caso, se deberá tener en cuenta que al cambiar el formato de la ecuación se puede modificar la relación entre términos. Por ello se recomienda trabajar, siempre que sea posible, con términos adimensionales y verificar que, en todos los casos, la relación entre sus valores se conserva en todos los formatos de la ecuación. Los coeficientes parciales obtenidos sólo son válidos para las condiciones en que han sido calculados y, en cada caso, deberá justificarse su aplicación. Otras técnicas de trabajo o formas de la ecuación pueden proporcionar coeficientes de ponderación diferentes.

6.5.1.2

Secuencia para la calibración

En el proceso de calibración se podrá seguir la siguiente secuencia,

1. Definir el criterio de fallo, la probabilidad de fallo o índice de fiabilidad del modo

2. Organización de los factores de proyecto y definición de las clases de valores
3. Aplicación del método del coeficiente de seguridad global (en su caso)
4. Aplicación del método de los coeficientes parciales definiendo los coeficientes de ponderación
5. Aplicación de un método de Nivel II o III con la ecuación en coeficientes parciales
6. Minimización del valor medio cuadrático de la diferencia de las probabilidades de fallo obtenida y deseada
7. Comparación y análisis del resultado con el obtenido mediante el coeficiente total de seguridad
8. Realizar el mismo análisis para otros modos de fallo
9. Comprobación de la probabilidad conjunta del tramo

La minimización se realizará con respecto a los coeficientes de ponderación. Éstos, pueden expresarse en función del factor de proyecto predominante del modo, o del factor principal del término y de su modelo de probabilidad. Se deberá tener en cuenta que los objetivos de un Proyecto ROM se evalúan mediante la probabilidad conjunta de fallo y la operatividad del tramo de obra. Se recomienda por lo tanto obtener los coeficientes de ponderación para las ecuaciones de verificación de los modos principales de fallo del tramo.

Comentario

En la secuencia anterior se incluye la comprobación de la probabilidad conjunta del tramo. Con ello queda explícito que la calibración no es algo absoluto sino que está asociada a cada tramo de obra y, en consecuencia, a su carácter. En las Recomendaciones específicas se proporcionarán valores de los coeficientes de ponderación para su aplicación a los diferentes tramos de obra.

En 1992, la comisión del PIANC WG-12, constituida a tal efecto, obtuvo coeficientes parciales para la verificación del modo de fallo, extracción de piezas del manto principal de un dique en talud. Se definieron dos coeficientes de ponderación, uno que afecta al término desfavorable, cuyo factor principal es la altura de ola y el otro que afecta al término favorable que pondera la respuesta del talud. Ambos coeficientes se expresan por una fórmula que depende en el primer caso de la altura de ola y de la incertidumbre de su determinación y en el segundo de la probabilidad de fallo. La calibración se realizó con una ecuación dimensional. Estos valores son indicativos.

6.6

Anejo: Ejemplo de Cálculo del Rebase por Nivel II

Se considera un dique de tipología de Iribarren con un talud de pendiente $\tan \beta$, y francobordo F_c , medido desde el nivel del mar en reposo. Cuando una ola alcanza el dique, la lámina de agua asciende por el talud pudiendo llegar a rebasar el francobordo. Una forma de verificar la ocurrencia de rebase es calcular la cota R_u , medida desde el nivel del mar en reposo, que alcanzaría la lámina de agua para dicha ola sobre la prolongación indefinida del talud, figura 6.5.

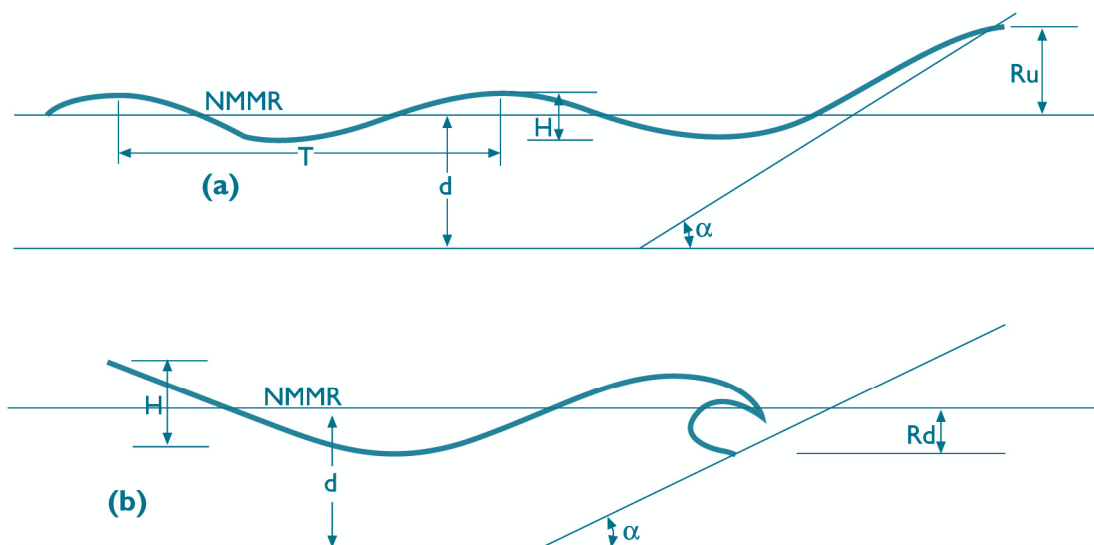


Figura 6.5:
Definición de
las variables

Para una sección tipo de un dique en talud de tipología de Iribarren con un talud de pendiente ($\tan \beta$) y francobordo F_c , el volumen de agua que pasa a sotamar debido a una ola de altura H y periodo T que aborda la sección, puede estimarse a partir del volumen de agua que ascendería por la prolongación imaginaria del talud que excede la cota del francobordo. Con esta aproximación, la ocurrencia de rebase (fallo) se produce siempre que la diferencia entre la cota de ascenso de la lámina de agua por el talud imaginario, R_u , excede F_c .

Losada, 1985, basándose en resultados experimentales y un análisis dimensional, propuso la siguiente fórmula para calcular R_u ,

$$\frac{R_u}{H} = A_u (1 - e^{-B_u I_r}) \quad (6.1)$$

donde A_u y B_u son coeficientes que dependen del tipo de piezas, H es la altura de ola y I_r es el número de Iribarren,

$$I_r = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \quad (6.2)$$

que en aguas profundas puede calcularse como

$$I_r = 1.25T \frac{\tan \beta}{\sqrt{H}} \quad (6.3)$$

En esas condiciones, la ocurrencia de rebase puede verificarse a partir de la ecuación, escrita en forma de margen de seguridad:

$$S = F_c - R_u = 0 \quad (6.4)$$

Para aquéllos valores de los parámetros para los que S es no negativa, no se produce rebase.

En este ejemplo se supone que el francobordo, F_c , y la pendiente del talud, $\tan \beta$, son variables deterministas con valores nominales $F_c = 10(\text{m})$, $\tan \beta = 1/1.5$. A_u y B_u son variables aleatorias gaussianas independientes de medias $\mu_a = 1.05$, $\mu_b = -0.67$ y desviaciones típicas $\sigma_a = 0.21$, $\sigma_b = 0.134$ respectivamente, y que en un estado de mar definido por una altura de ola significativa, $H_s = 5(\text{m})$, periodo medio de paso por cero, $T_z = 10$ (s), las alturas de ola y los periodos se distribuyen conjuntamente según la distribución de Longuet-Higgins, 1975, de parámetros H_s , T_z , y $\gamma = 0.25$, cuya función de densidad es,

$$f(T, H) = 2L(v) \exp(u(T_*, H_*)) \frac{H_*^2}{v T_*^2 \sqrt{\pi}} \frac{1}{H_s T_z} \quad (6.5)$$

donde $T_* = T/T_z$, $H_* = H/H_s$ y $L(\cdot)$, $u(T_*, H_*)$ tienen las siguientes expresiones ,

$$L(v) = \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1+v^2}} \right) \right]^{-1} \quad u(T_*, H_*) = -H_*^2 \left[1 + \frac{1}{v^2} \left(1 - \frac{1}{T_*} \right) \right] \quad (6.6)$$

Se considera, por tanto, la ecuación de verificación,

$$G(A_u, B_u, T, H) = F_c - H A_u (1 - e^{B_u I_r}) = 0 \quad (6.7)$$

Las derivadas parciales de la función G , cuyas expresiones se requieren en el cálculo de la probabilidad de fallo por el método de aproximación al primer orden, son,

$$\frac{\partial G}{\partial A_u} = -H (1 - e^{B_u I_r}) \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial G}{\partial B_u} = H A_u I_r e^{B_u I_r} \quad (6.9)$$

$$\frac{\partial I_r}{\partial T} = 1.25 \frac{\tan \beta}{\sqrt{H}} \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial I_r}{\partial H} = -1.25 T \tan \beta \frac{1}{2} H^{\frac{3}{2}} \quad (6.11)$$

$$\frac{\partial G}{\partial T} = H A_u B_u \frac{\partial I_r}{\partial T} e^{B_u I_r} \quad (6.12)$$

$$\frac{\partial G}{\partial H} = -A_u (1 - e^{B_u I_r}) + H A_u B_u \frac{\partial I_r}{\partial H} e^{B_u I_r} \quad (6.13)$$

Se toma como aproximación inicial del punto de fallo, el punto,

$$X^{(0)} = (A_u^{(0)}, B_u^{(0)}, T^{(0)}, H^{(0)}) = (1.05, -0.67, 10.0, 4.5) \quad (6.14)$$

En la primera iteración se transforman las variables aleatorias en otras normales reducidas equivalentes a las variables originales en un entorno del punto $X^{(0)}$.

La transformación de las variables A_u y B_u es inmediata y válida para todas las iteraciones,

$$Y_1 = \frac{A_u - \mu_a}{\sigma_a}; \quad Y_2 = \frac{B_u - \mu_b}{\sigma_b} \quad (6.15)$$

Para la transformación de las variables T y H , se utiliza la transformación de Rossenblatt, buscando las variables $Y_3^{(0)}$ e $Y_4^{(0)}$ normales reducidas, equivalentes a las variables T y $H|T$ (H condicionada a T) en un entorno del punto $X^{(0)}$. Dichas variables son,

$$Y_3^{(0)} = \Phi^{-1}[F_T(T)] \quad Y_4^{(0)} = \Phi^{-1}[F_{H|T}(T)] \quad (6.16)$$

donde F_T es la función de distribución marginal de T y $F_{H|T}$ es la distribución de H condicionada a T .

Las medias y varianzas de $Y_3^{(0)}$ e $Y_4^{(0)}$ son,

$$\begin{aligned} \sigma_3^{(0)} &= \frac{\phi \Phi^{-1}[F_T(T^{(0)})]}{f_T(T^{(0)})} = \frac{\phi \Phi^{-1}[0.4884]}{0.2064} = \frac{\phi(-0.0291)}{0.2064} = 1.9320 \\ \mu_3^{(0)} &= T^{(0)} - \Phi^{-1}[F_T(T^{(0)})] \sigma_3^{(0)} = 10 - 0.019 \cdot 1.9649 = 9.9627 \\ \sigma_4^{(0)} &= \frac{\phi \Phi^{-1}[F_{H|T}(H^{(0)})]}{f_{H|T}(H^{(0)})} = \frac{\phi \Phi^{-1}[0.5697]}{0.1623} = \frac{\phi(-0.1755)}{0.1623} = 2.4205 \\ \mu_4^{(0)} &= H^{(0)} - \Phi^{-1}[F_{H|T}(H^{(0)})] \sigma_4^{(0)} = 4.5 - 0.1366 \cdot 2.4363 = 4.1672 \end{aligned} \quad (6.17)$$

siendo f_T la función de densidad marginal de T , $f_{H|T}$ la función de densidad marginal de H condicionada a T y ϕ y Φ son las funciones de densidad y distribución de Gauss, respectivamente. En estas nuevas coordenadas, la aproximación al punto de fallo es,

$$\begin{aligned} Y^{(0)} &= \left(\frac{A_u^{(0)} - \mu_a}{\sigma_a}, \frac{B_u^{(0)} - \mu_b}{\sigma_b}, \Phi^{-1}[F_T(T^{(0)})], \Phi^{-1}[F_{H|T}(H^{(0)})] \right) \\ &= (0, 0, \Phi^{-1}[0.4884], \Phi^{-1}[0.5697]) = (0, 0, -0.0291, 0.1755) \end{aligned} \quad (6.18)$$

La matriz jacobiana de la transformación evaluada en $Y^{(0)}$ es,

$$J^{(0)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y_1}{\partial A_u} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial Y_2}{\partial B_u} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial Y_3^{(0)}}{\partial T} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial Y_4^{(0)}}{\partial T} & \frac{\partial Y_4^{(0)}}{\partial H} \end{bmatrix} = \quad (6.19)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f_H}{\phi(y_3^{(0)})} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial F_{H|T}}{\partial T} \frac{1}{\phi(y_4^{(0)})} & \frac{\partial F_{H|T}}{\partial H} \frac{1}{\phi(y_4^{(0)})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.7619 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7.4627 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5.09 & 0 \\ 0 & 0 & -0.2153 & 0.4105 \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

Las derivadas parciales de la función

$$g^{(0)} = (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4) = (A_u(Y_1), B_u(Y_2), H(Y_3^{(0)}), T(Y_4^{(0)})) \quad (6.20)$$

se obtienen invirtiendo la matriz J:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial Y_1} \\ \frac{\partial g}{\partial Y_2} \\ \frac{\partial g}{\partial Y_3^{(0)}} \\ \frac{\partial g}{\partial Y_4^{(0)}} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial X_1} \\ \frac{\partial g}{\partial X_2} \\ \frac{\partial g}{\partial X_3} \\ \frac{\partial g}{\partial X_4} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} -4.1763 \\ 1.3352 \\ -0.0895 \\ -0.8751 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.8770 \\ 0.1789 \\ -0.1757 \\ -2.2242 \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

La ecuación de verificación en coordenadas normalizadas, $g^{(0)}(Y)$ linealizada en un entorno del punto $Y^{(0)}$ es,

$$g_L^{(0)}(Y_1, Y_2, Y_3, Y_4) = a_0 + a_1 Y_1 + a_2 Y_2 + a_3 Y_3 + a_4 Y_4 \quad (6.22)$$

donde los coeficientes a_i están dados por,

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{\partial g}{\partial Y_1} |_{X^{(0)}} = -0.8770 \\ a_2 &= \frac{\partial g}{\partial Y_2} |_{X^{(0)}} = 0.1789 \\ a_3 &= \frac{\partial g}{\partial Y_3} |_{X^{(0)}} = -0.1757 \\ a_4 &= \frac{\partial g}{\partial Y_4} |_{X^{(0)}} = -2.2248 \end{aligned} \quad \begin{aligned} a_0 &= g^{(0)}(Y^{(0)}) - (a_1 Y_1^{(0)} + a_2 Y_2^{(0)} + a_3 Y_3^{(0)} + a_4 Y_4^{(0)}) \\ &= G(X^{(0)}) - (a_1 Y_1^{(0)} + a_2 Y_2^{(0)} + a_3 Y_3^{(0)} + a_4 Y_4^{(0)}) \\ &= 5.61 - (-0.3071) = 5.9220 \end{aligned} \quad (6.23)$$

La primera aproximación al valor de $g_L^{(0)}$, es el índice de fiabilidad, $\beta^{(1)}$, de la función $g_L^{(0)}$

$$\beta^{(1)} = \frac{a_0}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2}} = \frac{5.9220}{2.4039} = 2.4635 \quad (6.24)$$

Los índices de sensibilidad de $g_L^{(0)}$ son:

$$a_1^{(1)} = \frac{-0.8770}{2.4039} = -0.3648 \quad a_2^{(1)} = \frac{0.1789}{2.4039} = 0.0744 \quad (6.25)$$

$$a_3^{(1)} = \frac{-0.17570}{2.4039} = -0.0731 \quad a_4^{(1)} = \frac{-2.2248}{2.4039} = -0.9252$$

y la siguiente aproximación al punto de fallo es el punto $Y^{(1)}$ obtenido como punto crítico de la función $g_L^{(0)}$ a partir de los valores de $\beta^{(1)}$ y $a_i^{(1)}$,

$$Y^{(1)} = -\beta^{(1)}(\alpha_1^{(1)}, \alpha_2^{(1)}, \alpha_3^{(1)}, \alpha_4^{(1)}) = (0.8987, -0.1833, 0.1801, 2.264) \quad (6.26)$$

que en las coordenadas originales es,

$$\begin{aligned} X^{(1)} &= (0.210 \cdot 8987 + 1.05, 0.134(-0.1833) - 0.67, \\ &\quad F_T^{-1}(\Phi(0.1801)), F_T^{-1}(\Phi(2.264))) \\ &= (1.2387, -0.6946, 10.3276, 10.795) \end{aligned} \quad (6.27)$$

En la segunda iteración se procede con $X^{(1)}$ de la misma forma que se ha hecho con $X^{(0)}$. La tabla 6.1 muestra los diferentes valores obtenidos en cada iteración y en la figura 6.6 se muestra la evolución de los distintos parámetros que se calculan en el proceso iterativo. En 10 iteraciones el proceso se ha estabilizado, lo que demuestra la rapidez de la convergencia.

Los índices de sensibilidad de las variables B_u y T son $\alpha_2 = 0.161$, $\alpha_3 = -0.190$ relativamente pequeños, lo que indica que su contribución a la ocurrencia de fallo es menor que la de las variables A_u y, especialmente de H , cuyos índices de sensibilidad respectivos son $\alpha_1 = -0.498$ y $\alpha_4 = -0.831$. El índice de fiabilidad es $\beta = 2.010$ y la probabilidad de fallo es $p_f = (-) = 0.022$. Por último el punto crítico de diseño obtenido es:

$$A_u = 1.260 \quad B_u = -0.713 \quad T = 10.782 \quad H = 9.033 \quad (6.28)$$

Tabla 6.1:
Resultados de la aplicación del método de Nivel II: índice de fiabilidad y probabilidad de fallo; n es el número de iteraciones; G es el valor de la ecuación de verificación.

| n | $A_u^{(n)}$ | $B_u^{(n)}$ | $T^{(n)}$ | $H^{(n)}$ | $G(x_i)$ | | P_f |
|-----|-------------|-------------|-----------|-----------|----------|-------|-------|
| 0 | 1.05 | -0.67 | 10.45 | | | | |
| 1 | 1.239 | -0.695 | 10.328 | 10.795 | 5.615 | 2.463 | 0.007 |
| 2 | 1.274 | -0.727 | 10.953 | 8.801 | -1.204 | 2.006 | 0.022 |
| 3 | 1.253 | -0.709 | 10.730 | 8.986 | -0.012 | 1.966 | 0.025 |
| 4 | 1.255 | -0.713 | 10.755 | 8.989 | 0.104 | 1.979 | 0.024 |
| 5 | 1.254 | -0.712 | 10.749 | 8.991 | 0.062 | 1.978 | 0.024 |
| 6 | 1.259 | -0.713 | 10.772 | 9.177 | 0.067 | 2.029 | 0.021 |
| 7 | 1.263 | -0.715 | 10.806 | 9.029 | -0.160 | 2.019 | 0.022 |
| 8 | 1.260 | -0.713 | 10.782 | 9.037 | -0.067 | 2.010 | 0.022 |
| 9 | 1.260 | -0.713 | 10.783 | 9.030 | -0.032 | 2.008 | 0.022 |
| 10 | 1.260 | -0.713 | 10.782 | 9.033 | -0.030 | 2.010 | 0.022 |

Tabla 6.2:
Resultados de
la aplicación
del método de
Nivel II: índices
de sensibilidad;
n es el número
de iteraciones

| n | ⁽ⁿ⁾ ₁ | ⁽ⁿ⁾ ₂ | ⁽ⁿ⁾ ₃ | ⁽ⁿ⁾ ₄ |
|----|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0 | | | | |
| 1 | -0.365 | 0.074 | -0.073 | -0.925 |
| 2 | -0.531 | 0.213 | -0.225 | -0.789 |
| 3 | -0.491 | 0.147 | -0.183 | -0.839 |
| 4 | -0.492 | 0.161 | -0.188 | -0.834 |
| 5 | -0.492 | 0.159 | -0.186 | -0.836 |
| 6 | -0.491 | 0.159 | -0.186 | -0.836 |
| 7 | -0.503 | 0.165 | -0.194 | -0.826 |
| 8 | -0.497 | 0.160 | -0.190 | -0.832 |
| 9 | -0.498 | 0.161 | -0.191 | -0.830 |
| 10 | -0.498 | 0.161 | -0.190 | -0.831 |

Punto de diseño

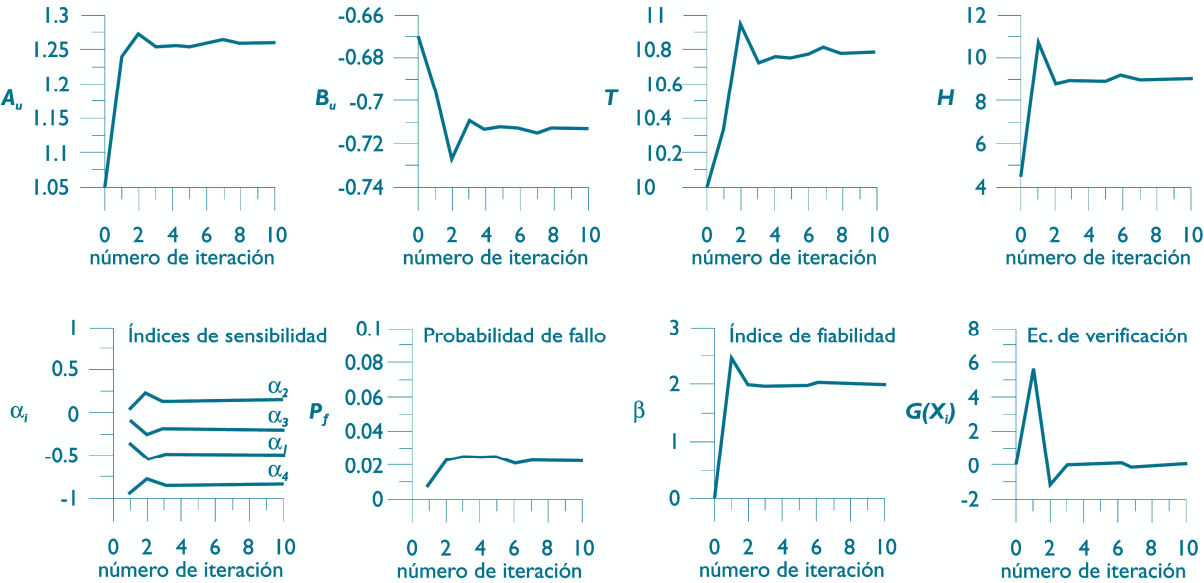


Figura 6.6: Resultados de la aplicación del método de Nivel II: H en m y T en s.

6.7

Anejo: La verificación en los Eurocódigos y en la EHE

En esta ROM se proponen tres métodos de verificación, denominados de Nivel I que incluyen los métodos de coeficiente de seguridad global y de los coeficientes parciales, de Nivel II basados en los momentos estadísticos y técnicas de optimización y los de Nivel III elaborados a partir de técnicas de integración y simulación numérica.

La utilización de uno u otro (o de varios de ellos) viene determinada en la tabla 4.6 en función del carácter de la obra, siendo el método de los coeficientes parciales el de uso más universal, ya que se recomienda en todos los casos salvo en uno correspondiente a los proyectos de menos trascendencia. En estos casos se puede aplicar el método del coeficiente de seguridad global. Se recomienda utilizar un método de Nivel II o III en obras importantes cuyo carácter general sea alto.

Este procedimiento que establece cuatro métodos de cálculo difiere del que se sigue en la mayoría de las Normas en las que solo se establecen métodos de Nivel I, por lo general, el de los coeficientes parciales. Esta diferencia se justifica por las limitaciones inherentes al propio método de los coeficientes parciales que no permiten obtener una relación entre los valores de los factores de proyecto y los coeficientes de ponderación, de compatibilidad y correctores y los valores de la probabilidad de fallo.

Puesto que la ROM 0.0 recomienda unas probabilidades de fallo y parada, fijadas en función de las particularidades de cada proyecto (ya lo hacía la ROM 02.90, aunque en aquel entonces solo se utilizaban para fijar el valor de algunas variables predominantes), es obligado que, en las ROM específicas, se establezcan procedimientos que permitan determinar aquellas relaciones. En la sección 6.5 se presentan las líneas generales para la determinación de esa relación.

6.7.1

Los Eurocódigos

En los Eurocódigos el tratamiento general del problema está recogido en el Anejo A de la Parte I: Bases de Proyecto del Eurocódigo I “Bases de Proyecto y Acciones en Estructuras”, que contiene información y soporte técnico sobre el método de los coeficientes parciales. Aunque este Anejo es informativo, se deben seguir sus criterios para la comprobación de obras, siempre que las reglas de los Eurocódigos existentes no se consideren adecuadas para el caso correspondiente (lo que sucederá en muchos casos de las Obras Marítimas y Portuarias).

En dicho Anejo que se transcribe literalmente a continuación, con la aclaración que está redactado enfocado fundamentalmente a la seguridad, se establece que, el valor de los coeficientes parciales debe depender del grado de incertidumbre en las acciones, resistencias, datos geométricos y modelos y del tipo de construcción y estado límite considerado. Si bien hay dos maneras de determinar los valores numéricos de los coeficientes parciales,

- a) por calibración a partir de la historia y tradición constructiva (este es el principio básico de la mayoría de los coeficientes propuestos en los actuales Eurocódigos),
- b) mediante la evaluación estadística de datos experimentales y observaciones de campo; (que se debe realizar dentro de la teoría probabilística de la fiabilidad).

En la práctica, se pueden combinar estas dos maneras. En particular, una simple aproximación estadística (probabilística) carece, habitualmente, de datos suficientes, pudiéndose siempre hacer referencia a los métodos tradicionales de proyecto. La razón más importante para la utilización del método tradicional es la larga y afortunada experiencia constructiva de los lugares en que se ha aplicado. Se pueden justificar reducciones de algunos coeficientes en condiciones específicas, siempre que redunden en un beneficio de la economía de la construcción. Desde este punto de vista, los métodos estadísticos deben ser considerados como una ayuda al método tradicional.

Los procedimientos de comprobación probabilística se pueden subdividir en dos clases principales: Métodos exactos y métodos de fiabilidad de primer orden (APO-FORM), a veces llamados métodos de nivel III y método de nivel II respectivamente. En ambos métodos la medida de fiabilidad es una probabilidad de fallo, p_f de los modos de fallo considerados y para un apropiado período de referencia. Estos valores se calculan y comparan con un valor predeterminado p_{f0} . Si la probabilidad de fallo $p_f < p_{f0}$, la estructura se considera insegura.

Los elementos de seguridad del método del coeficiente parcial (nivel I) pueden ser obtenidos de tres formas diferentes.

- a) mediante calibración de los métodos de proyecto históricos y empíricos
- b) mediante calibración de los métodos probabilísticos
- c) como una simplificación de FORM, mediante el método (calibrado) del valor de cálculo, tal y como se describe en A.3 (el apartado 3 de aquel Anejo).

La presente generación de Eurocódigos se ha basado, inicialmente, en el método a), corregido con el método c) o métodos equivalentes; principalmente en el campo del proyecto asistido por ensayos.

6.7.2

La instrucción EHE

Los criterios básicos de esta Instrucción están recogidos en su Capítulo II “Principios Generales y Método de los Estados Límites”, en el que, en los comentarios del art. 6.1 “Principios” dice textualmente que, el procedimiento de los estados límite, basado en la determinación previa de unos coeficientes parciales de seguridad, corresponde a un método de fiabilidad de nivel I.

Para la determinación de los coeficientes parciales de seguridad, básicamente existen dos procedimientos,

- a) Por medio de una calibración con los valores de cálculo de las variables empleadas en el cálculo de estructuras existentes.
- b) Por medio de una evaluación estadística de datos experimentales, en el marco de la aplicación de métodos probabilistas.

Se define la fiabilidad como la capacidad de la estructura para cumplir, con una probabilidad predefinida, una función en condiciones determinadas. En cierto modo ésta se corresponde con la probabilidad de ausencia de fallo y se puede cuantificar mediante el índice de fiabilidad, definido tal y como se hace en este capítulo al desarrollar el método de Nivel II. La única duda de interpretación es lo que entiende la EHE por probabilidad global de fallo, ya que no lo explica, y únicamente dice que no corresponde a la frecuencia real de fallos estructurales.

En la EHE se definen la probabilidad de fallo y los índices de fiabilidad que se citan allí ($\gamma = 3,8$ para estados límites últimos y $\gamma = 1,5$ para estados límites de servicio) por valores nominales de seguridad que sirven de base para el “desarrollo de unas reglas coherentes y rigurosas para el dimensionamiento de estructuras”. Esto es lo que se hace en esta ROM 0.0; los métodos, los valores concretos de los índices de fiabilidad, y las probabilidades de fallo, se han tomado, en los casos en los que había información, aquellos indicados por la EHE y los Eurocódigos, garantizando la homogeneidad del tratamiento y eliminando las posibles objeciones a su utilización.

Dadas las peculiaridades de las obras marítimas y portuarias, en particular en lo referente a las probabilidades de fallo que, con un consenso generalizado, se admiten en más altas que en otras obras civiles, la verificación por tres Niveles que se recomiendan en la ROM 0.0 no solo es conveniente, sino que es imprescindible, aunque solo sea para calibrar adecuadamente el método de los coeficientes parciales.

CAPITULO 7

Probabilidad de fallo y parada operativa



7

PROBABILIDAD DE FALLO
Y PARADA OPERATIVA

7.1

Introducción

En los capítulos 5 y 6 se propusieron los métodos para verificar el cumplimiento de los requisitos de seguridad, servicio y uso y explotación del tramo de obra en un intervalo de tiempo, (por ejemplo un estado de mar). En este capítulo se desarrollan los métodos para determinar (1) la probabilidad de ocurrencia de un modo en un intervalo de tiempo de duración genérica T_L , y (2) la probabilidad conjunta de ocurrencia de los modos principales en T_L . La probabilidad conjunta en la vida útil del tramo, debe estar acotada, tablas 2.2 y 2.3.

Para evaluar la probabilidad conjunta de fallo se recomienda ordenar en diagramas los modos principales, de fallo y parada. El diagrama se emplea para ordenar las causas o maneras más probables por las que el tramo deja de ser fiable, funcional u operativo, pero no informa sobre la relación entre los modos. En consecuencia, el diagrama no es un elemento para la gestión y explotación del tramo de obra, sino para la evaluación de una cota superior de la probabilidad conjunta de fallo y el establecimiento de estrategias de conservación y reparación.

No obstante, todos los tramos de la obra forman parte de un sistema portuario de servicios y funciones. Para calcular la probabilidad de fallo del sistema es necesario desarrollar árboles de fallo; con ellos se definen estrategias para mantener los niveles de seguridad, de servicio y de uso y explotación del sistema portuario, una vez que ha ocurrido un modo de fallo o parada. En estas Recomendaciones no se consideran los árboles de fallo ni su relación con la toma de decisiones en el sistema portuario.

7.1.1

Organización y contenidos del capítulo

Se comienza el capítulo con una breve introducción sobre la evolución temporal de los valores de los términos de una ecuación de verificación, y algunas técnicas estadísticas para su descripción y se proponen estas técnicas para determinar la probabilidad del tramo frente a un modo en un intervalo de tiempo de duración T_L , p.ej. la vida útil.

A continuación, se definen los diagramas de modos y se desarrolla el cálculo de la probabilidad conjunta de ocurrencia para los diferentes tipos de diagramas. De manera análoga, se desarrolla el análisis de la explotación del tramo mediante el cálculo del nivel de operatividad y el número medio de paradas operativas. A continuación, se presenta un método simplificado que se puede aplicar a las obras marítimas y portuarias con $IRE \geq 20$ e $ISA < 20$.

Las últimas secciones del capítulo se dedican a presentar, brevemente, técnicas para la optimización de las obras marítimas y portuarias mediante un análisis económico coste-beneficio y se comentan otros criterios para valorar la solución más adecuada, complementarios del método económico. Finalmente, se presentan diferentes herramientas para actualizar el valor de la probabilidad conjunta, a partir de la información recogida con diferentes técnicas de inspección, aus-

cultación e instrumentación, y se proponen criterios para tomar decisiones sobre la necesidad de iniciar una reparación en función de la reducción temporal de la fiabilidad, la funcionalidad y la operatividad del tramo de obra. En la figura 7.1 se esquematizan los contenidos y la organización del capítulo 7.

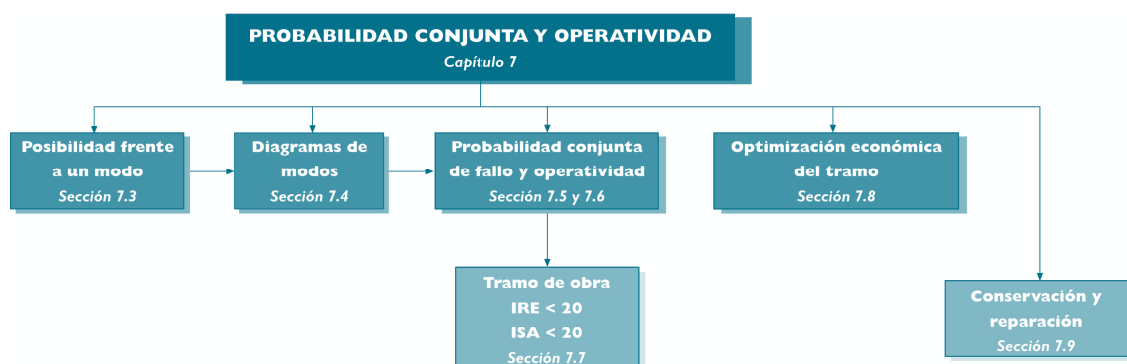


Figura 7.1:
Ordenación y contenidos del capítulo 7.

7.2 Conceptos Previos

La ecuación de verificación de un modo suele estar formada por la diferencia de dos términos, uno favorable y otro desfavorable. El valor del término desfavorable $X_2(t)$, evoluciona a lo largo del tiempo pasando por máximos y mínimos relativos, en función de la variabilidad temporal de los factores de proyecto que intervienen en él. En la figura 7.2, se representa una curva de evolución temporal, que se denomina curva de estados de X_2 . El valor del término favorable X_1 , también evoluciona con el tiempo; en la figura 7.3 se representa una curva de estados del término favorable X_1 .



Figura 7.2:
Evolución temporal del término desfavorable

El modo, de fallo o parada, se producirá cuando la curva de estados de X_2 cruce la curva de estados de X_1 ; en ese estado, el margen de seguridad $S(t) = X_1(t) - X_2(t) = 0$. Es claro que esta condición o criterio de fallo ocurrirá, por primera vez desde la entrada en servicio del tramo, cuando uno de los picos o máximos de $X_2(t)$, corte a la curva de X_1 .

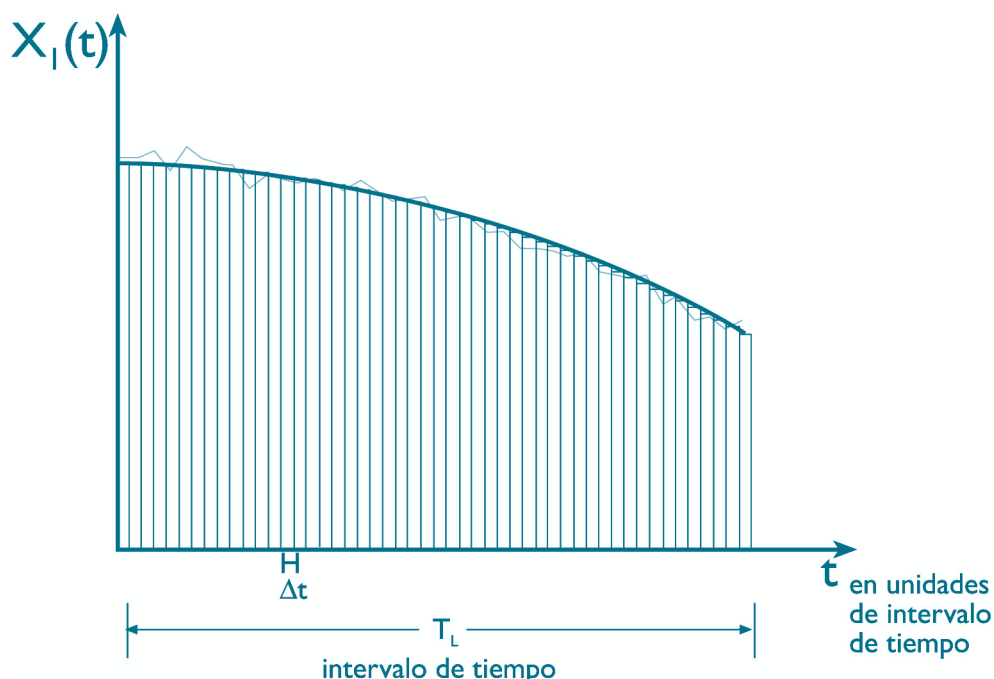


Figura 7.3:
Evolución
temporal
del término
favorable

Desde este punto de vista, la probabilidad de que $S(t) = 0$ por primera vez en T_L , se puede obtener calculando la probabilidad de que alguno de los máximos de la variable de estado X_2 , supere el valor de la variable de estado X_1 , en el intervalo de tiempo T_L . Si el tramo de obra está bien proyectado, la ocurrencia de un cruce de las curvas de estado o de un valor negativo del margen de seguridad, será un suceso raro y poco frecuente.

7.2.1 Probabilidad de los picos de X_2 en T_L

El instante de presentación, la magnitud y el número de picos de X_2 en T_L son aleatorias, por lo que su descripción debe hacerse mediante modelos de probabilidad que se pueden obtener a partir de las funciones de densidad y distribución de los factores que intervienen en el término.

Siempre que sea posible, la probabilidad de ocurrencia del modo en el intervalo de tiempo T_L , se calculará, directamente, a partir de las funciones de distribución de los factores de proyecto y términos en el intervalo T_L , aplicando cualquiera de los métodos del capítulo 6.

7.2.2 Presentación de los picos de X_2 como un proceso de Poisson

Al admitir que la primera ocurrencia del modo está relacionada con la presentación de los picos del término desfavorable, o del agente que lo causa, se posibilita analizar la secuencia temporal de los picos en T_L como un proceso de Poisson. Las condiciones necesarias para poder aplicar este modelo son que el número n de picos de X_2 en T_L , sea grande y que la probabilidad de presentación de un pico en T_L , sea pequeña.

Presentado un pico de X_2 , pueden ocurrir únicamente dos cosas o $X_2 > X_1$, o $X_2 < X_1$. En el pri-

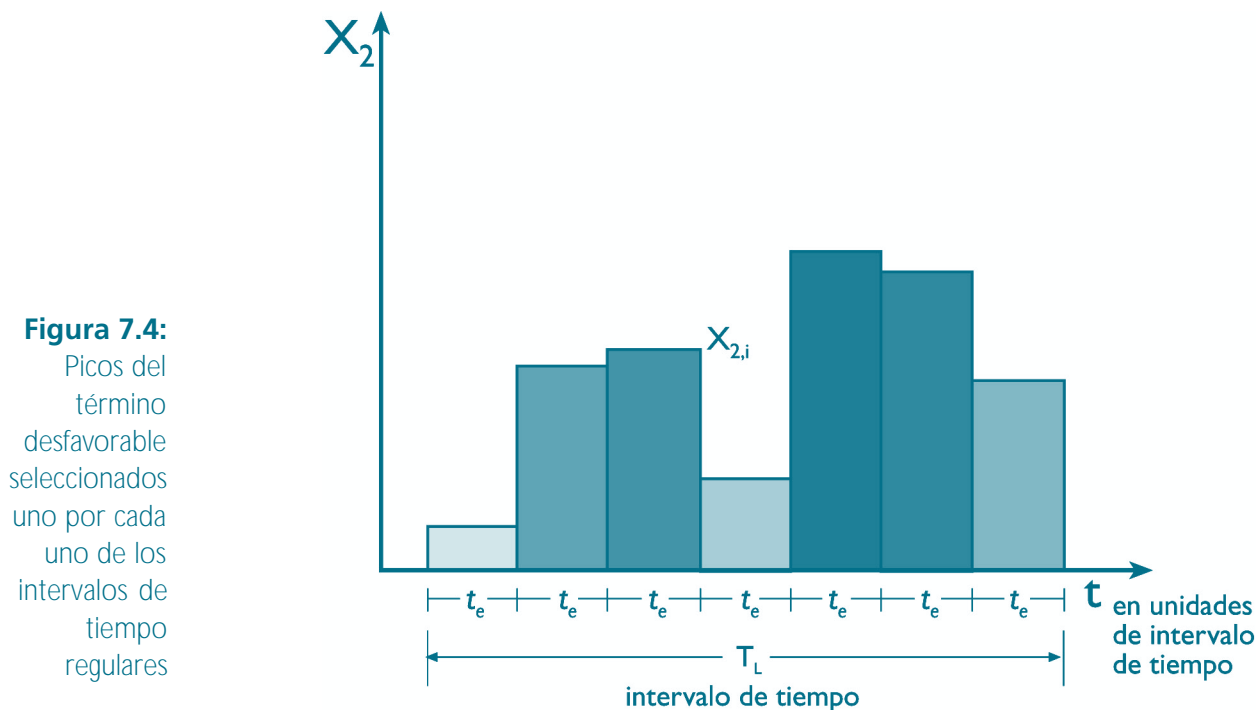
mer caso se produce el modo, en el segundo, no ocurre; llamando p , a la probabilidad de que ocurra el modo, la probabilidad de que no ocurra el modo es $(1 - p)$. Lo que ocurre cuando se presenta un pico se puede describir por un proceso de Bernoulli.

7.2.3 Número de picos en T_L

Durante el intervalo de tiempo T_L , pueden presentarse un número n_L , de picos, que, en general será un número aleatorio. A partir de aquí es posible proceder de dos maneras: considerar el número de picos como dato conocido o, por el contrario, considerar el número de picos como variable aleatoria.

7.2.3.1 Número de picos en T_L conocido

Si se divide el intervalo de tiempo T_L , en intervalos regulares de tiempo, y, en cada uno de ellos, se selecciona el pico máximo, se obtiene una muestra de $n_L = T_L$, picos de X_2 o del agente que lo produce. Ajustando un modelo de probabilidad a los n_L picos, se obtiene el régimen extremal de X_2 o del agente, y se puede adscribir a X_2 el valor de un cuantil de dicho régimen cuya probabilidad de excedencia sea p . Esta situación se produce cuando la vida útil o el intervalo de tiempo T_L se expresa en años, cada año es una unidad de intervalo de tiempo y, en cada uno de ellos, se selecciona el pico máximo, figura 7.4 y 7.5.



Suponiendo que lo que ocurre en cada unidad de intervalo de tiempo es independiente de lo que ocurre en las demás, se puede obtener la probabilidad de que se produzca al menos un fallo en T_L ,

$$P_{f,T_L} = 1 - (1 - p)(1 - p) \dots (1 - p) = 1 - \prod_{n=1}^{n=T_L} (1 - p)$$

En las aplicaciones prácticas p es un número pequeño y n_L es un número grande, por lo que esta expresión se puede aproximar por,

$$p_{f,T_L} \approx 1 - \exp(-pT_L) \approx T_L p$$

Comentario

En general, no se dispone de información suficiente para obtener una muestra estadísticamente representativa de $n_L = T_L$ valores de picos, uno por año, por lo que esta aproximación, suele requerir una extrapolación importante del régimen extremal. Dado que en el periodo de medida se suelen producir varios picos en un año, se puede proceder considerando el número de picos en T_L como una variable aleatoria.

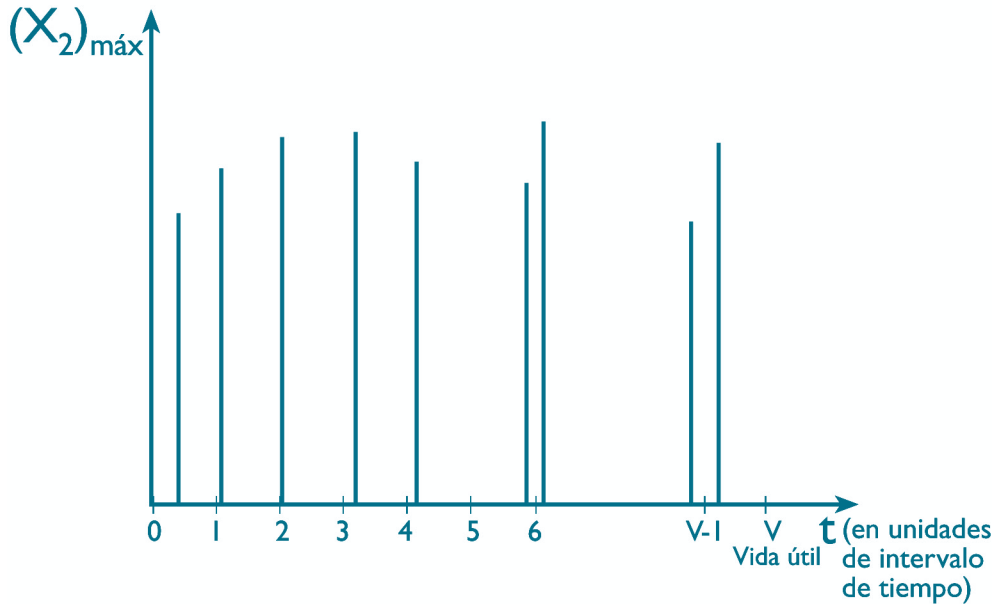


Figura 7.5:
Picos del
agente
seleccionados
en el intervalo
de tiempo

7.2.3.2 Número de picos en T_L es una variable aleatoria

En este caso, en vez de trabajar con el año se opera con el suceso pico de X_2 . La muestra debe estar formada por n_p sucesos independientes que no se solapen. Para ello es necesario definir un valor umbral de $X_2(t)$ de tal forma que entre dos cruces, ascendente y descendente consecutivos por el valor umbral, ocurre un único pico máximo; con ello se garantiza que el tramo de curva de estado asociado a un pico no se solape con el tramo de curva de estado del siguiente, figura 7.6. Sea p_u la probabilidad de excedencia del valor umbral. Si el periodo de medida t_p es suficientemente largo el número medio de sucesos del proceso de Poisson es $= n_p p_u$.

Se puede definir un subintervalo de tiempo $t = t_p / n_p$ que cumpla las condiciones siguientes,

1. La probabilidad de que ocurra más de un suceso en el subintervalo de tiempo es nula
2. Cada intervalo de tiempo se comporta como un proceso de Bernoulli y consecuentemente,
3. La ocurrencia de un fallo en cualquiera de los subintervalos es independiente de las ocurrencias en otros subintervalos
4. La probabilidad de que ocurra el suceso fallo en un subintervalo es constante

De acuerdo con estas condiciones, se define el número, o tasa, de ocurrencias de fallo por unidad de tiempo por $\lambda = 1/t_p$. Teniendo en cuenta las definiciones de subintervalo, t , y del parámetro de Poisson, $\lambda = n_p p_u$, se obtiene que, $\lambda t = p_u$, es decir, que la probabilidad de ocurrencia de un pico en un subintervalo es p_u .

La probabilidad de que en T_L , haya r picos o máximos de X_2 , se obtiene por,

$$p_r(r; \lambda, T_L) = \frac{(\lambda T_L)^r \exp(-\lambda T_L)}{r!}; \quad r = 0, 1, 2, \dots$$

y su función de distribución es,

$$F[s; \lambda, T_L] = \sum_{r=0}^s p_r(r; \lambda, T_L)$$

Comentario

En general, el parámetro, λ , no tiene porqué ser constante en el intervalo de tiempo y el modelo anterior se puede extender a intervalos en los que λ varía en el intervalo.

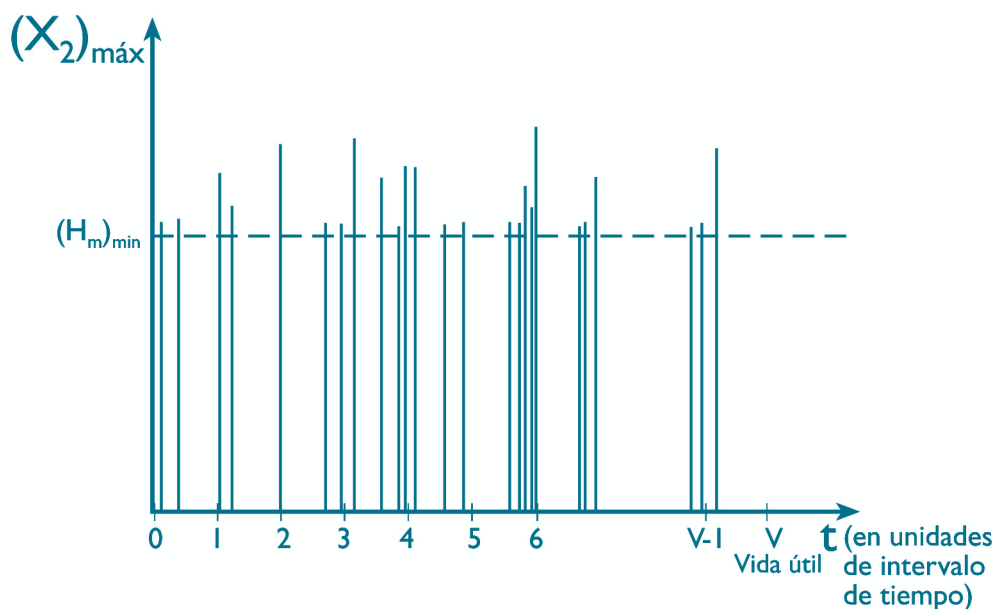


Figura 7.6:

Número aleatorio de picos del agente en el intervalo de tiempo

Con la presentación de cada uno de los picos existe la probabilidad de que $X_2 \geq X_1$. Ajustando un modelo de probabilidad a los n_p picos, se obtiene el régimen de picos o máximos de X_2 o del agente; y se puede adscribir a X_2 el valor de un cuantil del modelo de probabilidad cuya probabilidad de excedencia sea p_p . En ese caso, la probabilidad de fallo en el intervalo de tiempo T_L es,

$$P_{f, T_L} = \sum_{r=0}^{\infty} p_r(r; \lambda, T_L) \{1 - (1 - p_p)^r\} = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(\lambda T_L)^r \exp(-\lambda T_L)}{r!} \{1 - (1 - p_p)^r\}$$

Para valores de p_p muy pequeños y de T_L grandes, esta expresión se puede aproximar por la siguiente,

$$P_{f, T_L} \approx 1 - \exp(-\lambda T_L p_p) \approx 1 - \exp\left(-\frac{n_p p_u}{t_p} T_L p_p\right)$$

Esta aproximación no se debe aplicar si el número de picos n_p , y el periodo de medidas t_p , no son grandes.

Comentario

En caso de que la determinación de p_p se realice a partir de la función de distribución de picos de un descriptor estadístico, por ejemplo la altura de ola significativa, se deberá tener en cuenta la probabilidad de que se produzca el fallo conocido que se ha excedido el valor del descriptor. En consecuencia, p_p es la probabilidad condicionada a la presentación de un pico $p_p(|H_s = h)$, y, por tanto,

$$p_p = \int_{H_{s,u}}^{\infty} p_p(|H_s = h) f_{H_s}(h) dh$$

donde, $f_{H_s}(h)$, es la función de densidad del régimen de picos de H_s . Este cálculo también es necesario en el caso de calcular la probabilidad de ocurrencia, p , a intervalos regulares de tiempo tal y como se ha explicado en el apartado anterior.

7.3

Probabilidad frente a un Modo en T_L

En esta sección se desarrolla el procedimiento a seguir para calcular la probabilidad de ocurrencia de un modo de fallo o parada $p_{m,TL}$, en un intervalo de tiempo de duración T_L , que, en general será la vida útil mínima, $V_m = T_L$, recomendada en la tabla 2.2, en función del índice de repercusión económica, IRE.

7.3.1

Probabilidad de fallo con información estadística suficiente

En caso de que se disponga de una amplia base de datos para obtener aquellas funciones de distribución de los términos de la ecuación de verificación en el intervalo de tiempo T_L , en su caso, la vida útil, la probabilidad de ocurrencia del modo $p_{m,TL}$, se calculará directamente aplicando alguno de los métodos de Nivel II o III.

Comentario

Hoy en día en España, merced a la existencia de la red de medidas de datos oceanográficos, es habitual disponer, en un determinado emplazamiento, de registros continuos de estados de mar durante varios años, aunque en una cantidad que no es suficiente para abarcar una fase de proyecto del orden de, por ejemplo 50 años. En estas circunstancias, los datos se pueden ordenar tomando el año como unidad de intervalo de tiempo e inferir las funciones de distribución de los estados de mar máximos, tomando uno por año, para obtener el régimen de temporales, o tomando, los V máximos de la serie de datos, independientemente del año, o los máximos superiores a un cierto valor umbral, para obtener el régimen de picos sobre un umbral, etc.

Estas técnicas se pueden aplicar también a intervalos de tiempo de menor duración que el año. Se pueden aplicar por ejemplo, para obtener las funciones de distribución por estaciones, ciclos de solicitud, etc. También se pueden utilizar con factores de proyecto que no están relacionados con el medio físico, p.ej. de uso y explotación, terreno, etc.

Con el paso del tiempo, y manteniendo el rigor y la constancia en los procesos de medida, se dispondrá de una amplia base estadística que permita determinar, sin necesidad de hipótesis adicionales, directamente la probabilidad de ocurrencia de un modo en cualquier intervalo de tiempo de duración T_L .

7.3.2 Probabilidad de fallo con información estadística limitada

En estos casos, la probabilidad p_{m,T_L} , del tramo frente al modo, m , en el intervalo de tiempo de duración T_L , se calculará suponiendo ciertas propiedades estadísticas de la unidad de intervalo de tiempo y del número y valores de los picos que pueden ocurrir en cada uno de ellos, según se establece en los apartados siguientes.

7.3.2.1 Máximos de X_2 a intervalos de tiempo unidad regulares

Siempre que sea posible, se dividirá la duración T_L , en unidades de intervalo de tiempo independientes y regulares de duración t , y se supondrá que los términos favorables son constantes en T_L , y que el pico del término desfavorable es el valor extremo y, por tanto, hay uno en cada una de las t , unidades de intervalo de tiempo. Si $p_{m, \Delta t}$, es la probabilidad de que en la unidad de intervalo de tiempo i , ocurra el suceso m (X_2)_p X_1 , y, lo que ocurre en cada uno de ellos es independiente de lo que ocurra en los otros, la probabilidad p_{m,T_L} de que en T_L , ocurra al menos una vez el suceso (X_2)_p X_1 , es,

$$p_{m,T_L} = 1 - \prod_{i=1}^{i=n} (1 - p_{m, \Delta t_i})$$

donde $n = T_L / t$, es el número de sucesos en T_L y $1 - p_{m, \Delta t}$, es la probabilidad de que no ocurra el suceso (X_2)_p X_1 , en la unidad de intervalo de tiempo i .

La probabilidad $p_{m, \Delta t}$, se podrá determinar por uno de los métodos de Nivel II o III, o, en el caso de aplicación de un método de Nivel I, admitiendo que $p_{m, \Delta t}$, es igual a la probabilidad de exceedencia del factor predominante en t , u otras técnicas debidamente justificadas, por ejemplo experimentales.

Si la probabilidad $p_{m, \Delta t}$ es igual en todos los intervalos de tiempo t , e igual a $p_{m, \Delta t}$, entonces,

$$p_{m,T_L} = 1 - (1 - p_{m, \Delta t})^{T_L/t}$$

Si el producto $p_{m, \Delta t} T_L$, toma valores pequeños, la expresión anterior se puede aproximar asintóticamente por,

$$p_{m,T_L} \approx 1 - \exp(-p_{m, \Delta t} T_L) \approx p_{m, \Delta t} T_L$$

Comentario

Esta aproximación se puede aplicar cuando se considera la vida útil de la obra dividida en años, considerando el año como la unidad de intervalo de tiempo. En ese caso, p , es la probabilidad de ocurrencia del extremo en el año, que se puede obtener del régimen extremal de X_2 .

7.3.2.2 Probabilidad de fallo en T_L con número aleatorio de picos

En estos casos, se podrá suponer de forma general que el número n , de máximos o picos de X_2 , que pueden ocurrir en el intervalo de tiempo T_L , es una variable aleatoria, que tiene de modelo de probabilidad la función de Poisson de parámetro λ , número medio de picos en T_L . Para procesos homogéneos λ , podrá suponerse constante¹ en T_L .

(1) Para ello deberán cumplirse ciertas hipótesis.

El número de picos n_p , se calculará definiendo un valor umbral de X_2 o del agente, tal y como se detalla en el apartado, 7.2.3.2, a partir de una muestra de datos obtenida en un intervalo de tiempo de duración t_p . Se definirá la unidad de intervalo de tiempo $t = t_p/n$, y la tasa media de ocurrencias de picos en la unidad de intervalo de tiempo será, $\lambda = n_p/t_p$, donde $\lambda = n_p p_u$.

La probabilidad de ocurrencia de un pico en la unidad de intervalo de tiempo es $p_u = t_p$, y la probabilidad de fallo en el intervalo de tiempo T_L se podrá calcular por,

$$P_{m,T_L} = \sum_{r=0}^{r=\infty} p_r(r; \lambda, T_L) \{1 - (1 - p_p)^r\} = \sum_{r=0}^{r=\infty} \frac{(\lambda T_L)^r \exp(-\lambda T_L)}{r!} \{1 - (1 - p_p)^r\}$$

donde r es el número de picos que pueden presentarse en T_L y p_p es la probabilidad de que ocurra el modo habiéndose presentado un pico. Este valor se determinará a partir del régimen de picos obtenido a partir de la muestra de n_p picos medidos en t_p .

Para valores de λ muy pequeños y de T_L grandes, esta expresión se puede aproximar por la siguiente,

$$p_{m,T_L} \approx 1 - \exp(-\lambda T_L p_p) = 1 - \exp\left(-\frac{n_p p_u T_L p_p}{t_p}\right)$$

Esta aproximación no se debe aplicar si la base de datos del número de picos n_p , y del periodo de medidas t_p , no son estadísticamente grandes para la extrapolación al intervalo de duración T_L .

Comentario

El régimen de picos se conoce como régimen POT (peaks over threshold) que es distinto del régimen de extremos obtenido considerando un pico, el mayor, por unidad de intervalo de tiempo regular. Cuando la unidad de tiempo es el año, el régimen de estados de mar extremos en España se denomina Régimen de Temporales.

7.3.3 Periodo de retorno de un modo

La probabilidad de ocurrencia del fallo en la unidad regular de intervalo de tiempo i , p_{m, t_i} , representa la frecuencia media de ocurrencia de ese suceso en el intervalo de tiempo. Si todos los intervalos de tiempo tienen la misma probabilidad de ocurrencia, $p_{m, t_i} = p$, el periodo de retorno, o número de unidades de intervalos unidad que, en promedio, deben transcurrir hasta que se produzca el primer fallo, se calculará por $T_R = 1/p$.

Comentario

Si la vida útil de la fase de proyecto servicio es $T_L = V = 25$ años, el año es el intervalo de tiempo unidad y si la probabilidad de fallo del tramo frente al modo en V , debe ser igual o menor que $p_{m,V} = 0.1$, el periodo de retorno o número medio de años que deben transcurrir para que ocurra por primera vez el fallo es $T_R = V/p_{m,V} = 250$ años.

7.3.4 Valores umbrales y probabilidad frente a un modo

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de un modo en el intervalo de tiempo es necesario seleccionar el suceso pico de X_2 definiendo un valor umbral que cumpla las condiciones establecidas en el apartado 7.2.3.2. El valor umbral dependerá de si el modo está adscrito a un estado límite último, de servicio u operativo.

7.3.4.1 Valor umbral en estados límite últimos

Para cada tramo de obra y para cada modo de fallo adscrito a un estado límite último, se puede definir un valor umbral del término desfavorable de la ecuación de verificación de manera que, valores mayores a él contribuyan de forma significativa a la probabilidad de fallo del tramo frente a ese modo; en ese caso se denomina valor umbral del modo de fallo adscrito a un estado límite último.

En las Recomendaciones específicas se proporcionará el método para acotar cada modo de fallo, la probabilidad de fallo significativa y el valor umbral.

Comentario

Cuando se evalúa la probabilidad de fallo del tramo frente a un modo adscrito a un estado límite de último se deberán considerar sólo aquellos estados asociados a la ocurrencia de cierto valor umbral del factor predominate para el que la probabilidad de que se inicie el deterioro estructural sea significativa. A los efectos de este cálculo se podrá admitir que probabilidades menores que 10^{-4} no son significativas.

La fuerza y el momento con la que el oleaje solicita un pilote depende, entre otros factores de proyecto, de la altura y periodo de las sucesivas olas en el estado de mar. En muchas ocasiones se considera un estado de mar máximo y se calcula la probabilidad de que la fuerza o momento supere en el estado un cierto valor de cálculo. No obstante, el estado de mar forma parte de un ciclo de solicitud o temporal el cual está formado por una secuencia de estados de mar cuya altura de o la significativa es menor que la del máximo; en ellos hay una cierta probabilidad de que la fuerza o el momento supere el valor de cálculo. Es posible definir un valor umbral de la altura de ola significativa, en función de la del estado de mar máximo por debajo de la cual se puede considerar que es depreciable la contribución a la probabilidad de fallo frente al modo en su vida útil.

7.3.4.2 Valor umbral en estados límite de servicio

Para cada tramo de obra y para cada modo de fallo, se puede definir un valor umbral del término desfavorable de la ecuación de verificación de manera que valores mayores a él contribuyan de forma significativa a la probabilidad de fallo del tramo frente a ese modo; en ese caso se denomina valor umbral del modo de fallo adscrito a un estado límite de servicio.

En las Recomendaciones específicas se proporcionará el método de acotar para cada modo de fallo la probabilidad de fallo significativa y el valor umbral.

Comentario

Cuando se evalúa la probabilidad de fallo del tramo frente a un modo adscrito a un estado límite de servicio se deberán considerar sólo aquellos estados asociados a la ocurrencia de cierto valor umbral del factor predominate, para el que la probabilidad de que se inicie el deterioro estructural y formal sea significativa. A los efectos de este cálculo se podrá admitir que probabilidades menores que 10^{-3} no son significativas.

La fuerza y el momento instantáneo con la que el oleaje solicita un pilote de hormigón armado puede alcanzar un valor tal que se produzca la fisuración del material; una vez que la acción decrece por debajo de un cierto valor, la fisura se cierra. En estos casos es complicado trabajar con valores instantáneos, por lo que, en general, es más conveniente calcular con parámetros estadísticos representativos del estado de mar, p.ej. la altura de ola significativa. Se puede, entonces, definir un valor umbral de la altura de ola significativa, por encima del cual se produce fisuración del hormigón. Conocida la duración de la excedencia del valor umbral, se calcula el tiempo de vida útil durante el cual la fisura permanece abierta y se evalúan sus consecuencias.

7.3.4.3 Valor umbral en estados límite operativos

Para cada tramo de obra y para cada modo de parada, se puede definir un valor umbral del término desfavorable de la ecuación de verificación de manera que, valores mayores a él contribuyan de forma significativa a la pérdida de operatividad del tramo frente a ese modo; en ese caso se denomina valor umbral del modo adscrito a un estado límite operativo.

Comentario

Cuando se evalúa la probabilidad de parada del tramo frente a un modo adscrito a un estado límite operativo se deberán considerar sólo aquellos estados asociados a la ocurrencia de cierto valor umbral del factor predominante para el que la probabilidad de la parada operativa sea significativa. A los efectos de este cálculo se podrá admitir que probabilidades menores que 10^{-2} no son significativas.

Supóngase que la parada se debe realizar cuando la concentración media en un intervalo de tiempo de un determinado contaminante vertido durante la explotación, no supere un cierto valor. La concentración depende de las condiciones de difusión y dispersión del medio receptor, asociadas a la velocidad de la corriente y a las alturas de ola que dependen de la fase de la marea astronómica y del estado de mar. Pueden darse diversas combinaciones en las cuales la probabilidad de que la concentración supere el valor admisible sea significativa. Se puede definir, por tanto, la altura de ola significativa máxima y la carrera de marea mínima para las que la probabilidad de ocurrencia de la concentración media umbral de parada en la vida útil sea significativa.

7.4 Diagramas de Modos

A los efectos de evaluar la probabilidad conjunta de ocurrencia de todos los modos, se considera que el tramo constituye un sistema formado por un conjunto de elementos, subelementos, etc. Los modos pueden afectar a un elemento o a varios, pueden ocurrir individualmente o en conjunto, pueden inducir otros modos, etc. El tramo puede fallar por la ocurrencia de un único modo o por varios, individualmente o secuencialmente hasta alcanzar el colapso. La forma de analizar el comportamiento del tramo de obra frente a los modos es a través de árboles de fallo y parada. Este análisis es complejo, pues requiere tener en cuenta aspectos de uso y explotación del sistema en el que se encuentra ubicado el tramo de obra. Por ello, en estas Recomendaciones el análisis de los modos de fallo y parada se realiza mediante diagramas de modos considerados mutuamente excluyentes², lo que permite aproximar la probabilidad conjunta de ocurrencia de fallo o parada de forma más simple, figura 7.7

(2) Se dice de aquellos modos que no pueden ocurrir simultáneamente; la presentación de uno de ellos excluye la de los demás.

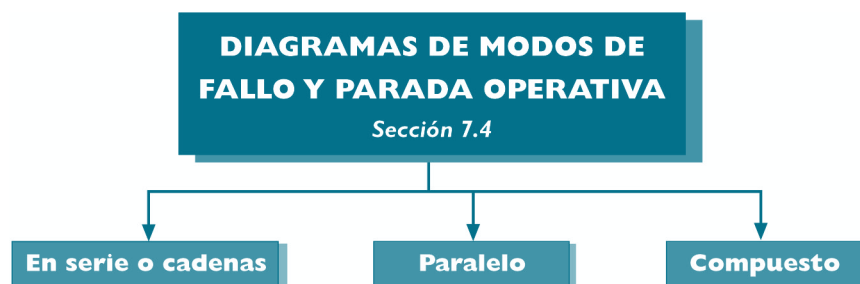


Figura 7.7:
Diagrama de
modos de fallo
y parada.

7.4.1 Ordenación en diagramas

A los efectos de evaluar la probabilidad conjunta del tramo frente a todos los modos de fallo y parada, se ordenarán éstos en diagramas. Un diagrama es una simplificación del comportamiento de un tramo y es una colección completa de modos mutuamente excluyentes.

Comentario

De acuerdo con esta definición, el tramo de obra falla o para, por la ocurrencia de uno de los modos de la colección, por eso se dice que es completa; además cuando la ocurrencia de uno de los modos excluye la ocurrencia simultánea, de los otros, se dice que los modos son mutuamente excluyentes.

Debe observarse que el cálculo de la probabilidad de fallo mediante diagramas de fallo, y no mediante árboles de fallo, excluye el colapso progresivo, el cual se debe evitar aplicando normas de buena práctica.

7.4.2 Tipos de diagramas

Estos modos se ordenarán en una de las tres configuraciones básicas siguientes: serie, paralelo y compuesta.

7.4.2.1 Diagramas en serie

En el caso serie, los modos se representarán formando una cadena o línea conectados en serie. El tramo de obra falla o para, cuando ocurre al menos uno de los modos.

7.4.2.2 Diagrama en paralelo

Estará formado por varios diagramas en serie que discurren en paralelo. Se considera que el tramo de obra falla o para, solamente, cuando, fallan o paran, todas las cadenas en serie; el fallo o parada de cada una de las cadenas en serie se produce si ocurre, al menos uno, de sus modos.

7.4.2.3 Diagrama compuesto

Estará formado por cadenas en serie y paralelo que, a su vez, se pueden desdoblar en otras cadenas en serie o paralelo, y así sucesivamente.

Comentario

Un ejemplo simplificado de tramo de obra con un diagrama en serie es un dique de abrigo en talud con espaldón con los siguientes modos de fallo: salida de cantos o caída del espaldón o erosión del pié de fondo. Este diagrama presenta los modos de fallo como sucesos independientes uno de otro. La ocurrencia de uno de ellos provoca el fallo de la obra. A los efectos de cálculo de la probabilidad de fallo, se considera que el tramo falla cuando ocurre al menos uno de los modos del diagrama.

El diagrama no representa cadenas o líneas de modos de fallo correlacionados por ejemplo fallos que inducen otros, en serie, hasta alcanzar el colapso de la obra. Supóngase que en el ejemplo anterior y debido a la ocurrencia del modo de fallo erosión de pié de fondo se produce la siguiente secuencia de modos de fallo.

Erosión pié fondo => erosión de la berma => deslizamiento global del manto principal => deslizamiento del espaldón.

En este caso los modos ocurren secuencialmente en perfecta dependencia uno de otro. La secuencia es una indicación de cómo el tramo colapsa. Para realizar este análisis el diagrama no es suficiente; para ello se requiere el análisis por árboles de fallo.

Desde el punto de vista de evaluación de la probabilidad de fallo del tramo, y, debido a que se trabaja con diagramas, se evaluará la probabilidad de que ocurra, o la erosión de pié, o la erosión de la berma, o el desli-

zamiento global del manto principal o el deslizamiento del espaldón. No obstante, esto no impide que, conociendo la dependencia entre modos, se puedan evaluar los costes de reconstrucción y las pérdidas económicas de explotación mediante un análisis de coste-beneficio teniendo en cuenta la posible secuencia de fallos.

La parada operativa de un muelle que disponga de dos líneas de atraque para atender el mismo servicio, uno orientado en una dirección y otro en otra, puede representarse mediante un diagrama en paralelo formado por dos cadena o líneas de modos de parada en serie, una para cada una de las líneas de atraque. Cada una de ellas, estará formada por una serie de modos de parada tales como, velocidad de viento de una determinada dirección superior al umbral, oscilación de la superficie del mar superior a un cierto umbral, etc. La parada de uno de los atraques no implica la parada del otro, debido a su diferente orientación y probablemente abrigo.

7.4.3

Modos considerados en la probabilidad conjunta

Los diagramas de modos son una ayuda para evaluar la probabilidad conjunta del tramo de obra. De todos los modos posibles hay algunos que son los principales y cuya ocurrencia pueden producir una avería o parada importante, con el resultado de la paralización de las operaciones portuarias con unas repercusiones económicas y sociales y ambientales significativas. Estos son los modos que se considerarán para evaluar la probabilidad conjunta de fallo.

La valoración de las repercusiones económicas y sociales y ambientales por la ocurrencia de cada uno de estos modos principales debe producir índices de repercusión económica y social y ambiental en el mismo intervalo que el adoptado para definir el carácter de la obra.

Comentario

Al evaluar la probabilidad conjunta de fallo de un muelle de bloques en Almería, se deberán considerar los modos de fallo, deslizamiento de hiladas, hundimiento, licuefacción y deslizamiento profundo. Sin embargo, no se incluirán los modos de fallo arrancamiento de un bolardo o rotura de una defensa durante la maniobra de atraque, salvo que este fallo conllevara el hundimiento del muelle.

7.5

Probabilidad Conjunta de Fallo

Elegido un tramo de obra y un intervalo de tiempo de duración T_L que, en general será la vida útil, la probabilidad conjunta de fallo del tramo se calculará agrupando en diagramas los modos principales de fallo adscritos a los estados límite últimos y de servicio. El cálculo dependerá del tipo de diagrama y se obtendrá aplicando las formulaciones presentadas en los apartados siguientes, figura 7.8.

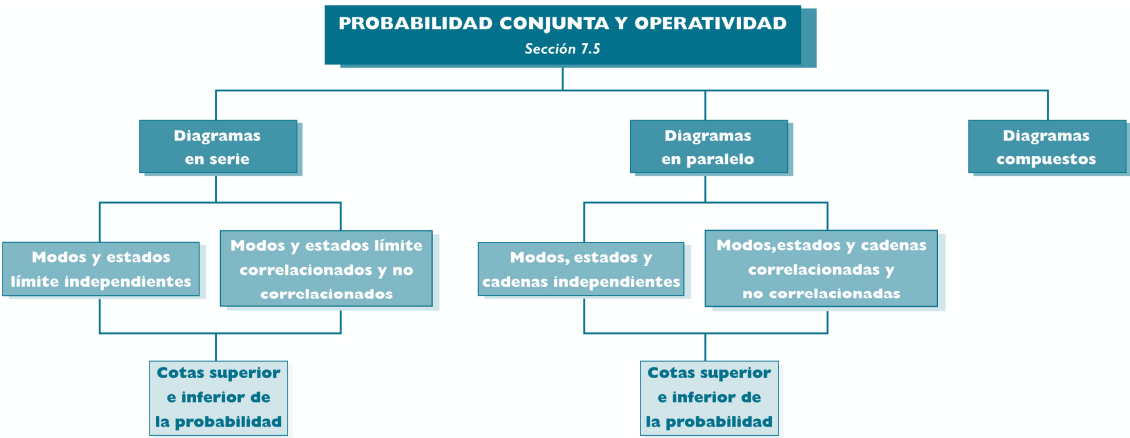


Figura 7.8:
Cálculo de la probabilidad conjunta en la vida útil.

Comentario

El valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo frente a los modos adscritos a los estados límite últimos es la fiabilidad del tramo. El valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo frente a los modos adscritos a los estados límite de servicio es la funcionalidad del tramo.

7.5.1**Diagramas en serie**

Sean A_{ij} , $i = 1, \dots, M_j$, cada uno de los i modos de fallo adscritos al estado límite último o de servicio $j = 1, \dots, N$, en un diagrama en serie; el fallo de la obra se produce cuando se presenta, al menos uno de los modos en el intervalo de tiempo T_L .

7.5.1.1 **M_j modos mutuamente excluyentes del estado límite j**

Denominando $\Pr[A_{ij}] = p_{ij, T_L}$, a la probabilidad de que ocurra el modo A_{ij} en el intervalo de tiempo T_L , y suponiendo que en el intervalo de tiempo, los modos de fallo del diagrama son mutuamente excluyentes, la probabilidad de fallo del tramo frente a todos los modos de fallo $i = 1, \dots, I$, adscritos al estado límite j se calculará por,

$$p_{j, T_L}^* = \sum_{i=1}^I p_{ij, T_L}$$

donde, p_{j, T_L}^* , es la probabilidad de que ocurra al menos uno de los i modos de fallo en T_L .

Si los sucesos complementarios de los modos son estadísticamente independientes, la probabilidad de fallo se podrá calcular también por,

$$p_{j, T_L}^* = 1 - \prod_{i=1}^{i=I} (1 - p_{ij, T_L})$$

donde, $(1 - p_{ij, T_L})$ es la probabilidad de que no ocurra el modo de fallo i , adscrito al estado límite j .

Suponiendo asimismo que el conjunto de estados límite, últimos o de servicio, formen una colección completa de estados mutuamente excluyentes, la probabilidad conjunta de fallo del tramo frente a todos los estados límite, últimos o de servicio $j = 1, \dots, J$, se calculará por,

$$p_{f, T_L} = \sum_{j=1}^{j=J} \sum_{i=1}^{i=I} p_{ij, T_L} = \sum_{m=1}^{m=M} p_{m, T_L}$$

donde, $M = I + J$, es el número total de modos de fallo principales adscritos a los estados límite últimos o de servicio y p_{m, T_L} , la probabilidad de ocurrencia del modo m en T_L .

Cuando T_L es la vida útil de la obra, la probabilidad conjunta de fallo p_{f, T_L} , deberá ser menor o igual que el valor dado en la tabla 2.2 y 2.3, para los estados límite últimos y de servicio, respectivamente.

Si además, los sucesos complementarios de los modos de fallo son estadísticamente independientes, la probabilidad de fallo se podrá calcular por,

$$p_{f, T_L} = 1 - \prod_{j=1}^{j=J} \prod_{i=1}^{i=I} (1 - p_{ij, T_L}) = 1 - \prod_{m=1}^{m=M} (1 - p_{m, T_L})$$

Comentario

Cuando todos los modos de fallo del diagrama en serie, adscritos a los estados límite últimos son, por ejemplo, mutuamente excluyentes, la probabilidad conjunta de fallo del tramo de obra es,

$$p_f = \Pr[S_1 \cup \dots \cup S_M] = 1 - \Pr[S_1^c S_1^c \dots S_M^c]$$

$$\Pr[S_1 \cup \dots \cup S_M] = \Pr[S_1^c] + \Pr[S_2^c] + \dots + \Pr[S_M^c] = \sum_{m=1}^{m=M} p_m$$

donde, $\Pr[S_m] = p_m$, $m = 1, \dots, M$ y el superíndice c indica el suceso complementario.

Si además, los sucesos complementarios de los modos son estadísticamente independientes,

$$\Pr[S_1^c S_2^c \dots S_M^c] = \Pr[S_1^c] \Pr[S_2^c] \dots \Pr[S_M^c] = \prod_{m=1}^{m=M} (1 - p_m)$$

y, en consecuencia,

$$p_f = 1 - \prod_{m=1}^{m=M} (1 - p_m) = \sum_{m=1}^{m=M} p_m$$

Si los sucesos son mutuamente excluyentes y sus complementarios son estadísticamente independientes, la probabilidad de fallo del tramo de obra, se puede evaluar por cualquiera de las dos formas, puesto que,

$$\Pr[S_1^c S_2^c] \Pr[S_1 \cup S_2] = 1$$

Si los sucesos complementarios no son estadísticamente independientes,

$$\Pr[S_1^c S_2^c] \geq \Pr[S_1^c] \Pr[S_2^c]$$

$$1 - \Pr[S_1^c S_2^c] \leq (1 - \Pr[S_1^c]) (1 - \Pr[S_2^c])$$

$$p_f = \sum_{m=1}^{m=M} p_m \leq 1 - \prod_{m=1}^{m=M} (1 - p_m)$$

es decir, la probabilidad de fallo calculada a través de los sucesos complementarios considerados independientes es una cota superior de la probabilidad de fallo.

La fiabilidad o funcionalidad del tramo de obra, frente a los modos adscritos a los estados límite j es $r_{TL} = 1 - p_{f,TL}$, es decir, la probabilidad de que no ocurra ninguno de los i modos de fallo adscritos a los estados límite últimos.

En la sección 4.3 se propuso una relación de estados límite, últimos y de servicio. A los efectos de cálculo de la probabilidad de fallo, esa relación es una colección completa de estados límite mutuamente excluyentes.

7.5.1.2 Cuando hay modos que no son mutuamente excluyentes

En algunos casos no es posible suponer que la colección completa esté formada por modos mutuamente excluyentes. En ese caso, la probabilidad conjunta de fallo del tramo $p_{f,TL}$, se calculará dependiendo de la relación existente entre los diferentes modos: independientes, todos correlacionados y modos unos correlacionados y otros no.

7.5.1.2.1 Modos correlacionados positivamente en todos los estados límite

(3) Los modos están correlacionados positivamente cuando, presentados los agentes, su probabilidad de ocurrencia varía en el mismo sentido.

En el caso en que todos los modos del diagrama estén correlacionados positivamente³, la probabilidad conjunta de fallo del tramo de obra se calculará por,

$$p_{f,T_L} = 1 - r_f = \max(p_{m,T_L})$$

donde, $\max(p_{m,T_L})$ indica la mayor probabilidad de fallo entre todas las posibles y p_{m,T_L} , es la probabilidad de ocurrencia de uno de los $m = 1, \dots, M$, modos adscritos a alguno de los estados límite. Este resultado se aplicará tanto a los estados límite últimos como a los de servicio.

7.5.1.2.2 Modos correlacionados y no correlacionados

En estos casos no existe una regla general y la habilidad para obtener un resultado depende del número de modos y de su relación, tal y como se detalla en el comentario siguiente.

Comentario

En el caso de que haya dos únicos modos de fallo adscritos al estado límite j , A y B , y estén correlacionados positiva o negativamente, la probabilidad conjunta de fallo del tramo de la obra con diagrama en serie, es decir, que ocurra, al menos uno, de los dos modos de fallo (A ó B) es,

$$Pr[A + B] = Pr[A] + Pr[B] - Pr[A * B]$$

donde $Pr[A * B]$, es la probabilidad de que ocurran simultáneamente los dos modos de fallo A y B .

Para modos de fallo A y B independientes, $Pr[A * B] = Pr[A] * Pr[B]$. Se comprende que a medida que intervienen mas modos de fallo, el cálculo de la probabilidad se complique. En muchos casos es difícil o imposible de obtener $Pr[A * B]$, por lo que en estas Recomendaciones se proponen métodos aproximados de cálculo o métodos para definir un intervalo de variación de dicha probabilidad.

Es conveniente recordar que el coeficiente de correlación nulo sólo es una indicación de que entre los modos no existe una relación lineal, pero puede que ésta sea cuadrática, por ejemplo.

7.5.1.2.3 Cotas superior e inferior de la probabilidad conjunta

En el caso en que los modos del diagrama en serie estén, unos correlacionados y otros no correlacionados o independientes, la probabilidad conjunta de fallo del tramo en el intervalo de tiempo T_L , deberá encontrarse en el intervalo cuyos extremos son,

- Cota inferior de la probabilidad conjunta de fallo

$$(p_{f,T_L})_{\inf} \geq \max(p_{m,T_L})$$

- Cota superior de la probabilidad conjunta de fallo

$$(p_{f,T_L})_{\sup} \leq 1 - \sum_{m=1}^{m=M} (1 - p_{m,T_L})$$

7.5.2 Diagramas en paralelo

Sean B_{kij} , $i=1, \dots, M_{kj}$, cada uno de los i modos de fallo adscritos al estado límite último o de servicio, $j=1, \dots, N_k$, de cada una de las $k=1, \dots, K$ cadenas de un diagrama en paralelo; el tramo de obra falla cuando fallan todos los diagramas en serie y, éstos fallan cuando falla al menos uno de los i

modos adscrito a uno de los j estados de la cadena. La probabilidad de fallo de la obra o del tramo p_{f,T_L} , en el intervalo de tiempo T_L se calculará dependiendo de las relaciones entre los diferentes modos de fallo en cada cadena en serie: independientes, correlacionados y no correlacionados. Si $\Pr[B_{kji}] = p_{kji,T_L}$, es la probabilidad de que ocurra el modo de fallo B_{kji} en el intervalo de tiempo T_L , la probabilidad conjunta del diagrama en paralelo se calculará por una de las siguientes formas.

7.5.2.1 M_{kj} modos y N_k estados límite mutuamente excluyentes de la cadena k

Si los modos y los estados límite son mutuamente excluyentes, la probabilidad de fallo en la cadena k se calculará por,

$$p_{f,k,T_L} = 1 - \sum_{j=1}^{i=I} \sum_{i=1}^{i=I} (1 - p_{kji,T_L}) = 1 - \sum_{m=1}^{m=M} (1 - p_{km,T_L})$$

donde, p_{km,T_L} , es la probabilidad de que ocurra uno de los $m = 1, \dots, M$, modos de fallo de la cadena k adscritos a los estados límite últimos o de servicio.

7.5.2.2 Probabilidad conjunta de fallo del tramo con un diagrama paralelo

La probabilidad conjunta de fallo p_{f,T_L} , del tramo con un diagrama en paralelo formado por K cadenas en serie cada una de ellas formadas por modos de fallo y estados límite mutuamente excluyentes se calculará por,

$$p_{f,T_L} = \prod_{k=1}^{k=K} \left\{ 1 - \sum_{m=1}^{m=M} (1 - p_{km,T_L}) \right\} = \prod_{k=1}^{k=K} p_{f,k,T_L}$$

Comentario

Obsérvese que para que se produzca el fallo del tramo deberán fallar todas las cadenas, con al menos un modo de fallo en cada una de ellas. La fiabilidad se calculará por $r_{f,T_L} = 1 - p_{f,T_L}$.

Estas fórmulas se pueden aplicar para el caso de fallos dúctiles en los que la capacidad resistente de cada elemento se conserva hasta que fallan todos; es decir, se supone que no se produce un colapso progresivo total o parcial.

7.5.2.2 Cuando hay modos que no son mutuamente excluyentes

En algunos casos no es posible suponer que la colección completa esté formada por modos mutuamente excluyentes. En ese caso, la probabilidad conjunta de fallo del tramo p_{f,T_L} , se calculará dependiendo de la relación existente entre los diferentes modos: independientes, todos correlacionados y modos unos correlacionados y otros no.

7.5.2.2.1 Modos correlacionados

En el caso en que algunas de las cadenas del diagrama paralelo tengan modos correlacionados y no correlacionados para evaluar la probabilidad conjunta de fallo del tramo, se aplicará a cada una de ellas lo recomendado en los apartados 6.3.2.3 y siguientes.

7.5.2.2.2 Cotas superior e inferior de la probabilidad conjunta

En el caso en que los modos del diagrama en paralelo estén, unos correlacionados, otros no correlacionados, y otros independientes, la probabilidad conjunta de fallo del tramo de obra estará contenida en el intervalo definido por,

- Cota inferior de la probabilidad conjunta

$$(p_{f,T_L})_{\text{inf}} > \prod_{k=1}^{k=K} p_{f,k,T_L}$$

- Cota superior de la probabilidad conjunta

$$(p_{f,T_L})_{\text{sup}} \leq \max (p_{kji,T_L})$$

7.5.3 Diagrama compuesto

La probabilidad conjunta de la obra o tramo de obra frente a modos de fallo, adscritos a estados límite últimos y de servicio y descritos por un diagrama compuesto, se evaluará, en cada caso, teniendo en cuenta lo recomendado en los apartados anteriores para cada una de las cadenas que la componen.

7.5.4 Sensibilidad de la probabilidad conjunta frente a algunos modos de fallo

Se recomienda analizar la sensibilidad de la probabilidad conjunta de fallo frente a algunos modos de fallo cuya probabilidad de ocurrencia se reduzca drásticamente con pequeñas modificaciones de la geometría del tramo o de alguno de sus elementos y cuya repercusión económica en el conjunto de la obra no sea significativa.

Comentario

En los diques en talud la berma de pié cumple una función de soporte del manto principal cuyo fallo puede dar lugar al colapso de la obra. Esta berma suele ubicarse a una profundidad del orden de la altura de ola de cálculo con respecto a la bajamar media viva equinoccial. En esas condiciones el peso de las piezas de la berma no suele ser alto y su colocación no suele requerir grandes grúas. Por ello, incrementar el peso de la pieza en un 50% no suele representar dificultades constructivas o encarecimiento de la obra y, sin embargo, puede reducir la probabilidad de fallo en más de un orden de magnitud.

7.6 Operatividad

Elegido un tramo de obra y un intervalo de tiempo T_L que, en general será una fase de proyecto, el cálculo de la operatividad se realizará según el tipo de diagrama de modos de parada, aplicando las mismas formulaciones, y con las mismas consideraciones que las recomendadas en la sección 7.5. Cuando el intervalo de tiempo es el año, la duración de la fase de proyecto se expresa en años y éstos son independientes, la operatividad en la fase es igual a la de un año medio.

7.6.1 Número medio de paradas operativas

En el caso de un diagrama en serie y modos mutuamente excluyentes, se calculará como la suma del número medio de paradas de cada uno de los modos. En el caso de diagramas en paralelo el número medio de paradas se calculará para cada una de las cadenas en serie que forman el diagrama en paralelo.

Comentario

El número medio de paradas debido a la ocurrencia de un modo i en V intervalos de tiempo es $N_{m,i} = V * p_i / m_i$, donde m_i es la duración media de la parada y p_i la probabilidad de ocurrencia de la parada en el intervalo de tiempo. La duración media se puede obtener a partir de la función de distribución del modo de parada en el intervalo de tiempo (vease la ROM 0.4).

Si los modos de parada son independientes, el tiempo total de parada debida a la ocurrencia de M modos en V es igual a $V * \sum_{i=1}^M p_i$; el número medio de paradas del tramo en V intervalos de tiempo es $N_m = \sum_{i=1}^M V * p_i / m_i = V * \sum_{i=1}^M p_i / m_i$.

7.6.2

Duración máxima de cada modo

En un diagrama en serie, la duración máxima probable se calculará para cada uno de los modos de forma independiente. Ésta, no podrá superar los valores recomendados en la tabla 2.6.

7.7

Tramos con IRE ≥ 20 e ISA < 20

En los casos en los que se recomienda verificar mediante un método de Nivel I un tramo de obra cuyo carácter general es IRE ≥ 20 e ISA < 20 , será suficiente evaluar su seguridad frente a los modos de fallo principales. El cálculo de la probabilidad de fallo se hará según se detalla en los siguientes apartados.

7.7.1

Probabilidad de presentación de un modo

Los modos pertenecerán al conjunto de los modos principales adscritos a los estados límite últimos y su causa será la ocurrencia de un agente del medio físico. En estos casos, la probabilidad de fallo p_{n,T_L} del tramo de obra frente al modo n , se podrá aproximar por la probabilidad de excedencia del valor del agente predominante.

7.7.1.1

Periodo de retorno de la ocurrencia de un modo principal

Es el tiempo medio T_R , expresado en número de intervalos de tiempo, que transcurre entre dos excedencias consecutivas de un valor de la variable aleatoria considerada. Suponiendo que los sucesos que ocurren en cada intervalo de tiempo son independientes, definiendo la función de distribución de la variable X en el intervalo de tiempo por $F_X(x) = \Pr[X \leq x]$, el periodo de retorno se puede expresar por,

$$p_n = [1 - F_X(x)] \quad T_R = \frac{1}{1 - F_X(x)} = \frac{1}{p_n}$$

Comentario

Con estas hipótesis, la probabilidad de fallo de la obra o tramo en la vida útil V (intervalos de tiempo) frente al modo principal provocado por la excedencia del valor del factor de proyecto predominante X , es,

$$p_{n,V} = 1 - [1 - F_X(x)]^V = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^V$$

En general la vida útil se define en años, por lo que el intervalo de tiempo de definición de $F_X(x)$ será el año. En el caso de un dique de abrigo bajo la acción de los estados de mar extremos $X = (H_s)_{max}$, donde $(H_s)_{max}$ es el estado de mar máximo de cada año, $F_X(x)$ es el régimen de estados de mar extremos o régimen de temporales. La función de distribución extremal se suele representar con la letra G .

7.7.2 Probabilidad conjunta de fallo en T_L

La probabilidad conjunta de fallo del tramo de la obra en T_L , frente a los modos $n = 1, \dots, N$, se calculará suponiendo éstos mutuamente excluyentes en un diagrama en serie, es decir

$$p_{f,T_L} = 1 - \sum_{n=1}^{n=N} (1 - p_{n,T_L})$$

Comentario

La fiabilidad r_f del tramo de obra se obtendrá mediante, $r_f = 1 - p_f$. El valor máximo de p_f se ajustará a lo recomendado en la tabla 2.2, máxima probabilidad conjunta de fallo del tramo frente a modos adscritos a los estados límite últimos.

7.7.2.1 Periodo de retorno y probabilidad conjunta de fallo

Considerando los modos principales mutuamente excluyentes, admitiendo la independencia estadística entre los sucesos que ocurren en las unidades de intervalo de tiempo, y tomando el año como unidad de intervalo de tiempo, el inverso del periodo de retorno T_{RC} , del tramo de obra cuya vida útil es V , se puede aproximar por la suma de los inversos de los periodos de retorno de cada modo de fallo individual, siempre que éstos sean suficientemente grandes,

$$\frac{1}{T_{RG}} \approx \frac{1}{T_{R1}} + \frac{1}{T_{R2}} + \dots + \frac{1}{T_{RI}}$$

Si los modos principales son mutuamente excluyentes o estadísticamente independientes, la aproximación es exacta.

7.8 Optimización Económica del Tramo

A partir del carácter de la obra se recomiendan los niveles de fiabilidad, funcionalidad y operatividad que debe satisfacer un tramo de la misma durante la fase de proyecto servicio. Estos niveles son generales y, en algunas ocasiones, por diversas razones es conveniente y necesario analizar la solución obtenida, teniendo en cuenta la probabilidad conjunta y su coste, comparándola con la solución óptima económica. Este análisis se puede realizar en función de un único factor, (p.ej. parámetro geométrico) o de varios de ellos. En el primer caso, el análisis se denomina univariado, mientras que en el segundo el análisis será multivariado. La optimización económica de la obra se podrá hacer, frente a la probabilidad conjunta de ocurrencia de modos adscritos a los estados límite últimos, de servicio u operativos. Los dos primeros tienen que ver con una economía de fallo y por tanto el óptimo económico debe ser congruente con el carácter general de la obra definido por el IRE y el ISA. La optimización frente a los estados límite operativos se corresponde con la economía en pleno funcionamiento.

Se pueden establecer, por tanto, diversos esquemas de optimización económica del tramo, según se optimicen el coste de la fase de construcción, el coste del tramo en la fase de servicio, el coste de las dos fases conjuntamente frente a estados límite últimos y de servicio, el coste-beneficio con diferentes restricciones relacionadas con la explotación del tramo o incluso considerando los costes de construcción, conservación y reparación.

Por tanto, para resolver el problema de la optimización es necesario definir la función objetivo y las restricciones. Del resultado de este análisis se podrán especificar estrategias de reparación, conservación, y, en su caso, de rentabilidad económica.

7.8.1 Optimización, fiabilidad y funcionalidad

La solución óptima económica del tramo de obra frente a la fiabilidad o la funcionalidad mediante un análisis univariado se realizará obteniendo el valor mínimo del coste total del tramo, teniendo en cuenta el coste de reparación y las repercusiones sociales y ambientales que la ocurrencia de los posibles modos de fallo pueden ocasionar. Estos costes deberán expresarse en función del factor de proyecto seleccionado para la optimización económica del tramo.

El resultado del cálculo es la magnitud del factor de proyecto, la probabilidad conjunta de fallo y el coste total óptimo del tramo en el intervalo de tiempo considerado, que, en general, será la vida útil.

Comentario

En España se realizan estudios de optimización de la sección tipo de los diques de abrigo en talud y verticales tomando como variable de optimización la altura de ola significativa del estado de mar máximo. Por lo general este estudio se realiza para un único modo de fallo, por ejemplo la salida de piezas del manto principal o el deslizamiento del dique sobre la banqueta de enrase. La extensión de estos métodos para incluir otros modos de fallo mutuamente excluyentes es sencilla.

Otras veces, es conveniente utilizar un parámetro geométrico del tramo de obra para optimizar económicamente la alternativa, bien frente a estados límite últimos, de servicio u operativos. Un ejemplo es la cota de coronación de un dique que protege instalaciones, bienes y personas.

7.8.1.1 Optimización económica y carácter de la obra

El proyecto de una obra comienza con la evaluación del carácter general de la obra en función de los índices IRE e ISA, los cuales se determinan, de forma aproximada, suponiendo la ocurrencia del modo de fallo pésimo adscrito a un estado límite último o de servicio. A partir de los valores de los índices se definen valores recomendados, entre ellos, de la vida útil de la obra y de la probabilidad conjunta de fallo.

En la mayoría de los casos, ya que unos pocos modos de fallo, llamados principales, son los que proporcionan las pautas para el dimensionamiento del tramo, el IRE e ISA de la alternativa verificada estará en el mismo intervalo de valores que los estimados al comienzo del proyecto. No obstante, podrá ocurrir que la solución óptima económica tenga una probabilidad conjunta de fallo que difiera sensiblemente de la recomendada en las tablas 2.2 y 2.3. En estos casos, el promotor de la obra decidirá sobre la solución a adoptar, si bien se recomienda optar por aquella, asociada a la probabilidad conjunta de fallo más pequeña.

7.8.2 Optimización y operatividad

Se podrá optimizar el coste de construcción de la obra frente a la operatividad aplicando los mismos criterios descritos en el apartado anterior y considerando los modos de parada operativa. De manera análoga, se deberá comprobar que las evaluaciones iniciales del IREO e ISAO son coherentes con los resultados obtenidos para la alternativa adoptada y que el óptimo económico no lleva asociado niveles de operatividad inferiores.

Comentario

La posible contradicción entre los resultados de la verificación y de la optimización económica se puede producir porque los valores de la probabilidad conjunta de fallo recomendados en las tablas 2.2 y 2.3 han sido establecidos por criterios de uniformidad con otras obras civiles, experiencia previa y otras consideraciones subjetivas que, en algunas obras particulares, pueden no darse. La aplicación de esta ROM proporcionará en los próximos años, una fuente de datos necesaria para la correcta calibración de los valores de aquellas Tablas. Es probable, que de esa calibración se obtenga una mejor concordancia entre los resultados de la aplicación del procedimiento de cálculo y los de los estudios de optimización.

7.8.3

Optimización socio-económico

En general, en un análisis coste-beneficio se incluyen, además de los presentados en el apartado anterior, otros aspectos relacionados con la valoración de las consecuencias del fallo del tramo y sobre las acciones a tomar e inversiones marginales a realizar. Para ello, es necesario considerar tanto factores de proyecto del tramo como otros relacionados con restricciones presupuestarias, técnicas, de orden socio-económico y lo que se conoce con el nombre de "seguridad cualitativa".

En este término se incluyen temas tan variados como la valoración del establecimiento de estructuras de gestión de la obra o tramo, de instrumentación y seguimiento del comportamiento de la obra, etc., y cuya existencia, o no, influye significativamente en la determinación de los costes.

7.8.3.1

Función objetivo

El criterio socio económico de optimización plantea maximizar la función objetivo ($B - C_T$), del tramo de obra a lo largo de todas las fases de proyecto, construcción, servicio, conservación y reparación y desmantelamiento, donde B es el beneficio total del tramo de obra y C_T es el coste total del proyecto, incluyendo el de construcción, el de las acciones para mejorar la seguridad cualitativa, los seguros, las medidas correctoras, los costes financieros, la conservación y el coste probable asociado a la ocurrencia del fallo. En este tipo de estudios se podrá considerar la maximización de la función objetivo, sujeta a cuantas restricciones se desee, incluyendo la fiabilidad, la funcionalidad y la operatividad, un coste máximo de construcción o un coste anual de conservación,

$$\begin{aligned} \text{Función Objetivo:} \quad & \text{Máx } [B(x) - C_T(x)] \\ & X(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{Restricciones:} \quad & C_T(x) < C_{\max} \\ & E(x) < E_{\max} \\ & p_{f,ELU} < [p_f], \text{ Tabla 2.2} \\ & p_{f,ELS} < [p_f], \text{ Tabla 2.3} \\ & p_{f,ELO} < [p_f], \text{ Tabla 2.4} \end{aligned}$$

Si el valor del vector x hace variar el escenario inicial de fallo y operatividad definido por el IRE, ISA, IREO e ISAO se deberá optimizar de nuevo la función objetivo con los nuevos valores de la probabilidad de fallo y parada asociados a los nuevos valores de los índices de repercusión. Por tanto, la optimización debe seguir, en su caso, un método recursivo.

En todos los casos la optimización de la función objetivo deberá ser coherente con el Manual de Evaluación de Inversiones de Puertos del Estado.

7.9

Conservación de Obras e Instalaciones

Todo sistema productivo con un conjunto de obras e instalaciones debe disponer de una estrategia de conservación global. Este es el caso del ente público Puertos del Estado que, en la actualidad, está definiendo los criterios y las estrategias de conservación del conjunto de sus obras e instalaciones, que no son el objeto de esta ROM.

7.9.1

Conservación del tramo de obra

Todas las obras marítimas y portuarias proyectadas de acuerdo con estas Recomendaciones deberán tener un estudio y una propuesta de conservación durante su vida útil, coordinado con los criterios y estrategias generales de conservación del sistema productivo, que concrete aquellos aspectos que, por su particularidad, no estén específicamente contemplados en aquellos.

7.9.1.1

Plan de conservación

Es el documento que refleja las actuaciones de conservación a aplicar durante la vida útil de la obra para mantener los requisitos de proyecto. Se pueden incluir actuaciones a corto, medio y largo plazo. El alcance y contenidos del plan se definirá en función del carácter general de la obra y se describen en las Recomendaciones específicas.

7.9.1.2

Conservación y optimización económica

Uno de los métodos para establecer un plan de conservación es mediante un proceso de minimización del coste total, definiendo la función objetivo coste, suma de la inversión y de la programación de su conservación,

$$C_T(x) = C_I(x) + \sum_t C_{t,Rep}(x) + \sum_t C_{t,Mant.}(x)$$

en función del vector de factores de proyecto x , sometida a restricciones presupuestarias, por efectos externos (Plan de Inspección, Auscultación e Instrumentación), por fiabilidad y funcionalidad.

Comentario

Incluso cumpliendo todas las restricciones tanto presupuestarias, como por efectos externos y por fiabilidad y funcionalidad, es posible que de este proceso de optimización se obtenga el resultado de una inversión menor que la prevista y unos mayores gastos presupuestados.

7.10

Observación de las Obras e Instalaciones

(4) En estas Recomendaciones el término inspección se utiliza para la observación visual; el término auscultación se refiere a la medida puntual e in situ de algún factor de proyecto mediante instrumentos; finalmente, el término instrumentación se aplica a la instalación de equipos que permiten la medición y registro continuos en el tiempo de los factores de proyecto

Todo sistema productivo con un conjunto de obras e instalaciones debe tener una estrategia de inspección, auscultación e instrumentación. Este es el caso del ente público Puertos del Estado que, en la actualidad, está definiendo los criterios y las estrategias⁴ del conjunto de sus obras e instalaciones, que no son el objeto de esta ROM.

7.10.1 Inspección, auscultación e instrumentación

Finalizada la construcción del tramo e iniciada su vida útil, el comportamiento de los materiales y de otros factores de proyecto, una vez construido el tramo puede ser objeto de campañas de inspección, auscultación e instrumentación.

7.10.2 Plan de inspección, auscultación e instrumentación

El alcance y contenidos del plan se definirá en función del carácter general de la obra y se describen en las Recomendaciones específicas.

7.10.2.1 Objetivos del Plan

Los objetivos de la inspección, auscultación e instrumentación deberán ser múltiples: (1) comprobación de los valores y los modelos de probabilidad de los parámetros de proyecto y de los agentes y de las acciones y, en su caso, análisis de su incidencia en la probabilidad conjunta de fallo y en la operatividad prevista en el proyecto; (2) ayuda para decidir sobre el momento más oportuno para las actuaciones de conservación y reparación y (3) generación de un banco de datos que a medio plazo permita completar los modelos de probabilidad de algunos factores de proyecto, el desarrollo de nuevas ecuaciones de verificación y métodos de evaluación de la probabilidad de fallo y otros.

7.10.2.2 Contenidos del Plan

Para cumplir los objetivos anteriores, el plan de inspección, auscultación e instrumentación deberá definir, al menos, los siguientes aspectos,

1. Extensión espacial y temporal
2. Cadencia de la inspección
3. Factores de proyecto inspeccionados
4. Método de observación y auscultación y, en su caso, de medida y registro
5. Temporalidad: permanente o no permanente

7.11 Fallo de Obras Existentes

Debido a la aleatoriedad intrínseca de los parámetros y de las variables de proyecto, todas las obras marítimas construidas por el hombre están destinadas a que su fiabilidad y funcionalidad decrezca con el tiempo y consecuentemente a fallar.

7.11.1 Incertidumbre y revisión de la probabilidad conjunta de fallo

La probabilidad conjunta de fallo del tramo calculada por cualesquiera de los métodos recomendados no está exenta de incertidumbre. Por ello, una vez que el tramo ha entrado en servicio se recomienda revisar la evaluación de la probabilidad conjunta de fallo en función de la información que se vaya recolectando, principalmente de los valores máximos de los agentes del medio físico. Para ello se podrá suponer que la fiabilidad en la vida útil $r_{f,v} = 1 - p_{f,v}$, es una variable con modelo de probabilidad, p. ej. la función beta.

7.11.2

Cálculo regresivo de comportamiento del tramo

Una vez que el tramo de la obra ha entrado en funcionamiento se inicia su deterioro natural y se comienza a disponer de datos de las campañas de inspección, auscultación e instrumentación, información real de los agentes físicos que actúan sobre ella. A partir de esta información se deberá comprobar el deterioro del tramo y la secuencia, número y magnitud de los agentes, si la evaluación de la probabilidad conjunta de fallo se ajusta a lo previsto en el proyecto y si la conservación del tramo es eficaz.

Para evaluar el comportamiento residual del tramo frente a los modos, se podrán aplicar las funciones de supervivencia, de peligro y vida fiable.

Comentario

Tiempo de supervivencia es el que debe transcurrir hasta que ocurre el primer fallo desde la entrada en servicio del tramo o desde su última reparación. Función de fiabilidad es la probabilidad de que el tramo no falle en al menos t intervalos de tiempo desde la entrada en servicio. Función peligro es la probabilidad condicional de que el tramo falle en el siguiente intervalo de tiempo habiéndose comportado correctamente en los intervalos anteriores, desde la entrada en servicio o desde la última reparación. Vida fiable es el tiempo requerido para que la fiabilidad del tramo (valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo) decrezca por debajo de la fiabilidad recomendada.

7.11.3

Reparación del tramo

A falta de mejor información, con carácter general, será necesario iniciar las obras de reparación del tramo cuando el valor estimado de la probabilidad de fallo del mismo frente a uno de los modos adscrito a un estado límite para el resto de las unidades de tiempo de la vida útil, sea inferior a la probabilidad correspondiente a la fase de proyecto o cuando el análisis derivado de la inspección y auscultación del tramo así lo recomienden.

7.11.4

Desmantelamiento

Cuando el tramo de obra haya finalizado su vida útil o cuando su seguridad y servicio no esté garantizada mediante la conservación y la reparación, se deberá proceder a su desmantelamiento.

7.12

Anejo: Ejemplo de Cálculo de la Probabilidad Conjunta

Considérese un dique vertical con tres modos de fallo principales o elementos muestrales: s_1 : deslizamiento, s_2 : vuelco y s_3 : erosión de la banquetta. Estos elementos junto con el suceso nulo, \emptyset , forman una colección completa y, por tanto, son el espacio muestral de los modos de fallo, $\Omega_s = \{\emptyset, s_1, s_2, s_3\}$.

7.12.1

Colección de sucesos

A partir de estos elementos muestrales se puede formar una colección de posibles sucesos de modos de fallo mediante la combinación de los elementos muestrales incluyendo los sucesos complementarios.

Los sucesos más elementales son los que contienen cada uno de los modos de fallo y sus corres-

pondientes sucesos complementarios: $S_1(s_1)$, S_1^c , $S_2(s_2)$, S_2^c , $S_3(s_3)$ y S_3^c . Supóngase que la probabilidad de cada uno de los modos de fallo principales en un año son, $\Pr[S_1] = 0.050$, $\Pr[S_2] = 0.001$ y $\Pr[S_3] = 0.010$. Teniendo en cuenta que cada suceso y su complementario son mutuamente excluyentes, se tiene que $\Pr[S_1^c] = 0.950$, $\Pr[S_2^c] = 0.999$ y $\Pr[S_3^c] = 0.990$. La formulación de otros sucesos se apoya en la unión y la intersección de sucesos. Concretamente, el suceso que consiste en que ocurra en un año el vuelco o el deslizamiento o la erosión de la banqueta es el suceso unión, $S_1 \cup S_2 \cup S_3$, y el suceso que consiste en que no ocurra ninguno de los tres modos de fallo es el complementario de la unión, $= \{S_1^c \cap S_2^c \cap S_3^c\}$, que es igual a la intersección de los sucesos complementarios, $= \{S_1^c \cap S_2^c \cap S_3^c\}$.

7.12.2 Modos de fallo mutuamente excluyentes

En el caso de que los modos de fallo, S_1 , S_2 y S_3 , sean mutuamente excluyentes, sus intersecciones son nulas y no pueden ocurrir simultáneamente. Los posibles estados por los que en el intervalo de tiempo (año) puede pasar el dique vertical son, o ha deslizado o ha volcado o se ha erosionado la banqueta o no ha fallado. A efectos de probabilidad, teniendo en cuenta que la probabilidad de todos los sucesos posibles debe ser igual a la unidad, y con los datos disponibles, la probabilidad de que en el año no ocurra ningún fallo es,

$$\Pr[S_1^c \cap S_2^c \cap S_3^c] = \Pr[\] = 1 - 0.061 = 0.939$$

En estas circunstancias, una colección completa de sucesos, Ω , está formado por las combinaciones de los siguientes sucesos

$$\Omega = \{S_1, S_2, S_3, S_1^c \cap S_2^c \cap S_3^c\}$$

A partir de esta información se puede calcular,

1. La probabilidad de que el dique falle por deslizamiento, por vuelco o erosión de la banqueta en un año

$$p_{f,1} = \Pr[S_1 \cup S_2 \cup S_3] = \sum_{i=1}^3 \Pr[S_i] = 0.050 + 0.001 + 0.010 = 0.061$$

Tal y como se ha visto, esta probabilidad también se puede calcular por medio de la probabilidad del complementario de la unión del suceso o de la intersección de los sucesos complementarios,

$$p_{f,1} = 1 - \Pr[\{S_1^c \cap S_2^c \cap S_3^c\}] = 1 - \Pr[\{S_1^c \cap S_2^c \cap S_3^c\}] = 0.061$$

La probabilidad de no fallo en un año es $1 - p_{f,1} = 0.937$. Es conveniente comprobar que los sucesos complementarios de los modos de fallo no son estadísticamente independientes, puesto que

$$\Pr[S_1^c] \Pr[S_2^c] \Pr[S_3^c] \neq \Pr[\{S_1^c \cap S_2^c \cap S_3^c\}]$$

2. La probabilidad de que en 25 años el dique falle por alguno de los tres modos de fallo es

$$p_{f,25} = \{ \Pr[S_1 \cup S_2 \cup S_3] \}_{25 \text{ años}} = 1 - (1 - p_{f,1})^{25} = 1 - \{1 - \Pr[S_1 \cup S_2 \cup S_3]\}^{25} = 0.7927$$

7.12.3 El vuelco y la erosión de banquetta no son excluyentes

En muchas ocasiones se ha observado que el dique vertical vuelca una vez que la banquetta se ha erosionado. En este caso la probabilidad condicionada de que el dique vuelque sabiendo que ha ocurrido la erosión de la banquetta no es nula. Supóngase que $\Pr[S_2 | S_3] = 0.5$, y que las probabilidades de ocurrencia del deslizamiento, vuelco y erosión de la banquetta, considerados como modos de fallo individuales son las adoptadas anteriormente.

En estas circunstancias, una colección completa de sucesos, Ω , está formado por la combinación de los siguientes modos de fallo,

$$\Omega = \{S_1, S_2, S_3, S_1^c S_2^c S_3^c\}$$

La probabilidad del suceso intersección vuelco y erosión de la banquetta, se obtiene en función del dato de probabilidad condicionada,

$$\Pr[S_2 S_3] = \Pr[S_2 | S_3] \Pr[S_3] = 0.50 \cdot 0.010 = 0.0050.$$

Con estos datos se puede obtener,

1. La probabilidad de que el dique falle por deslizamiento, o por vuelco o erosión de la banquetta en un año

$$p_{f,1} = \Pr[S_1 \cup S_2 \cup S_3] = \sum_{i=1}^3 \Pr[S_i] - \Pr[S_2 S_3] = 0.0610 - 0.0050 = 0.0560.$$

La probabilidad de que no falle en un año es, 0.944. Al igual que en el caso anterior,

$$p_{f,1} = 1 - \Pr[\{S_1 \cup S_2 \cup S_3\}^c] = 1 - \Pr[S_1^c S_2^c S_3^c] = 0.0560$$

y los sucesos complementarios de los modos de fallo no son estadísticamente independientes.

2. La probabilidad de que el dique falle en 25 años por alguno de los tres modos de fallo.

$$p_{f,25} = 1 - (1 - p_{f,1})^{25} = \{ \Pr[S_1 \cup S_2 \cup S_3] \}_{25 \text{ años}} = 1 - (1 - p_{f,1})^{25} = 1 - \{1 - \Pr[S_1 \cup S_2 \cup S_3]\}^{25} = 0.7632$$

7.12.4 El vuelco y la erosión de la banquetta son estadísticamente independientes

En este supuesto, la colección de sucesos es la misma que en el caso anterior, pero la probabilidad condicionada del vuelco supuesto que ha ocurrido la erosión de la banquetta es, $\Pr[S_2 | S_3] = \Pr[S_2]$, y la probabilidad del suceso intersección es, $\Pr[S_2 S_3] = \Pr[S_2] \Pr[S_3]$. La probabilidad de que el dique falle por deslizamiento, o vuelco o erosión de la banquetta en un año es 0.06099, la probabilidad de que no falle en un año es, $1 - p_{f,1} = 0.9390$, y la probabilidad de que falle en 25 años por alguno de los tres modos es, $p_{f,25} = 0.7926$.

7.12.4 El vuelco y la erosión y el desplazamiento y la erosión no son mutuamente excluyentes

Seguidamente, se considera el caso en el que las probabilidades de ocurrencia del vuelco y el deslizamiento condicionadas a la ocurrencia de la erosión de la banquetta y del vuelco condicionada a que haya ocurrido el deslizamiento y la erosión de la banquetta no son nulas:

$$\Pr[S_2 | S_3] = 0.50; \Pr[S_1 | S_3] = 0.25;$$

Además se incluye la probabilidad de que el dique vuelque, condicionado a que haya habido erosión de la banqueta y deslizamiento, $\Pr[S_2 | S_1 S_3] = 0.80$ y $\Pr[S_1 S_2] = 0.0001$

Aplicando la definición de la probabilidad condicionada y teniendo en cuenta los valores de las probabilidades individuales de S_1 , S_2 y S_3 , se obtiene,

$$\begin{aligned} \Pr[S_2 S_3] &= 0.0050; \Pr[S_1 S_3] = 0.0025; \\ \Pr[S_2 S_1 S_3] &= \Pr[S_2 | S_1 S_3] \Pr[S_1 | S_3] \Pr[S_3] = 0.0020 \end{aligned}$$

En estas circunstancias, una colección completa de sucesos, , está formado por la combinación de los siguientes modos de fallo,

$$= \{S_1, S_2, S_3, S_1 S_2, S_1 S_3, S_2 S_3, S_1 S_2 S_3, S_1^c S_2^c S_3^c\}$$

En este caso la probabilidad de que en un año el dique falle, por vuelco o por deslizamiento o por erosión de la banqueta, tiene la siguiente expresión,

$$p_{f,1} = \Pr[S_1 \cup S_2 \cup S_3] = \sum_{i=1}^3 \Pr[S_i] - \Pr[S_1 S_2] - \Pr[S_1 S_3] - \Pr[S_2 S_3] + \Pr[S_1 S_2 S_3] = 0.0554$$

la probabilidad de que no falle en un año es, 0.9445 y la probabilidad de que falle al menos una vez con uno de los modos de fallo, deslizamiento, vuelco o erosión de la banqueta es, $p_{f,25} = 0.7601$.

Se observa que los modos de fallo vuelco y deslizamiento siguen siendo mutuamente excluyentes.

7.12.6

Probabilidad de fallo de diversos supuestos de combinación de sucesos

El último caso desarrollado se adecúa bastante al comportamiento real de un dique vertical frente a la acción de los agentes climáticos con tres modos de fallo principales que están relacionados entre sí. Por ello, a continuación se tratará de responder a algunas preguntas que completen el análisis de la probabilidad de fallo del dique en 1 y 25 años y que pueden ayudar en la definición de estrategias de conservación y reparación.

- Cuestiones:

1. Probabilidad de que el dique falle por los tres modos de fallo simultáneamente.
2. Probabilidad de que el dique falle por la ocurrencia de dos modos de fallo: deslizamiento y erosión de la banqueta (vuelco y erosión de la banqueta, deslizamiento y vuelco).
3. Probabilidad de que el dique falle simultáneamente por alguna de las combinaciones de dos de los tres modos de fallo.
4. Probabilidad de que, habiendo ocurrido un deslizamiento, el dique falle por vuelco y erosión de la banqueta.

- Respuestas:

1. Ocurrencia simultánea de los tres modos de fallo.

$$p_{f(3),1} = \Pr[S_1 S_2 S_3] = \Pr[S_2 | S_1 S_3] \Pr[S_1 S_3] = 0.80 \cdot 0.25 \cdot 0.010 = 0.0020$$

$$P_{f(3),25} = 1 - (1 - P_{f(3),1})^{25} = 0.0048$$

2. Ocurrencia simultánea de dos modos de fallo.

deslizamiento y erosión: $\{Pr[S_1 S_3]\}_1 = 0.0025$; $\{Pr[S_1 S_3]\}_{25} = 0.0607$

vuelco y erosión: $\{Pr[S_2 S_3]\}_1 = 0.0050$; $\{Pr[S_2 S_3]\}_{25} = 0.1178$

deslizamiento y vuelco: $\{Pr[S_1 S_2]\}_1 = 0.0001$; $\{Pr[S_1 S_2]\}_{25} = 0.0025$

3. Ocurrencia de al menos una de las combinaciones posibles de dos modos de fallo.

$$P_{f(2),1} = Pr[(S_1 S_2 S_3^c) \cup (S_1 S_2^c S_3) \cup (S_1^c S_2 S_3)] = Pr[S_1 S_2 S_3^c] + Pr[S_1 S_2^c S_3] + Pr[S_1^c S_2 S_3]$$

$$P_{f(2),1} = Pr[(S_1 S_2 S_3^c) \cup (S_1 S_2^c S_3) \cup (S_1^c S_2 S_3)] = 0.0075$$

La probabilidad de que ocurra simultáneamente alguna de las combinaciones de dos modos de fallo posibles, al menos una vez en 25 años, es

$$P_{f(2),25} = 1 - \{1 - Pr[(S_1 S_2 S_3^c) \cup (S_1 S_2^c S_3) \cup (S_1^c S_2 S_3)]\}^{25} = 0.1716$$

4. Probabilidad de que falle por erosión y vuelco, sabiendo que ha fallado por deslizamiento.

$$Pr[S_2 S_3 | S_1] = \frac{Pr[S_1 S_2 S_3]}{Pr[S_1]} = 0.040$$

7.12.7 Colección completa de sucesos mutuamente excluyentes

Supóngase que, en condiciones de trabajo extremas, el dique vertical puede fallar sólomente, por deslizamiento, vuelco y erosión de la banquetta, denominados, s_1 , s_2 y s_3 , por lo que estos elementos muestrales forman una colección completa. El espacio de los modos de fallo se debe formar por la combinación de estos elementos muestrales. Los tres modos de fallo individuales se han denominado anteriormente, S_1 , S_2 y S_3 . Supóngase que siguiendo el procedimiento desarrollado en los apartados anteriores se han obtenido los siguientes valores de la probabilidad de fallo en un año,

$$Pr[S_1]_1 = 0.045; Pr[S_2]_1 = 0.020; Pr[S_3]_1 = 0.050;$$

En el supuesto de que estos modos de fallo son mutuamente excluyentes, la probabilidad conjunta de fallo del tramo de obra en una vida útil de 25 años por alguno de los tres modos de fallo es, $P_{f,ELU} = 0.9528$. Esta probabilidad tan alta se puede reducir de diversas maneras. En general, el coste de la protección de la banquetta de enrase no se eleva mucho aumentando el tamaño de los elementos de la protección. Con ello se puede conseguir que, $Pr[S_3]_1 \rightarrow 0$, con lo que, $P_{f,ELU} = 0.8137$. En estas condiciones es necesario reducir un orden de magnitud la probabilidad de ocurrencia de los modos S_1 y S_2 , ($Pr[S_1]_1 = 0.0045$; $Pr[S_2]_1 = 0.0020$), para que se obtenga, $P_{f,ELU} = 0.1504$.

7.12.8 Colección de sucesos que no son mutuamente excluyentes

Colección de sucesos que no son mutuamente excluyentes

Si los sucesos individuales no son mutuamente excluyentes, el cálculo se hace más engorroso porque es necesario considerar algunas combinaciones de sucesos que antes se han despreciado. Se supondrá que el vuelco y el deslizamiento son mutuamente excluyentes, es decir que si ocurre el

vuelco no puede ocurrir el deslizamiento y, por tanto, la intersección, $S_1 S_2 = \emptyset$, y $\Pr[S_1 S_2] = 0$, al igual que el deslizamiento y la erosión de la banquetta, $S_1 S_3 = \emptyset$. Sin embargo se considerará que es posible que la erosión de la banquetta y el vuelco puedan ocurrir simultáneamente, $S_2 S_3 \neq \emptyset$, y que la probabilidad de que ocurra el vuelco habiendo ocurrido la erosión de la banquetta es $\Pr[S_2 | S_3] = 0.20$, y en consecuencia,

$$\Pr[S_2 S_3] = \Pr[S_2 | S_3] \Pr[S_3] = 0.20 * 0.050 = 0.010$$

En este caso, el espacio de sucesos mutuamente excluyentes contiene las siguientes combinaciones de sucesos, $S_2 S_3$, $S_2 S_3^c$, $S_2^c S_3$, puesto que ahora,

$$\Pr[S_2 S_3^c] = \Pr[S_3^c | S_2] \Pr[S_2] = \{1 - \Pr[S_3 | S_2]\} \Pr[S_2] = \{1 - \Pr[S_3 S_2] \Pr[S_2]\} \Pr[S_2] = 0.010 \quad \Pr[S_2]$$

El espacio de sucesos mutuamente excluyentes está formado por,

$$\Omega = \{S_2 S_3, S_2 S_3^c, S_2^c S_3, S_1 S_2^c S_3^c, S_1^c S_2^c S_3^c\}$$

La probabilidad de que ocurra, al menos uno de los sucesos de fallo S_1 , o S_2 , o S_3 es la probabilidad de la unión de los sucesos mutuamente excluyentes que incluyen sucesos con fallo, es decir

$$\Pr[(S_1 S_2^c S_3^c) \cup (S_2 S_3) \cup (S_2 S_3^c) \cup (S_2^c S_3)] = \Pr[S_1 S_2^c S_3^c] + \Pr[S_2 S_3] + \Pr[S_2 S_3^c] + \Pr[S_2^c S_3]$$

de tal forma que, la probabilidad de no fallo, es decir de la ocurrencia del suceso $S_1^c S_2^c S_3^c$, ahora se puede escribir,

$$\Pr[S_1^c S_2^c S_3^c] = 1 - \Pr[(S_1 S_2^c S_3^c) \cup (S_2 S_3) \cup (S_2 S_3^c) \cup (S_2^c S_3)]$$

Con la ayuda de un diagrama de Venn se puede ver que la probabilidad de que ocurra, al menos uno de los sucesos de fallo S_1 , o S_2 , o S_3 , es,

$$\Pr[S_1 \cup S_2 \cup S_3] = \Pr[S_1] + \Pr[S_2] + \Pr[S_3] - \Pr[S_2 S_3] = 0.1050$$

REGISTRO EN EL PROGRAMA ROM

Al objeto de poder tenerle informado de las posibles correcciones , nueva edición, de la publicación de la PARTE II de la ROM 0.0 y de otras Recomendaciones, le agradecemos su registro en el Programa ROM, mediante el envío de la ficha adjunta a:

REGISTRO PROGRAMA ROM

Dirección de Infraestructuras y Servicios Portuarios

PUERTOS DEL ESTADO

Campo de las Naciones

Avda. del Partenón, 10

28042 Madrid

También puede enviar sus comentarios sobre esta publicación ROM 0.0 PARTE I, a la siguiente dirección de correo electrónico: **programarom@puertos.es**

Muchas gracias.

RECOMENDACIONES PARA OBRAS MARÍTIMAS

| | | | |
|----------------------------|-------------|------------------|-------------|
| NOMBRE | | | |
| DIRECCIÓN | | | |
| EMPRESA U ORGANISMO | | | |
| DEPT./SECCIÓN | | | |
| POBLACIÓN | C.P. | PROVINCIA | PAIS |
| TELEFONO | FAX | E-MAIL | |

REGISTRO PROGRAMA ROM
Dirección de Infraestructuras y Servicios Portuarios
PUERTOS DEL ESTADO Campo de las Naciones.
Avda. del Partenón, 10.
28042 Madrid

