

# ***Capítulo IV***

## ***Definición de los estados y situaciones de proyecto***





# Índice Capítulo IV

## CAPÍTULO IV. DEFINICIÓN DE LOS ESTADOS Y SITUACIONES DE PROYECTO

4.1.	SELECCIÓN DE LOS ESTADOS A CONSIDERAR .....	25
4.1.1.	Para métodos de Nivel I .....	26
4.1.1.1.	Verificación de modos de fallo adscritos a estados límite últimos .....	28
4.1.1.1.1.	Simultaneidad y valores compatibles de los agentes que definen los estados límite últimos de proyecto .....	30
4.1.1.2.	Verificación de modos de fallo adscritos a estados límite de servicio .....	39
4.1.1.3.	Verificación de modos de parada operativa .....	39
4.1.2.	Para métodos de Niveles II y III .....	47
4.2.	DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS .....	48
4.2.1.	Geometría de la obra de atraque y amarre .....	48
4.2.2.	Geometría del terreno .....	49
4.2.3.	Niveles de las aguas .....	50
4.3.	DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL TERRENO .....	50
4.3.1.	Para formulaciones deterministas y determinista-probabilistas .....	50
4.3.2.	Para formulaciones probabilistas .....	51
4.4.	DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN .....	51
4.5.	DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL MEDIO FÍSICO .....	52
4.6.	DEFINICIÓN DE LOS AGENTES Y SUS ACCIONES .....	53
4.6.1.	Agente gravitatorio ( $q_g$ ) .....	54
4.6.1.1.	Peso propio ( $Q_{g,1}$ ) .....	54
4.6.1.2.	Pesos muertos ( $Q_{g,2}$ ) .....	57
4.6.2.	Agentes del medio físico ( $q_f$ ) .....	58
4.6.2.1.	Agentes atmosféricos básicos y climáticos marinos .....	59
4.6.2.1.1.	Formulación de las acciones debidas a los agentes climáticos .....	71
4.6.2.2.	Otros agentes climáticos atmosféricos ( $q_{f,3}$ ) .....	98
4.6.2.3.	Agente térmico ( $q_{ft}$ ) .....	100
4.6.2.3.1.	Formulación de las acciones debidas a los agentes térmicos ( $Q_{ft}$ ) .....	101
4.6.2.4.	Agente sísmico ( $q_{fs}$ ) .....	104
4.6.2.4.1.	Formulación de las acciones debidas al sismo ( $Q_{fs,1}$ ) .....	109
4.6.2.4.2.	Formulación de las acciones debidas al maremoto ( $Q_{fs,2}$ ) .....	114
4.6.3.	Agentes del terreno ( $q_t$ ) .....	117
4.6.3.1.	Formulación de las acciones debidas o transmitidas por el terreno ( $Q_t$ ) .....	120
4.6.4.	Agentes de uso y explotación ( $q_v$ ) .....	123
4.6.4.1.	Estacionamiento y almacenamiento de mercancías ( $q_{v,1}$ ) .....	124
4.6.4.1.1.	Formulación de las acciones debidas a los agentes de estacionamiento y almacenamiento ( $Q_{v,1}$ ) .....	134

4.6.4.2.	Manipulación de mercancías y embarque y desembarque de pasajeros ( $q_{v,2}$ ) .....	135
4.6.4.2.1.	Manipulación de mercancías en áreas de operación .....	135
4.6.4.2.1.1.	Cargas transmitidas por sistemas discontinuos de carga y descarga del buque por elevación ( $q_{v,21}$ ) .....	136
4.6.4.2.1.1.1.	Cargas transmitidas por equipos fijos y de movilidad restringida con capacidad de carga y descarga del buque por elevación ( $q_{v,211}$ ) .....	136
4.6.4.2.1.1.2.	Cargas transmitidas por equipos de movilidad no restringida con capacidad de carga y descarga del buque por elevación ( $q_{v,212}$ ) .....	157
4.6.4.2.1.1.3.	Cargas transmitidas por equipos auxiliares sobre neumáticos, de movilidad no restringida, utilizados para el transporte horizontal y depósito ( $q_{v,213}$ ) .....	168
4.6.4.2.1.2.	Cargas transmitidas por sistemas discontinuos de carga y descarga del buque por medios rodantes ( $q_{v,22}$ ) .....	180
4.6.4.2.1.2.1.	Cargas transmitidas por equipos de movilidad no restringida con capacidad de carga y descarga del buque por medios rodantes ( $q_{v,221}$ ) .....	180
4.6.4.2.1.3.	Cargas transmitidas por sistemas continuos de carga y descarga del buque ( $q_{v,23}$ ) .....	187
4.6.4.2.1.3.1.	Cargas transmitidas por sistemas de carga y descarga de graneles líquidos ( $q_{v,231}$ ) .....	187
4.6.4.2.1.3.2.	Cargas transmitidas por sistemas continuos de carga y descarga de graneles sólidos ( $q_{v,232}$ ) ..	193
4.6.4.2.2.	Manipulación de mercancías en áreas de almacenamiento ( $q_{v,24}$ ) .....	196
4.6.4.2.3.	Embarque y desembarque de pasajeros ( $q_{v,25}$ ) .....	207
4.6.4.2.4.	Manipulación de embarcaciones pesqueras, deportivas y de recreo ( $q_{v,26}$ ) .....	212
4.6.4.2.5.	Formulación de las acciones debidas a los agentes de manipulación de mercancías y embarque y desembarque de pasajeros ( $Q_{v,2}$ ) .....	217
4.6.4.3.	Tráfico terrestre ( $q_{v,3}$ ) .....	219
4.6.4.3.1.	Tráfico viario ( $q_{v,31}$ ) .....	219
4.6.4.3.2.	Tráfico ferroviario ( $q_{v,32}$ ) .....	225
4.6.4.3.3.	Formulación de las acciones debidas a los agentes del tráfico terrestre ( $Q_{v,3}$ ) .....	231
4.6.4.4.	Operaciones de los buques ( $q_{v,4}$ ) .....	232
4.6.4.4.1.	Definición de la flota de buques en el atraque. Buques de proyecto .....	233
4.6.4.4.2.	Efectos hidrodinámicos inducidos por los buques en tránsito ( $q_{v,41}$ ) .....	239
4.6.4.4.2.1.	Ondas generadas por los buques en tránsito .....	250
4.6.4.4.2.1.1.	Acciones debidas a las ondas generadas por los buques en tránsito .....	256
4.6.4.4.3.	Acciones de atraque ( $q_{v,42}$ ) .....	256
4.6.4.4.3.1.	Métodos para la determinación de las acciones de atraque .....	259
4.6.4.4.3.1.1.	Definición de las condiciones límite de operatividad para la realización de las maniobras de atraque .....	259
4.6.4.4.3.1.2.	Cuantificación de las energías cinéticas cedidas al sistema de atraque ( $E_f$ ) .....	260

4.6.4.4.3.1.3.	Definición de la fuerza de impacto ( $Q_{v,42 T}$ ) ....	294
4.6.4.4.3.1.4.	Definición de la fuerza de rozamiento ( $Q_{v,42 L}$ )	313
4.6.4.4.3.2.	Criterios para la elección del tipo y características del sistema de atraque .....	315
4.6.4.4.3.3.	Transmisión de las cargas de atraque a la estructura .....	323
4.6.4.4.4.	Impacto accidental del buque durante las operaciones de atraque ( $q_{v,43}$ ) ....	324
4.6.4.4.4.1.	Métodos para la determinación de las acciones debidas al impacto accidental del buque durante las operaciones de atraque .....	326
4.6.4.4.4.2.	Comprobaciones complementarias para la elección del tipo y características del sistema de atraque asociadas con la energía cinética debida a impactos accidentales del buque durante las maniobras de atraque .....	329
4.6.4.4.5.	Corrientes generadas por las hélices y otros equipos de propulsión y maniobra de los buques ( $q_{v,44}$ ) .....	331
4.6.4.4.5.1.	Máxima velocidad horizontal de la corriente en el fondo marino .....	333
4.6.4.4.5.2.	Velocidad horizontal de la corriente en el fondo marino mínima .....	342
4.6.4.4.6.	Acciones debidas a los portalones del buque ( $q_{v,45}$ ) .....	343
4.6.4.4.6.1.	Características de los portalones de los buques .....	345
4.6.4.4.6.2.	Determinación de las acciones debidas a los portalones del buque .....	345
4.6.4.4.6.3.	Cargas mínimas debidas a los portalones del buque .....	353
4.6.4.4.7.	Acciones de amarre ( $q_{v,46}$ ) .....	354
4.6.4.4.7.1.	Métodos para la determinación de las acciones de amarre ...	359
4.6.4.4.7.1.1.	Definición de la configuración y características del sistema de amarre y defensas .....	360
4.6.4.4.7.1.2.	Métodos estadísticos a partir de sistemas de amarre monitorizados .....	377
4.6.4.4.7.1.3.	Modelos matemáticos .....	387
4.6.4.4.7.1.4.	Modelos experimentales .....	458
4.6.4.4.7.2.	Criterios de aplicación y de distribución de las cargas de amarre en los elementos estructurales .....	460
4.6.4.4.7.3.	Cargas de amarre mínimas en puntos de amarre y defensas	463



## 4.1 SELECCIÓN DE LOS ESTADOS A CONSIDERAR

Para analizar un determinado modo de fallo adscrito a un estado límite es preciso plantear para la obra o tramo de la misma una geometría, unas propiedades de los materiales, del medio físico y del terreno, y unos agentes y acciones que, en general, serán una simplificación de la realidad válida durante un cierto intervalo de tiempo durante el cual los factores de proyecto y la respuesta estructural, funcional u operativa de la obra pueden suponerse estacionarios estadísticamente. Estas simplificaciones se denominan *estados o situaciones*.

La duración del estado cuantifica el tiempo que debe transcurrir para que se produzca un cambio significativo en la manifestación del proceso y, en consecuencia, el tiempo durante el cual se admite que se cumple la hipótesis de estacionariedad. Por tanto, en todos los casos la descripción de los diferentes factores de proyecto de actuación simultánea que definen un estado debe fundamentarse en la compatibilidad de sus escalas temporales de variabilidad con la duración del estado. En general, el agente predominante es el que selecciona la duración del estado, debiendo utilizarse, para los restantes agentes, descriptores que caractericen su variabilidad en el plazo temporal del estado en el cual se realiza la verificación.

En función de su variabilidad temporal en el estado considerado, los factores de proyecto se clasifican en:

- ◆ Permanentes, cuando la probabilidad de ocurrencia del valor representativo adoptado para el factor de proyecto es aproximadamente igual a la unidad en el estado considerado y el tiempo medio de actuación o de excedencia de dicho valor sea aproximadamente igual a la duración de dicho estado.
- ◆ No permanentes o variables, cuando la probabilidad de ocurrencia del valor representativo adoptado para el factor de proyecto esté próxima a la unidad en el estado considerado y cuyo tiempo medio de actuación o de excedencia sea menor que la duración de dicho estado.
- ◆ Extraordinarios o insólitos, cuando la probabilidad de ocurrencia del valor representativo adoptado para el factor de proyecto sea considerablemente menor que la unidad en el estado considerado y cuyo tiempo medio de actuación sea mucho menor que la duración de dicho estado.

Por tanto, un factor de proyecto no tiene el carácter de permanente, variable o extraordinario de forma intrínseca, sino que depende del estado que se considere.

Para cada modo de fallo, la selección de estados a considerar en los procesos de verificación se realizará analizando todas las posibles condiciones en las que se encontrará la obra de atraque durante cada una de las fases de proyecto, considerando cuando pueden adoptarse valores estacionarios en sentido estadístico de los diferentes factores de proyecto: geometría, propiedades y agentes y acciones. La selección de estados que, como mínimo, se debe considerar en el proyecto de obras de atraque y amarre se ajustará a los siguientes criterios:

- ◆ Para cada fase de proyecto (construcción, servicio, reparación y desmantelamiento) se seleccionarán estados que tomen en consideración:
  - Las modificaciones en la geometría de la obra.
  - Las variaciones en el comportamiento de los materiales de construcción.
  - Los cambios en el comportamiento del terreno.
  - Los ciclos de solicitud<sup>(1)</sup> a los que se encuentra sometida la instalación de atraque, los cuales se definen para cada modo de fallo o parada a partir de la excedencia (para los modos de parada y para

(1) La ROM 0.0 y la ROM 1.0 utilizan la denominación “ciclos de operatividad” refiriéndose a los “ciclos de calmas” o ciclos de carencia o de reducida solicitud. Esta denominación es clara en aquellos casos en los que la excedencia de valores umbrales de los agentes climáticos define todos los ciclos de solicitud a los que está sometida la obra portuaria, lo que es totalmente aplicable a obras de abrigo. No obstante, en obras de atraque hay ciclos de solicitud asociados a la situación de normal uso y explotación de la instalación (p.e. buque en el atraque realizándose operaciones de carga y descarga o de embarque y desembarque de pasajeros), definidos por la no excedencia de determinados valores de los agentes de uso y explotación o climáticos, utilizándose también la denominación “de operatividad” para estos casos. Por dichas razones y con el objetivo de evitar que aspectos semánticos puedan dar lugar a confusiones técnicas, se recomienda utilizar únicamente la denominación “de operatividad” para definir los de solicitud asociados a condiciones normales de operación, usando “ciclos de calma” para cuando se emplee en el sentido conceptual de la ROM 0.0 y ROM 1.0.

los modos de fallo en condiciones de trabajo extremas y excepcionales) o no excedencia (para modos de fallo en condiciones operativas) de niveles umbral de los agentes predominantes o agentes que desencadenan respectivamente la ocurrencia de cada modo de fallo (último o de servicio) o de parada en cada caso. A estos efectos, para una obra de atraque y amarre los agentes predominantes para la definición de los diferentes ciclos de solicitud a los que está sometida la instalación son los climáticos, los de uso y explotación y, en su caso, el sismo u otras acciones extraordinarias o accidentales, en función de las condiciones de trabajo consideradas.

- ◆ Respecto al comportamiento del terreno se analizará su variación, simultáneamente a la de las presiones intersticiales, durante todas las fases de proyecto, tanto en relación con su evolución en el tiempo (p.e. debido a procesos de consolidación naturales o artificiales) como en relación con las cargas actuantes (p.e. durante la actuación del sismo o el oleaje) con el objeto de tomar en consideración y analizar todos los estados que a estos efectos pueden presentarse durante cada una de las fases de proyecto o establecer la compatibilidad entre el comportamiento del terreno y las cargas actuantes. Como mínimo, se analizarán las posibilidades de que puedan presentarse los siguientes tipos de estados:
  - a) *Situaciones sin drenaje*: el terreno se comporta en condiciones no drenadas y, por tanto, durante un cierto intervalo de tiempo se producen aumentos o disminuciones de las presiones intersticiales por la actuación de los diferentes agentes.
  - b) *Situaciones con drenaje*: el terreno se comporta en condiciones drenadas, no produciéndose en consecuencia aumentos o reducciones transitorios de las presiones intersticiales por la actuación de los diferentes agentes.

Sin perjuicio de que en algunos casos deban analizarse situaciones intermedias, en particular cuando se presentan acciones oscilatorias.

En la ROM 0.5 y en los apartados de esta Recomendación correspondientes a los agentes y acciones cuya actuación puede modificar el comportamiento del terreno se analizan las condiciones del terreno y de los agentes actuantes en las que pueden presentarse cada una de estas situaciones.

A los efectos de organizar los cálculos de verificación de cada modo de fallo o parada, se recomienda que la definición de los estados de proyecto se realice considerando los ciclos de solicitud a que está sometida la obra en cada diferente configuración geométrica, así como en cada tipo de comportamiento de los materiales y del terreno que puedan darse durante la fase de proyecto considerada. Esta ordenación da lugar a la división de la fase de proyecto en diversas subfases, en cada una de las cuales puede considerarse que la configuración geométrica y el comportamiento de los materiales y del terreno tienen un carácter permanente.

La selección de los estados límite de proyecto que en cada fase y subfase de proyecto se deben considerar en el proyecto de obras de atraque y amarre se ajustará a los siguientes criterios en función del método adoptado para la formulación y resolución de la ecuación de verificación:

#### 4.1.1 Para métodos de Nivel I

Para formulaciones deterministas y determinista-probabilista de las ecuaciones de verificación se considerará siempre que los agentes están definidos por sus variables de estado.

Para la verificación de modos de fallo o parada, los estados de proyecto en cada fase o subfase diferenciada se agrupan en condiciones de trabajo, en función de los diferentes ciclos de solicitud en los que se presentan los agentes predominantes. Para las obras de atraque y amarre se considerarán, como mínimo las siguientes condiciones de trabajo:

- ◆ Condiciones de trabajo operativas.
- ◆ Condiciones de trabajo extremas.
- ◆ Condiciones de trabajo excepcionales.



Las condiciones de trabajo permiten definir las diferentes condiciones de simultaneidad y los valores compatibles de los agentes a los que está sometida la obra de atraque, las cuales caracterizan los estados límite que deben considerarse en las verificaciones mediante métodos de Nivel I. En definitiva, las diferentes combinaciones de agentes y acciones que deben considerarse en cada fase o subfase de proyecto para la verificación de cada uno de los modos de fallo y parada.

Las condiciones de trabajo se definen en función del agente considerado como predominante de acuerdo con los siguientes criterios:

- a) *Estados representativos de los diferentes ciclos de solicitud asociados a la explotación de la instalación de atraque: **Condiciones de trabajo operativas (CTI)**:* En estas condiciones los agentes predominantes son los de uso y explotación, los cuales, una vez definidos, pueden en general correlacionarse con los agentes climáticos (viento, oleaje, corriente, nivel del mar y otras perturbaciones del medio físico). En las obras de atraque y amarre se distinguirán, como mínimo, los siguientes modos de parada generales que dan lugar a las condiciones de trabajo operativas:

- ◆ Accesibilidad marítima.
- ◆ Operaciones de atraque del buque.
- ◆ Permanencia de los buques en el atraque sin realizar operaciones de carga y descarga.
- ◆ Realización de las operaciones de carga y descarga de mercancías o embarque y desembarque de pasajeros con buque atracado.

Sin perjuicio de que deban distinguirse otros modos de parada que afecten a operaciones en las que no intervenga el buque o la interacción buque-estructura (p.e. operaciones de depósito, apilamiento, recogida y transporte en el área de almacenamiento).

Cada uno de estos modos de parada puede ser debido a una o a varias causas de paralización, dando lugar a los diferentes límites de operatividad de los agentes de uso y explotación que pueden afectar a la operación considerada en el emplazamiento.

Los estados límite en las condiciones de trabajo correspondientes a cada modo de parada dependen de las causas de paralización, definiéndose para cada una de ellas a partir de los valores límite de operatividad del o de los agentes de uso y explotación que afectan a la operación considerada, establecidos, bien por criterios de explotación, ambientales, legales o de seguridad (p.e. máximos movimientos admisibles del buque en el atraque compatibles con las operaciones de carga y descarga) o bien a partir de ventanas de operatividad asociadas a la probabilidad de no excedencia de los agentes de uso y explotación correspondientes al valor establecido como requisito de proyecto para la causa de paralización considerada, en los casos en que los agentes de uso y explotación no tengan establecidos límites absolutos de operatividad (p.e. los asociados con los niveles de las aguas exteriores) o, cuando los tengan, se considere que la instalación de atraque por cualquier razón debe limitar su operatividad por debajo de dichos valores límite. En estos casos dicha probabilidad se definirá por medio de los regímenes medios conjuntos y de persistencias de los agentes de uso y explotación. En ausencia de regímenes conjuntos podrá admitirse la utilización de regímenes marginales del agente predominante y de los agentes independientes de él, así como de regímenes medios condicionados y de funciones de correlación para los agentes dependientes de los mismos.

No obstante, dado que los agentes de uso y explotación tienen una gran dependencia de los agentes climáticos y debido a una menor complejidad en el tratamiento, habitualmente se definen estos estados límite a partir de los valores umbrales de los agentes climáticos que provocan los diferentes modos de parada operativa para los buques, los equipos y los medios de explotación considerados, establecidos igualmente, bien por criterios de explotación, ambientales, legales o de seguridad, bien a partir de ventanas operativas definidas por medio de los regímenes medios conjuntos o marginales de dichos agentes, considerando la probabilidad de no excedencia definida como requisito de proyecto para el modo de parada y causa de paralización considerados. En ausencia de regímenes conjuntos también podrá admitirse la utilización de regímenes marginales de los agentes independientes así como de regímenes

medios condicionados y funciones de correlación para los agentes dependientes de los mismos de acuerdo con lo definido a estos efectos en esta Recomendación. Si los valores límite de los agentes climáticos establecidos para definir una parada operativa no son alcanzables en el emplazamiento con una probabilidad anual de presentación mayor de  $10^{-3}$  en el régimen medio, se considerarán los valores asociados a dicha probabilidad para definir el estado límite de proyecto en condiciones operativas.

En los casos en los que el Promotor de la instalación de atraque considere que ésta no debe tener limitada su operatividad para una determinada operativa y agente climático (p.e. quiere asegurar la permanencia del buque en el atraque independientemente de la velocidad del viento), bien por criterios de explotación, bien por condicionantes infraestructurales o bien porque el valor límite de operatividad de un determinado agente climático no es alcanzable en el emplazamiento con probabilidades relevantes, los estados límites en esta condición de trabajo cuando se considere dicho agente como predominante se tratarán como estados asociados a condiciones extremas. También se tratarán como estados asociados a condiciones extremas cuando no se dispongan sistemas y protocolos de parada automática de la instalación y de no operatividad cuando se superen los valores umbral establecidos de los agentes climáticos.

- b) *Estados representativos de los ciclos de solicitud asociados a la actuación de agentes climáticos y térmicos de carácter extremo: **Condiciones de trabajo extremas (CT2)***: estados representativos de los ciclos de solicitud de los agentes climáticos y térmicos (viento, oleaje, corriente, nivel del mar, ...), que son considerados los agentes predominantes. En estas condiciones se considera que la obra de atraque y amarre no está operativa, salvo cuando el agente climático o térmico predominante no incida en la operatividad o cuando el Promotor establezca específicamente que la instalación no tenga limitada alguna operativa independientemente de la circunstancia climática asociada con dicho agente. Los estados límite en estas condiciones se definirán a partir de los regímenes extremos conjuntos de los agentes climáticos con un mismo origen, considerando la probabilidad de excedencia igual o menor correspondiente al cumplimiento de los requerimientos de seguridad o de servicio definidos como requisito de proyecto para el modo de fallo considerado en estas condiciones. En ausencia de regímenes conjuntos podrá admitirse la utilización de regímenes marginales del agente predominante y de los agentes independientes de él, así como de regímenes condicionados y funciones de correlación para los agentes dependientes de los mismos de acuerdo con lo establecido a estos efectos en esta Recomendación.
- c) *Estados representativos de los ciclos de solicitud de una instalación cuando actúa un agente extraordinario o insólito: **Condiciones de trabajo excepcionales (CT3)***: estados representativos de los ciclos de solicitud asociados a la actuación de un agente climático de carácter extraordinario (CT3,1), de una acción accidental o insólita (CT3,2) y del agente sísmico (CT3,3) para el sismo extremal y CT3,32 para el sismo extraordinario). Los estados límites se definirán a partir de valores nominales o, en su caso, de los regímenes extremos de dichos agentes y de los regímenes medios del resto de agentes.

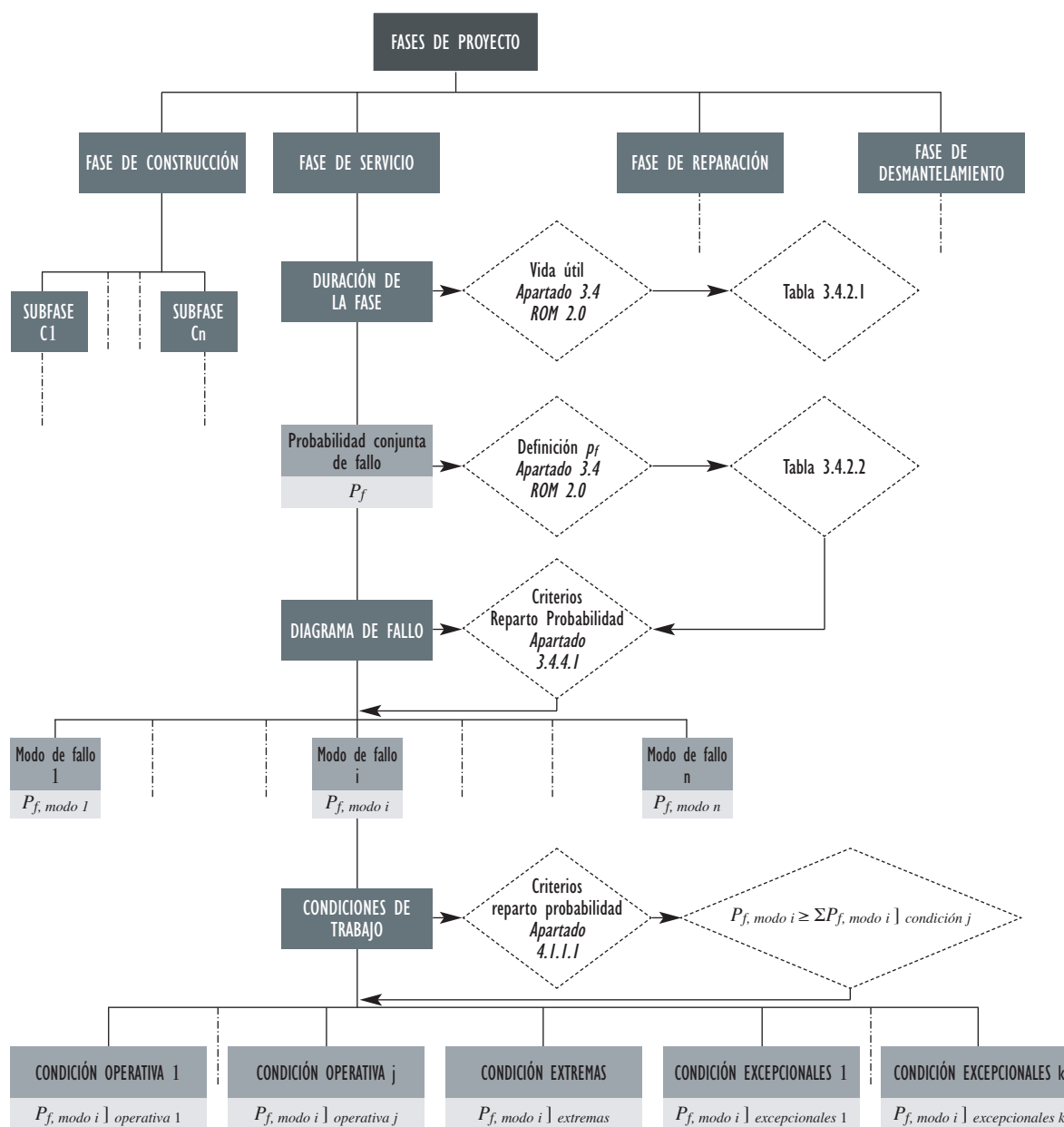
#### 4.1.1.1. Verificación de modos de fallo adscritos a estados límite últimos

Para las obras de atraque y amarre se verificará que la probabilidad de ocurrencia de cada modo de fallo (*i*) adscrito a estados límites últimos en la fase de proyecto considerada es menor o igual que la probabilidad de fallo asignada a dicho modo en el correspondiente diagrama de fallo ( $p_{f, \text{modo } i}$ ). Ver apartados 2.5.3 y 2.5.4. de la ROM 1.0 y 3.4.4. de esta Recomendación (Ver figura 4.1.1.1).

Considerando que las condiciones de trabajo (ciclos de solicitud) a las que se encuentra sometida la obra de atraque en cada fase de proyecto (operativas, extremas y excepcionales) son mutuamente excluyentes, la probabilidad de que se produzca un modo de fallo en la fase considerada será igual a la suma de las probabilidades de que se produzca dicho modo de fallo en cada una de las condiciones de trabajo que puedan diferenciarse (Ver figura 4.1.1.1). Es decir, deberá cumplirse:

$$p_{f, \text{modo } i} \geq p_{f, \text{modo } i} \mid \text{condiciones operativas } 1 + \dots + p_{f, \text{modo } i} \mid \text{condiciones operativas } j + \dots + p_{f, \text{modo } i} \mid \text{condiciones extremas} + p_{f, \text{modo } i} \mid \text{condiciones excepcionales } 1 + \dots + p_{f, \text{modo } i} \mid \text{condiciones excepcionales } k$$

**Tabla 4.1.1.1. Diagrama metodológico para la distribución de la probabilidad de que se produzca un modo de fallo  $i$ , adscrito a Estados Límite Últimos, entre las diferentes condiciones de trabajo**



La distribución de probabilidades entre las distintas condiciones de trabajo se realizará por criterios de optimización económica, asignando prácticamente toda la probabilidad de fallo a la condición de trabajo que es más crítica para el dimensionamiento de la obra y verificando que en el resto de condiciones de trabajo se cumpla el criterio incondicional de no fallo ( $p_f < 10^{-4}$ ). Dicha condición de trabajo crítica suele estar asociada al agente predominante para el modo de fallo analizado en el emplazamiento. Es decir, la condición de trabajo crítica será una condición operativa si el agente predominante para el modo de fallo es de uso y explotación, la condición extrema si el agente predominante es climático y una condición excepcional si el agente predominante es extraordinario o accidental. En el caso de que no esté claramente definido cuál es el agente predominante para el modo de fallo analizado en el emplazamiento, deberá repetirse la verificación del modo considerando que el fallo puede producirse sucesivamente en cada una de las condiciones de trabajo y, por tanto, asignando toda la probabilidad de ocurrencia del modo a dicha condición, con el objeto de alcanzar el dimensionamiento óptimo de la obra.

Sin perjuicio de lo anterior, simplifícadamente como criterio general podrá adoptarse que en condiciones operativas así como en condiciones excepcionales cuando están asociadas a la actuación de un agente extraordinario definido mediante un valor nominal no se debe producir el fallo (se debe verificar el criterio incondicional de no fallo), asignando toda la probabilidad de fallo bien a condiciones extremas bien a excepcionales, siempre que el agente extraordinario que defina esta última condición de trabajo tenga una función de distribución conocida, dependiendo de cual de estas condiciones sea más crítica para el dimensionamiento <sup>(2)</sup>.

#### 4.1.1.1.1. SIMULTANEIDAD Y VALORES COMPATIBLES DE LOS AGENTES QUE DEFINEN LOS ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS DE PROYECTO

##### a) En condiciones de trabajo extremas

En la verificación de un modo de fallo en condiciones de trabajo extremas debidas a la actuación del agente climático considerado predominante para dicho modo de fallo se aplicarán los siguientes criterios de simultaneidad y compatibilidad para la definición de los valores representativos de los agentes que actúan en dicha condición de trabajo, los cuales definen el estado límite de proyecto:

- a<sub>1</sub>) Se excluirán los agentes climáticos que por razones físicas no pueden ocurrir o porque los valores del agente asociado a la probabilidad de fallo del modo en estas condiciones no son relevantes en el emplazamiento. Además se excluirán los agentes climáticos que no pueden ser simultáneos, bien por razones físicas en el emplazamiento o bien por ser la probabilidad conjunta prácticamente nula para todo el intervalo de valores posibles.
- a<sub>2</sub>) Para cada conjunto de agentes climáticos simultáneos se determinarán los valores compatibles de los diferentes agentes, teniendo en cuenta su origen y dependencia y la probabilidad de ocurrencia adjudicada al modo de fallo en condiciones extremas de acuerdo con lo dispuesto en este apartado. Para formulaciones determinista-probabilistas de las ecuaciones de verificación de los modos de fallo, simplifícadamente se considerará que el fallo en estas condiciones está inducido principalmente por el agente climático que se considere predominante en el emplazamiento para el modo de

(2) Esta simplificación es razonable, dado que en las obras portuarias en general las condiciones de operación están definidas considerando que no se superan valores límite de operatividad de los agentes de uso y explotación y, por tanto, que no hay incertidumbre en la excedencia de los mismos, por lo que debe exigirse que quede garantizado el criterio incondicional de no fallo en dichas condiciones de trabajo ( $p_f < 10^{-4}$ ). El mismo razonamiento es válido para condiciones excepcionales cuando están asociadas a la actuación de un agente extraordinario definido a través de un valor nominal.

(3) En el caso general, la probabilidad de ocurrencia, al menos una vez durante la fase analizada, de un modo de fallo causado por el conjunto de los ciclos de sollicitación de los agentes climáticos que pueden considerarse como no excluyentes e independientes entre sí [(A ciclo atmosférico global), B (ciclo atmosférico local), C (ciclo astronómico), ...] es:

$$1 - \Pi(1 - p_i) = [p_A + p_B + p_C] - [p_A p_B + p_A p_C + p_B p_C] + [p_A p_B p_C] \approx p_A + p_B + p_C$$

Siendo  $p_A, p_B$  y  $p_C$ , respectivamente la probabilidad de ocurrencia del modo de fallo considerando que es producido por un único agente climático. Esta formulación es válida si consideramos que el fallo puede ser inducido únicamente por el ciclo de sollicitación de un agente, tanto actuando sólo como simultáneamente con otros agentes, sin considerar la posibilidad de que el fallo pueda ser debido a la contribución de efectos de los agentes de diferentes ciclos actuando conjuntamente, los cuales por separado no llegarían a producir el fallo. Es decir, sin considerar que la actuación de un agente de un ciclo con un determinado valor puede no dar lugar al fallo (p.e. oleaje), pero sí este mismo valor conjuntamente con la actuación simultánea de otro ciclo (p.e. oleaje+marea astronómica). En la expresión no interviene la probabilidad de presentación conjunta, sino la de que se produzcan fallos debidos a cada ciclo tanto aislada como simultáneamente. Dada en la práctica la inviabilidad en cálculos de Nivel I de tomar en consideración todas y cada una de las variables que inciden y de las posibilidades existentes que dan lugar al fallo (que sí se consideran cuando la verificación se realiza en Niveles II y III), simplifícadamente en esta Recomendación es admisible para las formulaciones semiprobabilistas de las ecuaciones de verificación cumplir la anterior expresión realizando la hipótesis de que la ocurrencia del modo de fallo en condiciones extremas es causado únicamente por el ciclo de sollicitación del agente climático predominante para dicho modo y, por tanto el valor representativo que se adopta para la variable principal del mismo es el correspondiente a una probabilidad de excedencia en la fase de proyecto igual a la probabilidad asignada al modo de fallo analizado en dichas condiciones. A estos efectos es equivalente a considerar que los otros ciclos no pueden producir el fallo y que, por tanto, cuando se produce un fallo debido a la actuación del ciclo de sollicitación climática predominante, no es relevante para el fallo la situación en que se encuentran el resto de agentes climáticos independientes. Por dicha razón, del lado de la seguridad y por homogeneidad con el planteamiento

fallo analizado <sup>(3)</sup>. En el caso de que no esté claramente definido el agente climático que puede ser predominante en la inducción del modo de fallo considerado se repetirá el proceso de verificación sucesivamente para cada uno de los agentes que pudieran ser predominantes. En función de dicha probabilidad, se adoptará como valor representativo de la variable principal que define al agente climático predominante el siguiente:

◆ Para probabilidades de fallo > 5%

- El correspondiente a una probabilidad de excedencia en la fase de proyecto igual a la probabilidad adjudicada al modo de fallo, tomado en la función de distribución de extremos marginal de dicha variable. La relación entre la probabilidad de excedencia de una variable,  $n$ , durante una fase de proyecto de duración  $L(p_{n,L})$  y su periodo de retorno ( $T_R$ ) viene dada por la expresión:

$$p_{n,L} = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^L$$

◆ Para probabilidades de fallo  $\leq 5\%$ , siempre que se disponga de ecuaciones de verificación del modo de fallo taradas con coeficientes de mayoración y seguridad que lleven a las citadas probabilidades de fallo con los siguientes valores representativos <sup>(4)</sup>:

- Para fase de servicio, el correspondiente a un periodo de retorno ( $T_R$ ) de 50 años, obtenido de la función de distribución de extremos marginal de dicha variable, en su caso, en la dirección considerada.
- Para fases transitorias (construcción, reparación, fases transitorias de comportamiento del terreno, ...), el correspondiente a un periodo de retorno del mismo orden de magnitud que

utilizado para las verificaciones probabilistas (Niveles II y III) en las que trabajamos con la función de distribución extremal conjunta (todos los agentes están actuando en ciclo de sollicitación), para las variables principales asociadas a los agentes que definen los otros ciclos climáticos de sollicitación se adoptarán como valores representativos compatibles aquéllos cuya probabilidad conjunta de presentación de los ciclos de sollicitación sea sustancialmente la misma que la adoptada para definir el valor representativo de la variable principal del agente predominante. Es decir:

$$P_{v, \text{modo } i | \text{condiciones extremas}} = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^V > \left[1 - \left(1 - \frac{1}{T_{R1}}\right)^V\right] \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{1}{T_{R2}}\right)^V\right] \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{1}{T_{R3}}\right)^V\right]$$

Del lado de la seguridad, a falta de mejor criterio se recomienda adoptar como valores representativos compatibles de las variables principales de los agentes climáticos independientes del predominante los correspondientes a un periodo de retorno mínimo de 5 años en fase de servicio. Para fases transitorias, se adoptará el correspondiente a un periodo de retorno de 1 año.

(4) En los métodos de Nivel I, para la verificación de modos de fallo con criterio incondicional de no fallo o probabilidades de fallo pequeñas (< 5%), el valor representativo de la variable principal del agente predominante adoptado no suele coincidir con el correspondiente a una probabilidad de excedencia igual a la probabilidad adjudicada al modo de fallo. En general para estas probabilidades de fallo se adoptan otros valores representativos por las siguientes razones:

- Los valores correspondientes a probabilidades de presentación bajas de los agentes climáticos (Periodos de retorno altos > 1.000 años), obtenidos de las funciones de distribución extremas, suelen tener bandas de confianza muy grandes asociadas al nivel de confianza normalmente exigido del 90%, por lo que aplicar el método general definido para probabilidades de fallo > 0,05 con dicha incertidumbre estadística podría dar lugar a importantes sobredimensionamientos de las obras.
- En formulaciones deterministas o deterministas-probabilistas, muchas de las ecuaciones de verificación correspondientes a los distintos modos de fallo de pérdida de equilibrio estático, estructurales y geotécnicos normalmente utilizadas en la ingeniería civil están generalmente asociadas a condiciones nominales de no fallo ( $p_f < 10^{-4}$ ) o a muy bajas probabilidades de fallo ( $p_{f, \text{modo } i} < 10^{-2}$ ). Dichas ecuaciones están normalmente definidas con coeficientes de mayoración y/o seguridad considerando que los valores representativos de la variable climática predominante están asociados a probabilidades de presentación del orden de 0,5-0,6 durante la fase de proyecto analizada, lo que equivale a periodos de retorno del orden de magnitud de la duración de la fase de proyecto analizada (valores extremos medios en dicho periodo). Como criterio general, se adopta 50 años para fase de servicio de duración igual o menor a 50 años.

En aquellos modos de fallo, normalmente específicos de la ingeniería marítima y portuaria (p.e. modos de fallo de inestabilidad hidráulica), en los que no estén disponibles con validez reconocida ecuaciones de verificación definidas con coeficientes de mayoración y seguridad que lleven a probabilidades nominales de no fallo o bajas utilizando los citados valores representativos, deberá procederse a su obtención mediante la aplicación de métodos de Nivel II o III (Ver ROM 0.0). En tanto no se disponga de dichos coeficientes, es más fiable aplicar en estos casos a las ecuaciones de verificación disponibles los valores representativos de las variables climáticas obtenidos por medio de los procedimientos y la metodología establecidos para la definición de los valores representativos cuando las probabilidades de presentación del modo de fallo en estas condiciones de trabajo es mayor del 5%.

la duración de dicha fase para las fases transitorias prolongadas en relación con la duración de la fase de servicio y el doble de dicho valor para los casos de transitoriedad menos prolongada, con un valor mínimo de 2 años, obtenido de la función de distribución de extremos, en la dirección considerada.

**a<sub>3</sub>)** Los valores representativos compatibles de las variables principales del resto de los agentes climáticos que sean independientes del predominante serán, independientemente de la probabilidad de fallo:

- ◆ Para fase de servicio, el correspondiente a un periodo de retorno ( $T_R$ ) de 5 años, tomado en la función de distribución de extremos marginal de la variable, en la dirección considerada. Si la variable puede actuar en varias direcciones y se disponen de regímenes extremos direccionales, el valor representativo compatible asociado a un sector direccional  $i$  será igual al correspondiente al cuantil ( $1-p/f(\alpha_i)$ ) del régimen direccional de extremos utilizado o a cero si dicho valor es negativo, siendo  $f(\alpha_i)$  la frecuencia de presentación del sector direccional  $i$ , considerando únicamente las excedencias de los valores umbrales de la variable que definen las condiciones extremas y  $p$  la probabilidad de excedencia correspondiente al periodo de retorno de 5 años en la función extremal utilizada.
- ◆ Para fases transitorias, el correspondiente a un periodo de retorno de 1 año, tomado en la función de distribución de extremos, en la dirección considerada, obtenido de igual forma que lo señalado en el epígrafe anterior.

**a<sub>4</sub>)** Los valores representativos compatibles del resto de variables del agente climático predominante o de los otros agentes climáticos independientes se obtendrán a partir de los valores representativos adoptados para la variable principal del agente con el que están correlacionados, adoptando el cuantil del 85% o del 15% de la función de distribución de la variable correlacionada condicionada a dicho valor y, en su caso, dirección de la variable principal, en función de que sean más desfavorables los valores superiores o inferiores de la variable correlacionada.

**a<sub>5</sub>)** Los valores representativos del resto de agentes de actuación simultánea serán los valores característicos o de combinación definidos para cada uno de ellos en esta Recomendación.

- ◆ Para los agentes considerados de carácter permanente en el estado definido por el agente climático predominante se adoptará:
  - El valor característico en el caso de agentes no dependientes de los agentes climáticos
  - El valor de combinación en el caso de agentes en los que algún agente climático tenga incidencia en la definición del mismo. En este último caso para la definición del valor de combinación se considerará que la variable del agente climático que tiene incidencia en el mismo actúa con el valor representativo compatible con el adoptado para el agente climático predominante, de acuerdo con lo definido en este apartado.
- ◆ Para los agentes de carácter variable en el estado definido por el agente climático predominante, se adoptará:
  - El valor característico en el caso de agentes desfavorables para el modo de fallo considerado en los que el agente climático predominante tenga incidencia en la definición del mismo.
  - El valor de combinación en los casos de agentes, desfavorables para el modo de fallo considerado, en que ningún agente climático tenga incidencia en su definición o que el agente climático que tiene incidencia no sea el predominante. En este último caso para la definición del valor de combinación se considerará que la variable del agente climático que tiene incidencia en el mismo actúa con el valor representativo compatible con el adoptado para el agente climático predominante, de acuerdo con lo definido en este apartado <sup>(5)</sup>.

(5) Por ejemplo en el caso de una obra de atraque situada en una zona no abrigada, en la que el agente climático predominante que define la condición extremal es el oleaje, el valor representativo de las cargas transmitidas por equipos de manipulación de mercancías fijos o de movilidad restringida será el valor de combinación definido para condiciones extremas y no el característico, ya que el viento no es el agente climático predominante para el modo de fallo analizado.



Los valores característicos y de combinación de estos agentes se detallan en el apartado correspondiente a su definición (apartado 4.6 de esta Recomendación).

Los valores representativos compatibles de los agentes de actuación simultánea que se deben considerar en condiciones extremas se resumen en la figura 4.1.1.2. La combinación de los valores representativos compatibles de los agentes de actuación simultánea correspondientes a condiciones extremas constituye la combinación denominada poco frecuente o fundamental para condiciones extremas.

Para la verificación de modos de fallo en obras de atraque y amarre, el agente climático predominante en condiciones extremas en función del emplazamiento de la obra, así como las correlaciones existentes en esa área entre los agentes climáticos en el estado meteorológico definido por el agente climático predominante, se analizan en el apartado 4.6.2.1 de esta Recomendación.

## b) En condiciones de trabajo excepcionales

En la verificación de un modo de fallo en condiciones de trabajo excepcionales se considera que el agente predominante que define estas condiciones de trabajo es un agente climático extraordinario, un agente accidental o el agente sísmico (sismo o maremoto), aplicándose los siguientes criterios de simultaneidad y compatibilidad para la definición de los valores representativos de los agentes que actúan en dicha condición de trabajo, en función del agente extraordinario predominante.

### b<sub>1</sub>) En condiciones de trabajo excepcionales debidas a la actuación de un agente climático extraordinario

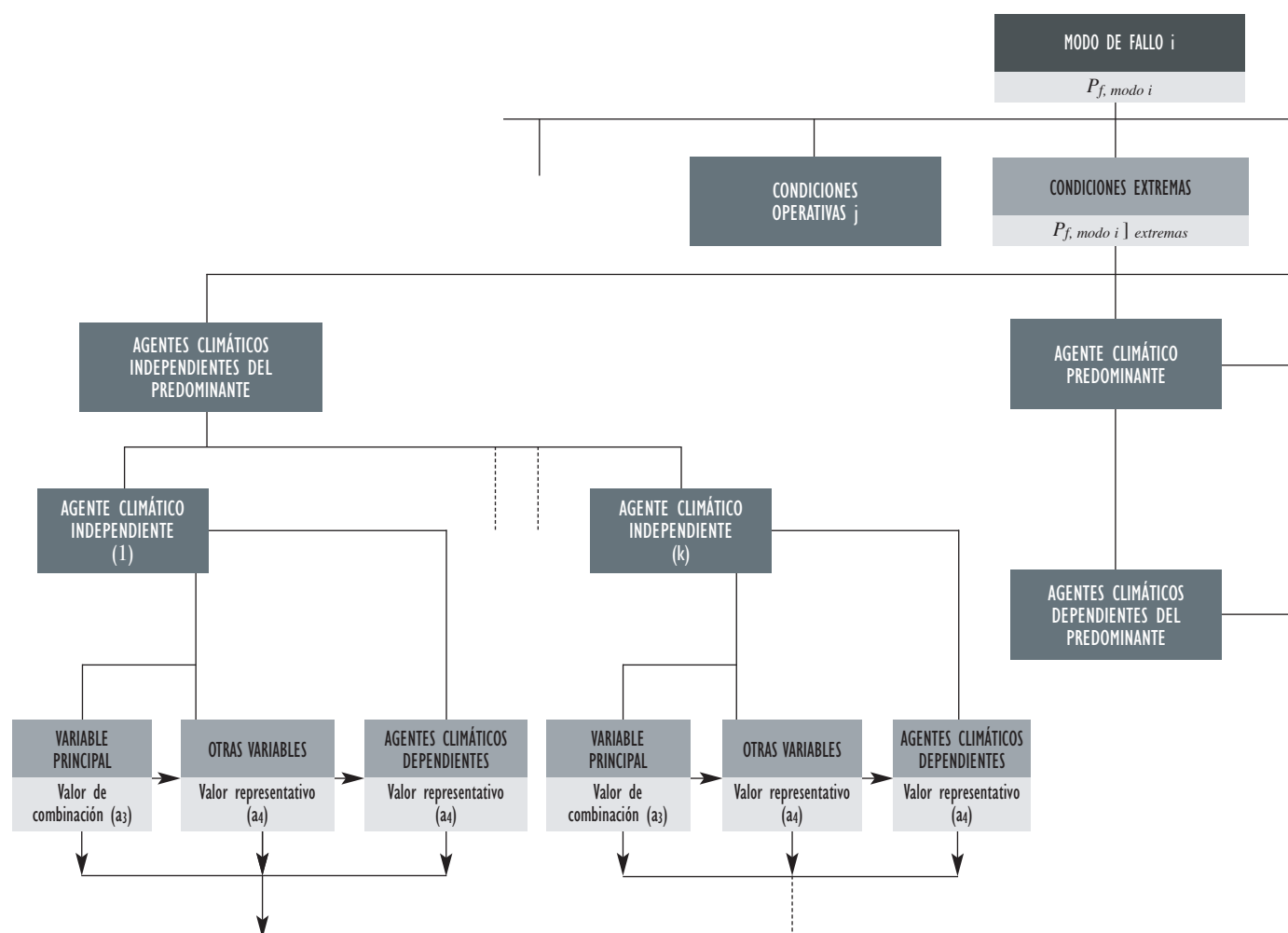
Esta condición de trabajo únicamente se tomará en consideración para el agente climático predominante para el modo de fallo, cuando la probabilidad de ocurrencia adjudicada al modo de fallo analizado tanto en estas condiciones excepcionales como en condiciones extremas durante la fase de servicio sea igual o menor a 0,05 y se utilice como valor representativo para la variable principal de dicho agente en condiciones extremas el correspondiente a un periodo de retorno de 50 años. <sup>(6)</sup>

Para la verificación de esta condición se adoptarán los siguientes valores representativos:

- b<sub>11</sub>)** Para la variable principal del agente climático predominante en condiciones excepcionales, el correspondiente a un periodo de retorno ( $T_R$ ) de 500 años, obtenido de la función de distribución de extremos marginal de dicha variable, en su caso, en la dirección considerada.
- b<sub>12</sub>)** Para las variables principales de los agentes climáticos de actuación simultánea independientes del predominante, el correspondiente a un periodo de retorno de 5 años, tomado en la función de distribución de extremos marginal de la variable, en la dirección considerada. Si la variable puede actuar en varias direcciones y se disponen de regímenes extremos direccionales, el valor representativo compatible asociado a un sector direccional  $i$  será igual al correspondiente al cuantil  $(1-p/f(\alpha_i))$  del régimen direccional de extremos utilizado o a cero si dicho valor es negativo, siendo  $f(\alpha_i)$  la frecuencia de presentación del sector direccional  $i$ , considerando únicamente las excedencias de los valores umbrales de la variable que definen las condiciones extremas y  $p$  la probabilidad de excedencia correspondiente al periodo de retorno de 5 años en la función extremal utilizada.

(6) Esta condición de trabajo se establece con el objeto de tomar en consideración que las acciones debidas al agente climático predominante para el modo de fallo responda a coeficientes de variación significativamente mayores de 0,2. Este coeficiente de variación, conjuntamente con considerar que la fiabilidad parcial de las acciones se corresponde con el 70% del total, son las hipótesis que normalmente se consideran implícitamente para la definición de los coeficientes de mayoración de las acciones debidas a dicho agente, incluidos en las fórmulas de verificación de los distintos modos de fallo mediante formulaciones semi-probabilistas, cuando se utiliza como valor representativo del mismo el definido en esta Recomendación ( $T_R = 50$  años) para probabilidades de ocurrencia del modo  $< 0,05$  (valores medios durante la vida útil). En los casos en que el coeficiente de variación de las acciones debidas al agente climático predominante sea mayor que 0,2, no incluir esta nueva condición de trabajo no nos garantizaría quedar del lado de la seguridad.

**Tabla 4.1.1.2. Valores representativos compatibles de los agentes de actuación simultánea en condiciones Extremas (Combinación fundamental para modos de fallo adscritos a Estados Límite Últimos)**



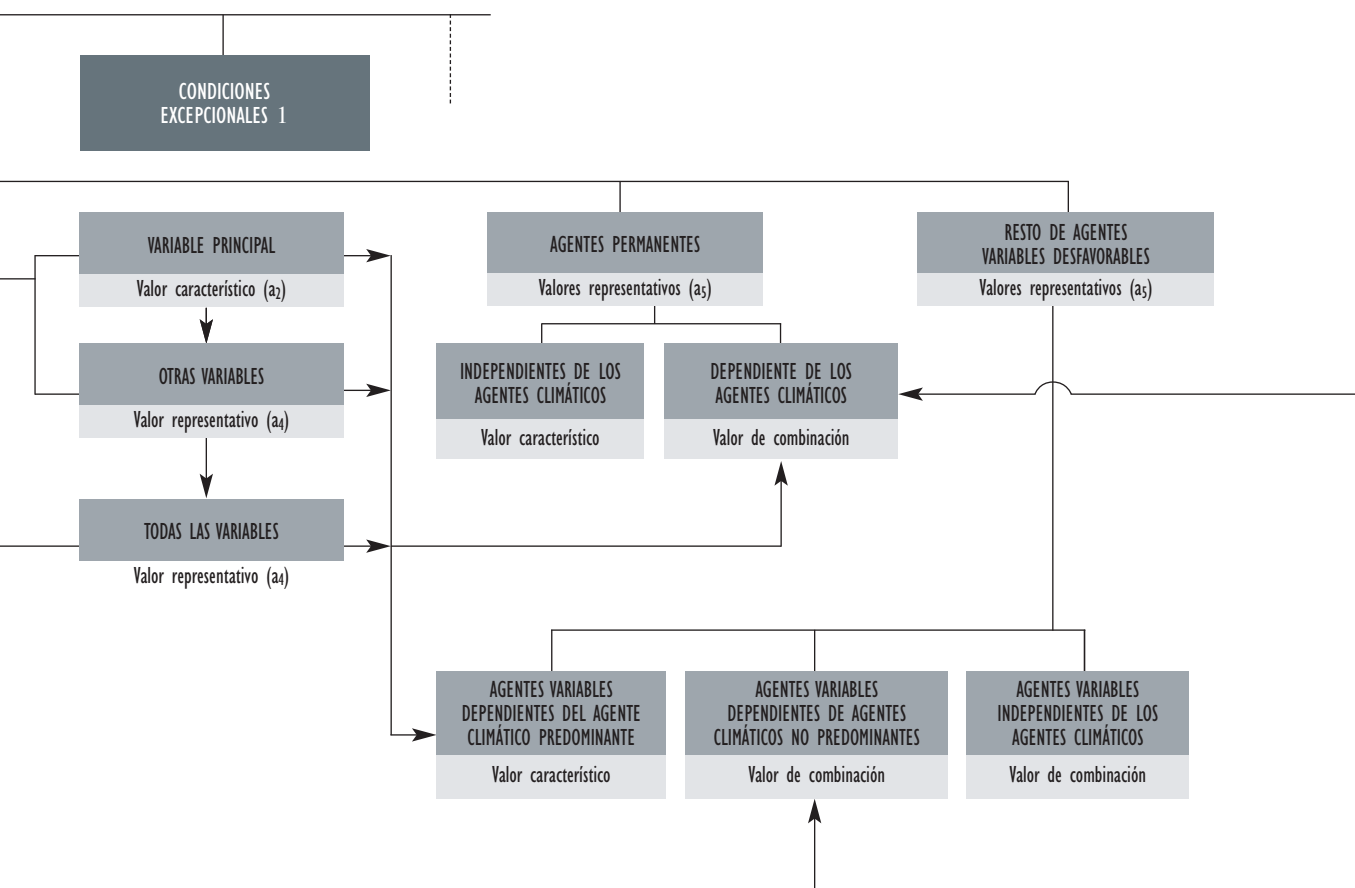
**Nota**

La definición de los diferentes valores representativos indicados en la tabla con las denominaciones  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $a_5$  se incluyen en los subapartados de este apartado bajo idéntica denominación.

- b<sub>13</sub>)** Los valores representativos compatibles del resto de variables del agente climático predominante o de los otros agentes climáticos independientes se obtendrán a partir de los valores representativos adoptados para la variable principal del agente con el que están correlacionados, adoptando el cuantil del 85% o del 15% de la función de distribución de la variable correlacionada condicionada a dicho valor y, en su caso, a la dirección de la variable principal, en función de que sean más desfavorables los valores superiores o inferiores de la variable correlacionada.
- b<sub>14</sub>)** Los valores representativos del resto de agentes de actuación simultánea que sean relevantes en el emplazamiento serán:

- ◆ El valor característico para los agentes considerados de carácter permanente en el estado definido por el agente climático predominante en los que ningún agente climático tenga incidencia en su definición, así como para los agentes, desfavorables para el modo de fallo considerado, de carácter variable en dicho estado en los que el agente climático predominante tenga incidencia en la definición del mismo.
- ◆ El valor frecuente para los agentes considerados de carácter permanente o variable en dicho estado, desfavorables para el modo de fallo considerado, en los que algún agente cli-





mático distinto al predominante tiene incidencia en la definición de los mismos. Este valor frecuente se obtendrá considerando que la variable del agente climático que tiene incidencia en la definición del agente actúa con el valor representativo compatible con el adoptado para el agente climático predominante, de acuerdo con lo definido en este apartado.

- ◆ El valor cuasi-permanente para los agentes considerados de carácter variable en dicho estado que sean desfavorables para el modo de fallo considerado, en los que ningún agente climático tiene incidencia en la definición de los mismos. Los valores característicos, frecuentes y cuasi-permanentes de estos agentes para estas condiciones excepcionales se detallan en el apartado correspondiente a su definición (apartado 4.6. de esta Recomendación).

**b<sub>2</sub>)** En condiciones de trabajo excepcionales debidas a la presentación de una acción accidental que no sea un agente climático extraordinario o sísmico

Esta condición de trabajo únicamente se tomará en consideración para la verificación de la obra durante la fase de servicio, no considerándose de aplicación a fases transitorias, excepto que lo requiera expresamente el Promotor de la instalación.

Para la verificación de esta condición se adoptarán los siguientes valores representativos:

**b<sub>21</sub>)** Para la acción accidental:

- ◆ Si la acción accidental está definida mediante un valor nominal, se considerará este valor como su valor representativo.
- ◆ Si la acción accidental está definida mediante una función de distribución extremal:
  - El correspondiente a un periodo de retorno ( $T_R$ ) de 500 años, obtenido de la función de distribución extremal, cuando la probabilidad de ocurrencia adjudicada al modo de fallo analizado en estas condiciones excepcionales durante la fase de servicio sea igual o menor a 0,05 y se disponga de ecuaciones de verificación del modo de fallo taradas con coeficientes de mayoración y seguridad que lleven a las citadas probabilidades de fallo utilizando este valor representativo.
  - El correspondiente a una probabilidad de excedencia en la fase de servicio igual a la probabilidad adjudicada al modo de fallo en estas condiciones excepcionales, cuando dicha probabilidad sea mayor de 0,05 o, siendo menor, no se disponga de una ecuación de verificación del modo de fallo tarada con los coeficientes de mayoración y seguridad que lleven a la probabilidad de fallo utilizando como valor representativo de la acción el correspondiente a un periodo de retorno de 500 años.

**b<sub>22</sub>)** Para el resto de agentes de actuación simultánea que sean relevantes en el emplazamiento serán:

- ◆ El valor característico para los agentes considerados de carácter permanente en el estado definido por la acción accidental, en los que ningún agente climático tenga incidencia en su definición.
- ◆ Cuando se considere que el agente variable predominante en esta condición de trabajo para el modo de fallo analizado es un agente climático, se adoptará el valor frecuente para la variable principal de dicho agente, así como para los agentes considerados de carácter permanente o variable en dicho estado que sean desfavorables para el modo de fallo considerado, en los que el agente climático predominante u otros agentes climáticos dependientes del mismo tienen incidencia en la definición de los mismos. Para el resto de variables del agente climático predominante o para los agentes climáticos dependientes del predominante se adoptará como valor representativo el correspondiente al cuantil del 85% o del 15% (en función de cual es el más desfavorable) de la función de distribución de la variable correlacionada condicionada al valor representativo y, en su caso, dirección adoptados para la variable climática predominante. Para el resto de agentes variables, desfavorables para el modo de fallo considerado, independientes del agente climático predominante se adoptará el valor cuasi-permanente.
- ◆ Cuando se considere que el agente variable predominante en esta condición de trabajo para el modo de fallo analizado no es un agente climático se adoptará para el agente predominante su valor frecuente. Para el resto de agentes se adoptará el valor cuasi-permanente o, en su caso, los valores compatibles con éste para los agentes dependientes entre sí.

Los valores nominales, característicos, frecuentes y cuasi-permanentes de estos agentes para estas condiciones excepcionales se detallan en el apartado correspondientes a su definición (apartado 4.6 de esta Recomendación).

La combinación de los valores representativos compatibles de los agentes de actuación simultánea correspondientes a condiciones excepcionales debidas a la presentación de una acción climática extraordinaria o de una acción accidental constituye la combinación denominada excepcional o accidental.

**b<sub>3</sub>)** En condiciones de trabajo extremas o excepcionales debidas a la presentación de una acción sísmica

Para la verificación de esta condición se adoptarán los siguientes valores representativos:

**b<sub>31</sub>)** Para la acción sísmica (sismo o maremoto):

- ◆ Para fase de servicio, cuando la probabilidad de ocurrencia adjudicada al modo de fallo analizado en estas condiciones durante esa fase sea menor o igual que 0,05, se adoptará el correspondiente a un periodo de retorno ( $T_R$ ) de 50 años, obtenido de la función de distribución extremal para el caso de condiciones extremas y a un periodo de retorno ( $T_R$ ) de 500 años para condiciones excepcionales, siempre que se disponga de ecuaciones de verificación del modo de fallo taradas con coeficientes de mayoración y seguridad que lleven a las citadas probabilidades de fallo utilizando estos valores representativos. Siempre que se den las condiciones anteriores, para fases transitorias se adoptará el correspondiente a un periodo de retorno del mismo orden de magnitud que la duración de la fase para las fases transitorias prolongadas en relación con la duración de la fase de servicio y el doble de dicho valor para los casos de transitoriedad menos prolongada, con un valor mínimo de 2 años.
- ◆ Cuando la probabilidad de ocurrencia adjudicada al modo de fallo analizado en estas condiciones durante la fase considerada sea mayor que 0,05, se adoptará el valor correspondiente a una probabilidad de excedencia en la fase igual a la probabilidad adjudicada al modo de fallo en las condiciones analizadas. Aún cuando la probabilidad de ocurrencia adjudicada al modo de fallo analizado en estas condiciones sea igual o menor que 0,05 pero no se disponga de ecuaciones de verificación taradas con los coeficientes de mayoración y seguridad que lleven a la probabilidad de fallo utilizando como valores representativos los correspondientes a periodos de retorno de 50 y 500 años (para fase de servicio) o a periodos de retorno similares a la duración de la fase (para fases transitorias) es más fiable adoptar como valores representativos los asociados con el cuantil correspondiente a la probabilidad de excedencia adjudicada al modo de fallo en las condiciones de trabajo analizadas.

**b<sub>32</sub>)** Los valores representativos del resto de agentes de actuación simultánea que sean relevantes en el emplazamiento serán:

- ◆ El valor característico para los agentes considerados de carácter permanente en el estado sísmico, en los que ningún agente climático tenga incidencia en su definición.
- ◆ Para el resto de los agentes que sean desfavorables para el modo de fallo considerado se adoptará el valor cuasi-permanente o, en su caso, los valores compatibles con éste para los agentes dependientes entre sí.

Los valores característicos y cuasi-permanentes de estos agentes para estas condiciones sísmicas extremas y excepcionales se detallan en el apartado correspondiente a su definición (apartado 4.6 de esta Recomendación).

Los valores representativos compatibles de los agentes de actuación simultánea que se deben considerar en condiciones extremas o excepcionales debidas a la presentación de una acción sísmica se resumen en la figura 4.1.1.3. La combinación de los valores representativos compatibles de los agentes de actuación simultánea correspondientes a condiciones extremas o excepcionales debidas a la presentación de una acción sísmica constituye la combinación denominada sísmica.

**c) En condiciones operativas**

En la verificación de un modo de fallo en condiciones de trabajo operativas asociadas a cada modo de parada se considera que el agente predominante en estas condiciones de trabajo es el agente de uso y explotación asociado a la operación considerada, definido directamente a través de su valor límite de operatividad o indirectamente a través de los valores del agente cuando actúan los valores umbrales de los agentes climáticos que provocan la parada operativa.

Las condiciones operativas se consideran generalmente para la verificación de la obra durante la fase de servicio, sin perjuicio de que el promotor de la instalación requiera expresamente la comproba-

ción de condiciones operativas durante fases transitorias como la entrada parcial en servicio, condiciones operativas post-extremas o condiciones operativas post-excepcionales (Ver ROM 0.0), así como durante las fases de construcción y reparación. En particular, si no están previstas en el proyecto condiciones operativas durante la fase de construcción, deberán verificarse condiciones operativas en esa fase si el procedimiento constructivo utilizado por el constructor somete a la obra a este tipo de condición.

Para la verificación de esta condición con criterio incondicional de no fallo o con probabilidades de fallo menores del 5% se adoptarán los siguientes valores representativos, siempre que se disponga de ecuaciones de verificación del modo de fallo taradas con coeficientes de mayoración y seguridad que lleven a las citadas probabilidades de fallo utilizando estos valores representativos:

**c<sub>1</sub>)** Para la acción de uso y explotación predominante, la cual define el modo de parada:

- ◆ El valor límite de operatividad establecido.
- ◆ En el caso de que el valor límite de operatividad esté definido a través de una variable climática de la que depende este agente de uso y explotación, se adoptará con carácter general como valor umbral de la misma el más limitativo de entre los correspondientes a dicha variable climática en las diferentes causas de paralización asociadas con el modo de parada considerado en las que es predominante. Si la causa de paralización más desfavorable para el modo de fallo analizado no tiene como variable climática predominante aquélla de la que depende el agente de uso y explotación, se adoptará para esta última su valor de compatibilidad con la variable climática predominante (valores  $c_2$  y  $c_3$ ) de dicha causas de paralización (Ver figura 4.1.1.4).

**c<sub>2</sub>)** Para las variables principales de los agentes climáticos de actuación simultánea independientes de la variable climática predominante de la que depende el agente de uso y explotación que define el modo de parada operativa, que sean relevantes en el emplazamiento:

- ◆ El valor de compatibilidad será el valor cuasi-permanente; es decir el correspondiente a una probabilidad absoluta de no excedencia del 50% en el año medio, sin superar, en su caso, los límites de operatividad que pudieran estar establecidos individualmente para dichos agentes en el modo de parada y en el sector direccional considerado. En el caso de que la variable independiente de la variable climática predominante actúe básicamente en un sector direccional, la dirección no sea una variable de estado del mismo o no se disponga de regímenes medios direccionales, la probabilidad absoluta de no excedencia del 50% en el año medio se corresponderá con el cuantil del 50% en el régimen medio. Si puede actuar en varias direcciones y se disponen de regímenes medios direccionales, el valor de compatibilidad asociado a un sector direccional  $\alpha_i$  será igual al correspondiente al cuantil  $[1-0,50/f(\alpha_i)]$  del régimen medio direccional o a cero si dicho valor es negativo, siendo  $f(\alpha_i)$  la frecuencia de presentación del sector direccional  $i$ .

**c<sub>3</sub>)** Para las variables de los agentes climáticos dependientes de las que provocan la parada operativa o de las variables de los agentes climáticos independientes de éstos:

- ◆ El valor de compatibilidad será el correspondiente al cuantil del 85% o del 15% de la función de distribución de la variable correlacionada condicionada al valor  $y$ , en su caso, la dirección adoptados para la variable de la que depende, en función de que sean más desfavorables los valores superiores o inferiores de la variable correlacionada.

**c<sub>4</sub>)** Para el resto de agentes de actuación simultánea que sean relevantes en el emplazamiento:

- ◆ El valor característico para los agentes considerados de carácter permanente en el estado definido por el agente climático que provoca la parada operativa, en los que ningún agente climático tenga incidencia en su definición.

- ◆ Para el resto de agentes desfavorables para el modo de fallo considerado se adoptará el valor de combinación. Para la definición del valor de combinación se considerará, en su caso, que las variables de los agentes climáticos que, en su caso, tienen incidencia en el mismo actúan con los valores representativos adoptados para los mismos en estas condiciones, de acuerdo con lo definido en este apartado.

Los agentes de uso y explotación predominantes que definen cada modo de parada, las causas de paralización asociadas al modo, así como los valores límite de operatividad y los valores de combinación de estos agentes se detallan en el apartado correspondiente a su definición (apartado 4.6. de esta Recomendación).

Los valores representativos compatibles de los agentes de actuación simultánea que se deben considerar en condiciones operativas se resumen en la figura 4.1.1.4. La combinación de los valores compatibles de los agentes de actuación simultánea correspondientes a condiciones operativas constituye la combinación denominada poco frecuente o fundamental operativa.

#### **4.1.1.2. Verificación de modos de fallo adscritos a estados límite de servicio**

Para las obras de atraque y amarre se verificará que la probabilidad de ocurrencia de cada modo de fallo (*i*) adscrito a estados límite de servicio en la fase de proyecto considerada es menor o igual que la probabilidad de fallo asignada a dicho modo en el correspondiente diagrama de fallo (Ver apartados 2.5.3. y 2.5.4. de la ROM 1.0 y 3.4.4 de esta Recomendación).

Para la verificación de modos de fallo adscritos a estados límite de servicio en los que el tipo de combinación aplicable para dicha verificación en cada condición de trabajo sea la combinación poco probable o fundamental, la accidental o la sísmica, será de aplicación lo dispuesto en el apartado 4.1.1.1 para los modos de fallo adscritos a estados límite últimos tanto en lo que respecta a la distribución de probabilidades entre las distintas condiciones de trabajo como a la simultaneidad y valores compatibles de los agentes que definen los estados límites de proyecto.

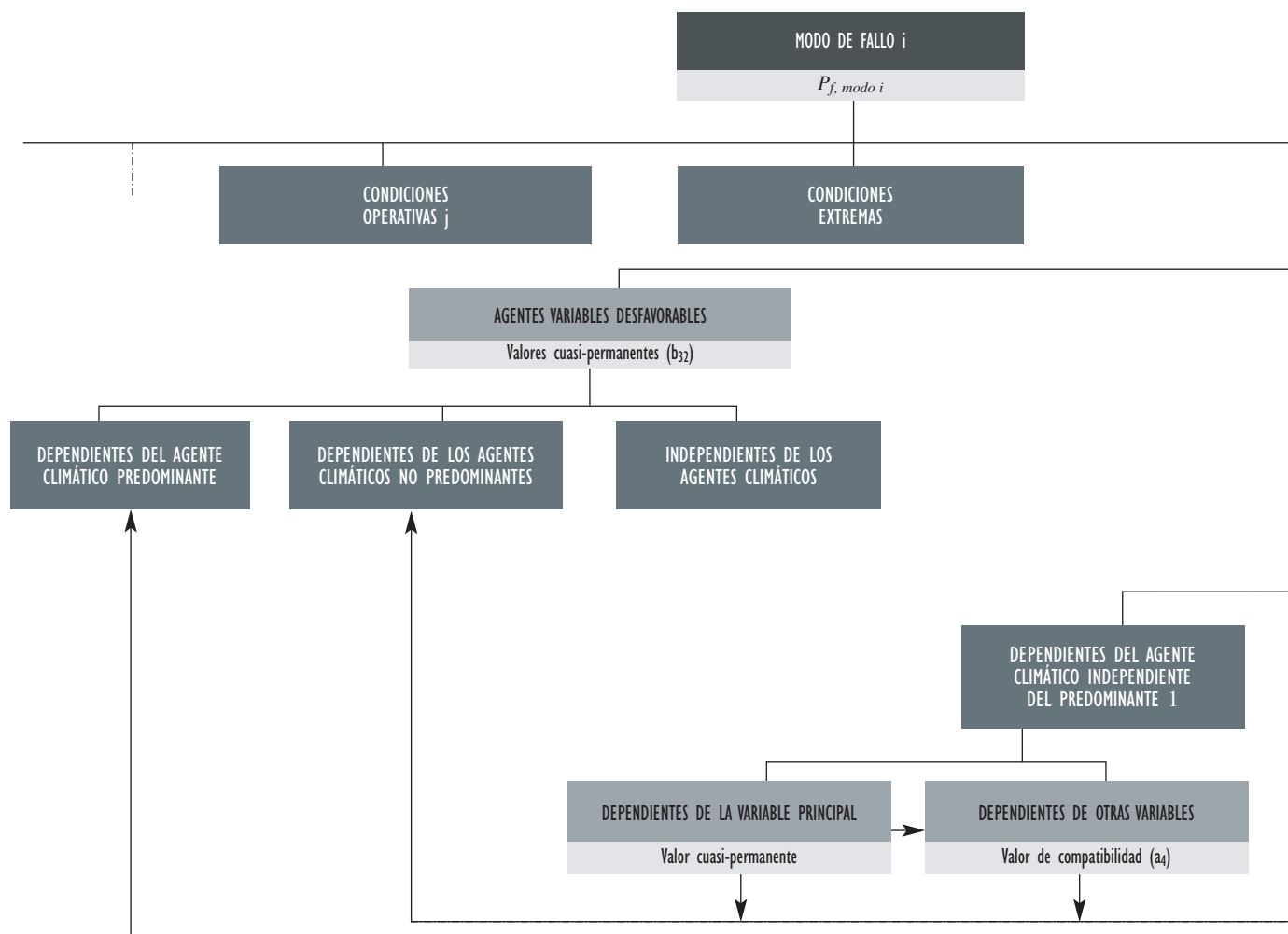
Los modos de fallo adscritos a estados límite de servicio en los que el tipo de combinación aplicable en la ecuación de verificación sea la frecuente o cuasi-permanente (Ver ROM 0.0), en general, salvo que se señale expresamente lo contrario, se considerará que el cumplimiento de la misma está asociado al criterio incondicional de no fallo funcional o de servicio ( $p_f < 0,07$ ). Para estos casos, la simultaneidad y valores representativos compatibles de los agentes que definen los estados límite de proyecto serán equivalentes para la combinación frecuente a los definidos para estados límite últimos en condiciones de trabajo excepcionales debidas a la presentación de una acción accidental (apartado 4.1.1.1.  $b_2$ ), no considerando la actuación de la acción accidental. Para la combinación cuasi-permanente serán equivalentes a los definidos para estados límite últimos en condiciones de trabajo extremas o excepcionales debidas a la presentación de una acción sísmica (apartado 4.1.1.1.  $b_3$ ), no considerando la actuación de la acción sísmica.

#### **4.1.1.3. Verificación de modos de parada operativa**

Para las obras de atraque y amarre se verificará que la probabilidad de parada conjunta en la fase de proyecto considerada, así como la contribución a la misma de cada modo (*i*) de parada (causa de paralización) son, respectivamente, menores o iguales a la probabilidad conjunta de parada exigida en el proyecto (Ver apartado 3.4) y a las asignadas a cada modo en el correspondiente diagrama de paradas, definido en función de los criterios y condiciones de explotación considerados para cumplir los niveles de calidad del servicio establecidos por su Promotor.

Los criterios y condiciones de explotación considerados para definir el citado diagrama, la contribución de cada modo a la probabilidad de parada conjunta y los valores límite de operatividad de los agentes climáticos para cada causa de paralización que afecta a las obras de atraque y amarre deberán cumplir como mínimo los siguientes requerimientos:

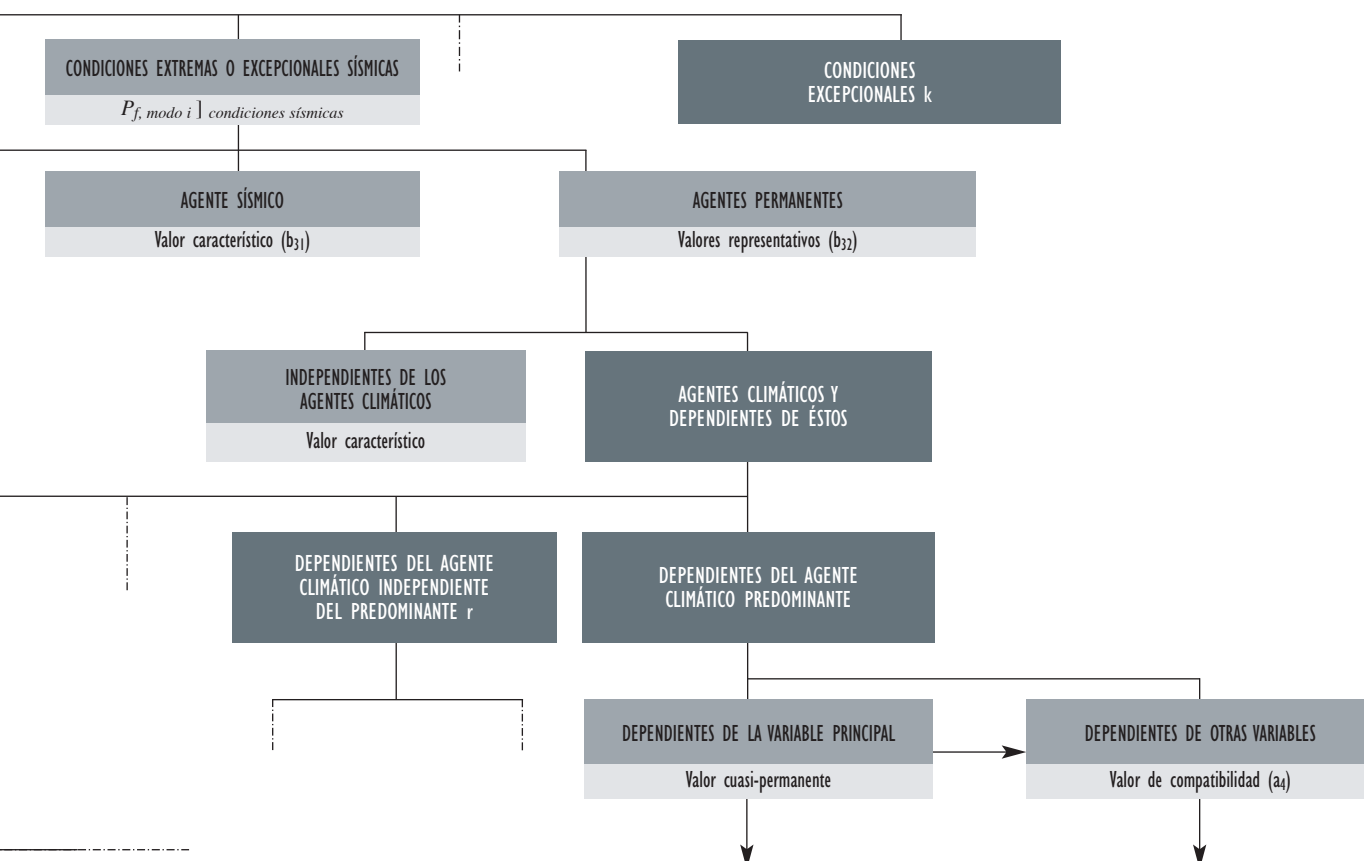
**Tabla 4.1.1.3. Valores representativos compatibles de los agentes de actuación simultánea en condiciones Extremas o Excepcionales debidas a la presentación de una acción Sísmica (Combinación fundamental para modos de fallo adscritos a Estados Límite Últimos)**



**Nota**

La definición de los diferentes valores representativos indicados en la tabla con las denominaciones  $b_{31}$ ,  $b_{32}$  y  $a_4$  se incluyen en los subapartados de este apartado bajo idéntica denominación.

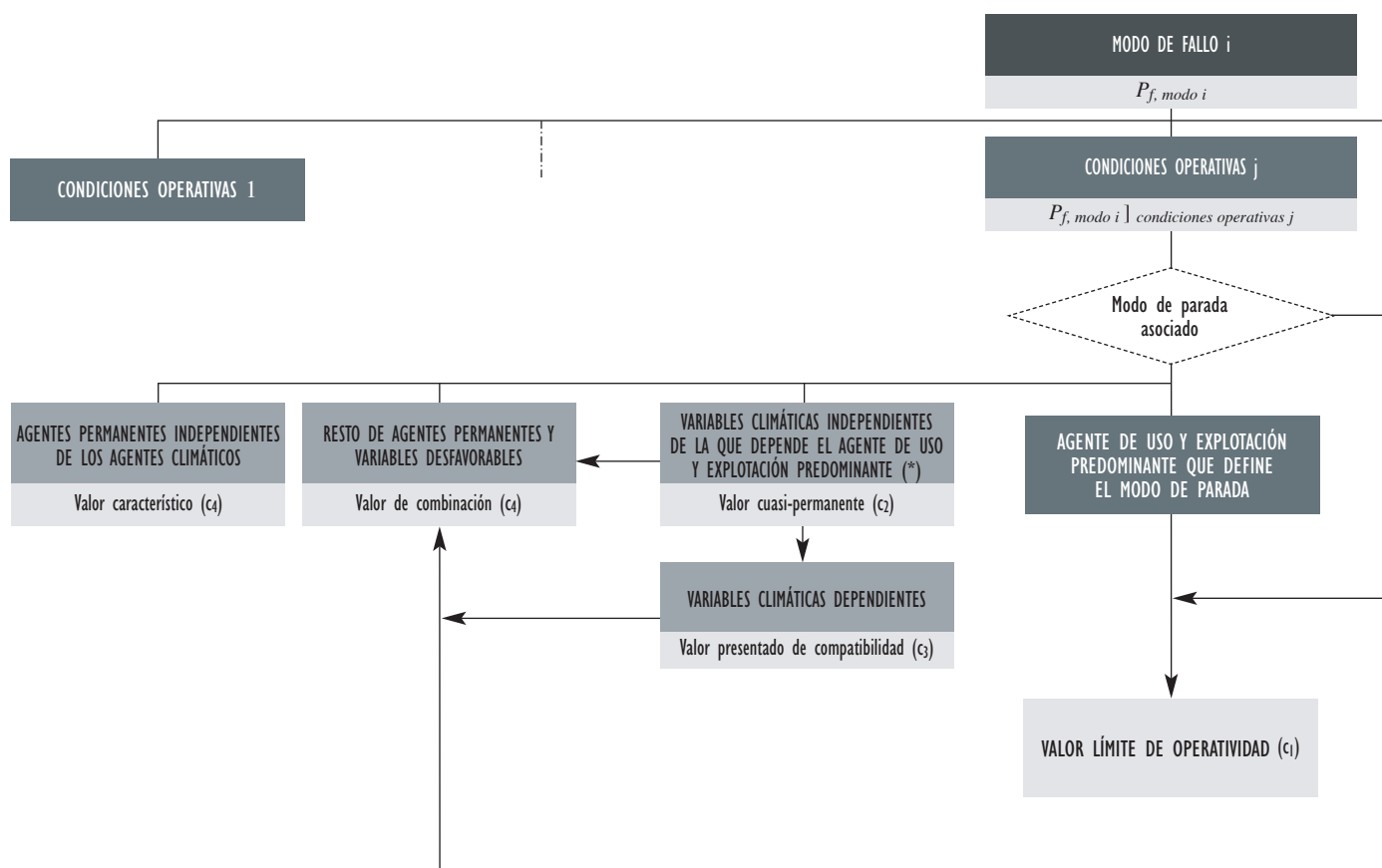
- ◆ Las condiciones de parada correspondientes a la accesibilidad de los buques a la instalación de atraque suelen estar asociadas a valores de los agentes climáticos en general menos limitativos (umbrales de operatividad mayores) que los correspondientes a las operaciones de atraque, aunque se recomienda que se consideren para la paralización de las operaciones de atraque los valores que correspondan en el emplazamiento a los que producen la suspensión de la accesibilidad marítima, ya que es conveniente que un buque pueda atracar siempre que pueda acceder a la instalación para no aumentar innecesariamente los tiempos de espera y, por tanto reducir su nivel de servicio. La excepción a esta recomendación se produce cuando las condiciones de parada adoptadas para alguna de las causas de suspensión de la permanencia del buque en el atraque dependientes de estos agentes sean por cualquier razón más limitativas que las de accesibilidad marítima. Es decir, excepto que se produzca esta última circunstancia, se considerará que estos dos modos de parada se producen simultáneamente para las causas de paralización dependientes de estos agentes, computándose una única vez su contribución a la probabilidad conjunta.
- ◆ Las condiciones de parada correspondientes a la permanencia de los buques en el atraque deben ser producidas por valores iguales o menos limitativos de los agentes climáticos que las correspondientes a las



operaciones de atraque, ya que un buque debe poder permanecer en el atraque siempre que pueda atracar en el mismo. En el caso de que alguna de las condiciones de parada dependientes de estos agentes asociadas a la permanencia del buque en el atraque sean más limitativas que las de accesibilidad marítima, se considerará que los modos de parada operación de atraque y permanencia en el mismo se producen simultáneamente con los mismos valores de los agentes climáticos para las causas de paralización dependientes de dichos agentes, computándose una única vez su contribución a la probabilidad conjunta.

- ◆ Las condiciones de parada correspondientes a la permanencia de los buques en el atraque deben ser producidas por valores iguales o menos limitativos de los agentes climáticos que las correspondientes a las operaciones de atraque, ya que un buque debe poder permanecer en el atraque siempre que pueda atracar en el mismo. En el caso de que las condiciones de parada dependientes de estos agentes asociadas a la permanencia del buque en el atraque sean más limitativas que las de accesibilidad marítima, se considerará que los modos de parada operación de atraque y permanencia en el mismo se producen simultáneamente con los mismos valores de los agentes climáticos para las causas de paralización dependientes de dichos agentes, computándose una única vez su contribución a la probabilidad conjunta.

**Tabla 4.1.1.4. Valores representativos compatibles de los agentes de actuación simultánea en condiciones Operativas (Combinación fundamental para modos de fallo adscritos a Estados Límite Últimos)**



#### Nota

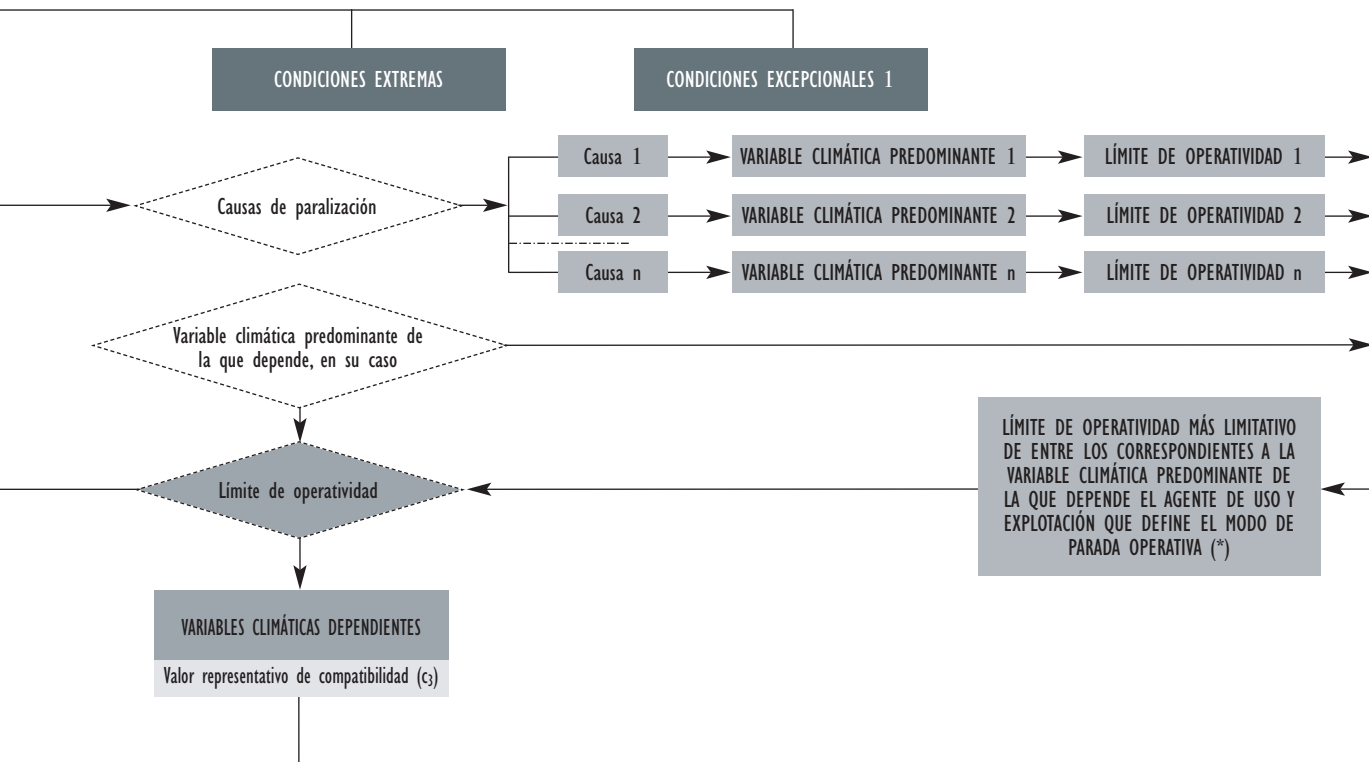
La definición de los diferentes valores representativos indicados en la tabla con las denominaciones  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  y  $c_4$ , se incluyen en los subapartados de este apartado bajo idéntica denominación.

(\*) Si la causa de paralización más desfavorable para el modo de fallo analizado no tiene como variable climática predominante aquella de la que depende el agente de uso y explotación, se adoptará para esta última su valor de compatibilidad con la variable climática predominante de la causa de paralización ( $c_2$  y  $c_3$ ). En el caso de que la variable climática predominante de la causa de paralización más desfavorable para el modo de fallo sea independiente de la que depende el agente de uso y explotación que define el modo de parada, el valor representativo de dicha variable será el correspondiente al límite de operatividad de la misma.

- ◆ Si, por razones económicas asociadas con el coste de primer establecimiento y/o mantenimiento de los accesos marítimos a la instalación de atraque, se adoptan condiciones de parada para la accesibilidad de los buques a la instalación asociadas a valores de los agentes climáticos más limitativos que los de la permanencia de los buques en el atraque, por condiciones de seguridad deberá verificarse que la permanencia de los buques en el atraque no tiene limitada la operatividad dependiente de esos agentes (7).
- ◆ En el caso de que el atraque sea de uso comercial para mercancías peligrosas, deberá considerarse que las condiciones de parada correspondientes a la accesibilidad del buque a la instalación de atraque son menos limitativas que las de permanencia de los buques en el atraque, ya que un buque que transporta este tipo de mercancías debe poder dejar el atraque en cualquier momento por razones de seguridad.

(7) Un ejemplo de esta circunstancia es cuando la accesibilidad a una instalación de atraque está condicionada por limitaciones de calado y las operaciones de acceso y atraque son posibles únicamente mientras el nivel de las aguas se mantiene por encima de un nivel o “ventana” de marea (Ver ROM 3.1-99), pero se garantiza la permanencia del buque en el puesto de atraque por razones de calado en todo momento por medio de una fosa o zanja de dragado con objeto de aumentar la operatividad de la instalación en lo que respecta a la realización de las operaciones de carga y descarga.





En este caso es recomendable considerar que estos tres modos de parada se producen simultáneamente para los mismos valores de los agentes climáticos, computándose una única vez su contribución a la probabilidad conjunta.

- ◆ Las condiciones de parada correspondientes a la permanencia de buques en el atraque deben ser producidas por valores menos limitativos de los agentes climáticos que las correspondientes a la realización de las operaciones de carga y descarga de mercancías o embarque y desembarque de pasajeros con buque atracado, ya que un buque debe poder permanecer en el atraque cuando se paralizan las operaciones de carga y descarga de mercancías o de embarque y desembarque de pasajeros debido a dichos agentes.
- ◆ Teniendo en cuenta la simultaneidad que se produce entre causas de suspensión o paralización adscritas a los diferentes grupos de paradas operativas, generalmente los modos de parada (causas de suspensión o de paralización de las operaciones) a los que se debe asignar las mayores probabilidades de parada son algunos de los modos de parada correspondientes a la paralización de las operaciones de carga y descarga, ya que no es conveniente que un buque deba suspender su permanencia en el atraque sin

que previamente se haya producido una causa de paralización de las operaciones de carga y descarga. Asimismo, un buque debe poder permanecer en el atraque siempre que pueda acceder y atracar en el mismo. Particularmente, de entre las causas de paralización de las operaciones de carga y descarga o de embarque y desembarque de pasajeros es conveniente asignar las mayores probabilidades de parada a la paralización por incompatibilidad de movimientos del buque atracado con las operaciones de carga y descarga o de embarque y desembarque de pasajeros y a la paralización por razones de seguridad de los equipos de manipulación o de embarque y desembarque de pasajeros, así como de la operativa de los mismos, asociadas con aspectos resistentes funcionales o ambientales, dependiendo en este último caso de las condiciones climáticas locales en el emplazamiento, particularmente de las probabilidades de presentación de los límites de operatividad de los equipos asociados a la velocidad del viento. Sin perjuicio de lo anterior, en algunos casos criterios de optimización económica pueden aconsejar independizar la suspensión de la permanencia del buque en el atraque de la suspensión de la accesibilidad marítima. En estos casos, a alguno de los modos de parada del grupo correspondiente a la suspensión de la accesibilidad marítima podrá ser conveniente asignarles probabilidades de parada del mismo orden de magnitud que la probabilidad de parada conjunta.

De acuerdo con estos criterios mínimos de explotación, para la verificación de la probabilidad de parada operativa de la instalación portuaria de atraque será suficiente considerar como máximo la contribución de los modos de parada (causas de paralización) más limitativos correspondientes a la accesibilidad de los buques a la instalación de atraque, a la permanencia de los buques en el atraque y a la realización de las operaciones de carga y descarga con buque atracado, ya que los correspondientes a las operaciones de atraque se produce simultáneamente, bien con los modos de parada correspondientes a la accesibilidad o bien con los de permanencia en el atraque.

En la figura 4.1.1.5 se incluye un ejemplo sintético, sin considerar componente direccional de las variables, de diagrama de parada operativa, aplicando los citados criterios mínimos de explotación a un atraque de uso comercial para mercancía general no peligrosa con manipulación de mercancías mediante sistemas discontinuos por elevación, considerando condiciones de permanencia en el atraque menos limitativas que las condiciones de accesibilidad del buque al puesto de atraque, así como la simultaneidad de las causas de paralización.

Una vez definidos, en magnitud y dirección, los valores umbral de las variables de los agentes atmosféricos y climáticos marinos y de los agentes operativos que limitan la operatividad de la instalación de atraque para cada uno de los buques esperables en el mismo, tomando en consideración todas las causas de paralización, la probabilidad conjunta de parada operativa se obtendrá calculando la probabilidad absoluta de excedencia en el emplazamiento en el año medio de los umbrales de operatividad más restrictivos de las variables de los agentes climáticos en cada una de las direcciones, tomando en consideración todos los modos de parada (causas de paralización) y todos los buques pertenecientes a la flota esperable en el atraque.

La probabilidad de parada conjunta será la suma de las probabilidades absolutas de excedencia en el año medio de los umbrales de operatividad en cada dirección correspondientes a cada una de las variables predominantes independientes entre sí que limitan la operatividad de la instalación de atraque, así como de las probabilidades de excedencia del valor umbral de operatividad adoptado para cada una de las variables dependientes en cada dirección, obtenidas considerando los regímenes medios de las mismas condicionados a la no superación del valor umbral en cada dirección de la variable de la que dependen.

En el caso de que varias variables que limitan la operatividad sean dependientes entre sí se adoptará como predominante aquélla que considerando los umbrales de operatividad en todas las direcciones tiene mayor probabilidad de excedencia en el emplazamiento.

Es decir:

$$P_{\text{parada conjunta}} \leq P_{\text{excedencia valores umbrales operatividad variable independiente 1}} + \dots + P_{\text{excedencia valores umbrales operatividad variable independiente n}} + P_{\text{excedencia valores umbrales operatividad variable dependiente 1 condicionada a la no superación de los valores umbrales de operatividad de la variable de la que depende}} + \dots + P_{\text{excedencia valores umbrales operatividad variable dependiente j condicionada a la no superación de los valores umbrales de operatividad de la variable de la que depende}}.$$

Con carácter general, considerando la componente direccional:

$$P_{parada\ conjunta} \leq \sum_{i=1}^N \left\{ \left[ 1 - P'(X_{10,i}) \right] \cdot f(\alpha_i) \right\} + \dots + \sum_{i=1}^N \left\{ \left[ 1 - P'(X_{n0,i}) \right] \cdot f(\alpha_i) \right\} + \\ + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N \left\{ \left[ 1 - P''_{X_j,0,k}(Y_{1|X_j,0,i}) \right] \cdot f(\alpha_i) \right\} + \dots + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N \left\{ \left[ 1 - P''_{X_j,0,k}(Y_{r|X_j,0,i}) \right] \cdot f(\alpha_i) \right\} + \dots + \\ + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N \left\{ \left[ 1 - P''_{X_t,0,k}(Y_{1|X_t,0,i}) \right] \cdot f(\alpha_i) \right\} + \dots + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N \left\{ \left[ 1 - P''_{X_t,0,k}(Y_{u|X_t,0,i}) \right] \cdot f(\alpha_i) \right\}$$

Siendo:

$X_{10,i}$	: umbral de operatividad de la variable independiente 1, correspondiente al sector direccional $i$ .
$X_{n0,i}$	: umbral de operatividad de la variable independiente $n$ , correspondiente al sector direccional $i$ .
$P'(X_{10,i})$	: probabilidad condicional de no excedencia del umbral de operatividad de la variable independiente $X_1$ , correspondiente al sector direccional $i$ (equivale a la obtenida en el régimen medio direccional marginal de la variable).
$P'(X_{n0,i})$	: probabilidad condicional de no excedencia del umbral de operatividad de la variable independiente $X_n$ , correspondiente al sector direccional $i$ (equivale a la obtenida en el régimen medio direccional de la variable).
$f(\alpha_i)$	: probabilidad de presentación del sector direccional $i$ .
$Y_{1 X_j,0,i}$	: umbral de operatividad de la variable dependiente 1 de la variable independiente $X_j$ , correspondiente al sector direccional $i$ .
$Y_{r X_j,0,i}$	: umbral de operatividad de la variable dependiente $r$ de la variable independiente $X_j$ , correspondiente al sector direccional $i$ .
$Y_{1 X_t,0,i}$	: umbral de operatividad de la variable dependiente 1 de la variable independiente $X_t$ , correspondiente al sector direccional $i$ .
$Y_{r X_t,0,i}$	: umbral de operatividad de la variable dependiente $r$ de la variable independiente $X_t$ , correspondiente al sector direccional $i$ .
$P''_{X_j,0,k}(Y_{1 X_j,0,i})$	: probabilidad de no excedencia del umbral de operatividad de la variable dependiente 1 de la variable $X_j$ , correspondiente al sector direccional $i$ , condicionada a la no superación del valor umbral de operatividad de la variable independiente $X_j$ en la dirección $k$ . <sup>(8)</sup>
$P''_{X_j,0,k}(Y_{r X_j,0,i})$	: probabilidad de no excedencia del umbral de operatividad de la variable dependiente $r$ de la variable $X_j$ , correspondiente al sector direccional $i$ , condicionada a la no superación del valor umbral de operatividad de la variable independiente $X_j$ en la dirección $k$ .
$P''_{X_t,0,k}(Y_{1 X_t,0,i})$	: probabilidad de no excedencia del umbral de operatividad de la variable dependiente 1 de la variable $X_t$ , correspondiente al sector direccional $i$ , condicionada a la no superación del valor umbral de operatividad de la variable independiente $X_t$ en la dirección $k$ .
$P''_{X_t,0,k}(Y_{u X_t,0,i})$	: probabilidad de no excedencia del umbral de operatividad de la variable dependiente $u$ de la variable $X_t$ , correspondiente al sector direccional $i$ , condicionada a la no superación del valor umbral de operatividad de la variable independiente $X_t$ en la dirección $k$ .

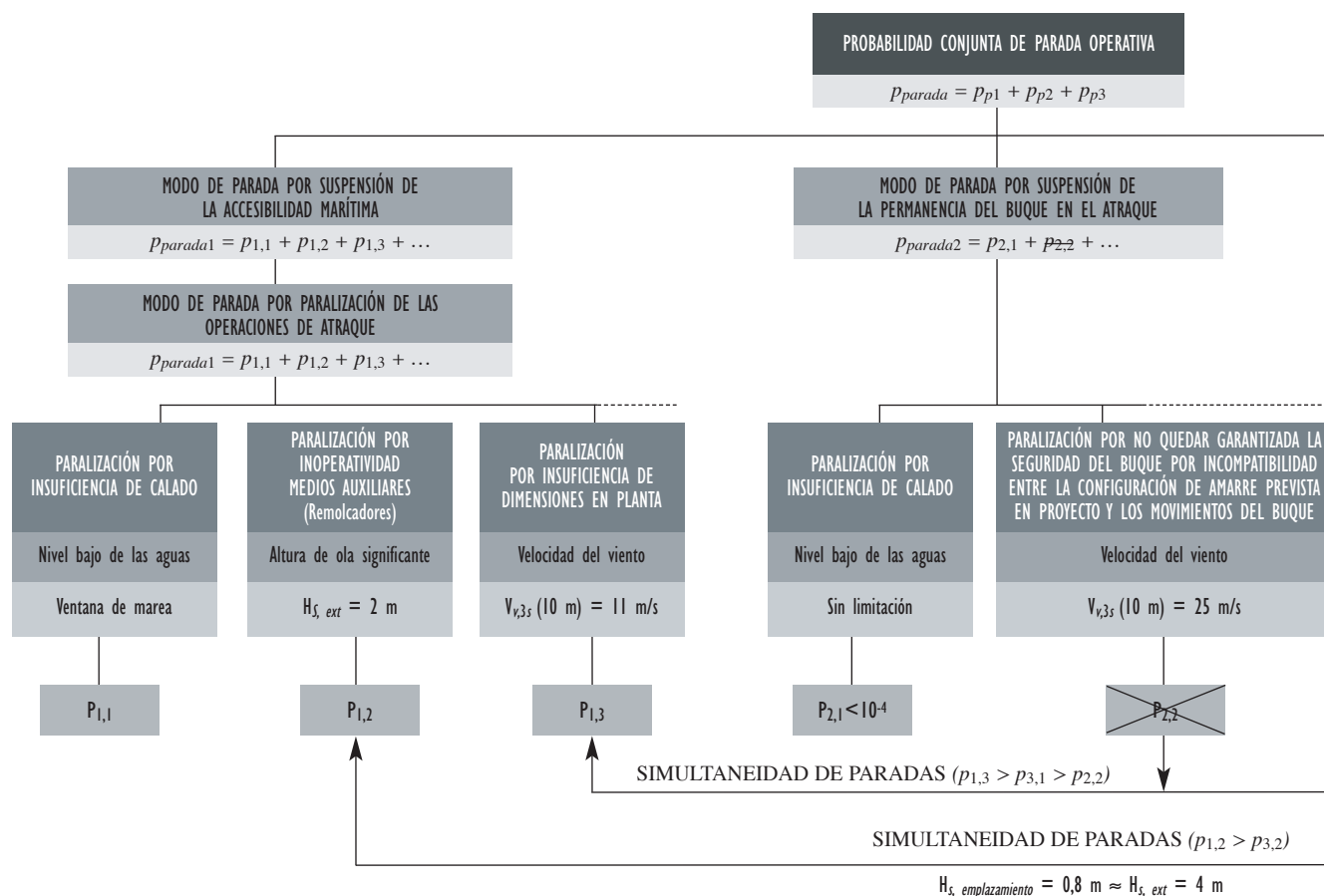
En el caso de que pueda considerarse o que, del lado de la seguridad, se considere que todas las variables que limitan la operatividad son independientes entre sí, la formulación anterior se simplifica:

$$P_{parada\ conjunta} \leq \sum_{i=1}^N \left\{ \left[ 1 - P'(X_{10,i}) \right] \cdot f(\alpha_i) \right\} + \dots + \sum_{i=1}^N \left\{ \left[ 1 - P'(X_{n0,i}) \right] \cdot f(\alpha_i) \right\}$$

Si adicionalmente, los valores umbrales de las variables que limitan la operatividad de la instalación de atraque no se diferencian según sectores direccionales:

(8) Las probabilidades de no excedencia del valor umbral de una variable dependiente, condicionadas a la no superación de un valor de la variable de que dependen, puede obtenerse fácilmente a partir de la función de densidad conjunta de las variables dependientes entre sí.

**Tabla 4.1.1.5. Ejemplo de diagrama de Parada operativa de una instalación de atraque (Atraque de uso comercial para mercancía general no peligrosa con manipulación de mercancías mediante sistemas discontinuos de elevación, emplazado en un área interior o abrigada respecto al oleaje y no adosado a una obra de abrigo. Para condiciones de permanencia en el atraque menos limitativas que las condiciones de accesibilidad del buque al puesto de atraque)**



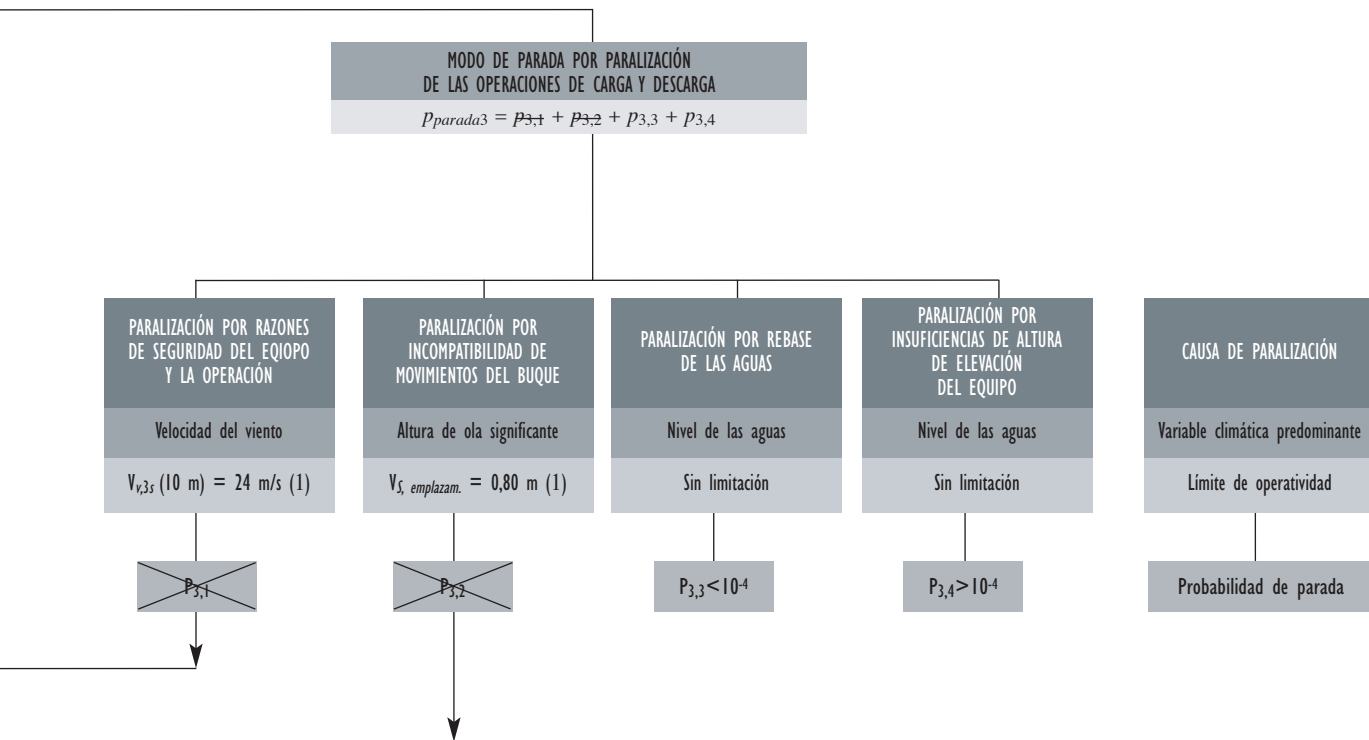
#### Nota

(1) Simplemente, se ha considerado que la ubicación de la obra de atraque permite admitir que las variables climáticas son independientes entre sí.

$$P_{parada \text{ conjunta}} \leq [1 - P(X_{10})] + \dots + [1 - P(X_{n0})]$$

Siendo  $P(X_{n0})$  la probabilidad de no excedencia del nivel  $X_{n0}$ , obtenida del régimen medio escalar de la variable  $X_n$ .

En el caso de que los valores de operatividad obtenidos no cumplieran con los niveles de operatividad mínimos requeridos inicialmente, deberá modificarse la configuración y características adoptadas inicialmente para el sistema de amarre y defensas, debiéndose obtener los nuevos valores umbrales de operatividad de cada una de las variables actuantes asociados con dicha nueva configuración, reiterándose el proceso hasta alcanzar los niveles de operatividad requeridos. En algunos emplazamientos, los objetivos de operatividad establecidos inicialmente pueden no ser alcanzables por mucho que se modifique la configuración y características del sistema de amarre y defensas. En estos casos deberán reducirse los niveles de operatividad respecto de los establecidos inicialmente, siempre y cuando cumplan con los niveles mínimos exigidos para la instalación de atraque por esta Recomendación.



Las causas de paralización asociadas a cada uno de los modos de parada se desarrollan en los apartados de esta Recomendación correspondientes a la definición de los agentes de uso y explotación predominantes en cada modo. Es decir, para el modo de parada “realización de las operaciones de carga y descarga de embarque de mercancías o embarque y desembarque de pasajeros con buque atracado” en el apartado 4.6.4.2, para el modo de parada “operaciones de atraque de buques” en el apartado 4.6.4.4.3 y para el modo de parada “permanencia de buques en el atraque” en el apartado 4.6.4.4.7. Las causas de paralización asociadas al modo de parada “accesibilidad marítima” se desarrollan en la ROM 3.1-99.

#### 4.1.2. Para métodos de Niveles II y III

Para formulaciones probabilistas de las ecuaciones de verificación podrán definirse los agentes por sus variables de estado o bien, dependiendo de la ecuación de verificación utilizada y de forma mucho más precisa, considerando, si es posible, además la variabilidad en cada estado de las variables básicas correspondientes a cada agente.

La verificación de la obra mediante métodos probabilísticos puede realizarse del lado de la seguridad modo a modo, comprobando que la probabilidad de ocurrencia del mismo en la fase de proyecto considerada es menor o igual que la probabilidad de fallo o parada asignada a dicho modo en el correspondiente diagrama de fallo o parada de acuerdo con los criterios establecidos en esta Recomendación sobre el reparto de la probabilidad idóneo para la optimización económica de la obra, o bien de forma conjunta considerando simultáneamente todos los modos principales y comprobando que la probabilidad conjunta de fallo o parada es menor o igual que la asignada al conjunto de la obra. Esta última opción es mucho más precisa al poder tomar en consideración la posibilidad de que varios modos de fallo o parada principales no sean en realidad excluyentes y puedan producirse simultáneamente. Además tiene la ventaja de no ser necesario establecer previamente los criterios para la distribución de la probabilidad de fallo o parada entre los distintos modos principales a la hora de comprobar una alternativa, aunque por dicha razón se complica más el proceso para la toma de decisiones sobre cual es la más conveniente para el proyecto de inversión. Con este último procedimiento, con objeto de simplificar los cálculos, es recomendable que los modos no principales se verifiquen individualmente a criterio incondicional de no fallo mediante métodos de Nivel I, no considerando su contribución a la probabilidad conjunta de fallo.

Para los métodos de Nivel II ó III no se definen específicamente estados límite de proyecto. En este caso los estados límite son un resultado del método.

No obstante, para evitar un número excesivo de comprobaciones, para cada fase o subfase de proyecto, se recomienda diferenciar la verificación de la ocurrencia de cada uno de los modos adscritos a estados límite últimos y de servicio o de la totalidad de los mismos sucesivamente para condiciones de trabajo operativas, para condiciones extremas y para condiciones excepcionales, ya que son excluyentes.

*Comentario: Se recuerda que en los métodos de Nivel II ó III no es necesario definir específicamente los estados límites ya que la verificación de cada modo de fallo no se realiza únicamente en estados o situaciones límite asociados con una determinada probabilidad de fallo o parada, sino en todos y cada uno de los estados que se presentan a lo largo de la duración de la fase o subfase de proyecto analizada, obteniéndose la probabilidad de fallo o parada mediante la integración de la función de densidad conjunta de los factores de proyecto que intervienen en cada modo de fallo o parada en el dominio de fallo o parada definido por la ecuación de verificación. Dicha integral puede ser resuelta bien por integración directa (raramente posible), bien por simulación numérica (p.e. simulación de Monte Carlo (Nivel III), bien por transformación del integrando para trabajar con variables gaussianas independientes (Nivel II). Es decir, los métodos II y III son únicamente diferentes procedimientos matemáticos para la resolución de la citada integral (Ver ROM 0.0).*

## 4.2 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

En cada estado, los parámetros geométricos se considerarán de carácter permanente y se definirán a través de valores nominales, cualquiera que sea el formato de la ecuación de verificación utilizado.

### 4.2.1. Geometría de la obra de atraque y amarre

El valor nominal de los parámetros geométricos que definen las dimensiones de la obra y de cada uno de sus tramos en cada fase o subfase de proyecto es el fijado por el proyectista e incluido en los planos y se corresponde con su valor medio.

En el caso de que se admitan desviaciones de los parámetros geométricos (tolerancias) debidas al proceso constructivo o a la fabricación que puedan ser relevantes en el proceso de verificación, el valor nominal de los parámetros geométricos incluirá la tolerancia en más o en menos según sea desfavorable en la verificación. Las tolerancias admisibles deberán consignarse en los planos y en el Pliego de Prescripciones Técnicas. En el caso de que no se consignen se considerará que son nulas. En los apartados de esta Recomendación correspondientes a las distintas tipologías estructurales se incluyen las tolerancias usuales admisibles en las obras de atraque y amarre.

### 4.2.2. Geometría del terreno

Deberá disponerse de un modelo completo de configuración geométrica del terreno, tanto emergido como sumergido, en el emplazamiento de la obra, extendiéndose espacialmente hasta incluir todas las zonas que pudieran estar afectadas por los distintos modos de fallo o tener incidencia en la definición de los agentes o acciones de proyecto. Dicho modelo quedará definido por:

- ◆ Las cotas de la superficie del terreno.
- ◆ Las cotas de los niveles estratigráficos que definen los distintos tipos de terreno y sus contactos.

El valor nominal de las cotas de la superficie del terreno se obtendrá a partir de levantamientos topográficos y batimétricos específicos realizados recientemente en el emplazamiento de la obra, que permitan su representación de una forma suficientemente precisa y fiable para los cálculos y para el proceso constructivo. Dicho valor se corresponde, en general, con un valor medio. La descripción de las técnicas y métodos utilizados en este tipo de trabajos excede del ámbito de esta ROM. Con carácter general, se considera suficientemente preciso y fiable para este tipo de obras la realización de los levantamientos batimétricos con ecosondas adaptadas a la profundidad y naturaleza del terreno en conjunción con sistemas electrónicos de posicionamiento, con espaciamientos de perfiles entre 10 y 25 m en el emplazamiento de la obra de atraque (hasta 50 m si el fondo es aplacerado y regular), entre 20 y 50 m en las zonas más próximas y entre 50 y 100 m en las áreas correspondientes a los canales de navegación y áreas de maniobra, dependiendo de la irregularidad del fondo. En aquellas áreas cuya profundidad afecte a las condiciones de propagación del oleaje hasta la obra ( $h < L/2$ ), cualquier cambio batimétrico ( $\Delta h/L$ ) que tenga unas dimensiones horizontales  $[b_x/L \geq 0,1]$  o  $[b_y/L \geq 0,1]$  transforma las características del oleaje, por lo que en esos casos es recomendable espaciamientos de perfiles menores de  $L/8$  <sup>(9)</sup>. Las ecosondas convencionales (monohaz y frecuencia única baja entre 20 y 80 kHz) pueden dar errores importantes en áreas con suelos blandos, fangos o altas concentraciones de sedimentos en suspensión en superficie al no reflejar en dichas capas. En estas áreas es imprescindible la utilización de ecosondas de doble frecuencia (33 y 210 kHz) que permiten detectar la capa superior y el espesor de este tipo de sedimentos. A su vez en zonas con una alta irregularidad o con la posibilidad de existencia de obstáculos es recomendable utilizar otros sistemas más precisos como ecosondas multihaz. En cualquier caso, deberá indicarse siempre la precisión de los levantamientos.

En España, el nivel de referencia topográfico (NRT) es el nivel medio del mar en Alicante. El nivel de referencia de los levantamientos batimétricos (NRM, nivel de referencia marino), suele ser local, adoptándose el cero del puerto, la bajamar máxima o cualquier otro nivel de referencia. Para evitar confusiones se recomienda que tanto los levantamientos topográficos como los batimétricos se refieran a un mismo plano de referencia, el cual debe materializarse sobre el terreno para permitir replanteos y comprobaciones ulteriores y que dicho nivel de referencia sea el marino (NRM). A estos efectos se recomienda que se incluya en un plano general del proyecto un croquis con la definición relativa de estos niveles.

La cartografía oficial publicada de carácter general tanto topográfica como batimétrica puede ser útil para estudios previos, pero insuficiente para las fases de anteproyecto y proyecto constructivo, debido a escalas no adecuadas y a que puede no ser totalmente fiable por falta de actualización, sin recoger procesos de sedimentación, erosión, vertidos, ... que pueden haberse producido de forma reciente. Las escalas de levantamiento recomendadas para el proyecto y construcción de obras de atraque y amarre son 1:500, 1:1000 y 1:2000. No obstante, para la definición de los procesos de transformación de los agentes climáticos marinos son normalmente suficientes escalas del orden de 1:10.000 para las zonas con profundidades reducidas ( $h < L/20$ ) y de hasta 1:50.000 para aquellas con profundidades intermedias ( $L/20 < h < L/2$ ). No obstante, si dichas zonas tienen una batimetría muy irregular o con presencia de bajos o cauces de dimensiones apreciables a estos efectos  $[b/L \geq 0,1]$ , la escala seleccionada deberá ser capaz de identificarlos.

Los valores de los parámetros geométricos de la superficie del terreno pueden estar sometidos a desviaciones causadas por imprecisiones en los levantamientos, tolerancias en la ejecución de los trabajos de dragado y

(9) Se adoptará como valor de  $L$  el correspondiente a longitud de onda asociada al periodo medio del oleaje en el estado de mar de proyecto más desfavorable a estos efectos.

variaciones en el tiempo debido a la existencia en el área de procesos morfológicos de sedimentación o erosión, bien naturales, bien causados por estructuras próximas o por la explotación portuaria, así como a asentamientos, los cuales deben ser investigados y cuantificados por el proyectista. En el caso de que estos procesos se puedan producir, el valor nominal de los parámetros geométricos incluirá el valor de dichas alteraciones cuando sean desfavorables para el proceso de verificación (Ver ROM 3.1-99).

Como caso particular, para la definición geométrica del calado en el atraque se considerará suficiente la aplicación del calado nominal o del de proyecto respectivamente en función del nivel que sea más desfavorable para la verificación de cada modo de fallo o parada analizado, siempre y cuando no se considere la posibilidad de que se presenten erosiones o socavaciones por debajo del calado de proyecto o sedimentaciones por encima del calado nominal. La definición de estos niveles se recoge en el apartado 3.2.2.2 de esta Recomendación. En el caso de que se considere la posibilidad de erosiones o socavaciones se deberá cuantificar el fenómeno y considerar niveles inferiores al calado de proyecto en función de dicha cuantificación. De igual forma, en el caso de que se considere la posibilidad de sedimentaciones se deberá igualmente cuantificar el fenómeno y considerar niveles superiores al calado nominal en función de dicha cuantificación.

Las cotas de los niveles estratigráficos que definen los distintos tipos de terreno y sus contactos serán las deducidas de los reconocimientos geológico-geotécnicos donde deben quedar claramente establecidos los distintos tipos de terreno y sus contactos. Los criterios de identificación de los diferentes terrenos, así como la intensidad y profundidad del reconocimiento geotécnico necesario para las obras de atraque y amarre para la fiabilidad y precisión de esta definición se recogen en la ROM 0.5-05 (Ver apartados 2.3, 2.7.2 y 2.12 a 2.14).

#### 4.2.3. Niveles de las aguas

Al contrario que en la mayor parte de la ingeniería civil, en la ingeniería marítima y portuaria los niveles tanto de las aguas exteriores como de los niveles de saturación en terrenos naturales y rellenos suelen no considerarse, dada su variabilidad, como factores geométricos sino como un agente climático, no siendo en consecuencia de aplicación a los mismos las recomendaciones generales dadas en este apartado para el tratamiento de los parámetros geométricos. Por dicha razón su definición se desarrolla más ampliamente en el apartado de esta ROM correspondiente a los agentes climáticos (Ver apartado 4.6.2.1).

Por tanto, también a los efectos de la definición geométrica de la obra y del terreno, los niveles de las aguas libres exteriores y de los niveles de saturación en terrenos naturales y rellenos que se adopten serán los compatibles con los distintos ciclos de sollicitación de los agentes predominantes de los estados analizados.

### 4.3 DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL TERRENO

Una vez definido el comportamiento del suelo que corresponde a cada estado (Ver ROM 0.5-05 y apartado 4.6 de esta Recomendación), las propiedades del terreno, tanto si se trabaja en tensiones totales como efectivas, se considerarán de carácter permanente en dicho estado. En función del tipo de formulación de la ecuación de verificación, las propiedades del terreno se definirán:

#### 4.3.1. Para formulaciones deterministas y determinista-probabilistas

Para las formulaciones determinista y determinista-probabilista de la ecuación de verificación, las propiedades del terreno que intervienen en la misma se definirán a través de valores nominales o representativos de cada capa homogénea del terreno.

Con carácter general se admitirá que el valor representativo de las propiedades del terreno es una *estimación prudente del valor medio* de los resultados obtenidos a través de una investigación geotécnica suficientemente fiable y precisa correspondiente a la zona de afección del modo de fallo considerado, salvo que por algún moti-



vo debidamente justificado, el proyectista decida optar por un valor más conservador. Tales excepciones suelen darse en aquellos casos en los que, por ejemplo, la información disponible no se considere suficiente para su tratamiento estadístico o se observe una gran dispersión de resultados. No obstante, cuando se disponga de una base estadística que permita la determinación de la función de distribución de un determinado parámetro geotécnico, su valor representativo será el valor característico o valor correspondiente al cuantil de la probabilidad de no excedencia del 5% o del 95% según resulte más desfavorable para los cálculos.

Para las obras de atraque y amarre, la intensidad y profundidad de la investigación geotécnica necesaria para considerar que ésta es suficientemente fiable y precisa se recoge en la ROM 0.5-05 (apartados 2.3, 2.7.2, 2.12 a 2.14 y 3.3.10).

#### 4.3.2. Para formulaciones probabilistas

Para formulaciones probabilistas de la ecuación de verificación, las propiedades del terreno que intervienen en la misma, correspondientes a cada capa homogénea, se definirán a través de su función de distribución.

Con carácter general y siempre que no se haya podido identificar expresamente una ley de variación más acorde con la variabilidad observada de cada parámetro geotécnico, se podrá adoptar como función de distribución la función log-normal definida por el valor medio ( $\lambda$ ) y la desviación estándar ( $\xi$ ) del logaritmo del parámetro geotécnico ( $X$ ). Es decir:

$$\text{Valor medio del logaritmo:} \quad \lambda = \ln X_m - \frac{1}{2}\xi^2$$

$$\text{Desviación estándar del logaritmo:} \quad \xi = \sqrt{\ln(1+v^2)}$$

Donde  $X_m$  y  $v$  son, respectivamente, el valor medio de  $X$  y su coeficiente de variación (Ver ROM 0.5-05).

En aquellos casos en los que la variabilidad del parámetro no se considere significativa; es decir que, en el rango de variación observado, ésta no sea relevante para el modo de fallo, los parámetros del terreno podrán, simplificadaamente, introducirse en la ecuación de verificación a través de su valor representativo.

En la ROM 0.5-05, así como en las Recomendaciones de la serie 2 referidas a cada tipología de obra de atraque, se recogen los parámetros del terreno a considerar para la verificación de cada modo de fallo en cada estado de proyecto.

### 4.4 DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

En las obras de atraque y amarre, los materiales de construcción más frecuentemente utilizados son: hormigón, acero, materiales de cantera, rellenos naturales, geotextiles, plásticos, aluminio y madera.

En cada estado, las propiedades de dichos materiales se considerarán de carácter permanente y, con carácter general, podrán definirse simplificadaamente, a través de valores nominales o representativos tanto si las ecuaciones de verificación se escriben en los formatos determinista o determinista-probabilista como en el probabilista, ya que los procesos constructivos y de fabricación están sometidos normalmente a procesos de control de calidad que limitan enormemente la variabilidad de las propiedades de los materiales.

El valor nominal o representativo de las propiedades de los materiales que compondrán la obra será especificado por el proyectista, así como los límites admisibles del rango de variación, debiendo consignarse en el Pliego de Prescripciones Técnicas.

Dichos valores se corresponden normalmente con:

- ◆ *Para las propiedades del hormigón, acero, geotextiles, plásticos, aluminio y madera:*
  - Para los pesos específicos y otros parámetros de resistencia, el valor característico o valor correspondiente al cuantil de la probabilidad de no excedencia del 5 % o del 95 %, según sea más desfavorable para los cálculos, correspondiente a la función de distribución de la propiedad considerada.
  - Para los parámetros de deformación, el valor medio.
- ◆ *Para las propiedades de materiales de cantera y rellenos naturales:*
  - Con la estimación prudente del valor medio: en el caso de los rellenos naturales deberán tenerse en cuenta las variaciones que experimentan los parámetros del terreno por el sólo hecho de ser removido de su lugar natural, así como el procedimiento de puesta en obra.

En el caso de que sea necesario considerar la variabilidad de las propiedades de los materiales en formulaciones probabilistas por ser relevante para el modo de fallo analizado, las propiedades de los materiales se definirán a través de su función de distribución. La ley de distribución más acorde con cada propiedad de los materiales, en función del nivel de control de calidad adoptado, se recogerá en la ROM 0.I.Recomendaciones sobre materiales constructivos.

Durante el proceso constructivo “in situ” o en fábrica deberá quedar garantizado el cumplimiento de los valores nominales o representativos especificados en el proyecto y, en su caso, de los valores límite de los parámetros que caracterizan las funciones de distribución para las propiedades de los materiales a través de la realización de los correspondientes ensayos. El Pliego de Prescripciones Técnicas deberá incluir el tipo, número y condiciones de los ensayos a realizar a estos efectos, así como los criterios que garantizan que los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de variabilidad y del intervalo de confianza exigido. Cuando se trate de materiales contruidos en un proceso industrial sujeto a procesos de control de calidad debidamente normalizados (Normas UNE, Europeas, ...), el valor representativo de las propiedades de los materiales o, en su caso, la función de distribución, estará garantizado por el fabricante.

En las distintas Recomendaciones de la serie 2 correspondientes a las distintas tipologías estructurales de obras de atraque y amarre, se incluirán las propiedades de los materiales a considerar para la verificación de cada modo de fallo, señalándose los valores representativos y los límites del rango de variación de las mismas que se recomienda en el proyecto, tomando en consideración, entre otras, la estrategia de durabilidad adoptada. De igual forma, en dichos apartados y mucho más detalladamente en la ROM 0.I se señalarán los ensayos que deben exigirse en los Pliegos de Prescripciones Técnicas para que dichos valores queden garantizados.

La variación de las propiedades de los materiales de construcción puede ser significativa para la definición de agentes y acciones asociados al propio comportamiento del material (Agentes de los materiales,  $q_m$ ).

## 4.5 DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL MEDIO FÍSICO

En cada estado, las propiedades del aire y del agua (densidad, viscosidad cinemática, ...) se considerarán de carácter permanente y, con carácter general, podrán definirse a través de valores nominales tanto si las ecuaciones de verificación se escriben en los formatos determinista o determinista-probabilista como en el probabilista, ya que el rango de variación observado en estos parámetros no es relevante para los distintos modos de fallo.

En ausencia de información más detallada en el emplazamiento, se adoptarán los siguientes valores nominales de las propiedades del aire y del agua que inciden en el proyecto de obras de atraque y amarre, correspondientes a valores medios:

- ◆ *Propiedades del aire:*
  - Densidad del aire ( $\rho_a$ ): Es función de la humedad, temperatura y presión atmosférica. Simplificada-mente podrá tomarse como valor nominal  $1,23 \text{ kg/m}^3$ . No obstante, cuando la obra de atraque se encuentre en zonas muy batidas por el oleaje en las que sea previsible o conocido que el viento pueda arrastrar abundante contenido de agua (rocién), deberán tenerse en cuenta aumentos en la densidad del aire compatibles con el oleaje existente. En algunos casos se ha medido hasta un máxi-

mo de  $15 \text{ kg/m}^3$ . También deberán tenerse en cuenta aumentos en la densidad del aire en aquellos emplazamientos en los que el viento pueda arrastrar un alto contenido de partículas sólidas (p.e. en zonas desérticas).

◆ *Propiedades del agua:*

- Densidad del agua ( $\rho_w$ ): Es función de la salinidad y la temperatura. Simplificadamente podrá tomarse como valor nominal  $1.000 \text{ kg/m}^3$  para agua dulce y  $1.030 \text{ kg/m}^3$  para agua marina en el Mediterráneo y  $1.025 \text{ kg/m}^3$  en el Atlántico. No obstante, cuando el agua se encuentre cargada de sedimentos o partículas en suspensión (p.e. rellenos hidráulicos, avenidas fluviales,...) deberán considerarse valores mayores de la densidad del agua entre  $1.200$  y  $1.600 \text{ kg/m}^3$  hasta que hayan finalizado los procesos de decantación <sup>(10)</sup>.
- Viscosidad cinemática del agua ( $\nu$ ): Es función de la salinidad y la temperatura. Simplificadamente podrá tomarse como valor nominal  $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  en el Atlántico y  $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  en el Mediterráneo.

## 4.6 DEFINICIÓN DE LOS AGENTES Y SUS ACCIONES

Los agentes capaces de provocar acciones significativas en las obras de atraque y amarre son los siguientes:

- ◆ Gravitatorio ( $q_g$ )
- ◆ Del medio físico ( $q_f$ )
- ◆ Del terreno ( $q_t$ )
- ◆ De uso y explotación ( $q_v$ )
- ◆ De los materiales ( $q_m$ )
- ◆ Del proceso constructivo ( $q_c$ )

Los agentes y las acciones resultantes tendrán la consideración de permanentes, no permanentes o variables y extraordinarios en función de su variabilidad temporal en el estado considerado, de acuerdo con lo dispuesto a estos efectos para todos los factores de proyecto en el apartado 4.1 de esta Recomendación.

A su vez, las acciones tendrán la consideración de dinámicas si su aplicación induce aceleraciones significativas en la totalidad de la estructura resistente o en partes de la misma. Es decir, en estos casos la condición de equilibrio obliga a tener en cuenta las fuerzas de inercia de las masas involucradas. Por tanto, el carácter dinámico de una acción no es intrínseco a la misma sino que depende de la respuesta de la estructura al ser solicitada por dicha acción. En general, la susceptibilidad de una estructura a experimentar un comportamiento dinámico depende de sus propias características en relación con las de la acción: frecuencias propias, modos de vibración y capacidad de amortiguamiento. En este sentido, el carácter dinámico de la acción será de naturaleza:

- ◆ Impulsiva, cuando el tiempo de aplicación de la acción es reducido respecto al periodo propio de oscilación de la obra, produciendo en ésta una respuesta que alcanza un valor máximo en el momento inicial y reduciéndose con posterioridad cíclicamente hasta la posición de reposo.
- ◆ Frecuencial o cíclica, cuando la acción varía a lo largo del tiempo con una frecuencia del orden de magnitud de la frecuencia propia o natural de oscilación de la obra (entre  $f_n/3$  y  $2f_n$ ).

En los apartados de esta Recomendación correspondientes a la formulación de los distintos agentes y acciones se señalará expresamente la consideración que tienen a los efectos de su variabilidad temporal, así como aquéllos casos en los que el comportamiento dinámico de la acción puede ser significativo y debe ser tomado en consideración en el procedimiento de verificación.

(10) La consideración de valores mayores de la densidad del agua puede ser relevante en algunas situaciones. Por ejemplo, para el cálculo de empujes en el trasdós de obras de atraque o las presiones en el interior de las celdas de cajones deberá considerarse como fase transitoria que en un primer periodo los rellenos no se comportan como un suelo sino como un líquido de alta densidad cuando su vertido en el trasdós de la obra de atraque o en el interior de las celdas se realiza mediante métodos hidráulicos que consisten en su colocación en obra mediante un proceso de sedimentación de partículas sólidas contenidas en un efluente que procede de un dragado.

#### 4.6.1. Agente gravitatorio ( $q_g$ )

El agente gravitatorio está asociado a la existencia de la gravedad terrestre ( $g$ ), pudiendo, en general, distinguirse dos tipos de acciones:

- ◆ Peso propio ( $Q_{g,1}$ ): carga producida por los pesos de los diferentes elementos estructurales.
- ◆ Pesos muertos ( $Q_{g,2}$ ): pesos de los elementos no resistentes en sentido estructural, pero soportados o incluidos en la obra, tales como elementos constructivos, pavimentos, defensas, instalaciones fijas, lastres, rellenos, adherencias marinas, etc.

En cada estado, las acciones gravitatorias se considerarán de carácter permanente y, con carácter general, podrán definirse simplificadaamente a través de valores nominales o representativos tanto si las ecuaciones de verificación se escriben en formatos determinista o determinista-probabilista como en formato probabilista, dado que es usual que para las obras de atraque y amarre se exija que estos factores tengan un reducido rango de variación.

Dado su origen, las acciones gravitatorias vendrán caracterizadas por fuerzas verticales, concentradas o repartidas.

##### 4.6.1.1. Peso propio ( $Q_{g,1}$ )

Los valores nominales o representativos de los pesos propios se calcularán a partir de los valores nominales de los factores geométricos consignados en los planos y en el Pliego de Prescripciones Técnicas (Ver apartado 4.2) y de los valores nominales o representativos de los pesos específicos unitarios o aparentes ( $\gamma$ ) correspondientes a los distintos elementos y materiales que conforman la obra, especificados en el Pliego de Prescripciones Técnicas, y al terreno. Estos valores se corresponden con valores medios o con valores característicos de acuerdo con lo dispuesto en los apartados 4.3 y 4.4 de esta Recomendación.

Por tanto, el peso propio puede definirse a través de la formulación:

$$Q_{g,1} = \rho \cdot g \cdot V = \gamma V$$

Siendo  $V$  el volumen del elemento considerado en el caso de cargas concentradas y el volumen por unidad de superficie en el caso de cargas repartidas.

En el caso de que se admitan desviaciones admisibles de los parámetros geométricos (tolerancias) de acuerdo con lo previsto en el apartado 4.2.1, éstas se tomarán en consideración para la definición de los valores nominales de los pesos propios siempre que sean desfavorables para la verificación.

Cuando no se disponga de información detallada en el emplazamiento o el proyecto no contemple la definición específica de los valores nominales o representativos de los pesos específicos de los materiales, se podrán tomar los consignados en la tabla 4.6.1.1 para los más habituales. Para los pesos específicos de los terrenos y de los rellenos ver respectivamente las tablas 2.4.3, 4.9.8 y 4.9.9 de la ROM 0.5-05.

Para el cálculo de los pesos propios de las partes de la obra que se encuentren total o parcialmente sumergidos se recomienda calcular el peso propio a través de los pesos específicos saturados, considerando adicionalmente los empujes ascensionales del agua equivalentes al peso del agua desplazada (empuje de Arquímedes) como una acción independiente. En el caso de los pesos específicos del terreno natural y rellenos de aportación se considerarán con su valor saturado o sumergido ( $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ ), dependiendo de la ecuación de verificación adoptada, según se plantee ésta en tensiones totales o en tensiones efectivas. En el caso de que existan gradientes hidráulicos significativos, cuando la ecuación de verificación se plantee en tensiones efectivas, la utilización de pesos específicos sumergidos exigirá la consideración simultánea de las correspondientes fuerzas de arrastre (ver apartado 3.4.5 de la ROM 0.5-05). En las sucesivas Recomendaciones de la serie 2 correspondientes a cada tipología de obra de atraque y amarre se indicará expresamen-

te cuándo estos gradientes hidráulicos son significativos para los cálculos del peso propio. Los niveles de las aguas libres exteriores y de los niveles de saturación que se adopten para estos cálculos serán los compatibles con los distintos ciclos de sollicitación de los agentes predominantes de los estados de proyecto analizados (ver apartado 4.6.2.1).

El peso propio de un elemento resistente cuyas dimensiones finales van a verificarse en el proceso de cálculo se estimará inicialmente en la fase de predimensionamiento. Si las sollicitaciones finales de cálculo conducen a unas dimensiones de los elementos resistentes cuyos pesos no difieren de los obtenidos en el predimensionamiento en más de un 3% podrá prescindirse de un nuevo cálculo, excepto en aquellos casos en que el peso propio sea determinante para el elemento o estructura que se analiza.

Cuando el peso propio sea determinante para la verificación de un modo de fallo deberán incluirse en el Pliego de Prescripciones Técnicas del Proyecto las cláusulas correspondientes que impongan la obligatoriedad de que los referidos pesos sean alcanzados o no se superen durante la ejecución de la obra, así como los distintos métodos de control en obra de dichos valores y, en su caso, las tolerancias correspondientes.

**Tabla 4.6.1.1. Pesos específicos unitarios o aparentes y porosidades usuales de elementos constructivos y estructurales**

A. ELEMENTOS BÁSICOS		Peso específico aparente (kN/m <sup>3</sup> )	Peso específico saturado (kN/m <sup>3</sup> )	Porosidad (%)
A1 – AGUA	Dulce	9,8	–	–
	Marina	10,1	–	–
A2 – LIGANTES BITUMINOSOS (a 25°)	Alquitrán	12,8	–	–
	Betunes y Emulsiones	10,8	–	–
A3 – MADERAS	Seca blanda	5,9	–	–
	Seca dura	8,8	–	–
	Mojada	10,8	–	–
A4 – MATERIALES CERÁMICOS Y AFINES	Baldosa de cemento	20,6	–	–
	Baldosa de gres	16,7	–	–
	Baldosa de cerámica	17,7	–	–
	Fibro cemento	19,6	–	–
	Ladrillo cerámico hueco	10,8	–	–
	Ladrillo cerámico perforado	13,7	–	–
	Ladrillo cerámico macizo	17,7	–	–
	Ladrillo silicocalcáreo macizo	18,6	–	–
A5 – METALES	Acero	77,0	–	–
	Aluminio	26,5	–	–
	Bronce	83,4	–	–
	Cobre	87,3	–	–
	Estaño	72,6	–	–
	Fundición	71,6	–	–
	Latón	83,4	–	–
	Plomo	111,8	–	–
A6 – ROCAS	Zinc	70,6	–	–
	Arenisca	25,5	–	–
	Basalto	27,5	–	–
	Caliza	27,5	–	–
	Creta o caliza porosa	19,6	–	–
	Diorita	27,5	–	–
	Gneis	29,4	–	–
	Granito	27,5	–	–
	Lapillis (picón)	24,5	–	–
	Marga	22,6	–	–
	Mármol	27,5	–	–
	Pizarra	23,5	–	–

**Pesos específicos unitarios o aparentes y porosidades usuales de elementos constructivos y estructurales (continuación)**

A. FÁBRICAS		Peso específico aparente ( $kN/m^3$ )	Peso específico saturado ( $kN/m^3$ )	Porosidad (%)
B1 – DE BLOQUES (Según tipo de bloque)		12,8-15,7	–	–
B2 – DE LADRILLO (Según tipo de ladrillo)		11,8-19,6	–	–
B3 – DE GAVIONES		19,6	22,6	30,0
B4 – HORMIGONES	Normal en masa	22,5-23,5	–	–
	Normal armado y pretensado	24-25	–	–
	Normal con fibras	23-24	–	–
	Ligeros	17,5-18	–	–
	Epoxi	22,5-23	–	–
	Ciclópeo	19-20	–	–
	Pesados	29-30	–	–
B5 – MAMPOSTERÍAS CON MORTERO (Careadas, concertadas, descafiladas) (Según peso específico de la roca)		23,5-26,5	–	–
B6 – MAMPOSTERÍAS EN SECO (Según peso específico de la roca)		24,5-27,5	–	–
B7 – SILLERÍAS (Según peso específico de la roca)		25,5-29,4	–	–
C. PAVIMENTOS		Peso específico aparente ( $kN/m^3$ )	Peso específico saturado ( $kN/m^3$ )	Porosidad (%)
C1 – CAPAS GRANULARES		22,6	–	20
C2 – SUELOS ESTABILIZADOS		20,6	–	–
C3 – MEZCLAS BITUMINOSAS		24,5	–	–
C4 – PAVIMENTOS DE HORMIGÓN		23,5	–	–
C5 – ADOQUINES DE PIEDRA LABRADA		25,5	–	–
C6 – ADOQUINES DE HORMIGÓN		21,6	–	–
D. TERRENOS NATURALES		Peso específico aparente ( $kN/m^3$ )	Peso específico saturado ( $kN/m^3$ )	Porosidad (%)
D1 – SUELOS GRANULARES	Grava densa	18,2	21,5	30
	Grava floja	15,6	19,6	40
	Grava arenosa densa	20,8	22,8	20
	Grava arenosa floja	18,2	21,5	30
	Arena densa	17,0	20,4	35
	Arena floja	15,6	19,6	40
D2 – SUELOS COHESIVOS	Limo y arcilla arenolimoso media	16,8	20,6	37,5
	Limo y arcilla arenolimoso blanda	14,8	19,0	45
	Arcilla consistente (sobreconsolidada)	17,5	21,0	35
	Arcilla blanda (normalmente consolidada)	13,5	18,5	50
	Sedimento orgánico muy arcilloso	14,0	16,5	60
	Sedimento orgánico poco arcilloso	10,0	14,0	75
	Turba	12,8	12,8	–
	Fango	14,7	14,7	–
E. RELLENOS		Peso específico aparente ( $kN/m^3$ )	Peso específico saturado ( $kN/m^3$ )	Porosidad (%)
EI – ESCOLLERAS Y PEDRAPLENES (colocación aleatoria) De granulometría abierta:	Escollera natural (s/peso esp. roca)	17,5-16,0	21,5-20,0	37-40
	Bloques paralelepípedicos	13,2-12,0	17,7-17,0	40-50
	Tetrápodos	12,0-11,3	17,5-16,7	50-55
	Dolos	11,3-10	16,7-16,0	55-60
	Acrópodos, Core-Loc	12,0-11,3	17,5-16,7	50-60
	Pedraplenes	17,5-16,5	21,0-20,0	40
	Balasto	15,7	19,6	40

**Pesos específicos unitarios o aparentes y porosidades usuales de elementos constructivos y estructurales (continuación)**

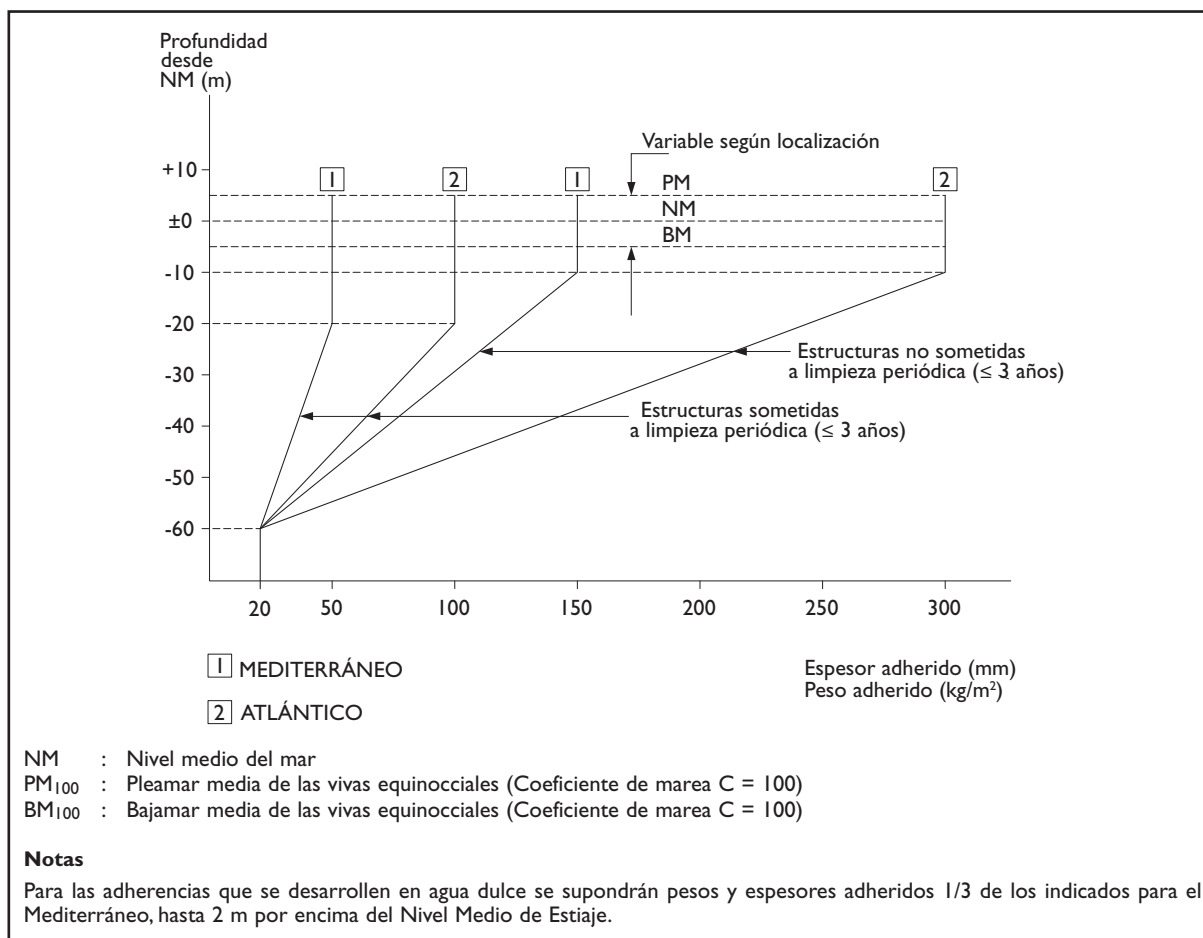
E. RELLENOS		Peso específico aparente ( $kN/m^3$ )	Peso específico saturado ( $kN/m^3$ )	Porosidad (%)
E1 – ESCOLLERAS Y PEDRAPLENES (colocación aleatoria) De granulometría cerrada (todo uno y detritus de cantera o suelos seleccionados):	Compacto	20,3	22,8	25
	Poco compacto	16,9	20,5	35
E2 – RELLENOS GRANULARES Y COHESIVOS	Gravas compactas	18,9	21,9	30
	Gravas poco compactas	16,5	20,2	40
	Arenas compactas	19,0	21,9	30
	Arenas poco compactas	16,5	20,0	40
	Limos	14,0	14,0	–
	Terraplenes	16,5	20,5	40
E3 – RELLENOS ANTRÓPICOS	Escombros urbanos y basuras de demolición compactados	12,8	14,7	20
E4 - RELLENOS NO CONVENCIONALES	Escorias de alto horno granulares compactas	13,5	16,0	30
	Escorias de alto horno granulares poco compactas	11,5	15,0	40
	Escorias alto horno troceadas compactas	19,5	21,0	25
	Escorias de alto horno troceadas poco compactas	16,0	19,0	40
	Lapillis compactos	18,0	21,0	30
	Lapillis poco compactos	16,5	20,0	35
	Cenizas volantes compactas	13,0	17,0	40
	Cenizas volantes poco compactas	8,5	14,5	60
F. OTROS		Peso específico aparente ( $kN/m^3$ )	Peso específico saturado ( $kN/m^3$ )	Porosidad (%)
F1 – ADHERENCIAS MARINAS		9,8	–	–
<b>Notas</b> Para materiales compuestos el peso específico aparente emergido puede variar considerablemente según las condiciones locales, y en particular, según el contenido de agua.				

**4.6.1.2. Pesos muertos ( $Q_{g,2}$ )**

Para la definición de los valores nominales o representativos de los pesos muertos se tendrán en cuenta todos los criterios contemplados en el apartado 4.6.1.1, con las siguientes consideraciones adicionales:

- ◆ Se recomienda que los pesos del equipamiento y de las instalaciones fijas sean obtenidos directamente de fabricantes y proveedores o mediante pesadas directas de los elementos correspondientes.

Dada su poca relevancia en relación con otras imprecisiones de cálculo, la carga muerta debida a adherencias marinas únicamente se tendrá en cuenta en aquellos casos en que el aumento de peso originado por ellas pueda ser significativo para la seguridad o la aptitud para el servicio de la estructura (p.e. en algunas obras de atraque flotantes). No obstante, deberá considerarse la actuación de adherencias marinas en cuanto causantes de importantes sobreespesores y modificaciones de la rugosidad superficial, los cuales deberán ser tenidos en cuenta en la valoración de algunas acciones (p.e. fuerzas de arrastre e inercia causadas por el oleaje sobre obras de atraque y amarre de pilotes). No se considerarán adherencias marinas en fase de construcción, excepto si la duración asignada en proyecto a dicha fase es superior a 3 años. En ausencia de información local detallada, la cuantificación de las adherencias marinas en las aguas costeras españolas podrá aproximarse mediante la tabla 4.6.1.2.

**Tabla 4.6.1.2. Cuantificación de adherencias marinas en las aguas costeras españolas**

#### 4.6.2. Agentes del medio físico ( $q_f$ )

Los principales agentes del medio físico que afectan a las obras de atraque y amarre, bien produciendo efectos directos en las mismas (acciones), bien solicitando a otros factores de proyecto (p.e. el buque, las mercancías, los equipos de manipulación de mercancías, ...), son los asociados a las manifestaciones de la dinámica atmosférica y marina, a los gradientes térmicos y a los movimientos sísmicos. Se distinguirán los siguientes agentes:

- ◆ Climáticos atmosféricos básicos: presión atmosférica y viento ( $q_{fc,1}$  y  $q_{fc,2}$ )
- ◆ Otros climáticos atmosféricos: lluvia, nieve y hielo ( $q_{fc,3}$ )
- ◆ Climáticos marinos y fluviales ( $q_{fc,4}$  a  $q_{fc,6}$ )
- ◆ Térmicos ( $q_{ft}$ )
- ◆ Sísmicos ( $q_{fs}$ )

La manifestación conjunta estacionaria de varios agentes del medio físico atmosféricos y marinos con el mismo origen (p.e. presión atmosférica, viento, oleaje, marea meteorológica) define un estado meteorológico, en el que puede considerarse que estos agentes están en mayor o menor medida correlacionados. De igual forma, la manifestación del sismo define un estado sísmico.

Los agentes del medio físico climáticos tienen normalmente un carácter variable en los estados meteorológicos, y en general, salvo en el caso de los otros climáticos atmosféricos, la variabilidad temporal de cada uno de los agentes y de las acciones por ellos generadas tiene un marcado carácter oscilatorio. En estos casos, en cada estado esta variabilidad puede describirse mediante modelos de probabilidad de las variables básicas que los defi-



nen en cada estado y sus parámetros estadísticos, o bien mediante un análisis frecuencial obteniendo el espectro y los correspondientes parámetros espectrales. Los parámetros estadísticos o espectrales que definen un agente del medio físico en un determinado estado se denominan variables de estado. El agente sísmico tiene también un carácter variable en el estado sísmico. No obstante, en dicho estado puede considerarse que los agentes climáticos tienen el carácter de permanentes. Tanto en los estados meteorológicos como sísmicos el agente térmico tiene un carácter de permanente.

La variabilidad estadística de los agentes del medio físico, en el emplazamiento y en presencia de la obra, durante una fase de proyecto se recomienda, siempre que se disponga de datos, que se describa a partir de la función de distribución conjunta de las variables de estado que caracterizan los agentes con el mismo origen, en el año meteorológico; la cual define conjuntos de valores posibles y concomitantes de los agentes y su probabilidad de presentación. Si se consideran únicamente los valores de las variables de estado pertenecientes a la cola superior, las funciones de distribución se denominan regímenes extremales. Si, por el contrario se consideran los valores centrados de las variables, las funciones de distribución se denominan regímenes medios.

No obstante, en ausencia de regímenes conjuntos y por simplicidad en el tratamiento de muchas variables será admisible utilizar sustitutivamente los regímenes marginales, escalares o direccionales, de la variable de estado considerada como principal <sup>(11)</sup> correspondiente al agente predominante para el modo de fallo o parada analizado, considerándose el resto de variables, tanto del mismo agente como de otros agentes, correlacionadas con ésta. Estas correlaciones pueden definirse a partir de las funciones de distribución conjuntas bivariadas con la variable principal por medio de las funciones de distribución de la variable correlacionada, condicionadas a cada valor y, en su caso, dirección de la variable principal. A su vez, para las formulaciones deterministas y semiprobabilistas de las ecuaciones de verificación será admisible sustituir dichas funciones de distribución por funciones que correlacionan dicha variable con cada una de las otras que caracterizan al mismo u otro agente dependientes de ella. A estos efectos, dichas funciones se obtendrán mediante un ajuste analítico, considerando que a cada valor de la variable principal se le asigna el valor correspondiente a una determinada probabilidad de no excedencia en la función de distribución de la variable correlacionada condicionada a dicho valor de la variable principal. En general dicha probabilidad puede tomarse igual al 85% o al 15%, en función de que sean más desfavorables los valores superiores o los inferiores de la variable correlacionada (Ver figura 4.6.2.1). En el caso de que por las condiciones del emplazamiento sea admisible considerar que algunos agentes climáticos no están correlacionados o presentan una débil dependencia entre sí es admisible utilizar los regímenes marginales de las variables principales de los agentes que pueden considerarse independientes, conjuntamente con las funciones de distribución conjuntas bivariadas de cada una de dichas variables y las variables que están correlacionadas con las mismas (Ver apartados 4.1.1 y 4.1.2).

#### 4.6.2.1. Agentes atmosféricos básicos y climáticos marinos

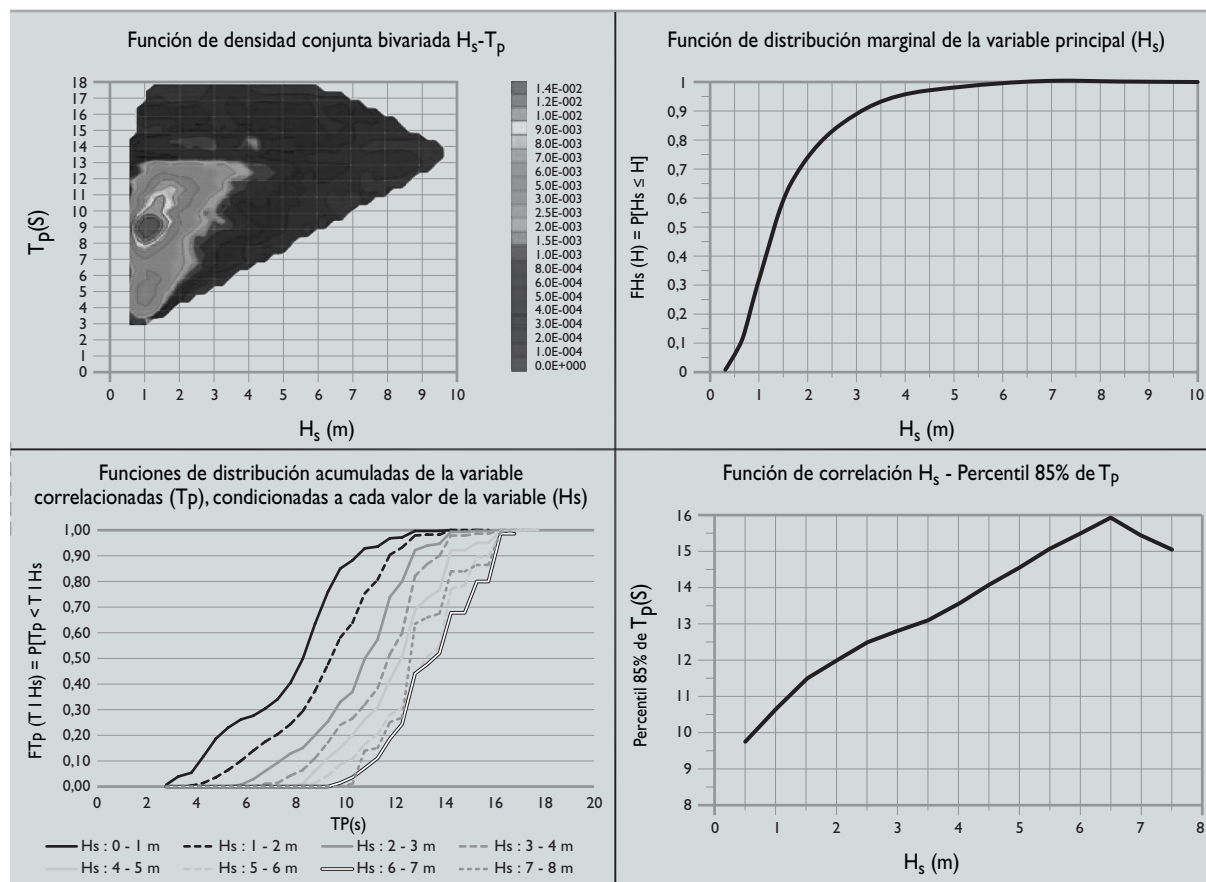
Los agentes atmosféricos básicos y climáticos marinos que definen un estado meteorológico que tienen una mayor importancia para las obras de atraque y amarre son:

- ◆ Viento ( $q_{fc,2}$ ).
- ◆ Corrientes permanentes y uniformes ( $q_{fc,4}$ ) y variables ( $q_{fc,5}$ ).
- ◆ Oscilaciones marinas y fluviales de periodo largo ( $T > 3 h$ ): niveles de agua asociados a mareas y regímenes fluviales ( $q_{fc,61}$ ).
- ◆ Oscilaciones marinas de periodo intermedio ( $30 s < T < 3 h$ ): ondas largas ( $q_{fc,62}$ ).
- ◆ Oscilaciones del mar de periodo corto ( $3 s < T < 30 s$ ): oleaje ( $q_{fc,63}$ ).

Y en menor escala también lo pueden definir otros agentes atmosféricos no básicos como la lluvia, la niebla, el hielo, la temperatura, etc.

(11) Se define como variable de estado principal de un agente a la variable a la cual es más sensible el comportamiento de la obra frente a cada uno de los modos de fallo o parada.

**Figura 4.6.2.1. Ejemplos de funciones de densidad conjuntas biviadas, funciones de distribución marginales y condicionadas y funciones de correlación asociadas (Agente: oleaje)**



La descripción completa y detallada de estos agentes, de las funciones de distribución de las variables básicas que definen su variabilidad en cada estado, así como de las diferentes variables de estado o parámetros estadísticos o espectrales que los caracterizan en el estado no es objeto de esta ROM, pudiendo a estos efectos consultarse para el agente viento la ROM 0.4-94, y para las oscilaciones marinas y las corrientes la ROM 1.0. Diques de abrigo. Criterios generales y factores de proyecto.

Los parámetros de cada agente que deben tomarse en consideración para la definición de las acciones y demás factores dependientes del agente que intervienen en una ecuación de verificación están asociados con los fundamentos del modelo de cálculo de las acciones y de la propia ecuación de verificación, y dependen generalmente del tipo de obra, elemento o instalación, de la duración del estado y del modo de fallo o parada considerado, así como de si hacemos la evaluación a nivel básico (ej. por ola a ola o componente espectral a componente espectral) o a nivel de estado (utilizando en ese caso variables de estado). En la tabla 4.6.2.1 se incluyen las variables de estado correspondientes a los agentes que, con carácter general, se adoptan para la definición de las acciones que actúan sobre las obras de atraque y amarre, cuando hacemos la evaluación a nivel estado. En los correspondientes apartados de esta Recomendación, sí como en las sucesivas Recomendaciones de la Serie 2 se indicarán los parámetros a utilizar en cada caso.

#### ◆ Correlaciones entre los agentes climáticos en un estado meteorológico

En relación con el grado de correlación existente en el emplazamiento entre los distintos agentes climáticos que definen un estado meteorológico, pueden distinguirse las siguientes áreas:

- *Áreas restringidas o direcciones en las que el oleaje que afecta a la obra de atraque está generado por el viento local:* puede considerarse que en estas áreas el viento, el oleaje y las corrientes de deriva cau-

sadas por el viento están completamente correlacionados. Por el contrario, en esta situación, simplícidamente podrá considerarse que el viento local y los niveles de agua no presentan ningún tipo de correlación, despreciándose las pequeñas sobreelevaciones del nivel de las aguas que el viento local pudiera causar. Ejemplos de estas áreas pueden ser los interiores de rías y estuarios, las bahías amplias abrigadas, ...

**Tabla 4.6.2.1. Variables de estado de los agentes climáticos que generalmente se adoptan para la definición de las acciones que actúan sobre las obras de atraque y amarre \*)**

AGENTE	PARÁMETRO	En instalaciones fijas		En instalaciones flotantes			
		Obras cerradas	Obras abiertas	Pequeñas embarcaciones y elementos flotantes hasta 25 m de eslora	Buques y estructuras flotantes de eslora mayor de 25 m		
OLEAJE	Altura de ola	$H_{max}$	$H_{max}$	$H_{1/3}, H_{rms}$ o $H_{max}$			
	Periodo	$\bar{T}$ o $T_p$					
	Dirección	$\bar{\theta}$ (todas las posibles o bien la más crítica si su identificación es posible)					
NIVELES DE AGUA ASOCIADOS A MAREAS Y RÉGIMENES FLUVIALES	Nivel alto	$h_{AM}, 10 \text{ min}$					
	Nivel bajo	$h_{BM}, 10 \text{ min}$					
CORRIENTES	Velocidad de la corriente	$V_C, 10 \text{ min}(z')$					
	Dirección de la corriente	$\alpha$ (todas las posibles o bien la más crítica si su identificación es posible. En cualquier caso la dirección debe ser compatible con el nivel de agua adoptado)					
		En elementos e instalaciones fijas			En elementos e instalaciones móviles		
		Equipamientos y subestructuras	Estructuras o partes de ella cuya mayor dimensión horizontal y vertical no sobrepasa los 50 m	Estructuras o partes de ella cuya mayor dimensión horizontal o vertical excede los 50 m	Equipamiento y equipos e instalaciones de manipulación y transporte de mercancías	Pequeñas embarcaciones y elementos flotantes hasta 25 m de eslora	Buques y estructuras flotantes de eslora mayor de 25 m.
VIENTO	Velocidad del viento	$V_v, 3 \text{ s}(z)$	$V_v, 5 \text{ s}(z)$	$V_v, 15 \text{ s}(z)$	$V_v, 3 \text{ s}(z)$	$V_v, 15 \text{ s}(z)$	$V_v, 1 \text{ min}(z)$
	Dirección del viento	$\alpha$ (todas las posibles o bien la más crítica si su identificación es posible)					
* Las variables de estado a considerar incluidas en esta tabla se recomiendan con carácter general, sin perjuicio de que deban considerarse otras variables para la verificación de algunos modos de fallo específicos adscritos tanto a estados límite últimos (p.e. inestabilidades hidráulicas: socavaciones, erosiones externas e internas,...), como a estados límites de servicio (p.e. durabilidad) y estados límites operativos (p.e. suspensión de la permanencia de los buques en el atraque: agitación,...). Para estos casos, las variables de estado recomendadas se indicarán expresamente en las Recomendaciones de la Serie 2 en los que se definan las correspondientes ecuaciones de verificación de estos modos de fallo.							

**Variables de estado de los agentes climáticos que generalmente se adoptan para la definición de las acciones que actúan sobre las obras de atraque y amarre (continuación)**

<b>Leyenda</b>	
$H_{rms}$	: altura de ola media cuadrática del estado de mar. Puede considerarse equivalente a $0,706 H_{1/3}$ .
$H_{1/3}$	: valor medio del tercio de alturas de ola mayores del estado de mar. Puede considerarse equivalente a la altura de ola significativa espectral ( $H_{m0}$ ), denominándose también altura de ola significativa ( $H_s$ )
$H_{1/10}$	: valor medio del décimo de alturas más altas del estado de mar. En ausencia de información más detallada pueden adoptarse con carácter general las siguientes relaciones: – $H_{1/10} = 1,27 H_{1/3}$ en aguas profundas. – $H_{1/10} = (de\ 1,27\ a\ 1,10) H_{1/3}$ en profundidades relativas ( $h/L < 1/10$ ), en función del porcentaje de olas en rotura. A los efectos de esta tabla se adoptará como $L$ la longitud de onda asociada el periodo medio del oleaje en un estado de mar.
$H_{max}$	: valor más probable de la máxima altura de ola del estado de mar. En ausencia de información más detallada puede adoptarse con carácter general la siguiente relación: – $H_{max} = (de\ 1,60\ a\ 2,00) H_{1/3}$ , en aguas profundas, en función del número de olas del estado de mar. – $H_{max} = (de\ 1,60\ a\ 1,30\ y\ de\ 2,00\ a\ 1,60) H_{1/3}$ en profundidades relativas ( $h/L < 1/10$ ), en función del número de olas del estado de mar y del porcentaje de olas en rotura. En cualquier caso, $H_{max}$ no superará la máxima altura de ola posible [simplificadamente en estos casos puede adoptarse que $H_{max} < 0,9 h$ para fondo plano o pendientes suaves o muy tendidas, $tg\alpha < 1/50$ ]
$T_{1/3}$	: valor medio de los periodos del tercio de olas más altas del estado de mar. También se denomina periodo significativo ( $T_s$ ).
$\bar{T}$	: periodo medio en un estado de mar. Puede considerarse equivalente al periodo medio espectral tipo (0,2). [ $T_m = T_{0,2}$ ].
$T_p$	: periodo de pico o periodo en el cual el espectro del oleaje tiene su contenido energético máximo.
$\bar{\theta}$	: Dirección media de propagación del oleaje.
$h_{AM,10\ min}$	: nivel alto de las aguas, obtenido como el valor medio correspondiente a periodos de medición de 10 minutos.
$h_{BM,10\ min}$	: nivel bajo de las aguas, obtenido como el valor medio correspondiente a periodos de medición de 10 minutos.
$V_{C,10\ min}(z')$	: velocidad horizontal de la corriente a una altura $z'$ desde el fondo, obtenida como el valor medio correspondiente a periodos de medición de 10 minutos. $\bar{V}_C$
$\bar{V}_v(z')$	: velocidad horizontal media del viento a una altura $z$ sobre el nivel de las aguas exteriores, obtenida como el valor medio correspondiente a periodos de medición de 10 minutos.
$V_{v,3\ s}(z)$	: velocidad horizontal máxima probable del viento a una altura $z$ sobre el nivel de las aguas exteriores, considerando un periodo de medición de 3 segundos. Simplificadamente, en estos casos puede adoptarse de forma general: $V_{v,3\ s} = 1,44 \bar{V}_v$ .
$V_{v,5\ s}(z)$	: velocidad horizontal máxima probable del viento a una altura $z$ sobre el nivel de las aguas exteriores, considerando un periodo de medición de 5 segundos. Simplificadamente, en estos casos puede adoptarse de forma general: $V_{v,5\ s} = 1,42 \bar{V}_v$ .
$V_{v,15\ s}(z)$	: velocidad horizontal máxima probable del viento a una altura $z$ sobre el nivel de las aguas exteriores, considerando un periodo de medición de 15 segundos. Simplificadamente, en estos casos puede adoptarse de forma general: $V_{v,15\ s} = 1,38 \bar{V}_v$ .
$V_{v,1\ min}(z)$	: velocidad horizontal máxima probable del viento a una altura $z$ sobre el nivel de las aguas exteriores, considerando un periodo de medición de 1 minuto. Simplificadamente, en estos casos puede adoptarse de forma general: $V_{v,1\ min} = 1,31 \bar{V}_v$ .
$\alpha$	: Dirección del viento.

En ausencia de datos conjuntos en el emplazamiento, estas correlaciones podrán aproximarse a través de métodos y modelos numéricos o paramétricos de generación y propagación de oleaje de viento (Ver Anejo II. ROM 0.4-95), considerando la velocidad del viento como variable principal. En estos casos, la correlación entre el viento y la corriente de deriva causada por el viento puede aproximarse considerando que la velocidad media de la corriente generada por el viento en superficie está en el rango del 2 al 5% de la velocidad media del viento a una altura de 10 m sobre el nivel del mar y con una dirección desviada 20-25° respecto a la dirección del viento en sentido horario en el hemisferio norte y antihorario en el hemisferio sur, admitiéndose una reducción lineal de la misma hasta el fondo. En mares con marea astronómica significativa o en áreas sometidas a regímenes fluviales se considerará otro régimen independiente de correlación entre las corrientes y los niveles de agua igualmente a lo señalado para las áreas exteriores o sometidas a oleajes procedentes de alta mar.

- **Áreas exteriores o aquellas sometidas fundamentalmente a oleaje procedente de alta mar:** en dichas áreas es admisible considerar que el viento local y el resto de agentes climáticos presentan bajos niveles de correlación, pudiéndose tratar como agentes independientes. Por el contrario, en estos casos, oleaje, niveles de agua, corrientes y, en su caso, ondas largas se considera que pueden presentar niveles importantes de correlación.

Aunque en estas áreas, las corrientes que pueden presentarse son tanto las corrientes oceánicas asociadas a las circulaciones en los mares a nivel global, las corrientes generadas por el oleaje en la zona de rompientes y las debidas al viento local, como las debidas a variaciones de los niveles de

agua y a los regímenes fluviales, en los casos generales de obras de atraque y amarre situadas en las proximidades de la costa será suficiente considerar únicamente las corrientes debidas a mareas y, en su caso, a regímenes fluviales. Estas corrientes son altamente dependientes de los niveles de las aguas, estableciéndose las correlaciones entre ambos en zonas abiertas, en los mares con marea, a través de la obtención de la “elipse de corriente” del vector “velocidad de la corriente” en la que se señalan los distintos niveles de marea simultáneos con cada velocidad y dirección de la corriente (Ver ROM I.0). En áreas portuarias interiores la elipse de corriente se simplifica considerando únicamente corriente entrante y corriente vaciante. El máximo valor de la velocidad de la corriente tanto entrante como vaciante puede considerarse que se produce cuando el nivel de las aguas coincide con el nivel medio del mar. Cuando se consideren los niveles alto y bajo de las aguas se considerará que la velocidad de la corriente es cero. Como orden de magnitud, incluso en zonas con grandes carreras de marea puede considerarse que la velocidad media de la corriente de marea en áreas portuarias generalmente no supera los 3 m/s. En España, dadas las características de las mareas en su litoral, no supera 1,5 m/s. Si la obra de atraque se encuentra situada en un puerto marítimo-fluvial, deberán considerarse dos regímenes de correlación independientes: uno ligado a la marea y otro a la hidrología. En áreas sin marea astronómica significativa o no afectadas por regímenes fluviales puede desprejarse la acción de este tipo de corrientes.

En estos casos, en ausencia de datos conjuntos en el emplazamiento, los valores de los agentes a pie de obra, así como las correlaciones entre los diferentes agentes dependientes en dicho emplazamiento podrán obtenerse a partir de mediciones obtenidas en sus proximidades, trasladándolos hasta pie de obra mediante la aplicación de modelos hidrodinámicos de generación y/o propagación de validez reconocida para las condiciones locales, considerando las condiciones locales existentes en el emplazamiento de la obra y las debidas a la presencia de la misma (Ver ROM I.0). En particular, dada la gran influencia que pueden tener los niveles de agua y las corrientes en los parámetros del oleaje, los cuales pueden incidir en la rotura del oleaje y en las transformaciones del mismo en su aproximación a la costa y hasta el emplazamiento de la obra por el efecto, entre otros, de los procesos de refracción, transmisión, difracción y reflexión, las correlaciones existentes entre ambos deberán obtenerse mediante la realización de estudios de propagación del oleaje, considerando, no únicamente los niveles alto y bajo del nivel de las aguas compatibles con dicho oleaje, sino también niveles intermedios siempre y cuando pudieran ser relevantes para el oleaje. Así mismo, cuando sea relevante, deberá tomarse en consideración las correlaciones existentes entre la presencia de ondas largas que pudieran afectar a las obras, el oleaje y los niveles del mar (Ver ROM I.0).

- *Áreas afectadas tanto por oleajes locales de viento significativos como por oleajes provenientes de alta mar:* En este caso deberán considerarse dos regímenes de correlación independientes, uno ligado al viento local y otro al oleaje proveniente de alta mar de acuerdo con lo previsto en los apartados anteriores.

A los efectos de simplificar la consideración del conjunto de los agentes de actuación simultánea que definen el estado meteorológico, en cada fase de proyecto las obras de atraque y amarre se diferenciarán en:

- *Obras de atraque situadas en áreas interiores o abrigadas frente al oleaje:* son aquellas obras ubicadas en un emplazamiento en las que en ningún estado límite de proyecto, tanto representativo de las condiciones de trabajo extremas y excepcionales como operativas, el oleaje es el agente predominante en un modo de fallo o de parada operativa, al mantenerse éste en dicho emplazamiento y estado en niveles muy alejados de los umbrales de operatividad establecidos. En general, en estos casos, no se considerarán los efectos del oleaje en el proceso de verificación, salvo cuando se comprueben modos de parada de la instalación asociados con la accesibilidad marítima.

Para las obras de atraque y amarre fijas, tanto cerradas como abiertas, situadas en estas áreas los agentes climáticos predominantes en condiciones extremas y excepcionales son generalmente los niveles de agua asociados a mareas y regímenes fluviales conjuntamente, en su caso, con las corrientes dependientes. Por el contrario, para obras flotantes, el agente predominante suele ser el viento. En condiciones normales de operación, los límites de operatividad relevantes suelen estar asociados

con el viento y, en su caso, con la velocidad de la corriente, no siendo en general los niveles de agua causa de limitación de las condiciones de explotación. No obstante, para rampas ro-ro o atraques en los que no se asegure la permanencia del buque en el atraque por razones de calado en todo momento también se pueden establecer límites de operatividad para los niveles de las aguas, aunque no es recomendable (Ver apartados 3.2.1.6 y 3.2.2.2). En el caso de que se definan umbrales de operatividad bien para las corrientes, bien para los niveles de agua, los valores del otro agente serán los compatibles con dichos valores en función de su relación de dependencia. La presencia de ondas largas asociadas a pulsaciones barométricas o vinculadas a la estructura de agrupamiento del oleaje también debe analizarse en estas áreas con el objeto de comprobar si pueden causar limitaciones en la operatividad de la instalación; aunque, en general, es recomendable que se establezcan configuraciones de dársenas y se definan disposiciones de amarre que eviten que se produzcan fenómenos de resonancia que afecten a la permanencia u operaciones del buque en el atraque. (Ver ROM 1.0).

- *Obras de atraque situadas en áreas exteriores, no abrigadas, total o parcialmente, frente al oleaje:* son aquellas obras ubicadas en un emplazamiento en las que en algún estado límite de proyecto el oleaje es el agente predominante en un modo de fallo o parada operativa.

Para obras de atraque y amarre fijas, tanto cerradas como abiertas, situadas en áreas exteriores o no abrigadas frente al oleaje, cuando oleaje y viento se puedan considerar como independientes, el agente climático predominante en condiciones extremas y excepcionales será generalmente el oleaje. En obras de atraque flotantes, en función del grado de abrigo del emplazamiento, el agente predominante puede ser tanto el oleaje como el viento. En condiciones normales de operación, en estas áreas los límites de operación se establecen tanto para el oleaje como para el viento y, eventualmente, para la velocidad de la corriente. Asimismo, para rampas ro-ro o atraques en los que no se considere la permanencia del buque en el atraque en todo momento por razones de calado también se pueden establecer límites de operatividad para los niveles de las aguas. Tanto para condiciones extremas como en condiciones normales de operación, los valores de los niveles de agua y de las corrientes dependientes serán los compatibles con oleaje y viento y viceversa, en función del agente adoptado como predominante y de las relaciones de dependencia existentes entre estos agentes en el emplazamiento. La posible presencia de ondas largas también debe considerarse como causa de limitaciones en la operatividad de una instalación situada en áreas exteriores o no abrigadas.

#### ◆ Definición de los agentes climáticos

En función del tipo de formulación de las ecuaciones de verificación, los agentes climáticos a considerar se definirán:

##### a) *Para formulaciones deterministas y determinista-probabilistas*

Para formulaciones deterministas y semi-probabilistas se trabaja siempre con variables de estado.

##### a<sub>1</sub>) *Para la verificación de modos de fallo adscritos a estados límite últimos*

##### a<sub>11</sub>) *EN CONDICIONES EXTREMAS Y EXCEPCIONALES DEBIDAS A LA ACTUACIÓN DE UN AGENTE CLIMÁTICO DE CARÁCTER EXTRAORDINARIO*

Para la comprobación de modos de fallo adscritos a estados límite últimos, el estado meteorológico límite de proyecto correspondiente a condiciones de trabajo extremas o excepcionales debidas a un agente climático de carácter extraordinario se definirá a través de los valores representativos compatibles de las variables de estado que caracterizan a los agentes climáticos de actuación simultánea relevantes para el modo de fallo considerado (Ver apartado 4.1.1.1). Para probabilidades de ocurrencia del modo de fallo en estas condiciones de trabajo menores del 5% dichos valores se consignan en la tabla 4.6.2.2 a partir de los regímenes extremos y medios marginales, y en su caso direccionales, en el



emplazamiento y en presencia de la obra, de las variables de estado consideradas como principales correspondientes a agentes que puedan considerarse como independientes entre sí, así como de las funciones que correlacionan dichas variables y las que caracterizan a los agentes dependientes de ellas o de las funciones de distribución de las variables dependientes condicionadas a cada valor y, en su caso, dirección de la variable de la que dependen. Para probabilidades de ocurrencia del modo de fallo en estas condiciones de trabajo mayores o iguales al 5%, el valor característico de la variable de estado principal del agente predominante en condiciones de trabajo extremas será aquel cuya probabilidad de excedencia en la fase de proyecto analizada es igual a la probabilidad de fallo considerada <sup>(12)</sup>. En ambos casos, para la variable principal de los agentes independientes se adoptará como valor representativo el correspondiente a un periodo de retorno de 5 años en su régimen extremal marginal, con las consideraciones señaladas en el apartado 4.1.1.1.1 a. para el caso de variables direccionales. Los valores representativos compatibles del resto de variables del agente predominante, así como de las variables correspondientes a los agentes dependientes del agente predominante o del resto de agentes independientes se obtendrán a partir de los valores representativos adoptados para la variable principal del agente con el que están correlacionados a través de las funciones que correlacionan dichas variables, definidas de acuerdo con lo dispuesto en esta Recomendación <sup>(13)</sup> (Ver apartado 4.1.1.1.1 a).

Dado que la escala temporal de los estados de viento y oleaje es menor que la de los niveles de agua, puede suponerse que en los estados meteorológicos de proyecto el agente nivel de las aguas y corriente dependiente tienen el carácter de permanentes. En general, para los niveles de agua y corrientes dependientes será suficiente considerar los niveles correspondientes a los límites superior e inferior del ciclo de oscilaciones marinas y fluviales de largo periodo que actúan en el estado límite de proyecto, con los valores de los niveles alto y bajo compatibles con dicho estado, salvo que las corrientes de marea sean significativas y relevantes para el modo de fallo. No obstante, debido a la influencia de los niveles de aguas y de las corrientes en las transformaciones del oleaje, no es descartable que puedan presentarse estados más desfavorables asociados a niveles intermedios. El proyectista valorará la posibilidad de esta circunstancia. A su vez, en el caso de que la velocidad de la corriente sea significativa y relevante para el modo de fallo, también deberán considerarse distintos valores de la velocidad/dirección de la corriente en el caso de obras de atraque situadas en antepuertos o áreas exteriores, obtenidos a partir de la elipse de corriente asociada con la variación de niveles de las aguas considerada. En los casos de áreas portuarias cerradas será suficiente considerar los casos de máxima velocidad de corriente entrante y máxima de corriente vaciante. En ambos casos se considerará el nivel de las aguas exteriores compatible en el estado con las velocidades de corriente adoptadas. Los niveles de saturación en el terreno natural y en los rellenos que se consideren, en

- (12) La relación entre la probabilidad de excedencia de un agente o acción,  $n$ , durante una fase de proyecto de duración  $L$  ( $p_{n,L}$ ) y su periodo de retorno,  $T_R$ , viene dada por la expresión:

$$p_{n,L} = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^L$$

El proyectista evaluará la incertidumbre estadística asociada a los datos disponibles con los que se han estimado las funciones de distribución. Salvo justificación detallada, se tomarán como valores representativos, no los correspondientes a la estima central de las funciones de distribución, sino los valores extremos del intervalo de confianza del 90%.

- (13) La forma de obtener la función de correlación se recoge en el primer subapartado del apartado 4.6.2. En dicho apartado se señala que la función que correlaciona dichas variables puede obtenerse mediante un ajuste analítico, considerando que a cada valor de la variable principal se le asigna el valor correspondiente a una determinada probabilidad de no excedencia en la función de distribución de la variable correlacionada condicionada a dicho valor de la variable principal. En general, es recomendable para formulaciones de la ecuación de verificación deterministas y semi-probabilistas tomar dicha probabilidad igual al 85% o al 15% (ver figura 4.6.2.1), en función de que sean más desfavorables los valores superiores o los inferiores de la variable correlacionada (Ver apartado 4.1.1.1.1 a).

su caso, en cada estado serán los compatibles con dichos niveles de las aguas exteriores en función de los diferentes tipos de mareas y corrientes fluviales, así como de la permeabilidad de la obra, su cimientado y el relleno (Ver apartado 3.4.4.1 de la ROM 0.5-05).

En ausencia de datos conjuntos en el emplazamiento, así como cuando no se observen niveles claros de correlación, simplificadaamente se podrá considerar que los niveles de agua y corrientes dependientes compatibles con los valores representativos del oleaje pueden obtenerse a partir de los regímenes marginales de los niveles de agua, adoptando como valores representativos los que corresponden de su consideración como un agente independiente del oleaje.

#### **a<sub>12</sub>) EN CONDICIONES OPERATIVAS**

Los valores umbrales para cada uno de los agentes climáticos que se establecen habitualmente para obras de atraque y amarre por condiciones de explotación y seguridad se recogen en la tabla 3.2.1.3 de esta ROM para la velocidad del viento, la altura de ola y la velocidad de la corriente, considerando que no actúan simultáneamente o que en el emplazamiento un único agente climático es el predominante para la parada operativa de la instalación, así como en los apartados de esta ROM correspondientes a los agentes de uso y explotación. Lo anterior se establece sin perjuicio de que puedan establecerse otros, mayores o menores, a través de un análisis detallado de los modos de parada en el emplazamiento, considerando las condiciones y factores de proyecto, las características de la flota esperable en el atraque, las condiciones locales del puerto y los requerimientos del Promotor.

Para su aplicación deberá comprobarse que los valores umbral adoptados son alcanzables en el emplazamiento y en presencia de la obra con una probabilidad anual de presentación en el régimen medio conjunto (más de un valor umbral) o marginal (un único valor umbral) mayor de  $10^{-3}$ , así como que los medios y las condiciones físicas y de explotación del puerto permiten la realización de las operaciones portuarias asociadas con el cumplimiento de dichos límites <sup>(14)</sup>. En el caso de que en el emplazamiento no se alcancen los límites de operatividad establecidos, como mínimo con la probabilidad señalada, se considerarán como límites operativos efectivos los asociados a dicha probabilidad de presentación a los efectos de la verificación de los modos de fallo adscritos a estados límite últimos en condiciones de trabajo operativas.

En los casos en que se defina el agente predominante que condiciona la operatividad de la instalación, para el resto de agentes climáticos se adoptarán los valores compatibles con el adoptado para el agente predominante en el caso de los agentes climáticos de actuación simultánea dependientes de éste, por medio de las funciones que los correlacionan o las funciones de distribución condicionadas de acuerdo con lo establecido a estos efectos en esta Recomendación. Para probabilidades de ocurrencia del modo de fallo en estas condiciones menores del 5%, para los agentes climáticos de actuación simultánea independientes del predominante se adoptarán los valores correspondientes a una probabilidad absoluta de excedencia del 50% tomada del régimen medio, siempre que, en su caso, no superen los límites de operatividad que pudieran estar, en su caso, establecidos individualmente para dicho agente (Ver apartado 4.1.1.1. c). Por otra parte, cuando los valores del agente climático predominante no estén limitados directamente por condiciones de explotación y el Promotor considere que no se debe limitar la operatividad por las condiciones locales del puerto u otras causas, se asimilará esta condición operativa a una condición

(14) Por ejemplo, no puede considerarse la limitación de la permanencia de un buque en el atraque si el puerto no dispone de los medios (p.e. remolcadores con potencia suficiente) o su configuración física impide el desatraque del buque en condiciones seguras cuando se superan dichas condiciones límites de los agentes climáticos. En estos casos deberán preverse por ejemplo dispositivos de amarre o potencia de remolcadores suficiente para mantener en todo momento el buque en el atraque en condiciones seguras.



extrema asociada al agente predominante, adoptándose como valor representativo del agente predominante en condiciones normales de operación el valor extremal correspondiente a un periodo de retorno de 50 años para probabilidades de ocurrencia del modo fallo en estas condiciones menores del 5% para el agente predominante y de 5 años para el resto de agentes independientes, siempre que este valor no supere el umbral de operatividad establecido, en su caso, para dicho último agente en la dirección considerada <sup>(15)</sup> (Ver tabla 4.6.2.2).

*Comentario: por ejemplo, cuando se definan y sean posibles o alcanzables en el emplazamiento los límites de operatividad establecidos para las corrientes como agente predominante, los niveles de agua a considerar serán los compatibles con dichos valores. De igual forma, cuando se establezcan límites de operatividad asociados con los niveles de las aguas como agente predominante, se adoptarán como valores simultáneos de la velocidad de la corriente los compatibles con los mismos. A su vez, cuando los valores de los niveles de agua no estén limitados indirectamente a través de los límites de explotación establecidos para otro agente con el que estén correlacionado, o no pueda obtenerse su valor de compatibilidad con otro agente por ausencia de datos conjuntos en el emplazamiento, simplificadaamente se podrán adoptar como valores representativos de los niveles de agua en condiciones normales de operación los correspondientes a una probabilidad absoluta de excedencia del 50% del régimen medio cuando el límite de operatividad sea definido por otro agente considerado como predominante.*

**a<sub>13</sub>) EN CONDICIONES EXCEPCIONALES DEBIDAS A LA ACTUACIÓN DE UNA ACCIÓN ACCIDENTAL NO CLIMÁTICA O SÍSMICA**

En condiciones de trabajo excepcionales debidas a la presentación de una acción accidental no climática y en el estado sísmico, los agentes climáticos tendrán el carácter de permanentes, salvo que algún agente climático sea el agente variable predominante para el modo de fallo en el estado límite asociado a la presentación de una acción accidental o intervenga en la definición del agente variable predominante. En la tabla 4.6.2.2 se consignan los valores representativos de los agentes climáticos de actuación simultánea a adoptar en dichos estados a partir de los regímenes medios marginales y, en su caso, direccionales de las variables independientes entre sí, así como de las funciones que correlacionan dichas variables y las que caracterizan a los agentes dependientes de ellas de acuerdo con lo dispuesto con carácter general (Ver nota 13) en este apartado (Ver apartado 4.1.1.1 b).

**a<sub>2</sub>) Para la verificación de modos de fallo adscritos a estados límite de servicio**

Para la comprobación de modos de fallo adscritos a estados límites de servicio, la definición de los estados meteorológicos límite de proyecto se realizará de igual forma que para la verificación de modos de fallo adscritos a estados límite últimos cuando la combinación de agentes y acciones aplicable para la verificación del modo de fallo sea la poco probable o fundamental, la accidental o la sísmica.

Los modos de fallo adscritos estados límite de servicio en los que el tipo de combinación aplicable en la ecuación de verificación sea la frecuente o la cuasi-permanente, la definición del estado meteorológico de proyecto se realizará considerando el valor frecuente de la variable principal del agente climático que, en su caso, sea el predominante para la definición de la acción variable predominante para el modo de fallo analizado. Para el resto de agentes climáticos independientes o en aquellos casos en los que ningún agente climático intervenga en la definición

(15) Para la verificación de modos de fallo con probabilidades de fallo mayores o iguales al 5%, se tomará como valor representativo del agente predominante aquél cuya probabilidad de excedencia en la fase de proyecto considerada sea igual a la probabilidad de fallo considerada. Para las variables principales de los agentes independientes del predominante se adoptará el correspondiente a un periodo de retorno de 5 años en el régimen extremal marginal.

del agente variable predominante para el modo de fallo se adoptarán los valores cuasi-permanentes. Para los agentes climáticos dependientes de éstos se adoptarán los valores de compatibilidad (Ver Nota 13) de acuerdo con lo dispuesto en esta Recomendación (Ver apartado 4.1.1.2).

En la tabla 4.6.2.2 se consignan los valores representativos frecuentes y cuasi-permanentes de los agentes climáticos de actuación simultánea a partir de los regímenes medios marginales y, en su caso, direccionales de las variables independientes entre sí, así como de las funciones que correlacionan dichas variables y las que caracterizan a los agentes dependientes de ellas de acuerdo con lo dispuesto con carácter general a estos efectos en esta Recomendación.

### a<sub>3</sub>) Para la verificación de modos de parada operativa

A los efectos de verificar los modos de parada operativa de acuerdo con lo dispuesto en el apartado 4.1.1.3 de esta Recomendación, se definirán los valores umbral de las variables de los agentes climáticos asociados a cada causa de paralización de acuerdo con lo establecido para las condiciones de trabajo operativas de los agentes climáticos en el subapartado  $a_{12}$  de este apartado.

**Tabla 4.6.2.2. Valores representativos de las variables de estado principales de los agentes climáticos (Para fase de servicio de obras definitivas) <sup>1)</sup> para la verificación de modos de fallo adscritos a estados límite últimos con probabilidades de fallo menores del 5% en la correspondiente condición de trabajo (combinaciones fundamentales o poco probables) <sup>2)</sup>**

CONDICIONES DE TRABAJO	AGENTE CLIMÁTICO PREDOMINANTE <sup>3</sup>			AGENTES CLIMÁTICOS INDEPENDIENTES DEL PREDOMINANTE <sup>4</sup>	
	Valor característico	Valor frecuente	Valor cuasi-permanente	Valor de combinación fundamental	Valor cuasi-permanente
Condiciones de trabajo Operativas (CT1)	Límites de operatividad establecidos <sup>5</sup>			—	Probabilidad absoluta de no excedencia del 50% tomada del régimen medio <sup>5, 6</sup>
Condiciones de trabajo Extremas (CT2)	Periodo de retorno ( $T_R$ ) de 50 años obtenido de la función de distribución de extremos marginal <sup>6</sup>	—	—	Periodo de retorno ( $T_R$ ) de 5 años obtenido de la función de distribución de extremos marginal, con las consideraciones señaladas en el texto para el caso de variables direccionales <sup>6</sup>	—
Condiciones de trabajo Excepcionales debidas a la presentación de un agente climático de carácter extraordinario (CT3,1)	Periodo de retorno ( $T_R$ ) de 500 años obtenido de la función de distribución de extremos marginal <sup>6</sup>	—	—	Periodo de retorno ( $T_R$ ) de 5 años obtenido de la función de distribución de extremos marginal, con las consideraciones señaladas en el texto para el caso de variables direccionales <sup>6</sup>	—

**Valores representativos de las variables de estado principales de los agentes climáticos (Para fase de servicio de obras definitivas) <sup>1)</sup> para la verificación de modos de fallo adscritos a estados límite últimos con probabilidades de fallo menores del 5% en la correspondiente condición de trabajo (combinaciones fundamentales o poco probables) <sup>2)</sup> (continuación)**

CONDICIONES DE TRABAJO	AGENTE CLIMÁTICO PREDOMINANTE <sup>3)</sup>			AGENTES CLIMÁTICOS INDEPENDIENTES DEL PREDOMINANTE <sup>4)</sup>	
	Valor característico	Valor frecuente	Valor cuasi-permanente	Valor de combinación fundamental	Valor cuasi-permanente
Condiciones de trabajo Excepcionales debidas a la presencia de una acción accidental (CT3,2) <sup>7)</sup>	—	Probabilidad absoluta de no excedencia del 85% tomada del régimen medio <sup>6)</sup>	—	—	Probabilidad absoluta de no excedencia del 50% tomada del régimen medio <sup>6)</sup>
Condiciones de trabajo Extremas o Excepcionales debidas a la presentación de una acción Sísmica (CT3,31 y CT3,32)	—	—	Probabilidad absoluta de no excedencia del 50% tomada del régimen medio <sup>6)</sup>	—	Probabilidad absoluta de no excedencia del 50% tomada del régimen medio <sup>6)</sup>

**Notas**

- 1) Para estados o situaciones de proyecto transitorios, es decir aquellos que tienen corta duración respecto a la vida útil de la obra ya sea, entre otros, por causa de la geometría de la obra (fase de construcción), por las características del terreno (fase de consolidación o comportamiento drenado y no drenado del mismo) o por las acciones actuantes (cargas de uso y explotación diferentes en las fases de reparación y mantenimiento), en condiciones de trabajo extremas se adoptará como valor característico de la acción predominante el correspondiente a un periodo de retorno del mismo orden de magnitud que el de la duración de dicha fase para las situaciones transitorias prolongadas en relación con la duración de la fase de servicio y el doble de dicho valor para los casos de transitoriedad menos prolongada, con un valor mínimo de 2 años. En esos casos, para los agentes independientes se adoptará como valor representativo el correspondiente a un periodo de retorno de 1 año. En estas situaciones transitorias no se considerarán condiciones de trabajo excepcionales.
- 2) Para la verificación de modos de fallo en condiciones de trabajo extremas con probabilidades de fallo mayores o iguales al 5%, ver texto.
- 3) Los valores nominales o representativos compatibles de los agentes dependientes del agente predominante o del resto de agentes independientes se obtendrán a partir de los valores nominales o representativos de la variable principal del agente con el que están correlacionados a través de las correspondientes funciones de correlación, definidas de acuerdo con lo dispuesto en esta Recomendación.
- 4) La diferenciación entre agente predominante y otro agente climático se realiza únicamente en aquellos casos en que simplifícadamente puede considerarse que hay agentes climáticos independientes entre sí de actuación simultánea en el emplazamiento (Ver texto apartado 4.6.2.1).
- 5) Para cada condición de trabajo operativa, valores umbrales de los agentes climáticos adoptados como límites de operatividad que sean alcanzables en el emplazamiento. (probabilidad de presentación mayor  $10^{-3}$ ). Si no es así, ver texto. Para la definición de los valores representativos de los agentes climáticos dependientes de los predominantes o de los independientes de los predominantes, ver texto.
- 6) El proyectista evaluará la incertidumbre estadística asociada a los datos disponibles con los que se han estimado las funciones de distribución. Salvo justificación detallada, se tomarán como valores representativos, no los correspondientes a la estima central de las funciones de distribución, sino los valores extremos del intervalo de confianza del 90%.
- 7) Se adoptará como valor frecuente el correspondiente al agente climático que, en su caso, sea el predominante para la definición de la acción variable predominante para el modo de fallo. Para el resto de los agentes climáticos independientes o en los casos en los que ningún agente climático intervenga en la definición de la acción variable predominante para el modo de fallo se adoptará como valor representativo de los mismos el valor cuasi-permanente. Para los agentes climáticos dependientes de estos se adoptarán los valores de compatibilidad de acuerdo con lo dispuesto en esta Recomendación.

**b) Para formulaciones probabilistas**

Para las formulaciones probabilistas puede trabajarse únicamente con variables de estado o bien, dependiendo de la ecuación de verificación utilizada y de forma mucho más precisa, considerando además la variabilidad en cada estado de las variables básicas correspondientes a cada agente climático.

En la ecuación de verificación de un modo de fallo tanto adscrito a estados límites últimos como de servicio, los agentes climáticos se definen, siempre que se disponga de datos, a través de las funciones de distribución conjunta de las variables de estado que caracterizan a dichos agentes y que sean

relevantes para el modo de fallo o parada considerado en el emplazamiento, durante los diferentes ciclos de solicitud, y, en su caso, además por las funciones de distribución conjunta en cada estado de las variables básicas.

Para los ciclos de solicitud correspondientes a condiciones de trabajo extremas (CT2) y excepcionales (CT3,1) se utilizarán los regímenes extremos conjuntos de las variables de estado. No obstante, en ausencia de datos conjuntos será admisible utilizar los regímenes extremos marginales de la variable de estado considerada como principal correspondiente al agente predominante para el modo de fallo analizado; definiéndose el resto de variables, tanto del mismo agente como de otros agentes, correlacionadas con ésta a través de las funciones de distribución bivariadas con la variable principal durante el ciclo de solicitud por medio de las funciones de distribución de la variable correlacionada condicionada a cada valor y, en su caso, dirección de la variable principal (ver figura 4.6.2.1). En el caso de que por las condiciones del emplazamiento sea admisible considerar que algunos agentes climáticos no están correlacionados o presentan una débil dependencia entre sí es admisible utilizar los regímenes extremos marginales de las variables principales de los agentes que puedan considerarse independientes, conjuntamente con las funciones de distribución de las variables correlacionadas con cada uno de ellos condicionadas a cada valor y, en su caso, dirección de las mismas.

Para los ciclos de solicitud correspondientes a condiciones operativas (CT1) se utilizarán las funciones de distribución conjunta de clase centrada de las variables de estado (regímenes medios), truncadas por los límites de operatividad establecidos. En ausencia de datos conjuntos, fijado el valor umbral de la variable principal del agente predominante que condiciona la operatividad de la instalación, será admisible utilizar la función de distribución marginal de la variable principal del agente predominante truncada por el valor umbral de operatividad y las funciones de distribución de las variables dependientes de la misma, condicionadas al límite de operatividad establecido, así como los regímenes medios, en su caso truncados por los correspondiente límite de operación, de las variables principales de los agentes independientes del predominante y las funciones de distribución de las variables dependientes de estas últimas, condicionadas a cada valor de la misma. En el caso de que no se establezcan límites de operación para un agente o el Promotor considere que en la condición de trabajo considerada no se debe limitar la operatividad de la instalación para dicho agente, se utilizarán funciones de distribuciones extremas para dicho agente y para los agentes independientes de éste, truncadas estas últimas por los umbrales de operatividad establecidos, en su caso, para éstos, de forma equivalente a lo definido para condiciones de trabajo extremas y excepcionales.

Para los ciclos de solicitud correspondientes a condiciones de trabajo excepcionales debidas a la presentación de una acción accidental (CT3,2) o sísmica [(CT3,31) y (CT3,32)], se utilizarán los regímenes medios conjuntos de las acciones climáticas. No obstante, en ausencia de datos conjuntos será admisible utilizar los regímenes medios marginales de las variables de estado consideradas como principales de los agentes climáticos considerados independientes entre sí, definiéndose el resto de variables correlacionadas con éstos por medio de sus funciones de distribución condicionadas a cada valor y, en su caso, dirección de la variable principal.

Para la verificación probabilista de un modo de parada se utilizarán los diferentes regímenes medios conjuntos de las variables de los agentes climáticos dependientes entre sí cuyos valores umbral definen las diferentes causas de paralización asociadas con el modo, verificándose simultáneamente dichas causas de paralización para la obtención de la probabilidad de parada con el objeto de no duplicar la contribución a dicha probabilidad de causas de parada que ocurren simultáneamente con los mismos valores de los agentes climáticos.

La obtención de las funciones de distribución de los agentes climáticos necesarias tanto para las formulaciones probabilistas como para la definición de los valores representativos en las formulaciones semi-probabilistas podrá realizarse a partir de registros instrumentales en el emplazamiento en número de años suficiente y calidad contrastada. Para la obtención de los regímenes extremos se considerarán bien la serie de máximos anuales o bien los valores estadísticamente independientes que superan el

umbral que define el ciclo de solicitud en condiciones extremas. En general, el ajuste de la muestra se realiza con funciones de Weibull, Gumbel o Frechet. Para la obtención de regímenes medios, el ajuste de la muestra se suele realizar con funciones log-normal o Weibull en función del agente. En la ROM 0.3, 0.4 y I se desarrollan más detalladamente las metodologías para la obtención de las funciones de distribución de los agentes climáticos.

En España, a falta de datos específicos en el emplazamiento en número y calidad contrastada, las diferentes funciones de distribución y los valores representativos correspondientes a los parámetros que caracterizan a los agentes climáticos pueden obtenerse a partir de la base de datos climáticos de Puertos del Estado, que incluye tanto datos instrumentales como información de procesos de retroanálisis. Asimismo, están disponibles las siguientes funciones de distribución:

- Regímenes marginales de velocidad del viento: ROM 0.4-95. Anejo I. Atlas de viento en el litoral español, así como en la página Web de Puertos del Estado ([www.puertos.es](http://www.puertos.es))
- Regímenes marginales de altura de ola y funciones de correlación altura/periodo en aguas abiertas: nueva versión de la ROM 0.3, así como en la página Web de Puertos del Estado ([www.puertos.es](http://www.puertos.es)). Las funciones de distribución correspondientes a la altura de ola en el emplazamiento y en presencia de la obra podrá obtenerse a partir de estos regímenes, transfiriéndolos al emplazamiento por medio de uno o varios modelos numéricos o físicos de propagación del oleaje de validez reconocida para las condiciones físicas del emplazamiento, considerando el periodo del oleaje, los niveles de las aguas alto y bajo asociados a las mareas y corrientes fluviales y las corrientes compatibles (Ver ROM I.0).
- Regímenes marginales de niveles de mar asociados a mareas: Se incluirán en la nueva versión de la ROM 0.3. Hasta que este documento esté disponible, simplificada, podrán adoptarse los valores representativos estimados de los niveles de agua que se incluyen en la tabla 4.6.2.3. para los puertos españoles en los que hay información instrumental suficiente disponible <sup>(16)</sup>.

#### 4.6.2.1.1. FORMULACIÓN DE LAS ACCIONES DEBIDAS A LOS AGENTES CLIMÁTICOS

En ausencia de datos medidos, y siempre que se disponga de relaciones funcionales o fundamentos teóricos adecuados entre los parámetros representativos del agente a nivel de variables básicas o de estado y la acción debida al mismo, es admisible que los valores nominales o representativos de las acciones debidas directamente o bien generadas por los agentes climáticos, o sus funciones de distribución, puedan obtenerse o derivarse, respectivamente, a partir de los valores representativos de las funciones de distribución de los agentes climáticos que las causan o de sus propias funciones de distribución. En los casos en los que no se disponga de relaciones funcionales apropiadas para la precisión requerida de los cálculos, la acción se deberá obtener a partir del agente causante a través de técnicas numéricas o experimentales, en modelo físico o prototipo, de validez contrastada para la obra considerada.

Las acciones que solicitan a las obras de atraque y amarre debidas a la actuación de los agentes del medio y las relaciones funcionales con éstos que se consideran adecuadas son las siguientes:

##### a) Acciones debidas al viento ( $Q_{fc,2}$ )

Salvo en las obras de atraque y amarre flotantes, la acción del viento solicita a las estructuras de forma indirecta, actuando bien a través del buque atracado o amarrado, bien a través de las mercancías almacenadas y de los equipos e instalaciones de manipulación y transporte de dichas mercancías, así como de las edificaciones, depósitos o silos que eventualmente se ubiquen sobre su superficie. La acción del viento sobre dichas estructuras se detalla con carácter general en la ROM 0.4-95, así como en el apar-

(16) En aquellos puertos en los que no esté disponible este tipo de información, el proyectista podrá adoptar los valores correspondientes a puertos próximos de la misma fachada, siempre que tengan similar marea astronómica. En los otros casos, los valores representativos de los niveles del mar asociados con mareas podrán estimarse del lado de la seguridad de acuerdo con lo recomendado en la tabla 3.3.1. de la ROM 0.5-05.

tado de esta ROM correspondiente a las acciones de uso y explotación, donde se dan criterios para su estimación y consideración a partir del parámetro velocidad del viento.

La acción directa del viento sobre una obra de atraque flotante puede considerarse representada por una fuerza total de arrastre horizontal ( $R_v$ ) prácticamente estacionaria cuyo valor queda determinado por la siguiente formulación:

$$R_v = \frac{(C_{vx} \cdot \cos^2 \alpha \cdot A_{ex} + C_{vy} \cdot \sin^2 \alpha \cdot A_{ey})}{\cos(\phi - \alpha)} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot V_{v,t}^2$$

siendo:

- $R_v$  : Fuerza total de arrastre resultante de la acción del viento sobre el flotador. La distancia del centro de gravedad al punto de aplicación (e) y la dirección de la fuerza resultante ( $\phi$ ) se determinarán de acuerdo con lo dispuesto en este apartado.
- e : Excentricidad de la resultante respecto del centro de gravedad del flotador, medida sobre el eje longitudinal del flotador (eje de simetría mayor). Con carácter general y a falta de datos o estudios específicos, para flotadores prácticamente simétricos aunque no con simetría radial puede tomarse como  $0,1 \cdot b$ , siendo b la dimensión de la sección longitudinal del flotador en la dirección del eje longitudinal. La excentricidad deberá considerarse que puede actuar en ambos sentidos con el objeto de tomar en consideración las diferentes posibilidades de distribución de la superestructura.
- $\phi$  : Ángulo formado entre el eje longitudinal del flotador y la dirección de actuación de la fuerza. Podrá aproximarse mediante la formulación siguiente:

$$\operatorname{tg} \phi = [A_{ey}/A_{ex}] \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

- $\alpha$  : Ángulo formado entre el eje longitudinal del flotador y la dirección de actuación del viento.
- $C_{vx}$  : Factor adimensional de arrastre para el viento actuando en la dirección del eje longitudinal del flotador. Los valores de este factor pueden obtenerse en el apartado 3.2.2.8. de la ROM 0.4-95.
- $C_{vy}$  : Factor adimensional de arrastre para el viento actuando en la dirección del eje transversal del flotador. Los valores de este factor pueden obtenerse en el apartado 3.2.2.8 de la ROM 0.4-95.
- $A_{ex}$  : Área expuesta al viento de la proyección del flotador sobre un plano normal al eje longitudinal del flotador.
- $A_{ey}$  : Área expuesta al viento de la proyección del flotador sobre un plano normal al eje transversal del flotador.
- $\rho_a$  : Densidad del aire (Ver apartado 4.5)
- $V_{v,t}$  : Velocidad horizontal máxima probable del viento, considerando un periodo de medición t, en función de las características del flotador (Ver tabla 4.6.2.1). Deberá tomarse la correspondiente a la altura del centro de gravedad de la sección expuesta al viento.

En cada estado, las acciones debidas al viento tendrán igual consideración que el agente causante. Por tanto, salvo en condiciones excepcionales no debidas a viento extraordinario tendrán el carácter de no permanentes o variables. No obstante lo anterior, en algunos casos, dependiendo de su escala de variabilidad, alguna de estas fuerzas puede ser considerada de carácter permanente en el estado meteorológico (p.e. fuerza total de arrastre resultante de la acción del viento sobre el flotador).

La formulación de las acciones debidas al viento incluidas en este apartado es aplicable únicamente a variables de estado.

En general no es esperable que se produzcan efectos dinámicos debidos a la acción del viento en estructuras de atraque y amarre, salvo en estructuras pilotadas situadas a grandes profundidades y con importantes francobordos (p.e. plataformas o celosías espaciales en mar abierto) y en los sistemas de amarre de estructuras flotantes en función de la distribución de las líneas de amarre, de la flexibilidad de la estructura de amarre y de las condiciones del oleaje. A su vez, buques de gran desplazamiento amarrados a estructuras muy flexibles y mediante líneas de amarre muy elásticas suelen presentar frecuencias

naturales de oscilación próximas a las frecuencias con valores energéticos significativos presentes en los estados de viento, por lo que son esperables efectos dinámicos significativos en las cargas de amarre transmitidas. La definición de la acción dinámica producida por el viento en estos casos se recoge en el apartado de esta ROM correspondiente a las acciones de uso y explotación (Ver apartado 4.6.4.4.7).

**Tabla 4.6.2.3. Valores representativos estimados de los niveles de agua en puertos españoles respecto al nivel medio del mar, combinada marea astronómica-meteorológica (en m) <sup>1)</sup>**

PUERTO	NIVEL DE LAS AGUAS	VALORES EXTREMALES			VALORES MEDIOS		Altura del Nivel Medio del Mar respecto del Cero del Puerto (m) <sup>2)</sup>
		$T_R = 500$ años	$T_R = 50$ años	$T_R = 5$ años	Probabilidad de no excedencia del 85%	Probabilidad de no excedencia del 50%	
BILBAO	Nivel alto	+2,95	+2,88	+2,75	+1,92	+1,50	+2,40
	Nivel bajo	-2,85	-2,80	-2,70	-1,92	-1,50	
	Máximo rango de variación de la marea astronómica <sup>3)</sup>	4,94 (UA = 2,09)					
SANTANDER	Nivel alto	+2,95	+2,82	+2,70	+1,95	+1,52	+2,84
	Nivel bajo	-2,83	-2,76	-2,65	-1,95	-1,52	
	Máximo rango de variación de la marea astronómica <sup>3)</sup>	4,95 (UA = 2,10)					
GIJÓN	Nivel alto	+2,95	+2,85	+2,72	+1,92	+1,50	+2,72
	Nivel bajo	-2,82	-2,75	-2,63	-1,92	-1,50	
	Máximo rango de variación de la marea astronómica <sup>3)</sup>	4,83 (UA = 2,05)					
CORUÑA	Nivel alto	+3,00	+2,84	+2,70	+1,79	+1,39	+2,72
	Nivel bajo	-2,75	-2,69	-2,58	-1,79	-1,39	
	Máximo rango de variación de la marea astronómica <sup>3)</sup>	4,47 (UA = 1,89)					
VILAGARCÍA	Nivel alto	+3,15	+2,90	+2,70	+1,69	+1,31	+2,19
	Nivel bajo	-2,75	-2,65	-2,50	-1,69	-1,31	
	Máximo rango de variación de la marea astronómica <sup>3)</sup>	4,22 (UA = 1,79)					
VIGO	Nivel alto	+2,98	+2,74	+2,55	+1,68	+1,30	+2,06
	Nivel bajo	-2,44	-2,35	-2,23	-1,68	-1,30	
	Máximo rango de variación de la marea astronómica <sup>3)</sup>	4,19 (UA = 1,78)					
HUELVA (Mazagón)	Nivel alto	+3,50	+2,98	+2,50	+1,60	+1,25	+2,02
	Nivel bajo	-2,32	-2,25	-2,13	-1,60	-1,25	
	Máximo rango de variación de la marea astronómica <sup>3)</sup>	4,02 (UA = 1,70)					
SEVILLA (esclusa) <sup>4)</sup>	Nivel alto	+6,75 <sup>5)</sup>	+5,20 <sup>5)</sup>	+4,60 <sup>5)</sup>	+1,23	+0,96	+1,14
	Nivel bajo	-1,80	-1,75	-1,70	-1,23	-0,96	
	Máximo rango de variación de la marea astronómica <sup>3)</sup>	2,80 (UA = 1,19)					
BONANZA (Ría del Guadalquivir)	Nivel alto	+3,15	+2,75	+2,45	+1,48	+1,15	+1,71 <sup>6)</sup>
	Nivel bajo	-1,95	-1,85	-1,75	-1,48	-1,15	
	Máximo rango de variación de la marea astronómica <sup>3)</sup>	3,46 (UA = 1,47)					



**Valores representativos estimados de los niveles de agua en puertos españoles respecto al nivel medio del mar, combinada marea astronómica-meteorológica (en m) <sup>1)</sup> (continuación)**

PUERTO	NIVEL DE LAS AGUAS	VALORES EXTREMALES			VALORES MEDIOS		Altura del Nivel Medio del Mar respecto del Cero del Puerto (m) <sup>2</sup>
		$T_R = 500$ años	$T_R = 50$ años	$T_R = 5$ años	Probabilidad de no excedencia del 85%	Probabilidad de no excedencia del 50%	
MÁLAGA	Nivel alto	+1,07	+0,93	+0,80	+0,31	+0,24	+0,59
	Nivel bajo	-0,85	-0,80	-0,75	-0,31	-0,24	
	Máximo rango de variación de la marea astronómica <sup>3)</sup>	0,87 (UA = 0,37)					
VALENCIA	Nivel alto	+0,96	+0,85	+0,74	+0,16	+0,13	+0,07
	Nivel bajo	-0,78	-0,74	-0,70	-0,16	-0,13	
	Máximo rango de variación de la marea astronómica <sup>3)</sup>	0,41 (UA = 0,18)					
BARCELONA	Nivel alto	1,20	+0,99	+0,83	+0,17	+0,13	+0,26 <sup>7)</sup>
	Nivel bajo	-0,63	-0,58	-0,55	-0,17	-0,13	
	Máximo rango de variación de la marea astronómica <sup>3)</sup>	0,44 (UA = 0,19)					
TENERIFE	Nivel alto	+1,85	+1,72	+1,62	+1,14	+0,89	+1,48
	Nivel bajo	-1,70	-1,61	-1,52	-1,14	-0,89	
	Máximo rango de variación de la marea astronómica <sup>3)</sup>	2,9 (UA = 1,23)					
LAS PALMAS	Nivel alto	+1,80	+1,71	+1,63	+1,18	+0,92	+1,39
	Nivel bajo	-1,75	-1,68	-1,60	-1,18	-0,92	
	Máximo rango de variación de la marea astronómica <sup>3)</sup>	3,01 (UA = 1,28)					

**Notas**

UA : Unidad de altura. Es la semiamplitud, en metros, de la media de las mareas astronómicas vivas equinocciales, a la que corresponde un coeficiente de marea C: 100. A la máxima marea astronómica viva equinoccial le corresponde un coeficiente 118.

1) Valores representativos obtenidos considerando el intervalo de confianza del 90%.

2) Nivel medio obtenido de datos registrados por la red de mareógrafos de puertos (REDMAR-Puertos del Estado).

3) Amplitud, en metros, de la máxima marea viva equinoccial.

4) En este caso, el nivel de referencia es el nivel medio del río con viento en calma. Se puede considerar que, dadas las condiciones de regulación del río Guadalquivir, el caudal medio coincide aproximadamente con el caudal mínimo ecológico establecido ( $\approx 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

5) Dada la gran influencia que el caudal del río tiene en los niveles altos extremos, los valores dependerán principalmente del régimen fluvial extremal en condiciones de régimen regulado. En crecidas extraordinarias ( $T = 500$  años) el caudal del río en esta zona en condiciones reguladas es de  $8,700 \text{ m}^3/\text{s}$ . y en crecidas extremas ( $T = 50$  años y  $5$  años) es de  $6,200$  y  $3,600 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente. Se puede estimar que aproximadamente el caudal fluvial influye aumentando la pleamar en  $0.6 \text{ mm}$  y en  $1 \text{ mm}$  la bajamar por cada  $\text{m}^3/\text{s}$ .

6) Sobre el 0 del mareógrafo = cero hidrográfico.

7) Sobre el 0 del mareógrafo = cero de Alicante.

**b) Acciones debidas a las corrientes ( $Q_{fe,5}$ )**

La acción de las corrientes sobre las obras de atraque y amarre se manifiesta de dos formas: una indirecta, actuando a través del buque durante el atraque o amarrado, y otra directa ejerciendo una fuerza sobre la propia estructura. La primera se detalla en el apartado de esta ROM correspondiente a las acciones de uso y explotación, donde se dan criterios para su estimación y consideración (Ver apartado 4.6.4.4).

La acción directa de la corriente sobre una obra de atraque y amarre fija puede descomponerse en dos fuerzas horizontales:



- ◆ Fuerza de arrastre ( $F_D$ ), paralela a la dirección de la corriente.
- ◆ Fuerza transversal ( $F_L$ ), perpendicular a la dirección de la corriente.

siendo:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w A_L V_C^2$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_w A_T V_C^2$$

donde:

- $C_D$  : Coeficiente de arrastre (adimensional). Este coeficiente es variable con la forma de la estructura, su rugosidad, la dirección de la corriente y el número de Reynolds ( $R_e = V_c \cdot D/\nu$ ) <sup>(17)</sup>, el cual caracteriza el régimen del movimiento del agua en las proximidades de un obstáculo o de un límite sólido. Sus valores están comprendidos generalmente entre 0,6 y 2 para piezas prismáticas y entre 0,2 y 1,2 para piezas de sección circular, cuando el número de Reynolds está entre  $10^3$  y  $10^5$ . Para casos concretos puede consultarse su valor en ábacos y tablas existentes en la bibliografía especializada u obtenerse a través de ensayos en modelo físico. Para los casos más generales en obras de atraque y amarre, simplificadaamente pueden adoptarse los valores de la tabla 4.6.2.4.
- $C_L$  : Coeficiente de fuerza transversal (adimensional). Este coeficiente depende de la forma de la estructura, la dirección de la corriente y el número de Reynolds.
- $\rho_w$  : Densidad del agua (Ver apartado 4.5).
- $A_L$  : Área de la estructura proyectada en la dirección de la corriente.
- $A_T$  : Área de la estructura proyectada en la dirección perpendicular a la corriente. Los valores de  $A_L$  y  $A_T$  deben considerarse teniendo en cuenta el efecto de las posibles adherencias marinas (Ver apartado 4.6.1.2).
- $V_C$  : Velocidad media del perfil de corriente ( $\bar{V}_c$ ).

Estas fuerzas tendrán su punto de aplicación en el centro de gravedad del área de la estructura sumergida normal al flujo de corriente, afectada por la acción de la corriente. Es decir, como la fuerza resultante puede no pasar por el centro de gravedad de la estructura sino del área proyectada daría lugar a un momento resultante de torsión.

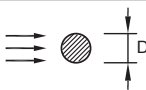
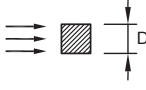
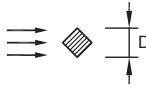
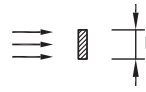
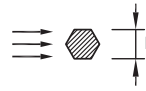
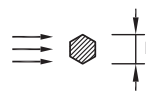
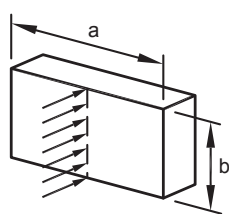
En general, en las obras de atraque y amarre la fuerza transversal debida a la acción de la corriente puede despreciarse. No obstante, en obras de pilotes muy esbeltos estas fuerzas pueden ser importantes cuando la frecuencia natural de la estructura se aproxima a la de los remolinos que se forman en los puntos de despegue de la estela generada por la interposición de la misma al flujo incidente (0,5 a 3,0 Hz), dando lugar a efectos dinámicos significativos. El estado más vulnerable suele ser en estos casos durante la fase constructiva, cuando los pilotes trabajan en voladizo, pudiendo llegar a ser necesario fijar la cabeza de los pilotes inmediatamente después de su hincia o fabricación. En todos los casos, este fenómeno resonante debe evitarse aumentando las condiciones de amortiguamiento de la estructura cuando la velocidad de la corriente supere un valor crítico, que puede aproximarse para pilotes circulares de diámetro  $D$  por  $1,2f_N D$ , siendo  $f_N$  la frecuencia natural de oscilación de la estructura. Para secciones no circulares puede, del lado de la seguridad, considerarse la misma fórmula adoptando como valor de  $D$ , la dimensión mayor en la dirección transversal a la dirección de la corriente.

La acción directa de la corriente sobre una obra de atraque flotante depende de muchos factores, entre otros, la velocidad y dirección de la corriente, la forma y rugosidad de la estructura, el área sumergida y, especialmente la proximidad al fondo, siendo muy difícil la sistematización de su valoración analítica. En

(17)  $D$  es la dimensión de la obra que mejor caracteriza la perturbación que produce ésta en el movimiento del agua.  $\nu$  es la viscosidad (en  $m^2/s$ ) cinemática (ver apartado 4.5).

ausencia de ensayos específicos en modelo físico o de resultados tabulados correspondientes a ensayos realizados en estructuras similares, simplícidamente podrá aproximarse por la formulación recomendada para el cálculo de fuerzas debidas a las corrientes sobre buques equiparables, incluida en el apartado de esta Recomendación correspondiente a las acciones de uso y explotación (apartado 4.6-4.4.7. Cargas de amarre). No obstante, en obras de atraque situadas en áreas exteriores o no abrigadas en las cuales la acción del oleaje es predominante, del lado de la seguridad es admisible calcular la fuerza de arrastre considerando un coeficiente  $C_D = 1,00$  siempre que la profundidad sea mayor que 5 veces el calado del flotador. Para valores profundidad/calado  $< 5$  dicho coeficiente puede alcanzar valores de hasta  $C_D = 4,00$ .

**Tabla 4.6.2.4. Coeficientes de arrastre ( $C_D$ ) para el cálculo de las fuerzas de arrastre debidas a la acción de la corriente ( $10^3 < R_e < 10^5$ )**

TIPO DE ESTRUCTURA			Área de la estructura en la dirección de la corriente ( $A_L$ )	Coeficiente de Arrastre ( $C_D$ )
OBRAS DE ATRAQUE FIJAS ABIERTAS	Pilas o pilotes de sección circular		$D \cdot L$	1,00 ( $L \gg D$ ) <sup>1</sup>
	Pilas o pilotes de secciones cuadradas		$D \cdot L$	2,00 ( $L \gg D$ )
			$D \cdot L$	1,60 ( $L \gg D$ )
	Pilas o pilotes de sección rectangular		$B \cdot L$	2,00 ( $L \gg D$ )
	Pilas o pilotes de secciones hexagonales		$D \cdot L$	2,00 ( $L \gg D$ )
			$D \cdot L$	2,00 ( $L \gg D$ )
	Pilas o pilotes de sección octogonal		$D \cdot L$	1,40 ( $L \gg D$ )
Pilas o pilotes de sección dodecagonal		$D \cdot L$	1,10 ( $L \gg D$ )	
OBRAS DE ATRAQUE FIJAS MASIVAS			$a \cdot b$	$a/b = 1 \rightarrow 1,12$ $a/b = 2 \rightarrow 1,15$ $a/b = 4 \rightarrow 1,19$ $a/b = 10 \rightarrow 1,29$ $a/b = 18 \rightarrow 1,40$ $a/b = \infty \rightarrow 2,00$
Notas				
L : Longitud de la generatriz.				
1) Para rugosidades bajas con números de Reynolds $< 10^3$ los valores de $C_D$ pueden oscilar entre 1 y 60.				

En cada estado, esta acción debida a corrientes se considerará de igual carácter que el agente causante. Por tanto, las acciones debidas a corrientes de marea o de regímenes fluviales en condiciones extremas y excepcionales se considerarán siempre de carácter permanente en el estado meteorológico.

**c) Acciones debidas a los niveles de agua asociados a mareas y niveles fluviales ( $Q_{fc,61}$ )**

Todas las superficies de las obras de atraque y amarre que se encuentren sumergidas estarán sometidos a presiones en la dirección normal a la superficie ( $u_w$ ) asociadas con los niveles de agua debidos a mareas y regímenes fluviales, por oscilaciones marinas y fluviales de periodo largo (Ver figura 4.6.2.2). A su vez, los niveles de agua dan lugar en el terreno, en el cimientado y en los rellenos a presiones intersticiales ( $u_w$ ) y, en su caso, a fuerzas de arrastre cuando existen gradientes de potencial ( $I \cdot \gamma_w$ ), que deben tomarse en consideración para la verificación de la estabilidad del terreno y de la obra en función del método de cálculo utilizado. (Ver ROM 0.5-05).

Dichas presiones vendrán dadas por la expresión:

$$u_w = \gamma_w \cdot z$$

siendo  $z$  la altura del nivel piezométrico en el punto de determinación y  $\gamma_w$  el peso específico del agua. Dicho nivel coincidirá con el nivel de las aguas exteriores o el de saturación en terrenos naturales o rellenos (empujes hidrostáticos), salvo en aquéllos puntos en que sea relevante el amortiguamiento de la onda de marea (p.e. en cimientados o rellenos poco permeables) o se considere significativa la existencia de procesos de filtración (p.e. por existir desniveles trasdós-intradós) o de procesos de consolidación. En estos casos, las presiones intersticiales podrán obtenerse analizando según cada caso, respectivamente, la forma en que se amortigua la onda de marea a través de modelos que reproduzcan el flujo en el medio poroso (ver apartado 3.4.11 de la ROM 0.5-05), estableciendo la correspondiente red de filtración cuando sea admisible considerar flujo estacionario o cuasi-estacionario o analizando la existencia de un proceso de consolidación (ver apartado 3.4.4 de la ROM 0.5-05). La metodología general para la cuantificación de los procesos de amortiguamiento o penetración de las diferentes oscilaciones del mar en el medio poroso aplicado a las obras de atraque y amarre se desarrolla en la figura 4.6.2.2 y en las tablas 4.6.2.6 y 4.6.2.7, al ser aplicable la misma metodología tanto a las oscilaciones marinas de periodo corto (oleaje) como a las de periodo largo (mareas) e intermedio (ondas largas). A su vez, en las sucesivas Recomendaciones de la Serie 2 correspondientes a cada tipología de atraque se desarrollarán las distribuciones de empujes a considerar en condiciones usuales.

Como puede observarse en los ejemplos incluidos en la figura 4.6.2.2, la onda de marea astronómica o meteorológica se amortigua en terrenos naturales, en una banqueta o en un relleno cuando se comportan como total o parcialmente drenados, a una distancia ( $L_{at}$ ) que depende fundamentalmente de las características de permeabilidad y deformabilidad del mismo; es decir, de su capacidad de drenaje en relación con el periodo de la marea. Por tanto, a partir de una cierta profundidad en el terreno de cimentación o distancia en el caso de las banquetas o rellenos, las presiones intersticiales se estabilizan en la presión hidrostática correspondiente al nivel medio. De acuerdo con la formulación generalmente aceptada (ver fórmulas de la figura 4.6.2.2), en terrenos de cimentación alejados de la obra de atraque, formados por arenas finas ( $k \approx 10^{-5} \text{ m/s}$  y  $c_v \approx 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ) esta profundidad puede ser del orden de 8-10 m, siendo mayor en terrenos más permeables. Cuando estos terrenos se comportan frente a la marea como totalmente drenados puede considerarse que la evolución de las presiones intersticiales se reproduce enteramente y sin desfase.

Por dichas razones, en obras de gravedad (ver ejemplo I de la figura 4.6.2.2) puede considerarse que, dadas las dimensiones y las características de las banquetas de cimentación de dichas obras, en general de escollera o todo uno con una alta permeabilidad ( $k > 10^{-3} \text{ m/s}$ ) y con coeficientes de consolidación  $c_v > 10 \text{ m}^2/\text{s}$ , el tiempo necesario para su completo drenaje es menor que el periodo de la onda de marea astronómica o meteorológica, por lo que es capaz de transmitir completamente los niveles de marea, produciéndose, en su caso, el amortiguamiento de la onda de marea de forma completa o incompleta en el relleno de trasdós dependiendo de la permeabilidad y demás características de dicho relleno. En estos casos la distribución de subpresiones en la base de la obra puede considerarse prácticamente homogénea. A su vez, en el caso de que se produzca amortiguamiento de la onda de marea en el trasdós, la ley de empujes en dicha zona es curva. A medida que avanza la profundidad, la ley se aparta de la hidrostática hasta alcanzar el valor de la subpresión en la base antes mencionado. Esta ley curva puede aproximarse resolviendo el problema de flujo estacionario con los desniveles trasdós-intradós considerados (Ver ROM 0.5-05).

En el caso del muelle de pantallas (ver ejemplo 2 de la figura 4.6.2.2) es un caso concreto en el que el terreno inferior, donde se empotra la pantalla, es prácticamente impermeable cuando se compara con el terreno superior del trasdós. El cálculo de las presiones intersticiales en estas pantallas es complejo y necesita considerar varias situaciones que pueden tener como referencia la situación de flujo estacionario correspondiente (ver figura 3.4.3 de la ROM 0.5-05). Para considerar el efecto del amortiguamiento de la onda de marea se puede añadir a las presiones en el extremo inferior de la pantalla obtenidas a través de la consideración de flujo estacionario, y a ambos lados de la misma, la presión intersticial adicional definida para el “campo libre” ( $\Delta u_m$ ). Puede considerarse que este incremento (o decremento) varía linealmente desde el extremo inferior de la pantalla hasta la zona superior de cada lado, donde el nivel piezométrico es constante (Ver figura 4.6.2.2).

Para la determinación de los niveles de saturación compatibles a considerar en los rellenos y terrenos naturales en el trasdós de la obra de atraque deberá analizarse la posibilidad de que se produzcan desfases entre dichos niveles y los de las aguas exteriores por la capacidad de la obra en su conjunto de amortiguar o no la onda de marea o los ciclos fluviales, así como de evacuar los flujos de agua que se generan. Estos desfases dependerán fundamentalmente de las características de variabilidad de las mareas y niveles fluviales y de las dimensiones de la obra, así como de las características de permeabilidad, porosidad y deformabilidad del cimientado, del terreno natural, del relleno y de la obra. En el apartado 3.4.4.1 de la ROM 0.5-05 se dan indicaciones simplificadas sobre los desniveles a considerar, a falta de análisis más precisos por medio de modelos adecuados o medidas experimentales. A falta de otros datos y a los efectos de la completa definición de la línea de saturación en rellenos y terrenos naturales a partir de los niveles definidos en el trasdós, puede considerarse, en el caso que sea desfavorable para el modo de fallo analizado, que los niveles de agua se estabilizan a distancias muy alejadas del trasdós de la estructura. En ningún caso se considerarán distancias menores de 20 m. El nivel de estabilización puede considerarse igual al nivel medio del mar + 0,3 m en mares con marea astronómica significativa y en el nivel medio del mar en mares sin marea astronómica significativa, siempre y cuando no haya aportaciones freáticas desde el lado tierra.

En cada estado, esta acción se considerará de carácter permanente al igual que el agente causante.

#### **d) Acciones debidas al oleaje ( $Q_{fe,63}$ )**

La acción del oleaje sobre las obras de atraque y amarre se manifiesta de dos formas: una indirecta, actuando a través del buque durante el atraque o amarrado, y otra directa ejerciendo fuerzas sobre la propia estructura. La primera se detalla en el apartado de esta ROM correspondiente a las acciones de uso y explotación, donde se dan criterios para su estimación y consideración (Ver apartado 4.6.4.4).

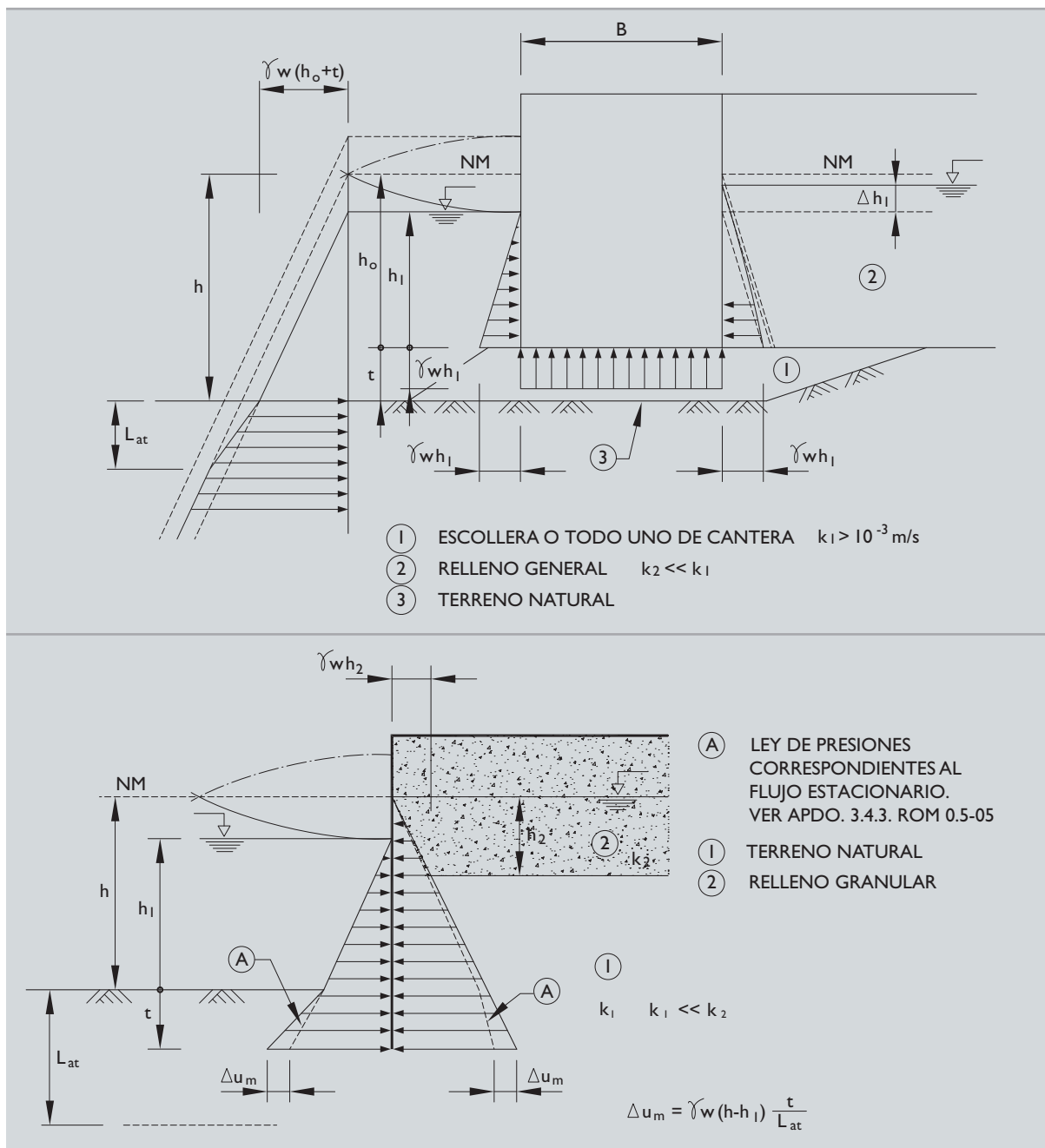
A su vez, el oleaje puede generar en el terreno o en los rellenos modificaciones en las presiones totales y en las presiones intersticiales que deben analizarse y, en su caso, tomarse en consideración para la verificación de la estabilidad del terreno y de la obra de acuerdo con lo previsto en la ROM 0.5-05 y en esta Recomendación (Tablas 4.6.2.6 y 4.6.2.7).

Las acciones y demás efectos directos debidos al oleaje no dependen únicamente de las características propias del oleaje incidente (altura, periodo y dirección) sino también de la tipología y dimensiones de la estructura y del régimen hidráulico en el emplazamiento resultante de la interacción del oleaje con la estructura, así como, en su caso, de las características del terreno. Debido a ello, la definición de las acciones se realiza de forma diferente en función de las condiciones que presenten dichos factores. A estos efectos, se considerará suficientemente válida la aplicación de la teoría lineal del oleaje para obras de atraque y amarre situadas en zonas relativamente protegidas. Cuando se presenten olas muy peraltadas, normalmente asociadas a zonas más expuestas, se aplicarán teorías de orden superior (ver figura 4.6.2.5). La aplicación detallada de estas teorías se desarrolla en la ROM 1.0.

La acción directa del oleaje sobre la obra de atraque y amarre se puede descomponer en tres grupos de fuerzas hidrodinámicas:

- ◆ Fuerzas de difracción, debidas a la modificación del tren de ondas por la presencia de la obra.
- ◆ Fuerzas de arrastre, inercia y sustentación, debidas a la velocidad y aceleración relativas del movimiento del agua con respecto al movimiento de la estructura.
- ◆ Fuerzas debidas, en su caso, al movimiento propio de la estructura (teniendo en cuenta la radiación de ondas por ello).

**Figura 4.6.2.2. Acciones debidas a los niveles de agua asociados a mareas y niveles fluviales. Ejemplos en obras de gravedad y pantallas 1) 2) 3)**



#### Notas

- 1) Los ejemplos se corresponden con situaciones de nivel bajo de las aguas, lo que no significa que siempre esta situación sea la más desfavorable para todos los modos de fallo. Debe comprobarse también la situación de niveles altos de las aguas.

### Acciones debidas a los niveles de agua asociados a mareas y niveles fluviales. Ejemplos en obras de gravedad y pantallas <sup>1) 2) 3)</sup> (continuación)

#### Notas

- 2) La Ley de presiones intersticiales en el terreno natural incluida en las figuras se corresponde con situación de “campo libre”; es decir, en zonas suficientemente alejadas de la obra de atraque. Esta ley cambia a medida que el plano vertical en consideración se aproxima a la obra de atraque por la influencia de la misma. Simplificadamente, en el terreno bajo el relleno del trasdós se puede considerar que es una continuación de la ley propuesta para el relleno. Asimismo, a los efectos de la verificación de los modos de fallo geotécnicos es admisible considerar en las zonas próximas a la obra que la ley de presiones intersticiales en el terreno de cimentación es igual a la media de la estimada para el suelo bajo el fondo del relleno y bajo el fondo en “campo libre”.
- 3) En ambas figuras puede aceptarse la simplificación de suponer que el amortiguamiento de la onda de marea crea en el terreno de cimentación en “campo libre”, en el momento de la bajamar, un gradiente vertical constante de flujo ascendente igual a la semiamplitud de la onda de marea dividida por la profundidad de atenuación de dicha onda de marea [ $I_v = (h-h_1)/L_{at}$ ]. En el caso del muelle de pantalla incluido en esta figura, si el terreno natural es poco permeable ( $k < 10^{-6}$  m/s) y con la compresibilidad usual del esqueleto sólido de suelos impermeables, pueden resultar valores de la variable  $L_{at}$  menores que la longitud de hinca,  $t$ . En estos casos puede tomarse simplificadamente  $L_{at} = t$ , comprobando además la estabilidad de la obra en condiciones no drenadas.

#### Legenda

- $L_{at}$  : profundidad o distancia de atenuación de la onda de marea en un terreno, banqueta o relleno.  
 $T_{onda}$  : periodo de la onda.  
 $H_{onda}$  : amplitud de la onda.  
 $L_{onda}$  : longitud de la onda.  
 $D$  : distancia más larga hasta el drenaje (en el caso del terreno es la profundidad del punto en cuestión bajo el fondo del mar si el estrato es de gran espesor o tiene un límite inferior impermeable. En el caso de que drene por ambas caras será la distancia más larga hasta el drenaje; es decir no mayor que la mitad del espesor del estrato). En el caso de que la formulación se aplique a oscilaciones del mar de periodo intermedio (ondas largas), esta distancia nunca se adoptará mayor de  $L_{onda}/2\pi$ .  
 $h$  : altura del nivel medio del mar sobre el terreno de cimentación.  
 $k$  : coeficiente de permeabilidad del terreno de cimentación.  
 $n$  : porosidad del terreno de cimentación.  
 $c_v$  : coeficiente de consolidación del terreno de cimentación.

- a) Terreno con comportamiento totalmente drenado frente a la marea. La evolución de las presiones intersticiales se reproduce enteramente y sin desfase. La ley de presiones en el terreno se obtendrá estableciendo la correspondiente red de filtración en condiciones de flujo estacionario.

$$T_{onda} > \max \left[ \frac{\pi n D^2}{hk}, \frac{\pi D^2}{c_v} \right]$$

- b) Terreno con comportamiento parcialmente drenado frente a la marea

$$0,01 \left[ \frac{\pi n D^2}{hk}, \frac{\pi D^2}{c_v} \right] < T_{onda} < \left[ \frac{\pi n D^2}{hk}, \frac{\pi D^2}{c_v} \right]$$

$$L_{at} = \min \left[ \sqrt{\frac{T_{onda} \cdot h \cdot k}{\pi \cdot n}}, \sqrt{\frac{T_{onda} \cdot c_v}{\pi}} \right] \leq \frac{L_{onda}}{2\pi}$$

- c) Terreno con comportamiento no drenado frente a la marea. La definición de las presiones intersticiales instantáneas está sometida a grandes incertidumbres. En estas zonas se recomienda trabajar en tensiones totales, considerando una presión en el fondo igual a

$$T_{onda} < 0,01 \left[ \frac{\pi n D^2}{hk}, \frac{\pi D^2}{c_v} \right]$$

$$\gamma_w \left[ h \pm \frac{H}{2} \right],$$

en función de considerar paso de cresta o paso de seno.

Las fuerzas predominantes en cada caso dependen principalmente del número de Keulegan-Carpenter [ $KC = uT/D \equiv \pi H/D$ , si  $u$  es el módulo de la velocidad lineal en el nivel medio] y del parámetro de difracción [ $\Pi_D = \pi D/L$ ], siendo  $D$  la dimensión horizontal frontal de la estructura perpendicular a la dirección de actuación del oleaje,  $u$  una velocidad representativa del flujo hidrodinámico y  $H$ ,  $T$  y  $L$ , los parámetros

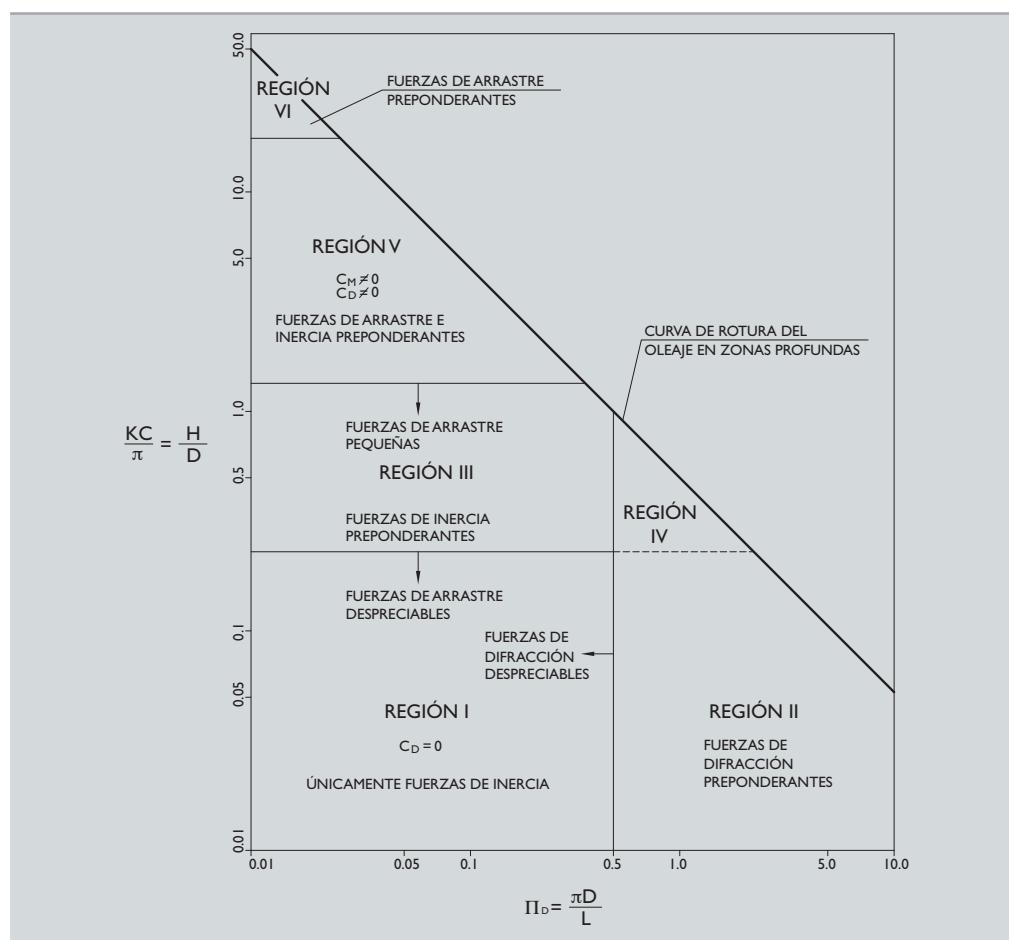
altura, periodo y longitud de onda respectivamente <sup>(18)</sup>. En la figura 4.6.2.3 se representan los dominios de preponderancia de cada una de las fuerzas en función de los valores de los parámetros  $KC$  y  $\Pi_D$ .

**d<sub>1</sub>) Obras de atraque fijas en las que las fuerzas de difracción son preponderantes ( $\Pi_D > 0,5$  y  $KC < 0,8$ . Región II, figura 4.6.2.3)**

**d<sub>11</sub>) OBRAS DE ATRAQUE FIJAS CERRADAS CON  $D \gg L$**

Se consideran en este apartado las obras opacas a la propagación del oleaje, de dimensión horizontal frontal ( $D$ ) relativamente importante respecto a la longitud de onda ( $L$ ) del oleaje (Ver nota 18), sin que exista acoplamiento entre las leyes de presiones a barlomar y sotamar. Dichas obras pueden ser total ( $C_r = 1$ ) o parcialmente ( $C_r < 1$ ) reflejantes. En general, las obras de atraque y amarre que responden a estos parámetros son los muelles y los pantalanes continuos. Las acciones del oleaje sobre este tipo de obras se definen a continuación, diferenciándose en función de las características del oleaje en el emplazamiento y de su interacción con la estructura.

**Figura 4.6.2.3. Dominios de preponderancia de las fuerzas hidrodinámicas del oleaje sobre las obras de atraque y amarre**



(18) Cuando se trabaje con variables de estado, se considerará  $H$  la altura de ola máxima ( $H_{max}$ ),  $T$  el periodo medio del oleaje ( $\bar{T}$ ) y  $L$  la longitud de onda asociada al periodo medio del oleaje ( $\bar{L} = [8(T)^2/2\pi] \tanh[2\pi h/\bar{L}]$ ). En profundidades reducidas [ $h < (1/20)\bar{L}$ ] puede tomarse aproximadamente:  $\bar{L} \approx \sqrt{g\bar{T}}$ . En casos en que el terreno natural se comporte como total o parcialmente drenado frente a la acción del oleaje (situaciones 1 y 2 de la tabla 4.6.2.6), para la definición de  $L$  mediante la formulación consignada deberá tomarse en consideración cuando sea relevante la profundidad en la que se produce el amortiguamiento del oleaje en terreno natural (tabla 4.6.2.6), adoptándose como nueva  $h$  ( $h'$ ) la distancia entre nivel medio del mar y profundidad de amortiguamiento de la onda ( $h + L_{at}$ ).



Dada la magnitud de las acciones resultantes cuando las obras de atraque se sitúan en emplazamientos muy expuestos a la acción del oleaje, en general en estos casos las tipologías fijas cerradas no son recomendables por criterios económicos, al dar lugar a diseños muy robustos capaces de resistir los importantes esfuerzos que se producen sobre las mismas. Para estos casos son más recomendables las tipologías abiertas o flotantes, mucho más permeables a la acción del oleaje.

- ◆ *Sobre obras de atraque en situación no rebasable, cuando pueda admitirse que se comportan como totalmente reflejantes, con paramentos exteriores verticales o casi verticales para oleaje incidente <sup>(19)</sup> y oleaje compuesto resultante ambos sin rotura ( $H_{max,I} < 0,9 h$  y  $H_{max,C} < 1,36 h$ ).*

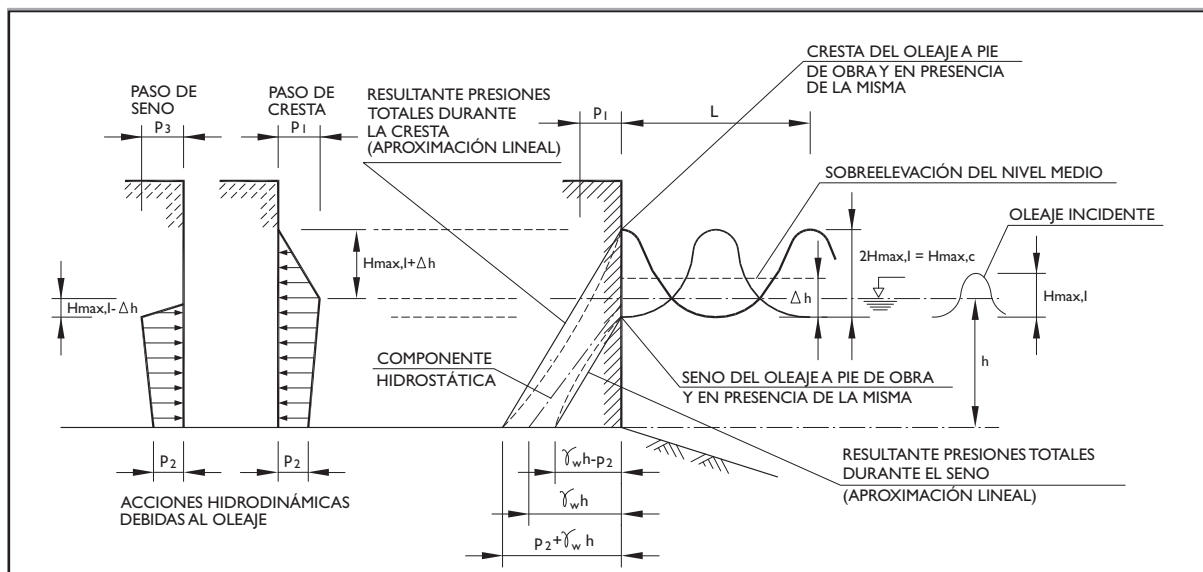
Sobre obras que puedan considerarse como totalmente reflejantes, la acción del oleaje podrá aproximarse a partir de las siguientes presiones, depresiones y subpresiones en dirección normal a la superficie:

- En ausencia de técnicas numéricas o experimentales más precisas, pueden adoptarse las presiones y depresiones sobre los paramentos exteriores que se recogen en la tabla 4.6.2.5. cuando pueda admitirse que la influencia del oleaje no alcanza al trasdós de la obra <sup>(20)</sup>.
- Las presiones y depresiones sobre los paramentos enterrados en las obras de pantallas y recintos dependen de la distribución de presiones intersticiales que se generan en el fondo marino por la acción del oleaje, las cuales son función de la deformabilidad y permeabilidad del terreno y, por tanto, de la capacidad de drenaje del mismo en relación con el periodo del oleaje actuante (Ver apartado 3.4.11 y 3.10.1 de la ROM 0.5-05). A falta de modelos analíticos o numéricos más complejos que analicen el flujo a través de medios porosos o mediante su observación en modelo físico o prototipo, de acuerdo con las soluciones simplificadas admitidas en dicha ROM 0.5-05, las presiones y depresiones sobre paramentos enterrados, así como las presiones intersticiales y, en su caso, las fuerzas de arrastre generadas por el oleaje en el terreno, pueden aproximarse para el paramento de intradós en los casos más generales a partir de las formulaciones recogidas en la tabla 4.6.2.6, cuando pueda admitirse que la transmisión del oleaje en el trasdós de la obra no es relevante (Ver nota 19). Como puede obtenerse de la aplicación de dicha tabla, para suelos arenosos limpios la zona en la que se produce el amortiguamiento del oleaje (con periodos medios del oleaje incidente ( $T_{oleaje}$ ) en el rango de 10-12 s) es del orden de 3 metros. Para terrenos limo-arenosos puede reducirse a 0,5 m. Para oleajes con periodos mayores dicha distancia aumenta.
- Las presiones y depresiones que actúan sobre la base de las obras de gravedad dependen directamente de las presiones intersticiales que se generan en la banqueta de cimentación por la propagación a través de la misma del oleaje, pudiéndose despreciar en este tipo de obras cuando están trasdosadas la influencia de los movimientos de la estructura. Al igual que se ha señalado en el apartado anterior para

(19) Se considera oleaje incidente el que se produce en el emplazamiento y en presencia de la obra, a una distancia de la misma en la que los efectos debidos a la reflexión producida por dicha obra no son significativos. Simplificadamente, para situaciones totalmente reflejantes puede considerarse que la altura de ola incidente equivalente tiene un valor mitad de la altura de ola a pie de obra ( $H_C$ ), aunque puede ser mayor cuando el encuentro entre el oleaje incidente y reflejado es oblicuo, ya que en estos casos la amplitud del movimiento vertical del oleaje compuesto decrece con el ángulo entre crestas.

(20) Con las dimensiones usuales de los muelles y pantallas continuos de gravedad y de sus banquetas de cimentación (de pequeño espesor en relación con la altura sumergida de la estructura), incluso cuando estas últimas tengan una alta permeabilidad (p.e. escolleras o todo uno), puede considerarse que es despreciable la transmisión del oleaje al trasdós de la estructura, comportándose como totalmente reflejante. Así mismo, en los muelles de pantallas puede admitirse que, dadas las longitudes necesarias de hinca y las características de los suelos para los que esta solución está particularmente indicada, generalmente tampoco se produce transmisión del oleaje al trasdós de la estructura. En aquellos casos en los que se considere que las presiones hidrodinámicas en la punta de la pantalla o recinto son significativas, las presiones hidrodinámicas en el trasdós podrán estimarse a partir del análisis de la red de filtración en esa zona considerando condiciones de flujo estacionario desde la punta de la pantalla.



**Tabla 4.6.2.5. Acciones de oleaje sin rotura sobre los paramentos exteriores de obras lineales de atraque fijas cerradas, totalmente reflejantes y no rebasables 1) 2) 3)****Notas**

- 1) Cuando pueda considerarse que no se produce transmisión del oleaje en el trasdós de la obra.
- 2) Se recomienda el modelo de Sainflou (1928) por las siguientes razones:
  - En general las obras de atraque y amarre, lineales, fijas y cerradas aunque estén situadas en áreas exteriores o no abrigadas frente al oleaje suelen diseñarse como no rebasables debido a la existencia de rellenos en el trasdós, así como a los requerimientos de explotación (almacenamiento de mercancías, disposición de equipos e instalaciones de manipulación de mercancías fijas o de movilidad restringida no removibles, ...), encontrándose ubicadas normalmente en zonas próximas a la costa, en aguas no muy profundas y sometidas a oleajes muy modificados, en particular por fenómenos de difracción y reflexión producidos por otras infraestructuras portuarias, en los que difícilmente se alcanzan condiciones de rotura, que hacen que el oleaje en el emplazamiento y en presencia de la obra sea un complejo fenómeno de agitación sin una dirección incidente dominante, resultado de varias olas incidentes con diferente orientación. Así mismo dadas las características y dimensiones de las banquetas de cimentación pueden considerarse que estas obras se comportan como totalmente reflejantes. En estas condiciones, otras fórmulas (p.e. Goda) tienen un rango de aplicabilidad mucho más limitado. Por otra parte, la fórmula de Sainflou es la que mejor reproduce las depresiones que se producen durante el paso del seno de la ola, situación que, en la mayor parte de los casos, es la crítica para la estabilidad de obras de atraque fijas cerradas con explanada en el trasdós.
  - La recomendación de este método se establece sin perjuicio de poder utilizar otra formulación recomendada para los diques de abrigo verticales, siempre que la obra de atraque esté muy desabrigada y sometida a oleajes incidentes menos modificados que los anteriormente señalados (Ver ROM 1.0.)
  - Rango de validez recomendado para el Modelo de Sainflou:
    - Fondo horizontal o pendiente muy tendida ( $\tan \alpha < 1/50$ )
    - Cualquier dirección de incidencia
    - Peralte reducido:  $H_{\max,I}/L < 0,06$
    - Profundidades relativas reducidas e intermedias con  $h/L < 0,25$
- 3) Se recomienda que las acciones resultantes obtenidas directa o indirectamente (p.e. subpresiones) a partir de la integración de las presiones definidas a través del modelo de Sainflou se multipliquen por un factor 1,25 cuando sean desfavorables con el objeto de tener en cuenta las incertidumbres asociadas a este modelo de cálculo.

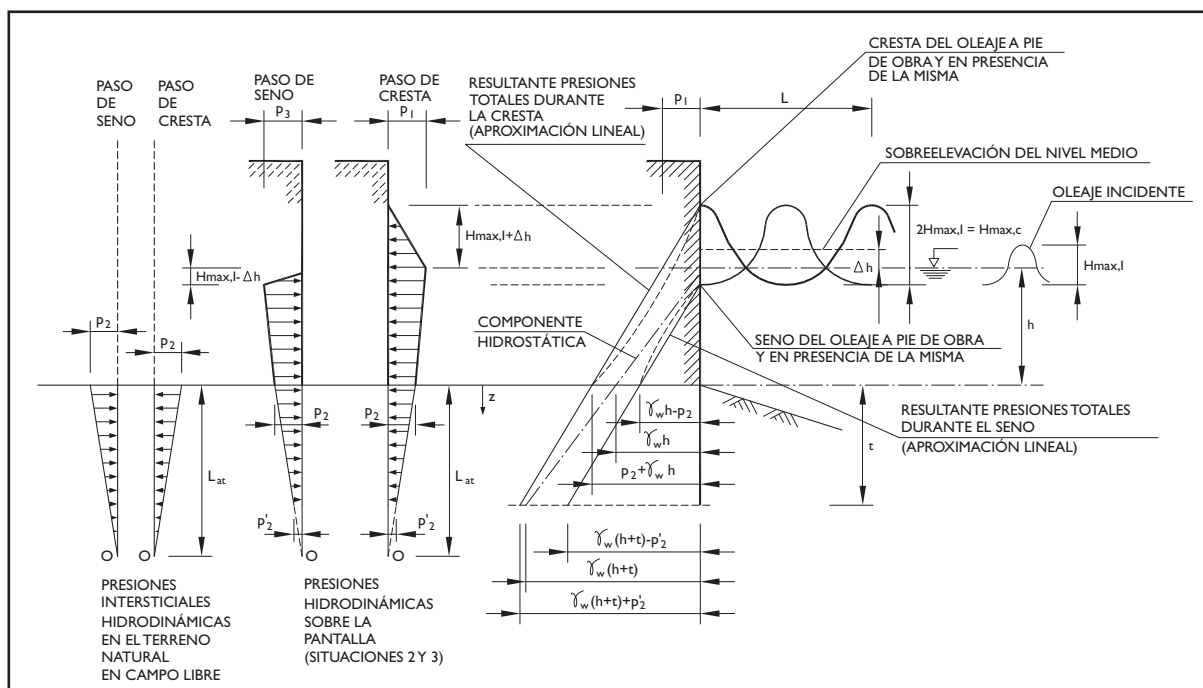
**Leyenda**

$$\begin{aligned}
 - \Delta h &= \frac{\pi H_{\max,I}^2}{L} \coth\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \\
 - p_1 &= (p_2 + \gamma_w h) \frac{H_{\max,I} + \Delta h}{H_{\max,I} + \Delta h + h} \\
 - p_2 &= \frac{\gamma_w H_{\max,I}}{\cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \\
 - p_3 &= \gamma_w (H_{\max,I} - \Delta h)
 \end{aligned}$$

presiones o depresiones sobre paramentos enterrados, estas presiones y subpresiones dependen de la permeabilidad y deformabilidad de la banqueteta y de sus dimensiones y, por tanto, de su capacidad de drenaje en relación con el periodo del oleaje actuante (Ver apartado 3.4.11 y 3.10.1 de la ROM 0.5-05.). En banquetetas de escollera y de todo uno de cantera limpio puede considerarse que el tiempo necesario para el drenaje es menor que los periodos del oleaje (situación 1 de la tabla 4.6.2.6), por lo que las presiones intersticiales podrán obtenerse estableciendo la correspondiente red de filtración en condiciones de flujo estacionario. Por tanto, en estos casos, si consideramos que no se produce o no es relevante la transmisión de oleaje en el relleno de trasdós será admisible considerar leyes triangulares de distribución de las presiones hidrodinámicas sobre la base, extendiéndose a la totalidad de la misma (Ver tabla 4.6.2.7) y una fuerza de arrastre asociada a dicha distribución. Por el contrario, si las banquetetas se realizan con materiales menos permeables (p.e. todo uno con alto porcentaje de finos), deberá comprobarse la distancia de penetración de las presiones en la banqueteta de acuerdo con la formulación recogida en la tabla 4.6.2.7.

- Para la definición del comportamiento, así como de las presiones intersticiales en el terreno natural y las presiones hidrodinámicas que actúan en el fondo del mar en las proximidades de la obra o en la superficie de las coronaciones o taludes de las banquetetas externas a la base de la misma debidas al oleaje se tomará en consideración lo establecido al respecto en los apartados 3.4.11 y 3.10.1 de la ROM 0.5-05, así como en las tablas 4.6.2.6 y 4.6.2.9 de esta Recomendación, respectivamente. Para la obtención de las presiones hidrodinámicas bajo las banquetetas de cimentación de obras de gravedad, en el punto de contacto con el terreno natural es admisible considerar una distribución hidrostática en dirección vertical de las subpresiones hidrodinámicas definidas para la base de la obra (ver tabla 4.6.2.7). Bajo el relleno de trasdós se considerará que no se producen presiones intersticiales hidrodinámicas.

**Tabla 4.6.2.6. Acciones del oleaje sin rotura sobre los parámetros de intradós enterrados en las obras lineales de pantallas o recintos totalmente reflejantes y no rebasables**



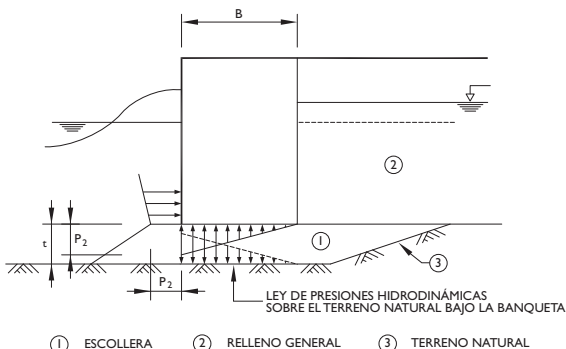
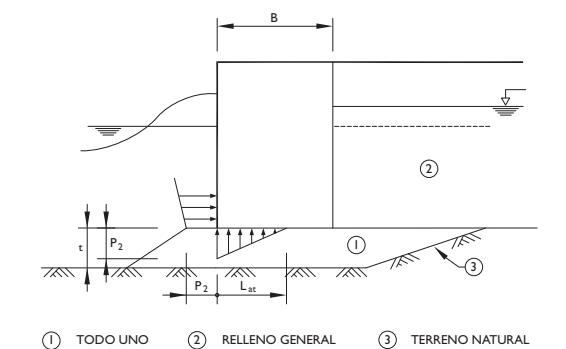
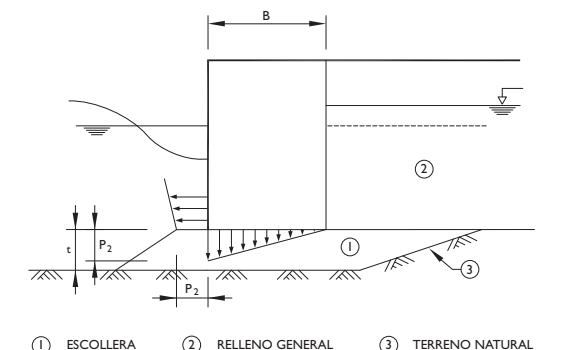
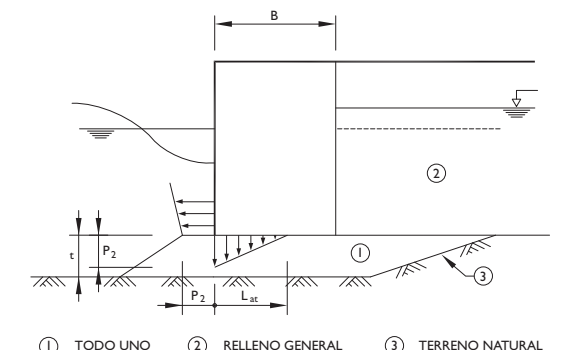
**Acciones del oleaje sin rotura sobre los parámetros de intradós enterrados en las obras lineales de pantallas o recintos totalmente reflejantes y no rebasables (continuación)**

<p>SITUACIÓN 1</p> $T_{oleaje} > \max \left[ \frac{\pi n B^2}{tk_1}, \frac{\pi B^2}{c_{v1}} \right]$ <p>(terreno con comportamiento totalmente drenado frente al oleaje)</p>	<p>SITUACIÓN 2</p> $0,01 \left[ \frac{\pi n B^2}{tk_1} \text{ ó } \frac{\pi B^2}{c_{v1}} \right] < T_{oleaje} < \left[ \frac{\pi n B^2}{hk} \text{ ó } \frac{\pi B^2}{c_{v1}} \right]$ <p>Situaciones intermedias (terreno con comportamiento parcialmente drenado frente al oleaje)</p>	<p>SITUACIÓN 3</p> $T_{oleaje} = 0,01 \left[ \frac{\pi n D^2}{hk} \text{ y } \frac{\pi D^2}{c_v} \right]$ <p>(terreno con comportamiento no drenado frente al oleaje)</p>
<p>a. Puede suponerse que la evolución de presiones intersticiales hidrodinámicas en el fondo generadas por el oleaje se reproduce enteramente y sin desfase dentro del terreno. En este caso la ley de presiones hidrodinámicas se obtendrá estableciendo la correspondiente red de filtración en condiciones de flujo estacionario. Esta condición no es previsible que ocurra en los suelos para los cuales está indicada la solución pantalla. Simplificadamente, en aquellos casos que esté del lado de la seguridad para la verificación de un modo de fallo es admisible considerar en el paramento enterrado la prolongación de la ley de empujes hidrodinámicos obtenida para el paramento exterior (equivale a admitir no transmisión del oleaje al trasdós de la estructura).</p>	<p>a. Distribución lineal entre:</p> $-p_2 = \frac{\gamma_w H_{\max, I}}{\cosh \left( \frac{2\pi h}{L} \right)}, \text{ en } z = 0$ $-0, \text{ en } z = L_{at}$ <p>b)</p> $L_{at} = \frac{1}{A} = \min \left[ \sqrt{\frac{T_{oleaje} \cdot h \cdot k}{\pi \cdot n}}, \sqrt{\frac{T_{oleaje} \cdot c_v}{\pi}} \right] \leq \frac{L_{oleaje}}{2\pi}$ <p>En los casos en que <math>L_{at}</math> sea muy pequeña en relación con la longitud de hincas se comprobará adicionalmente la obra en condiciones no drenadas.</p>	<p>a. La definición de las presiones intersticiales hidrodinámicas instantáneas está sometida a grandes incertidumbres. En estos casos, se recomienda particularmente la aplicación de modelos elastoplásticos del terreno, imponiendo el crecimiento de las presiones intersticiales en función del número de ciclos y de su intensidad (Ver apartado 3.10. ROM 0.5-05 y literatura especializada). Por dichas razones, en estas zonas se recomienda trabajar en tensiones totales, considerando que la presión hidrodinámica generada por la onda compuesta actuando sobre el fondo del mar es igual a:</p> $\frac{\gamma_w H_{\max, I}}{\cosh \left( \frac{2\pi h}{L_{oleaje}} \right)} \cos \left( \frac{2\pi x}{L_{oleaje}} \right) \cos \left( \frac{2\pi t}{T_{oleaje}} \right)$ <p>Tomando como origen de coordenadas <math>x</math> el paso de cresta o seno por la estructura.</p>
<p><b>Leyenda</b></p> <p><math>L_{at}</math> : profundidad o distancia de atenuación de la onda.</p> <p><math>c_v</math> : coeficiente de consolidación del terreno</p> <p><math>T_{oleaje}</math> : periodo medio del oleaje incidente</p> <p><math>K</math> : número de onda (<math>2\pi/L</math>) del oleaje incidente.</p> <p><math>D</math> : Distancia más larga hasta el drenaje (En el caso del terreno es la profundidad del punto en cuestión bajo el fondo del mar si el estrato es de gran espesor o tiene un límite inferior impermeable. En el caso de que drene por ambas caras será la distancia más larga hasta el drenaje; es decir no mayor que la mitad del espesor del estrato) Esta longitud nunca se adoptará mayor de <math>L_{oleaje}/2\pi</math>.</p> <p><math>\gamma_w</math> : peso específico del agua.</p> <p><math>h</math> : profundidad del fondo respecto al nivel medio del agua</p> <p><math>t</math> : profundidad del paramento enterrado respecto al fondo del mar</p> <p><math>L_{oleaje}</math> : Longitud de onda asociada al periodo medio del oleaje incidente.</p> <p><math>A</math> : <math>\sqrt{\left( \frac{\gamma_w \pi}{k E_m T} \right)} = \sqrt{\frac{\pi}{c_v T}}</math></p> <p><math>k</math> : coeficiente de permeabilidad del terreno.</p> <p><math>E_m</math> : módulo edométrico del terreno.</p> <p><math>n</math> : porosidad del terreno.</p>		

- En los casos en los que se considere relevante la transmisión de oleaje en el relleno de trasdós por las dimensiones y características de la banqueta de cimentación, del relleno o del terreno natural, no serán de aplicación las formulaciones anteriores, ya que la obra no se comportaría por dicha causa como totalmente reflejante y se produciría un acoplamiento entre las leyes de presiones a barlomar y sotamar de la obra

de atraque que debería tomarse en consideración para la definición de las presiones y subpresiones hidrodinámicas. Para el análisis y definición de estas leyes, ver la ROM I.0. En general, salvo con banquetas muy permeables de gran espesor en relación con la estructura resistente y con rellenos muy permeables en el trasdós de la obra (pedraplén), estos efectos pueden despreciarse en las obras de atraque y amarre fijas cerradas objeto de este apartado.

**Tabla 4.6.2.7. Subpresiones hidrodinámicas producidas por el oleaje sin rotura sobre la base de obras lineales de gravedad totalmente reflejantes cimentadas sobre banquetas de escollera u otro material granular 1) 2)**

<p>BANQUETA DE ESCOLLERA</p> $T_{oleaje} > \max \left[ \frac{\pi n B^2}{t k_1}, \frac{\pi B^2}{c_{v1}} \right]$ <p>Banqueta con comportamiento totalmente drenado frente al oleaje</p>	<p>BANQUETA DE TODO UNO CON FINOS</p> $0,01 \left[ \frac{\pi n B^2}{t k_1} \text{ ó } \frac{\pi B^2}{c_{v1}} \right] < T_{oleaje} < \left[ \frac{\pi n B^2}{h k} \text{ ó } \frac{\pi B^2}{c_{v1}} \right]$ <p>Banqueta con comportamiento parcialmente drenado frente al oleaje</p>
PASO DE CRESTA	
 <p>LEY DE PRESIONES HIDRODINÁMICAS SOBRE EL TERRENO NATURAL BAJO LA BANQUETA</p> <p>① ESCOLLERA    ② RELLENO GENERAL    ③ TERRENO NATURAL</p>	 <p>① TODO UNO    ② RELLENO GENERAL    ③ TERRENO NATURAL</p>
PASO DE SENO	
 <p>① ESCOLLERA    ② RELLENO GENERAL    ③ TERRENO NATURAL</p>	 <p>① TODO UNO    ② RELLENO GENERAL    ③ TERRENO NATURAL</p>
<p><b>Notas</b></p> <p>1) Para la definición de los parámetros incluidos en esta tabla, ver la leyenda de la tabla 4.6.2.6.</p> <p>2) La formulación incluida en esta tabla es de aplicación a los casos en los que no se considere relevante la transmisión del oleaje en el relleno de trasdós y, por tanto, la obra se comporte a estos efectos como totalmente reflejante. Será de aplicación con carácter general a las obras de atraque y amarre, salvo cuando las banquetas sean muy permeables de gran espesor en relación con la estructura resistente y con rellenos muy permeables en el trasdós de la misma.</p> <p><b>Leyenda</b></p> $L_{at} = \min \left[ \sqrt{\frac{T_{oleaje} \cdot t \cdot k_1}{\pi \cdot n}}, \sqrt{\frac{T_{oleaje} \cdot c_{v1}}{\pi}} \right]$	

- ◆ *Sobre obras de atraque en situación no rebasable, que se comporten como parcialmente reflejantes, con paramentos exteriores verticales o casi verticales y oleaje incidente y compuesto resultante ambos sin rotura*

Las obras fijas cerradas parcialmente reflejantes debido a la existencia de dispositivos absorbentes en su superficie se caracterizan por tener un coeficiente de reflexión  $C_r = H_R/H_I < 1$ , función del peralte del oleaje incidente, de la dirección del oleaje incidente y de la textura, forma y dimensiones de los dispositivos absorbentes; es decir, la altura de la ola reflejada es, en estos casos, menor que la altura de la ola incidente. El valor de  $C_r$  se obtendrá por medio de ensayos en modelo físico o en prototipo. Valores usuales del coeficiente de reflexión en estos casos están en el rango 0,3 ~ 0,6.

Ensayos realizados parecen confirmar que las acciones debidas al oleaje sobre este tipo de obras no son, en general, mucho más pequeñas que las que actúan sobre las obras totalmente reflejantes. En cualquier caso, es conveniente la aplicación de técnicas experimentales para confirmarlo en el caso de considerar dispositivos absorbentes no experimentados o sobre los que no exista una experiencia contrastada <sup>(21)</sup>. Por dicha razón y en ausencia de estudios más precisos, las acciones del oleaje sobre este tipo de obras cuando pueda admitirse que no se produce transmisión del oleaje en el trasdós de la misma pueden ser obtenidas utilizando la formulación recomendada en esta Recomendación para las obras totalmente reflejantes, considerando una altura de ola incidente equivalente ( $H'$ ) inferior a la altura de ola incidente real ( $H_I$ ) e igual a la mitad de la altura de ola a pie de obra y en presencia de la obra ( $H_C$ ). Es decir:

$$H' = \frac{1}{2} H_C = \frac{1}{2} (1 + C_r) H_I$$

No obstante lo anterior, y dado que puede producirse un aumento del peraltamiento de la ola para incidencia muy oblicua del oleaje, del lado de la seguridad en estos casos puede considerarse a los efectos de la definición de las acciones que la obra de atraque es totalmente reflejante ( $C_r = 1$ ) y, por tanto entrando en la formulación con la altura de ola incidente real.

- ◆ *Sobre obras de atraque en situación no rebasable y con oleaje incidente en condiciones de rotura*

No es conveniente ubicar las obras de atraque y amarre en general, y especialmente cuando las obras son fijas cerradas, en emplazamientos o con disposiciones de banqueta de cimentación en los que se pueda producir la rotura de las olas más altas del estado de mar incidente de proyecto ( $H_{max,I} \approx 0,9 h$ ) o del oleaje compuesto en el emplazamiento resultado de su interacción con la obra de atraque

$$\left( H_{max,C} \approx \left[ 1,36 - 0,48 \frac{1 - C_r}{1 + C_r} \right] \right),$$

dado que el oleaje en rotura puede dar lugar a presiones impulsivas muy importantes sobre la estructura, del orden de 10.000 kN/m<sup>2</sup> e incluso valores mayores, así como sobre los elementos que forman la banqueta.

- ◆ *Sobre obras de atraque en situación rebasable*

Como criterio general, por las consecuencias que tiene no sólo para la explotación sino para la estabilidad de las instalaciones, de las mercancías, de los equipos de transporte y

(21) Este criterio puede ser válido para el dimensionamiento y verificación global de la obra, pero no para el dimensionamiento y verificación de elementos locales, como por ejemplo las paredes que forman los dispositivos absorbentes, en los que pueden presentarse diferencias de presiones significativas entre las paredes exteriores e interiores.

manipulación de mercancías y de los rellenos de trasdós, las obras de atraque y amarre fijas cerradas se suelen proyectar como no rebasables o muy ligeramente rebasables en condiciones de nivel alto de las aguas exteriores (Ver apartado 3.2.2.1). En el caso excepcional de que una obra de atraque de este tipo, situada en áreas exteriores o no abrigadas frente al oleaje, se proyecte como rebasable se aplicará a los efectos de la definición de las acciones del oleaje lo dispuesto a estos efectos para los diques de abrigo en la ROM I.0.

No obstante lo anterior, en obras de atraque con trasdós las situaciones de paso de seno en situación de nivel bajo de marea suelen ser las más críticas para la estabilidad de la obra y en ellas no se suelen producir rebases, para estos casos podrán aplicarse las formulaciones recomendadas para los casos no rebasables.

#### **d<sub>12</sub>) SOBRE OBRAS DE ATRAQUE FIJAS CON $L/6 < D \leq L$**

Se consideran en este apartado las obras fijas exentas, anchas y separadas suficientemente de la costa cuyas dimensiones horizontales frontales opacas a la propagación del oleaje ( $D$ ) están entre  $1/6$  de la longitud de onda del oleaje y valores comparables a misma y que, por tanto, afectan significativamente a las condiciones de propagación del mismo alrededor de la estructura. En general, las obras de atraque y amarre que responden a estas características son grandes duques de alba aislados o pantalanes discontinuos formados por soluciones mixtas.

Al no disponerse de relaciones funcionales contrastadas de aplicación generalizable a todo tipo de dimensiones y secciones, las acciones del oleaje sobre este tipo de obras deberán obtenerse fundamentalmente a través de técnicas numéricas o experimentales en modelo físico o prototipo, particularmente cuando hay posibilidades de que el oleaje incidente esté en condiciones de rotura o la estructura sea rebasable.

En los casos de estructuras fijas no rebasables sometidas a oleajes progresivos con números de Keulegan-Carpenter acotados ( $H/D < 0,25$ ) puede admitirse que el flujo no se despega del perímetro de la obra y que, por tanto es esencialmente potencial. Entonces existe un potencial de velocidades ( $\Phi$ ) y el problema está gobernado por la ecuación de conservación de masa expresada mediante la función del potencial de velocidades:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0, \quad -h \leq z \leq 0$$

siendo:

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_S$$

$\Phi_I$  : función potencial de velocidades del oleaje incidente.

$\Phi_S$  : función potencial de velocidades del oleaje disperso. Este potencial depende de la forma de la obra y de las condiciones de contorno asociadas al terreno y a la obra.

Para formas y condiciones de contorno simples existen soluciones analíticas conocidas que permiten disponer de las funciones potenciales. Estas soluciones analíticas pueden encontrarse en la literatura especializada. Por ejemplo, cuando la obra es un cilindro circular de eje vertical y de paramento impermeable, está disponible la solución de MacCamy y Fuchs. No obstante, para estructuras con formas complejas y otras condiciones de contorno se recomienda resolver el problema aplicando modelos de transformación del oleaje, de validez para las condiciones de contorno existentes en la obra y en el emplazamiento, que tengan en cuenta especialmente los procesos de difracción (Ver ROM I.0) <sup>(22)</sup>.

(22) En particular, la aplicación de los modelos numéricos (MSPE) de transformación del oleaje formulados en la aproximación de pendiente suave (Ver ROM I.0) proporciona las funciones potenciales total y dispersa en todos los puntos del dominio, incluido el perímetro de la obra.

Una vez conocidas las funciones potenciales, las presiones hidrodinámicas en cada punto pueden calcularse aplicando la ecuación de Bernoulli linealizada:

$$p(x, y, z, t) = \rho_w \frac{\partial(\Phi_I + \Phi_S)}{\partial t}, \quad -h \leq z \leq 0$$

Las acciones resultantes del oleaje sobre la estructura se calculan por integración de las presiones ejercidas sobre el contorno de la misma. Con carácter general en un estado de mar, estas acciones tienen componentes estacionarias y componentes no permanentes con diferentes escalas de variabilidad temporal.

Para la definición del comportamiento, así como de las presiones intersticiales en el terreno natural y las presiones hidrodinámicas que actúan en el fondo del mar en las proximidades de la obra o en la superficie de las coronaciones o taludes de las banquetas de cimentación deberán conocerse las características del oleaje resultante de la interacción de los trenes de onda incidente y de los dispersos debidos a la presencia de la obra en el emplazamiento por medio de modelos de transformación del oleaje. Una vez definido el oleaje en el emplazamiento será de aplicación lo definido a estos efectos en el epígrafe *d<sub>11</sub>*) de este apartado considerando dicho oleaje.

**d<sub>2</sub>) Obras de atraque fijas en las que las fuerzas de inercia y/o arrastre son preponderantes ( $\Pi_D < 0.5$ . Regiones I, III, V y VI de la figura 4.6.2.3)**

**d<sub>21</sub>) SOBRE OBRAS DE ATRAQUE FIJAS ABIERTAS CON  $D < L/6$**

Se consideran en este apartado las obras formadas por elementos estructurales de sustentación (pilotes o pilas) con secciones cuyas dimensiones horizontales perpendiculares a la dirección de propagación del oleaje ( $D$ ) son mucho menores que la longitud de onda del oleaje y están suficientemente separados entre ellos y de otras estructuras para excluir toda interacción con las condiciones de propagación del mismo. En estas condiciones puede considerarse que esta estructura de la obra es transparente al oleaje, no afectando significativamente a las condiciones de agitación que se presentan en el emplazamiento. En general, las obras de atraque y amarre que responden adecuadamente a estos parámetros pueden ser tanto muelles como pantalanés, duques de alba y soluciones mixtas.

Las acciones del oleaje sobre este tipo de obras se definen a continuación, diferenciándose entre las actuantes sobre los elementos estructurales de sustentación y sobre la plataforma superior.

Este tipo de obras son particularmente recomendables cuando el emplazamiento esté muy expuesto a la acción del oleaje.

◆ *Sobre los elementos estructurales de sustentación*

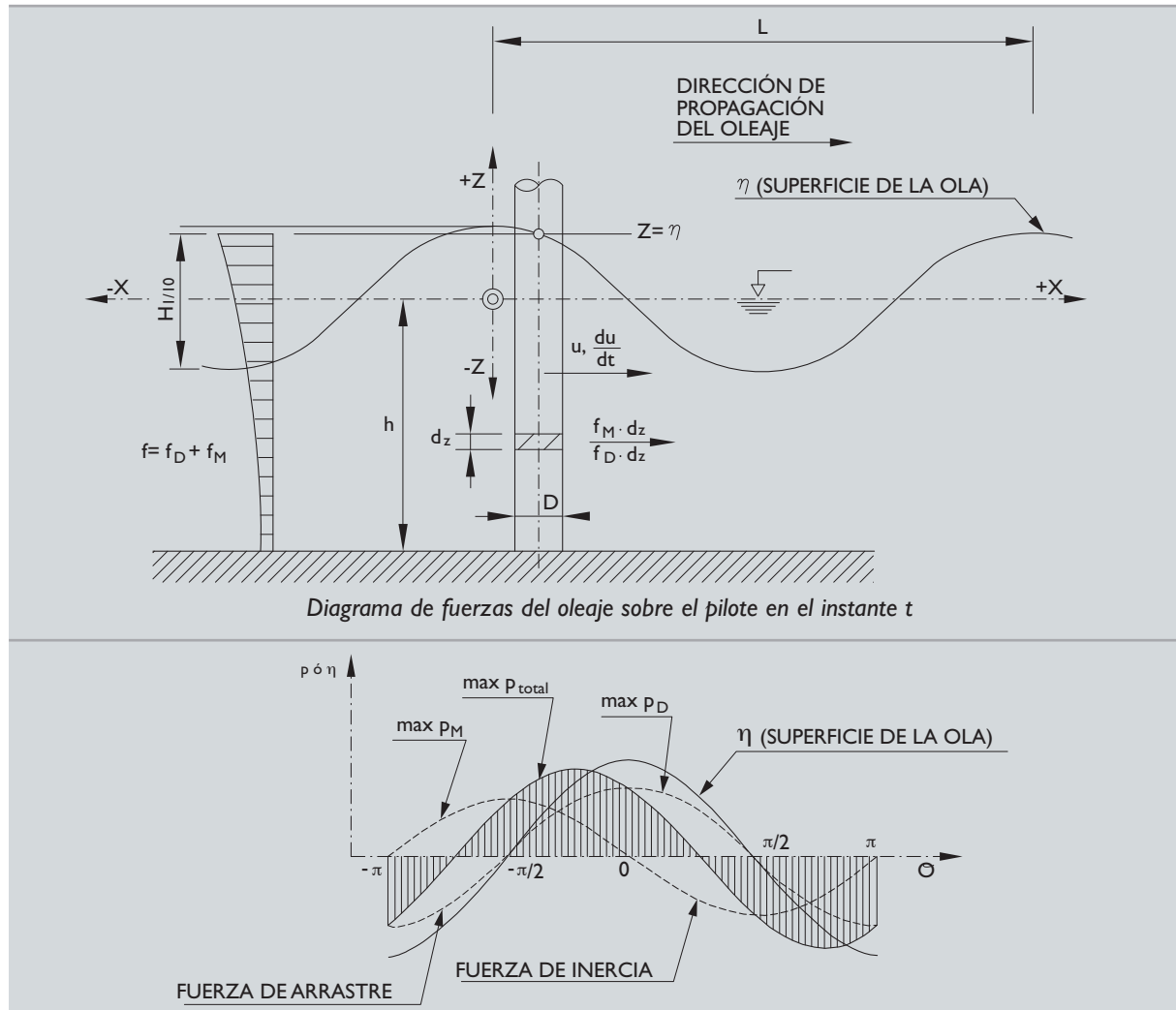
La acción del oleaje en condiciones sin rotura sobre un pilote o pila aislada vertical puede calcularse por medio de la Teoría de Morison cuando no se produzca de forma significativa la alteración de la progresión o la rotura de la onda por alcanzar o superar la cresta la plataforma superior de la obra de atraque. Esta teoría considera que la acción del oleaje puede descomponerse en dos fuerzas horizontales en la dirección de propagación del oleaje, de igual periodo que el oleaje en el emplazamiento:

- Fuerza de arrastre ( $F_D$ )
- Fuerza de inercia ( $F_M$ )

las cuales deben ser calculadas separadamente y superponerse tomando en consideración que existe un desfase entre los valores máximos de cada una de dichas fuerzas. Por tanto,

para determinar la máxima fuerza actuante debe calcularse cada una de las fuerzas en las diferentes fases. Si se aplica la teoría lineal del oleaje con ondas progresivas puede considerarse que la fuerza de arrastre está en fase con la onda y la fuerza de inercia está desfasada  $90^\circ$  respecto a la fuerza de arrastre (Ver figura 4.6.2.4).

**Figura 4.6.2.4. Acciones del oleaje sobre un pilote (o pila) aislado vertical**



De acuerdo con dicha formulación, las fuerzas de arrastre e inercia por unidad de longitud en un pilote o pila vertical se definen (Ver figura 4.6.2.4):

$$f_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot u \cdot |u|$$

$$f_M = C_M \cdot \rho_w \cdot A \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

donde:

$C_D$  : Coeficiente hidrodinámico de arrastre (adimensional). Se supone constante en toda la longitud del elemento estructural. Este coeficiente toma en consideración la resis-










tencia al flujo de presiones. Varía principalmente con la sección de la estructura, la rugosidad de la superficie (considerando, en su caso, adherencias marinas: ver apartado 4.6.1.2) y los números de Reynolds ( $Re$ ) y de Keulegan-Carpenter ( $KC \cong \pi H/D$ ) y se determina experimentalmente.

El valor de  $C_D$  puede considerarse que prácticamente es constante para secciones no circulares. Por el contrario para secciones circulares el valor es altamente dependiente del número de Reynolds y de la rugosidad de la superficie. En ausencia de información más precisa pueden adoptarse los valores incluidos en la tabla 4.6.2.8.

$\rho_w$  : Densidad (en  $\text{kg/m}^3$ ) del agua (ver apartado 4.5).

$D$  : Diámetro o, para elementos de sección no circular, anchura del elemento estructural en la dirección perpendicular a su eje en el plano perpendicular a la dirección del oleaje, incluyendo, en su caso, las adherencias marinas ( $m$ ).

**Tabla 4.6.2.8. Coeficientes de arrastre ( $C_D$ ) para el cálculo de las fuerzas de arrastre debidas a la acción del oleaje sin rotura**

SECCIÓN		COEFICIENTE DE ARRASTRE ( $C_D$ )
	DIRECCIÓN DE PROPAGACIÓN DEL OLAJE	1,98
		1,16
		2,20
		2,05
		1,10
		1,55
	$Re < 2 \cdot 10^5$	1,20
	$2 \cdot 10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$ (1)	0,70 a 1,20 según la rugosidad (2)
	$Re \geq 5 \cdot 10^5$ (1)	0,60 a 1,00 según la rugosidad (2)
<b>Notas</b> 1) En los casos más generales, este tipo de estructuras suele dar lugar a números Reynolds altos (régimen turbulento o de transición). 2) Los valores menores se corresponden con superficies suaves y lisas		

$u$  : Componente horizontal de la velocidad instantánea de las partículas de agua en el eje del pilote o pila ( $\text{m/s}$ ). La definición del campo de velocidades puede determinarse por medio de los distintos modelos de onda progresiva o, en su caso, de onda compuesta, de acuerdo con sus rangos de validez, considerando que el oleaje incidente es equivalente cuando se trabaje con variables de estado a una onda regular con  $H = H_{max}$ . La utilización del modelo lineal de Airy es generalmente suficiente para obras de atraque y amarre situadas en zonas relativamente protegidas (ver figura 4.6.2.5). Para obras situadas en zonas más expuestas, en las que pueden presentarse oleajes mucho más peraltados, es recomendable utilizar modelos de orden

superior (ver dominios de validez de cada una de las teorías del oleaje en la figura 4.6.2.5). En la tabla 4.6.2.9. se resumen las formulaciones de los distintos parámetros asociados a la teoría lineal del oleaje, tanto para onda progresiva como para onda compuesta. Las formulaciones de dichos parámetros en otras teorías de ondas se incluyen en la ROM 1.0.

- $|u|$  : Valor absoluto de la componente horizontal de la velocidad instantánea de las partículas de agua en el emplazamiento del pilote o pila. (m/s).
- $C_M$  : Coeficiente hidrodinámico de inercia (adimensional). Se supone constante en toda la longitud del elemento estructural. Varía principalmente con la sección de la estructura, la rugosidad de la superficie (considerando, en su caso, adherencias marinas) y los números de Reynolds ( $Re$ ) y de Keulegan-Carpenter ( $KC$ ). En ausencia de información más precisa de base experimental pueden adoptarse valores de  $C_M$  entre 2,0 y 2,5.
- $A$  : Sección transversal del elemento estructural en la dirección perpendicular a su eje ( $m^2$ ).
- $\delta u/\delta t$  : Componente horizontal de la aceleración instantánea de las partículas de agua en el eje del pilote o pila. La definición del campo de aceleraciones puede determinarse por medio de los distintos modelos de onda progresiva o, en su caso, de onda compuesta, de acuerdo con sus rangos de validez, considerando que el oleaje incidente es equivalente cuando se trabaje con variables de estado a una onda regular con  $H = H_{max}$ . Al igual que lo señalado para el campo de velocidades, la utilización del modelo lineal de Airy es generalmente suficiente para zonas relativamente protegidas (Ver figura 4.6.2.5). Para obras situadas en zonas más expuestas, en las que pueden presentarse oleajes mucho más peraltados, es recomendable utilizar modelos de orden superior (ver dominios de validez de cada una de las teorías del oleaje en la figura 4.6.2.5). En la tabla 4.6.2.9 se resumen las formulaciones de los distintos parámetros asociados a la teoría lineal del oleaje, tanto para onda progresiva como para onda compuesta. Las formulaciones de dichos parámetros en otras teorías de ondas se incluyen en la ROM 1.0 ( $m/s^2$ ).

En aquellos casos en los que, bien la fuerza de arrastre bien la fuerza de inercia sean muy pequeñas respecto a la predominante, será admisible como aproximación simplificada del lado de la seguridad adoptar que la fuerza resultante es 1.4 veces la correspondiente a la componente predominante. De acuerdo con lo dispuesto en la figura 4.6.2.3, puede considerarse que:

- La fuerza de inercia es preponderante cuando  $(H_{max}/D) < 2$ , ( $KC < 6$ ) (Regiones I y III de la figura 4.6.2.3)
- La fuerza de arrastre es preponderante  $(H_{max}/D) > 20$ , ( $KC > 60$ ) (Región VI de la figura 4.6.2.3)

Las fuerzas sobre pilotes o pilas individuales pueden extrapolarse a grupos de pilas o pilotes verticales de igual sección situados en una o varias alineaciones en la dirección del oleaje siempre que la separación entre los ejes de los mismos sea superior a 4 veces su diámetro. En estos casos, para determinar la fuerza total sobre el grupo deberá tomarse en consideración los desfases existentes entre las fuerzas actuantes sobre cada uno de los elementos estructurales en función de su emplazamiento. Es decir:

$$F_{total} = \sum_1^N f_i(\theta_i)$$

siendo :

$N$  : número de pilotes o pilas.

$f_i(\theta_i)$ : fuerza total sobre el pilote  $i$ , teniendo en cuenta el ángulo de fase [ $(\theta_i = (2\pi x_i/L) - (2\pi t/T))$ ].

La formulación de Morison también puede aplicarse a pilotes inclinados, considerando que las fuerzas por unidad de longitud son perpendiculares al eje del pilote e introduciendo en la formulación las velocidades y aceleraciones totales que se producen en cada punto simultáneamente, teniendo en cuenta los diferentes ángulos de fase en que se encuentran (Ver figura 4.6.2.6).

Simultáneamente a las fuerzas de arrastre e inercia, en este tipo de estructuras también se presentan fuerzas transversales perpendiculares al plano formado por el eje del elemento estructural y la dirección de propagación del oleaje. Generalmente puede aceptarse que dichas fuerzas no son significativas para elementos verticales, aunque pueden ser importantes en elementos estructurales horizontales (p.e. en celosías espaciales y jackets) y dar lugar a vibraciones en pilotes verticales muy esbeltos cuando la frecuencia natural de la estructura se aproxima a la de dicha fuerza que coincide con la de aparición de los remolinos que se forman en los puntos de despegue de la estela generada por la interposición de la estructura al flujo incidente ( $\approx$  frecuencia doble que la del oleaje). En estos casos, así como cuando la frecuencia natural de la estructura esté próxima a la del oleaje (0,05 a 1 Hz) deberá considerarse la realización de análisis dinámicos específicos. Los duques de alba muy flexibles, trabajando en voladizo, son particularmente sensibles a estos fenómenos resonantes. En la literatura técnica especializada pueden encontrarse formulaciones desarrolladas para algunos casos, en particular para elementos estructurales de sección circular.

#### ◆ Sobre la plataforma superior

Cuando la plataforma superior de una obra de atraque fija abierta esté situada en las proximidades del nivel del mar, el oleaje puede alcanzar la parte inferior y superior de la misma, debiendo tomarse en consideración la existencia de empujes verticales ascensionales sobre dicha parte de la plataforma causados por las velocidades y aceleraciones verticales de la masa de agua, así como de otros esfuerzos debidos a la propia inmersión de este elemento estructural, durante el paso de la cresta del oleaje. El valor y la distribución de estos empujes depende de las características del oleaje en el emplazamiento (progresivo o estacionario) y de su posición respecto de la parte inferior de la plataforma, así como de las dimensiones, forma estructural (con vigas o sin vigas) y condiciones de regularidad de la parte inferior de la plataforma. Estos empujes tienen naturaleza impulsiva, actuando con sus valores de pico durante periodos muy cortos de tiempo en diferentes zonas de la plataforma, debiéndose considerar la posibilidad de que se produzca una respuesta dinámica de la estructura. Dada la magnitud de estos empujes y las incertidumbres asociadas a su evaluación y distribución, siempre que sea posible se recomienda elevar la plataforma por encima del nivel más elevado de las aguas para evitar la actuación de este tipo de acciones sobre la misma.

Debido a la gran cantidad de parámetros que influyen en este fenómeno, estos empujes tienen una muy difícil evaluación analítica general por lo que para su cuantificación es recomendable la utilización de técnicas experimentales en modelo físico o en prototipo. En los casos en los que se realice una aproximación analítica, deberá valorarse la posible no linealidad del oleaje en el emplazamiento (olas muy peraltadas) y en ese caso utilizar una teoría no lineal que permita estimar con suficiente precisión las velocidades de la cresta de las olas, que suelen diferir considerablemente de las proporcionadas por la teoría lineal de ondas, válida para ondas de pequeña amplitud. En la literatura especializada puede encontrarse la cuantificación de dichos empujes para algunos casos concretos. Como una primera aproximación general puede considerarse que el empuje estático ascensional equivalente sobre una plataforma por unidad de superficie, considerado uniformemente distribuido a lo largo de la misma, es cuando se trabaje con variables de estado:

$$p = 2\rho_w g H_{max,I} \quad , \quad \text{para oleaje progresivo}$$

Figura 4.6.2.5. Dominio de validez de las distintas teorías del oleaje

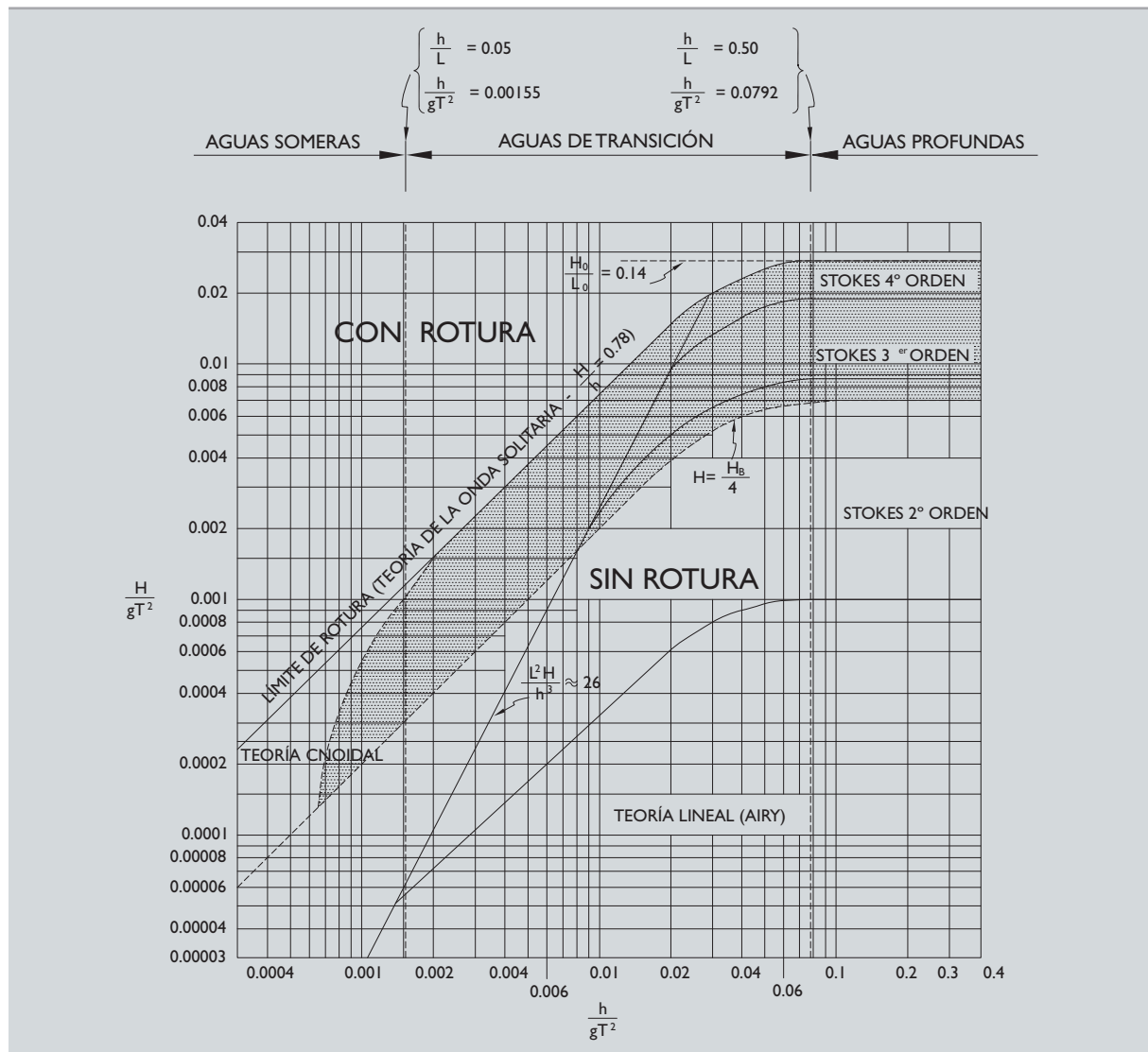
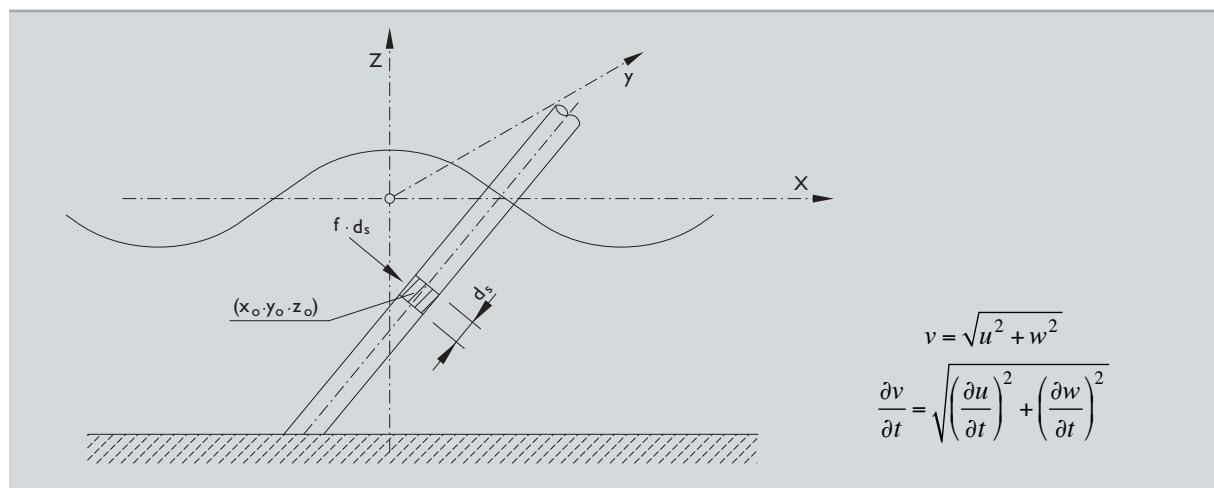


Figura 4.6.2.6. Acciones del oleaje sobre un pilote (o pila) aislado inclinado



$$p = 4\rho_w g H_{max,I} \quad , \quad \text{para oleaje estacionario}$$

La toma en consideración de estos esfuerzos podrá despreciarse cuando la parte inferior de la plataforma se sitúe al menos 0,5 m por encima del nivel correspondiente a la altura de ola máxima del estado de mar cuya probabilidad de excedencia en la fase de proyecto considerada sea igual a la probabilidad de fallo considerada, adoptando el nivel alto de las aguas compatible con dicho estado de mar y considerando las posibles asimetrías entre la altura de crestas y senos respecto al nivel medio del mar por la no linealidad del oleaje.

Para la definición del comportamiento, así como de las presiones intersticiales en el terreno natural y las presiones hidrodinámicas que actúan en el fondo del mar en las proximidades de la obra deberá considerarse que las características del oleaje en el emplazamiento no se modifican por la presencia de la obra, siendo por tanto de aplicación lo definido a estos efectos en el subapartado  $d_{11}$ ) de este apartado considerando dicho oleaje.

### d<sub>3</sub>) Obras flotantes

Se consideran en este apartado las obras de atraque y amarre flotantes, independientemente de sus dimensiones en relación con la longitud de onda del oleaje y del sistema de amarre empleado. En este sentido, las obras de atraque y amarre que responden a estos parámetros son pantalanés, boyas, campos de boyas y monoboyas.

**Tabla 4.6.2.9. Parámetros de la onda regular asociados a la teoría lineal del oleaje**

		Profundidades reducidas $h/L < 1/20$	Profundidades intermedias $1/20 \leq h/L \leq 1/2$	Aguas profundas $h/L > 1/2$
ONDA PROGRESIVA				
Superficie libre ( $\eta$ )		$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta = \frac{H}{2} \cos \left[ \frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right]_1$		
Celeridad de la onda ( $c = L/T$ )		$\sqrt{gh}$	$\frac{gT}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi h}{L} \right)$	$\frac{gT}{2\pi}$
Longitud de onda ( $L$ )		$\sqrt{gh} \cdot T$	$\frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi h}{L} \right)$	$\frac{gT^2}{2\pi}$
Velocidad de las partículas	Horizontal ( $u$ )	$\frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \cos \theta$	$\frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh \left[ \frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[ \frac{2\pi h}{L} \right]} \cdot \cos \theta$	$\frac{H}{2} \frac{2\pi}{T} e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos \theta$
	Vertical ( $w$ )	$\frac{H}{2} \frac{2\pi}{T} \left( 1 + \frac{z}{h} \right) \sin \theta$	$\frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh \left[ \frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[ \frac{2\pi h}{L} \right]} \cdot \sin \theta$	$\frac{H}{2} \frac{2\pi}{T} e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin \theta$
Aceleración de las partículas	Horizontal ( $\delta u / \delta t$ )	$\frac{H}{2} \left( \frac{2\pi}{T} \right) \sqrt{\frac{g}{h}} \sin \theta$	$\frac{H}{2} \frac{2\pi g}{L} \frac{\cosh \left[ \frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[ \frac{2\pi h}{L} \right]} \cdot \sin \theta$	$2H \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin \theta$
	Vertical ( $\delta w / \delta t$ )	$-2H \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 \left( 1 + \frac{z}{h} \right) \cos \theta$	$-\frac{H}{2} \frac{2\pi g}{L} \frac{\sinh \left[ \frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[ \frac{2\pi h}{L} \right]} \cdot \cos \theta$	$-2H \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos \theta$
Presión ( $p$ )		$\rho_w g (\eta - z)$	$\rho_w g \eta \frac{\cosh \left[ \frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[ \frac{2\pi h}{L} \right]} - \rho_w g z$	$\rho_w g \eta \cdot e^{\frac{2\pi z}{L}} - \rho_w g z$

**Parámetros de la onda regular asociados a la teoría lineal del oleaje (continuación)**

		Profundidades reducidas $h/L < 1/20$	Profundidades intermedias $1/20 \leq h/L \leq 1/2$	Aguas profundas $h/L > 1/2$
ONDA COMPUESTA <sup>2)</sup>				
Superficie libre ( $\eta_c$ )		$\eta_c = \frac{H_I}{2} \left[ \cos \left( \frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right) + C_r \cos \left( \frac{2\pi x}{L} + \frac{2\pi t}{T} + \varepsilon \right) \right] = \frac{H_I}{2} [\cos \theta_I + C_r \cos \theta_R]$ <sup>3)</sup>		
Celeridad de la onda ( $c = L/T$ )		$\sqrt{gh}$	$\frac{gT}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi h}{L} \right)$	$\frac{gT}{2\pi}$
Longitud de onda ( $L$ )		$\sqrt{gh} \cdot T$	$\frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi h}{L} \right)$	$\frac{gT^2}{2\pi}$
Velocidad de las partículas	Horizontal ( $u$ )	$\frac{H_I}{2} \frac{\sqrt{g}}{h} (\cos \theta_I - C_r \cos \theta_R)$	$\frac{H_I}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh \left[ \frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[ \frac{2\pi h}{L} \right]} (\cos \theta_I - C_r \cos \theta_R)$	$\frac{H_I}{2} \frac{2\pi}{T} e^{\frac{2\pi z}{L}} (\cos \theta_I - C_r \cos \theta_R)$
	Vertical ( $w$ )	$\frac{H_I}{2} \frac{2\pi}{T} \left( 1 + \frac{z}{h} \right) (\sin \theta_I - C_r \sin \theta_R)$	$\frac{H_I}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh \left[ \frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[ \frac{2\pi h}{L} \right]} (\sin \theta_I - C_r \sin \theta_R)$	$\frac{H_I}{2} \frac{2\pi}{T} e^{\frac{2\pi z}{L}} (\sin \theta_I - C_r \sin \theta_R)$
Aceleración de las partículas	Horizontal ( $\delta u / \delta t$ )	$\frac{H_I}{2} \left( \frac{2\pi}{T} \right) \sqrt{\frac{g}{h}} (\sin \theta_I + C_r \sin \theta_R)$	$\frac{H_I}{2} \frac{2\pi g}{L} \frac{\cosh \left[ \frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[ \frac{2\pi h}{L} \right]} (\sin \theta_I + C_r \sin \theta_R)$	$2H_I \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}} (\sin \theta_I + C_r \sin \theta_R)$
	Vertical ( $\delta w / \delta t$ )	$-2H_I \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 \left( 1 + \frac{z}{h} \right) (\cos \theta_I + C_r \cos \theta_R)$	$-\frac{H_I}{2} \frac{2\pi g}{L} \frac{\sinh \left[ \frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[ \frac{2\pi h}{L} \right]} (\cos \theta_I + C_r \cos \theta_R)$	$-2H_I \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}} (\cos \theta_I + C_r \cos \theta_R)$
Presión ( $p$ )		$\rho_w g (\eta_c - z)$	$\rho_w g \eta_c \frac{\cosh \left[ \frac{2\pi(z+h)}{L} \right]}{\cosh \left[ \frac{2\pi h}{L} \right]} - \rho_w g z$	$\rho_w g \eta_c \cdot e^{\frac{2\pi z}{L}} - \rho_w g z$
<b>Notas</b> 1) $\theta$ : Ángulo de fase $[(2\pi x/L) - (2\pi t/T)]$ . 2) Se entiende como onda compuesta a la onda estacionaria o cuasi-estacionaria resultado de la superposición de una onda incidente con una reflejada. En teoría lineal, la formulación de dicha onda puede obtenerse considerando la superposición lineal de dos ondas progresivas propagándose en direcciones opuestas. 3) $\varepsilon$ : Desfase entre la onda incidente y reflejada que se produce cuando la reflexión no es perfecta, dando lugar a una onda compuesta cuasi-estacionaria. Por tanto, cuando $\varepsilon = 0$ y $C_r = 1$ la onda compuesta es la onda estacionaria. 4) Origen de ordenadas $z$ en el nivel medio del mar.				

Las acciones del oleaje sobre este tipo de obras se definen a continuación, siendo altamente dependientes de la respuesta dinámica de la estructura y del sistema de amarre, rígido o flexible, utilizado frente a un oleaje de longitud de onda  $L$  y periodo  $T$ ; lo que define el tipo y magnitud de los movimientos de la estructura. Las acciones inducidas sobre este tipo de estructuras y sobre sus sistemas de amarre depende, por tanto, del equilibrio que se alcance entre las mismas, las reacciones de los sistemas de amarre y la reacción inercial que tiende a llevar al flotador a su posición de equilibrio cuando se mueve. La complejidad de este sistema de naturaleza dinámica recomienda con carácter general la determinación de estas acciones mediante técnicas experimentales o numéricas. Las obras de atraque y amarre con sistemas de amarre flexibles son particularmente recomendables cuando el emplazamiento esté muy expuesto a la acción del oleaje.

◆ **Sobre obras de atraque y amarre flotantes con sistemas de amarre rígidos**

Son obras dotadas de sistemas de amarre (p.e. pilotes guía, duques de alba, tirantes,...) que impiden o restringen en la práctica los movimientos horizontales de la estructura. Por la gran rigidez

que presentan frente a la acción del oleaje, no se recomienda este tipo de obras de atraque y amarre en zonas con oleaje relevante.

Las acciones predominantes inducidas por el oleaje en una estructura flotante de este tipo son de carácter oscilatorio con igual periodo que el oleaje incidente, cuyo valor depende del tamaño de la estructura en relación con la longitud de onda del oleaje, así como de la capacidad de la estructura flotante de transmitir la energía incidente.

Para la determinación de estas acciones no se disponen de formulaciones analíticas de aplicación generalizable, siendo, tal como se ha señalado, recomendable recurrir a técnicas experimentales o numéricas basadas en la teoría de la difracción (Ver apartado 4.6.2.1.1  $d_{12}$ ), tomando en consideración, adicionalmente a las fuerzas de difracción, las fuerzas de radiación debidas al movimiento propio de la obra. Para ello se deberá obtener, además de las funciones potenciales del oleaje incidente y del disperso, la función potencial irradiada de las ondas en el medio inducidas o generadas por los movimientos del flotador. Estas ondas son las que producen las fuerzas de radiación en la obra. Para el cálculo de las presiones sobre cada uno de los contornos de la estructura se debe tener en cuenta su velocidad, dando lugar a campos de presiones en la superficie del flotador asociados a cada uno de los grados de libertad de los que disponga. En la actualidad hay modelos numéricos que calculan estos movimientos sobre un cuerpo flotante en el régimen de difracción. No obstante lo anterior, en estructuras flotantes de sección rectangular, con dimensiones perpendiculares a la dirección de propagación del oleaje manifiestamente superior a la longitud de onda del oleaje y profundidad relativa  $h/L > 0,5$  puede considerarse simplifadamente que su comportamiento es totalmente reflejante si tiene el suficiente francobordo y no se produce transmisión del oleaje al trasdós, pudiendo estimarse la acción del oleaje de igual forma que para las obras de atraque fijas cerradas con  $D \gg L$  (Ver apartado 4.6.2.1.1  $d_{11}$ ). De igual forma, para dichas profundidades relativas cuando las dimensiones de la estructura en anchura son pequeñas en relación con la longitud de onda, de forma que no quedan afectadas significativamente las condiciones de propagación del oleaje, las acciones del oleaje pueden estimarse por medio de la formulación de Morison (Ver apartado 4.6.2.1.1  $d_{21}$ ).

En este tipo de estructuras no es esperable que se produzcan fenómenos resonantes que den lugar a movimientos de gran amplitud, ya que los periodos propios de oscilación de la estructura amarrada con sistemas de amarre rígidos son mucho menores que los periodos del oleaje incidente.

#### ◆ *Sobre obras de atraque y amarre flotantes con sistemas de amarre flexibles*

Son obras dotadas de sistemas de amarre flexibles (p.e. cadenas en catenaria,...) que mantienen la estructura más o menos en la misma posición pero no impiden los movimientos de la misma en los seis grados de libertad. Las acciones del oleaje sobre cada uno de los contornos de la estructura se pueden estimar de igual forma que para obras de atraque y amarre con sistemas de amarre rígidos pero considerando que, en este caso, la estructura dispone de seis grados de libertad. La resultante de estas acciones inducidas por el oleaje en la estructura flotante es la denominada fuerza horizontal de deriva en la dirección de propagación del oleaje, la cual es proporcional al cuadrado de la altura de ola y tiene un periodo mucho mayor que el del oleaje incidente, pudiéndose considerar prácticamente como cuasi-estacionaria en el estado de mar.

La cuantificación de la fuerza de deriva producida por el oleaje sobre la obra de atraque flotante es difícilmente generalizable debido a su dependencia de muchos factores, entre otros, de las características del oleaje en el emplazamiento, de las dimensiones sumergidas de la estructura y de la profundidad de agua existente en el emplazamiento, así como de la configuración del atraque y de la distribución y flexibilidad del sistema de amarre. No obstante, a falta de ensayos específicos en modelo o en prototipo, podrá aproximarse por la formulación recomendada para el cálculo de fuerzas debidas al oleaje sobre buques equiparables, incluida en el apartado de esta Recomendación correspondiente a las acciones de uso y explotación (apartado 4.6.4.4.7. Cargas de

amarre). En profundidades relativas  $h/L > 0,5$ , esta formulación tiene un valor máximo correspondiente a la completa reflexión de oleaje sobre la estructura. Por tanto, el valor máximo que puede alcanzar la fuerza de deriva total es:

$$F_w = \frac{\gamma_w \cdot D' \cdot H^2}{8}$$

siendo:

$D'$  : longitud de la proyección de la estructura flotante en la dirección de propagación del oleaje.  
 $H$  : cuando se trabaje con variables básicas es la altura de ola y cuando se trabaje con variables de estado es la altura de ola media cuadrática ( $H_{rms} \equiv H_{1/3}/\sqrt{2}$ ) del oleaje incidente.

En general, en este tipo de estructuras pueden producirse efectos resonantes que den lugar a una amplificación de movimientos, cuando los periodos de oscilación de alguno de ellos (particularmente los de cabeceo, balance y deriva) estén próximos a los del oleaje o sean múltiplos o submúltiplos de éstos. En este caso son esperables también efectos dinámicos significativos en las cargas de amarre transmitidas.

Para cada estado de proyecto correspondiente a condiciones de trabajo extremas o excepcionales debidas a la presentación de un oleaje extraordinario, las acciones debidas al oleaje tendrán igual consideración que el agente causante, al presentar en general componentes no permanentes con diferentes escalas de variabilidad temporal que pueden ser distintas a las de dicho oleaje. No obstante lo anterior, en algunos casos, dependiendo de su escala de variabilidad, alguna de estas fuerzas puede ser considerada de carácter permanente en el estado meteorológico (p.e. las fuerzas de deriva en obras de atraque flotantes con sistemas de amarre flexibles). Al igual que el oleaje en dichos estados, en condiciones de operación en las que la altura de ola defina los límites de operatividad de la instalación, en condiciones excepcionales debidas a la presentación de una acción accidental que no sea una acción climática extraordinaria o en el estado sísmico las acciones debidas al oleaje tendrán el carácter de permanentes.

En general, la formulación de las presiones hidrodinámicas debidas al oleaje incluidas en este apartado es aplicable tanto a variables básicas (por ola o por componente espectral) como a variables de estado, adoptándose en este último caso normalmente la altura de ola máxima como variable de estado principal cuando la escala de variabilidad de la acción resultante en el estado meteorológico es significativa y otro parámetro representativo de la altura de ola ( $H_{rms}$  o  $H_{1/3}$ ) cuando la escala de variabilidad de la acción resultante en dicho estado no es significativa.

#### 4.6.2.2. Otros agentes climáticos atmosféricos ( $q_{fc,3}$ )

Otros agentes climáticos atmosféricos como la precipitación, la niebla, la nieve o el hielo también pueden afectar a las obras de atraque y amarre, particularmente para el establecimiento de la operatividad de la instalación, al poder ser estos agentes los predominantes para algunos modos de parada operativa (p.e. las precipitaciones pueden dar lugar a la paralización de las operaciones de carga y descarga en función del tipo de mercancía manipulada, del equipo de manipulación considerado y de las instalaciones de almacenamiento existentes en el puerto o la niebla o el hielo impedir el acceso del buque al atraque), así como para el dimensionamiento de algunos elementos de uso y explotación como los sistemas de drenaje de las explanadas adosadas. También pueden ser relevantes para el establecimiento de la duración de la fase de construcción.

Estos agentes pueden considerarse que no presentan ningún tipo de correlación entre sí y con los otros agentes climáticos, tratándose como agentes independientes, salvo la niebla que puede tener dos regímenes de correlación con la precipitación y la nieve, al considerarse en sentido amplio que como niebla se incluyen también los fenómenos climáticos que reducen la visibilidad. En general, estos agentes se considerarán de actuación compatible entre sí y con los otros agentes climáticos, con la excepción de entre nieve y viento, entre precipitación y nieve, así como entre hielo y oleaje.



Los parámetros o variables de estado correspondientes a cada agente que, en general, se consideran relevantes para las obras de atraque y amarre, son los siguientes:

- ◆ Precipitación:  $I_t$  (Intensidad de precipitación en un intervalo de tiempo  $t$ , en  $mm/h$ ).
- ◆ Niebla:  $d_v$  (distancia máxima de visibilidad, en m).
- ◆ Nieve:  $Q_{fc,31}$  (sobrecarga de nieve acumulada en un periodo de 12 horas sobre un plano horizontal, en  $kN/m^2$ ).
- ◆ Hielo:  $h_h$  (espesor de la capa de hielo, en m)

Estos agentes se definen, de igual forma que lo dispuesto en el apartado 4.6.2.1 para los otros agentes climáticos, a partir de los regímenes extremos y medios marginales en el emplazamiento de las variables de estado que caracterizan a dichos agentes. Para la obtención de dichas funciones de distribución son aplicables idénticos criterios que para el resto de agentes climáticos.

Los límites de operación que se establecen para estos agentes para obras de atraque y amarre por condiciones de explotación y seguridad no son generalizables al ser muy dependientes de las condiciones locales del puerto, de los medios e instalaciones de explotación y seguridad disponibles, así como, en su caso, del tipo de mercancía e instalaciones de almacenamiento existentes. No obstante, considerando condiciones estándares de balizamiento y de control de tráfico, puede adoptarse como límite de operatividad para niebla en operaciones de acceso, atraque y desatraque de buques una distancia máxima de visibilidad del orden de 3 veces la eslora del buque, incluyendo en la eslora, en su caso, la longitud del cabo de remolque. Simplificadamente, es admisible considerar para buques mercantes mayores de 10.000 TPM una distancia máxima de visibilidad límite de operatividad de 1.000 m.

En España, a falta de datos en el emplazamiento en número y calidad contrastada, algunas funciones de distribución y/o los valores nominales o representativos correspondientes a los parámetros que caracterizan a estos agentes pueden obtenerse:

- ◆ Los regímenes extremos marginales de intensidad de precipitación: en los documentos “Máximas lluvias diarias en la España peninsular. Ministerio de Fomento (1999) y “Las precipitaciones máximas en 24 horas y sus periodos de retorno”. Ministerio de Medio Ambiente (2001). La relación que puede adoptarse entre el parámetro que suministran, estos documentos, la precipitación diaria máxima ( $P_d$ ), y la Intensidad de precipitación en un intervalo  $t$  ( $I_t$ ) es:

$$I_t = I_d \left( \frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0,1} - t^{0,1}}{28^{0,1} - 1}}$$

siendo;

$I_d$  : Intensidad de precipitación media diaria =  $P_d/24$ , en  $mm/h$

$I_1$  : Intensidad de precipitación media horaria:

- $8I_d$  (fachadas Galicia, Canarias norte y Estrecho).
- $9I_d$  (fachadas Cantábrica, Canarias/sur y Suratlántica)
- $10I_d$  (fachadas Canarias/sur y Surmediterránea)
- $11I_d$  (fachadas Ceuta, Melilla, Levante y Cataluña)
- $12I_d$  (fachada Baleares)

$t$  : Intervalo de tiempo para el que se quiere evaluar la intensidad (en  $h$ )

- ◆ Los valores representativos de la sobrecarga de nieve: en el Eurocódigo I. UNE-ENV 2003 Acciones generales: cargas de nieve. Acciones en estructuras. Parte 1.3. Carga de Nieve. Simplificadamente, podrán adoptarse los valores incluidos en la tabla 4.6.2.10.

En las zonas marítimas españolas no es necesario tomar en consideración la actuación del agente hielo. En aquellas áreas geográficas situadas en latitudes en la que la presencia del agente hielo sea significativa, este agente deberá tomarse en consideración tanto para la verificación de los modos de fallo como para la verificación de los modos de parada operativa. Sobre las obras de atraque y amarre tanto fijas, cerradas o abiertas, como

flotantes, la acción del hielo puede considerarse que da lugar a fuerzas horizontales estáticas y dinámicas debidas a la acción de arrastre del viento o las corrientes sobre bloques o campos de hielo que alcanzan y golpean la estructura, así como a la expansión producida por la congelación del agua. Estas fuerzas están limitadas por la resistencia a compresión del hielo. Asimismo da lugar a fuerzas verticales, tanto descendentes como ascendentes, causadas por las variaciones de los niveles de las aguas cuando se ha formado una capa de hielo alrededor de la estructura, las cuales dan lugar a que en cada ciclo dicha capa de hielo se mantenga un periodo elevada (fuerza descendente) y otro sumergida (fuerzas ascendentes). Dada su nula incidencia en España, la valoración detallada de estas acciones no se incluye en esta Recomendación. En la literatura técnica especializada pueden encontrarse formulaciones de aplicación.

**Tabla 4.6.2.10. Valores representativos de las sobrecargas de nieve en España (en  $kN/m^2$ )**

FACHADAS	VALORES EXTREMALES			VALORES MEDIOS	
	$T_R = 5$ años	$T_R = 50$ años	$T_R = 500$ años	Probabilidad de no excedencia del 85%	Probabilidad de no excedencia del 50%
Norte-Galicia	0,10	0,20	0,30	0,03	0,00
Cataluña-Baleares	0,20	0,40	0,60	0,06	0,00
Levante-Suratlántica	0,10	0,20	0,30	0,03	0,00
Surmediterránea-Canarias	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Los otros agentes climáticos atmosféricos, así como las acciones por ellos inducidas, tendrán el carácter de no permanentes o variables en el estado meteorológico. En condiciones excepcionales debido a su actuación de carácter extraordinario tendrán la consideración de extraordinarios, insólitos o accidentales en dicho estado de proyecto. En condiciones excepcionales debidas a la presencia de una acción accidental no climática o en el estado sísmico las acciones debidas a los otros agentes climáticos atmosféricos tendrán la consideración de permanentes.

#### 4.6.2.3. Agente térmico ( $q_{ft}$ )

Se consideran agentes térmicos los agentes del medio físico (temperatura del aire, humedad, temperatura del agua, radiación solar, etc.) cuyas variaciones en un intervalo de tiempo pueden ocasionar gradientes térmicos espaciales o temporales en los elementos estructurales que constituyen la obra, los cuales producen la deformación de dichos elementos cuando la estructura puede dilatarse libremente o tensiones adicionales cuando dichas deformaciones están impedidas o limitadas, dando lugar a la aparición en el mismo de las acciones térmicas.

En las obras de atraque y amarre podrá despreciarse la consideración de acciones térmicas, salvo en aquellos elementos que pueden quedar situados por encima de los niveles de agua o expuestos a las radiaciones solares. Por lo tanto, sus efectos se considerarán especialmente en la verificación de las superestructuras (vigas cantil en obras de atraque fijas cerradas y plataformas en obras de atraque fijas abiertas). En estos casos, dichos elementos se comprobarán considerando los efectos de estas acciones tanto en lo que respecta a la verificación de estados límites últimos estructurales como de estados límite de servicio correspondientes a deformaciones excesivas y a durabilidad.

La decisión de disponer o no de juntas de dilatación como mecanismo para reducir los efectos de las acciones térmicas o reológicas dependerá de la capacidad de las juntas de absorber los movimientos de la estructura, de la posibilidad de limitar el área de extensión de las fisuras con armadura suplementaria, así como, principalmente, de las consecuencias de su aparición para el cumplimiento de las exigencias de impermeabilidad y durabilidad de la misma.

En general, simplifícadamente en estos elementos estructurales de las obras de atraque y amarre, las acciones térmicas, conjuntamente con las reológicas, podrán despreciarse en los cálculos siempre que se dispongan

juntas de dilatación, con distancias entre juntas entre 20 y 40 metros y aperturas de junta entre 20 y 30 mm; en caso contrario, deberán realizarse el proceso de verificación considerando las acciones mencionadas. Dichas distancias deberán ser menores cuando los movimientos de los elementos estructurales puedan estar impedidos o limitados por diferentes causas.

Estos agentes pueden considerarse que son compatibles con el resto de agentes del medio físico, no presentando una correlación significativa con los mismos, tratándose como agentes independientes. En general, podrán considerarse de carácter permanente en el estado meteorológico definido por los agentes climáticos.

Los parámetros o variables de estado que caracterizan este agente son principalmente la temperatura máxima ( $T_{max}$ ) y la temperatura mínima ( $T_{min}$ ) del aire a la sombra, medidos a intervalos de una hora, así como la intensidad de la radiación solar.

Estos agentes se definen, tanto para formulaciones de las ecuaciones de verificación en términos deterministas y determinista-probabilista como probabilista, de igual forma que lo dispuesto en el apartado 4.6.2.1 para los otros agentes climáticos y del medio físico a partir de los regímenes extremos y medios marginales de las temperaturas máximas y mínimas del aire en la sombra y de la intensidad de la radiación solar en el emplazamiento. Normalmente no se consideran modos de parada operativa asociados con los agentes térmico. Por tanto, no se definen límites de operatividad asociados con dichos agentes, sin perjuicio de que deban tomarse en consideración en condiciones de trabajo operativas asociadas con otro agente.

En España, a falta de datos en el emplazamiento en número y calidad contrastada, los valores representativos de estos agentes pueden obtenerse del Eurocódigo UNE-ENV-1-5: 2004. Acciones en Estructuras. Acciones generales. Acciones térmicas. Los mapas de isotermas de temperatura máxima y mínima del aire en la sombra correspondiente a un periodo de retorno de 50 años, pueden verse en la figura 4.6.2.7. En el Eurocódigo citado, así como en el documento básico SE-AE. Seguridad estructural. Acciones en la Edificación (2003) del Código Técnico de la Edificación, se incluye la formulación simplificada para obtener las correspondientes a otros periodos de retorno.

#### 4.6.2.3.1. FORMULACIÓN DE LAS ACCIONES DEBIDAS A LOS AGENTES TÉRMICOS ( $Q_{ft}$ )

Las deformaciones impuestas y consecuentemente cualquier tensión resultante debida a los agentes térmicos sobre un elemento estructural dependen de la geometría y de las condiciones de contorno de dicho elemento, así como de las propiedades térmicas de los materiales empleados en su construcción; en particular el coeficiente de dilatación térmica lineal.

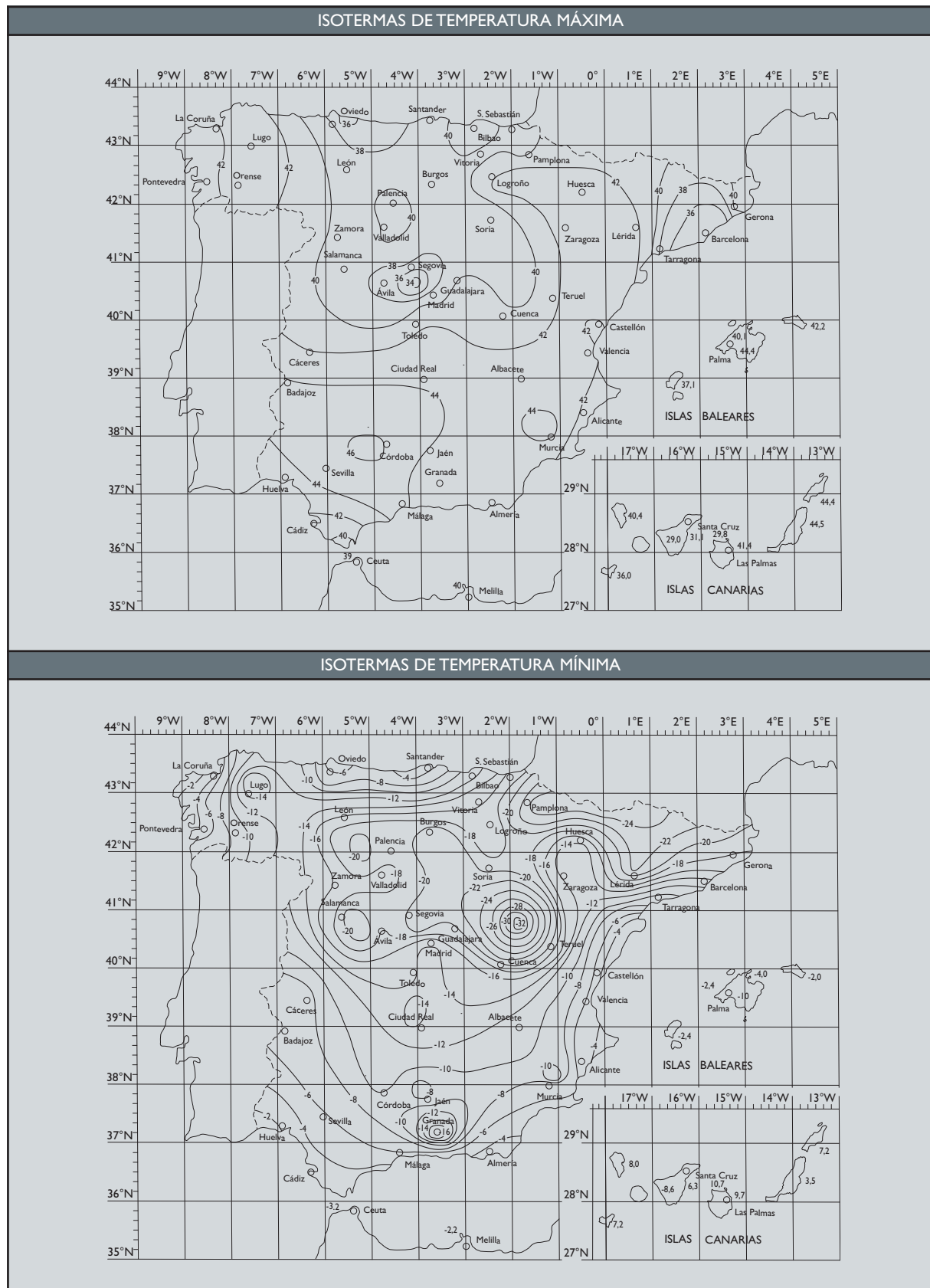
Se define como coeficiente de dilatación térmica lineal de un material ( $\alpha_T$ ) a la deformación unitaria lineal por unidad de incremento de temperatura efectiva en el mismo. Es decir:

$$\varepsilon = \alpha_T \cdot \Delta T_e$$

**Tabla 4.6.2.11. Valores representativos del coeficiente de dilatación térmica lineal**

MATERIAL	$\alpha_T$ ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
Acero estructural	12
Acero inoxidable	16
Hormigón (excepto los indicados debajo)	12
Hormigón con árido calizo	9
Hormigón con árido ligero	7
Mampostería	6-10 (dependiendo del tipo de fábrica)
Madera paralela a las fibras longitudinales	5
Madera perpendicular a las fibras longitudinales	30-70 (dependiendo del tipo de madera)

**Figura 4.6.2.7. Mapas de Isotermas de las temperaturas máximas y mínimas del aire a la sombra en España, correspondientes a un periodo de retorno de 50 años (nivel de confianza del 90%) en °C**



Tal como se ha indicado en el apartado 4.4, esta propiedad del material se considerará de carácter permanente, definiéndose a través de valores nominales asociados con valores medios. A falta de otros datos, podrán adoptarse como valores nominales del coeficiente de dilatación lineal los incluidos en la tabla 4.6.2.11.

Para las vigas cantil y las plataformas de las obras de atraque y amarre, las acciones térmicas podrán caracterizarse considerando únicamente:

- a) Una componente asociada a la variación uniforme de la temperatura ( $\Delta T_N$ ) en el conjunto de la sección del elemento estructural, respecto a la temperatura del mismo en el momento del cierre de juntas o durante la fase constructiva ( $T_0$ ). Esta componente depende de las temperaturas efectivas mínima ( $T_{e,min}$ ) y máxima ( $T_{e,max}$ ) a la que estará sometida el elemento estructural de la obra de atraque y amarre durante el periodo de tiempo considerado. El incremento o decremento de la temperatura efectiva puede calcularse a partir de las temperatura máxima y mínimas del aire a la sombra por medio de las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \blacklozenge \quad \Delta T_{N,max} &= T_{e,max} - T_0 \\ \blacklozenge \quad \Delta T_{N,min} &= T_{e,min} - T_0 \end{aligned}$$

siendo:

$T_0$  : Temperatura efectiva probable en el momento en que la estructura está realmente coaccionada. A falta de otros datos puede adoptarse 20° C.

$T_{e,max} = T_{max}$  : + 15,0° C, en estructuras metálicas  
+ 5,0° C, en estructuras mixtas  
+ 2,5° C, en estructuras de hormigón

$T_{e,min} = T_{min}$  : - 2,5° C, en estructuras metálicas  
+ 5,0° C, en estructuras mixtas  
+ 7,5° C, en estructuras de hormigón

Las funciones de distribución de  $\Delta T_N$  pueden obtenerse como funciones de distribución derivadas de las correspondientes a las temperaturas máximas y mínimas del aire a la sombra, respectivamente, a partir de la anterior formulación. De igual forma, los valores representativos de  $\Delta T_N$  podrán obtenerse a partir de los valores representativos de  $T_{max}$  y  $T_{min}$ . A falta de otros datos, los valores frecuentes y cuasi-permanentes se obtendrán por medio de los coeficientes recomendados en los Eurocódigos para las acciones térmicas (0,60 y 0,50 respectivamente), a partir de los valores característicos asociados a un periodo de retorno de 50 años.

- b) Una componente asociada al gradiente lineal de la temperatura entre superficies opuestas ( $\Delta T_M$ ). Los gradientes a adoptar dependen tanto de los datos climáticos en el emplazamiento (temperaturas de aire a la sombra, radiación solar, emisión de radiación nocturna) como de las características geométricas y las propiedades térmicas de los materiales (conductividad térmica, coeficiente de absorción, coeficiente de emisión, etc...). A falta de otros datos más precisos, simplificadaamente, los valores característicos de las diferencias lineales de temperatura entre las caras opuestas pueden tomarse igual a 15° C tratándose de estructuras metálicas y de 10° C tratándose de estructuras de hormigón. Los otros valores representativos se obtendrán por medio de los coeficientes recomendados en los Eurocódigos a partir de los valores característicos.

Cuando se estime necesario tomar en consideración simultáneamente las componentes uniforme y lineal de la variación de temperaturas se aplicarán las siguientes combinaciones, considerando en los cálculos la que produce los efectos más desfavorables:

$$\begin{aligned} \blacklozenge \quad \Delta T_N + 0.75\Delta T_M \\ \blacklozenge \quad \Delta T_N + 0.35\Delta T_M \end{aligned}$$

En estructuras donde las diferencias de la temperatura efectiva entre los diferentes tipos de elementos que la forman puedan causar efectos de carga adversos, dichos efectos deberán tenerse en cuenta. Además de los

efectos resultantes de una distribución uniforme de temperatura en todos los elementos, deben considerarse los efectos que resultan de una diferencia de temperatura efectiva de 15 °C entre los diferentes elementos estructurales.

En cada estado de proyecto, las acciones térmicas tendrán el mismo carácter que el del agente causante.

#### 4.6.2.4. Agente sísmico ( $q_{fs}$ )

Se considera agente sísmico a las oscilaciones sísmicas que se generan cuando se producen movimientos entre capas más o menos profundas de la corteza terrestre, las cuales se propagan hasta el lecho de la roca y, posteriormente, por esta masa hasta un determinado emplazamiento, transmitiéndose a continuación a través de las capas de suelo existentes en el mismo hasta alcanzar la superficie del terreno y las estructuras que en él se localizan. Dichas capas de suelo pueden modificar significativamente las características de las ondas sísmicas en origen tanto en amplitud y frecuencia como en duración, debido a la respuesta dinámica de los mismos frente al sismo. Estos efectos locales dependen tanto de las propiedades de los distintos estratos de suelo como de las características de los movimientos sísmicos en origen. Cada perfil de suelo amplifica preferentemente las frecuencias próximas a la propia. Si el sismo da lugar a movimientos verticales del fondo del mar pueden generarse tsunamis (maremotos), formados por ondas de pequeña amplitud en alta mar, que, debido a su facilidad para propagarse a grandes distancias, pueden alcanzar la costa. Al interaccionar con la plataforma continental y sus accidentes morfológicos, pueden, por reducirse la profundidad en las proximidades del litoral, por entrar en resonancia con áreas abrigadas naturales o por estrecharse la sección transversal de propagación en estuarios o bahías en “V”, dar lugar a grandes amplificaciones de las alturas de ola, generando corrientes de gran magnitud e inundando amplias zonas de costa <sup>(23)</sup>.

Los movimientos sísmicos pueden afectar a las obras de atraque y amarre al producir efectos dinámicos significativos en el conjunto suelo-estructura-masa de agua, así como variar el comportamiento de los suelos y de los rellenos, tanto en lo que respecta a su capacidad resistente como a su comportamiento deformacional, debido, entre otras causas, a que pueden producirse incrementos importantes de las presiones intersticiales en el mismo hasta, incluso, la anulación total de las presiones efectivas o licuefacción (Ver apartado 3.10. de la ROM 0.5-05). A su vez, los tsunamis pueden afectar a las obras de atraque y amarre produciendo acciones hidrodinámicas adicionales.

La descripción completa y detallada de este agente y de las diferentes variables de estado o parámetros que los caracterizan en un determinado emplazamiento no es objeto de esta ROM, estando previsto que se desarrolle en la ROM 0.6. Agentes sísmicos. También puede consultarse a estos efectos la ROM 0.5-05. Recomendaciones Geotécnicas para obras marítimas y portuarias, así como la ROM 1.0. Recomendaciones para el proyecto y construcción de obras de abrigo en lo que respecta a la caracterización de los tsunamis.

Este agente puede considerarse como compatible con el resto de agentes del medio físico y totalmente independiente de éstos. La manifestación estacionaria de este agente puede definir los siguientes estados:

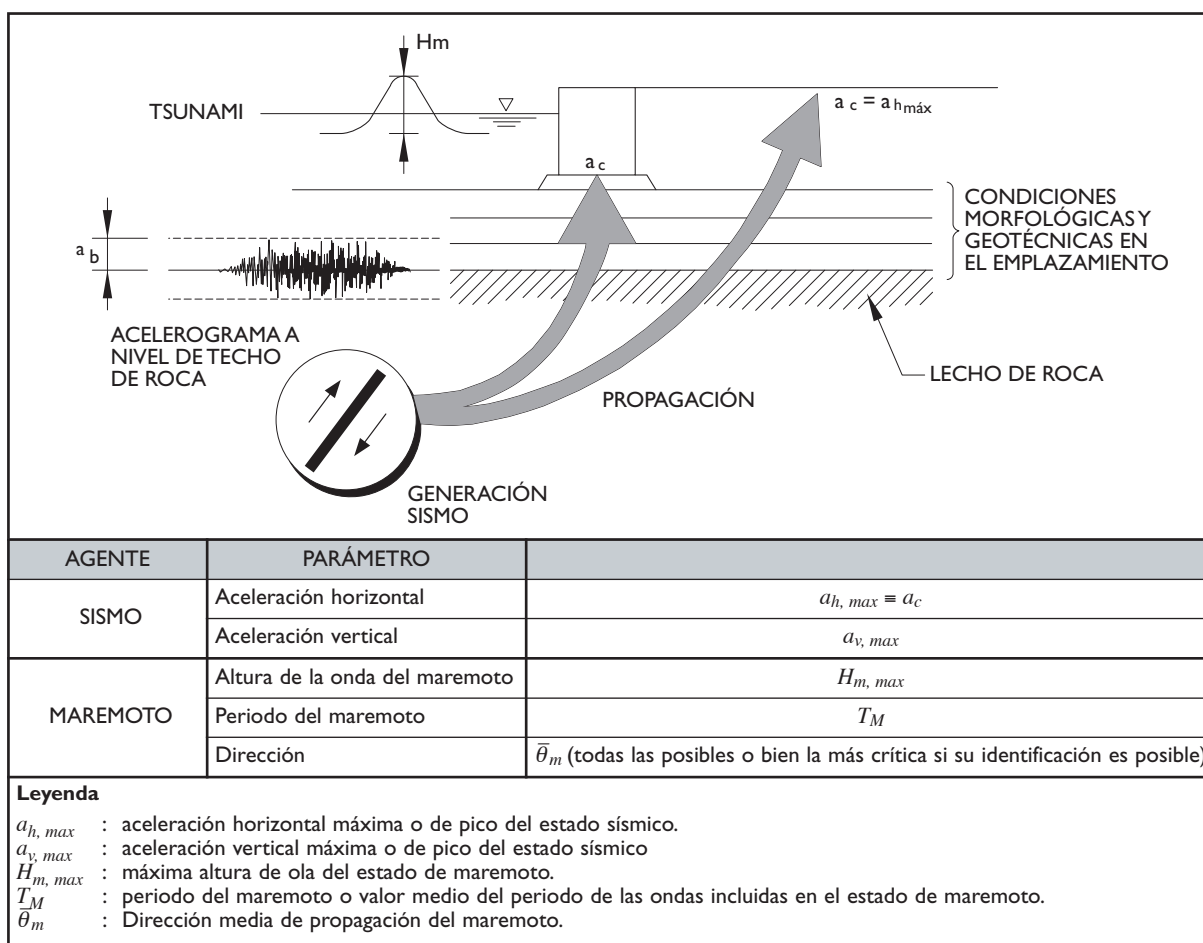
##### a) Estado Sísmico

Un estado sísmico se define por medio de acelerogramas que representan la variación en el tiempo de las aceleraciones horizontales y verticales que se producen durante la manifestación de un sismo. Los periodos representativos suelen estar en el rango entre 0,05 s y 0,5 s. Se considera que se produce un estado sísmico en un emplazamiento cuando la aceleración horizontal sísmica supera un valor de 0.04g, siendo g la aceleración de la gravedad. La duración del estado sísmico es el tiempo que transcurre entre la primera y la última vez que la aceleración horizontal sísmica en dicho emplazamiento supera el valor de 0,04 g. Dichas duraciones suelen ser pequeñas, del orden de 10 segundos para sismos de magnitud

(23) Los maremotos también pueden ser debidos a causas diferentes a los sismos como deslizamientos y actividad volcánica submarinos, aunque sus características y efectos son idénticos a los producidos por los sismos.

moderada y emplazamientos no muy alejados del epicentro y de 30 s para sismos de magnitud elevada y emplazamiento alejado del epicentro. En general, la variable de estado que define al agente sísmico para su consideración en las obras de atraque y amarre es la aceleración horizontal máxima o de pico ( $a_c$ ) en el emplazamiento (Ver tabla 4.6.2.12). Dicho parámetro está relacionado con la aceleración horizontal máxima a nivel del techo de roca <sup>(24)</sup> por medio de coeficientes de amplificación local que dependen de las características morfológicas y geotécnicas del terreno de cimentación. Estos coeficientes de amplificación se recogen generalmente en las normas y códigos sísmicos. En España pueden obtenerse en la Norma de Construcción Sismorresistente. La vigente en 2011 es la NCSE-02. Se admite normalmente que la aceleración vertical máxima está relacionada con la máxima aceleración horizontal.

**Tabla 4.6.2.12. Variables de estado relevantes de los agentes sísmicos significativos para obras de atraque y amarre**



No será necesario considerar el agente sísmico en el proceso de verificación en aquellos emplazamientos en los que en ningún estado límite de proyecto el sismo sea el agente predominante en un modo de fallo, al mantenerse éste en dicho emplazamiento en niveles inferiores al umbral que define el estado sísmico. Dado que la escala temporal del estado sísmico es mucho menor que la de los estados meteorológicos, puede suponerse que en los estados sísmicos el resto de agentes del medio físico tienen el carácter de permanentes.

(24) La aceleración horizontal máxima a nivel del techo de roca ( $a_h$ ) se denomina normalmente PGA (del inglés Peak Ground Horizontal Acceleration).



En función del tipo de formulación de las ecuaciones de verificación, el agente sísmico se definirá:

◆ *Para formulaciones deterministas y determinista-probabilistas*

Para la comprobación de modos de fallo adscritos a estados límite últimos, el estado sísmico se definirá a través de los valores representativos de la aceleración horizontal sísmica. Para probabilidades de fallo en condiciones extremas y excepcionales menores del 5% dichos valores se consignan en la tabla 4.6.2.13 a partir del régimen extremal en el emplazamiento de dicha variable. Para probabilidades de fallo mayores o iguales al 5% se considerarán únicamente condiciones extremas, siendo el valor característico aquél cuya probabilidad de excedencia en la fase de proyecto analizada es igual a la probabilidad de fallo considerada (Ver nota 12) en dichas condiciones (Ver apartado 4.1.1.1.1.b<sub>3</sub>).

En general, para la comprobación de modos de fallo adscritos a estados límites de servicio se considerarán en cada condición de trabajo los mismos valores representativos que los adoptados para los modos de fallo adscritos a estados límite últimos. A su vez, no se considerarán modos de parada operativa asociados al sismo y, por tanto, no se definen límites de operatividad asociados a dicha acción. Lo anterior se establece sin perjuicio de tener que verificar la instalación de atraque y amarre considerando que actúa el sismo (condiciones de trabajo extremas y excepcionales) cuando la instalación está tanto en servicio como fuera de servicio.

**Tabla 4.6.2.13. Valores representativos de las variables de estado de los agentes de proyecto en un estado sísmico para fase de servicio de obras definitivas (Para la verificación de modos de fallo adscritos a estados límite últimos y de servicio con probabilidades de fallo menores del 5% en la correspondiente condición de trabajo)<sup>1)</sup>**

CONDICIÓN DE TRABAJO	AGENTE SÍSMICO	RESTO DE AGENTES
	Valor Característico	Valor nominal o valor cuasi-permanente
Condiciones de trabajo Operativas (CT1)	El sismo no define límites de operatividad <sup>2)</sup>	
Condiciones de trabajo Extremas Sísmicas (CT3,31)	Periodo de retorno ( $T_R$ ) de 50 años obtenido de la función de distribución de extremos marginal	Probabilidad absoluta de no excedencia del 50%, tomada del régimen medio
Condiciones de trabajo Excepcionales debidas a la presentación de un Sismo de carácter extraordinario (CT3,32)	Periodo de retorno ( $T_R$ ) de 500 años obtenido de la función de distribución de extremos marginal	Probabilidad absoluta de no excedencia del 50%, tomada del régimen medio
<p>1) En general, en estados o situaciones de proyecto transitorios, es decir, aquéllos que tienen corta duración respecto a la vida útil de la obra ya sea, entre otros, por causas de la geometría de la obra (fase de construcción), por las características del terreno (fase de consolidación o comportamiento drenado o no drenado del mismo) o por las acciones actuantes (cargas de uso y explotación diferentes en las fases de reparación y desmantelamiento) en condiciones de trabajo extremas se adoptará como valor característico de la acción sísmica el correspondiente a un periodo del mismo orden de magnitud que el de la duración de dicha fase para las situaciones transitorias prolongadas en relación con la duración de la fase de servicio y el doble de dicho valor para casos de transitoriedad menos prolongada con un valor mínimo de 2 años. En situaciones de proyecto transitorias no se considerarán condiciones de trabajo excepcionales debidas a la presentación de un sismo de carácter extraordinario.</p> <p>2) No hay condiciones de parada operativa asociadas al sismo y, por tanto, no se definen límites de operatividad asociados con dicha acción. Lo anterior no evita que deba verificarse la instalación de atraque y amarre considerando que actúa el sismo (condiciones de trabajo extremas y excepcionales) cuando dicha instalación está tanto en servicio como fuera de servicio; adoptándose como valor representativo de los agentes de uso y explotación de actuación simultánea con el sismo el valor cuasi-permanente de cada uno de ellos en dichas dos situaciones respectivamente (ver tablas del apartado 4.6.4).</p>		

◆ *Para formulaciones probabilistas*

Para formulaciones probabilistas de la ecuación de verificación, el agente sísmico se define a través de la función de distribución extremal de la variable de estado aceleración horizontal máxima o de pico en el emplazamiento.



La función de distribución necesaria tanto para la formulación probabilista como para la definición de los valores representativos del agente sísmico en un emplazamiento puede obtenerse generalmente a partir de las normas y códigos sísmicos que sean de aplicación en dicho emplazamiento. En España pueden obtenerse en la Norma de Construcción Sismorresistente vigente (NCSE-02 en 2011). En dicha Norma, se incluye bajo la denominación de aceleración sísmica básica,  $a_b$ , el valor de la aceleración horizontal máxima a nivel de techo de roca asociada a un periodo de retorno de 500 años, correspondiente a cada emplazamiento. A partir de dicho valor, la función de distribución extremal de dicha variable en España puede considerarse definida por la siguiente relación:

$$a_{b|T} = a_b \left[ \frac{T_R}{500} \right]^{\frac{1}{2.7}}$$

siendo  $T_R$  el periodo de retorno, en años.

La aceleración horizontal máxima en el emplazamiento, tomando en consideración los efectos locales debidos a la configuración morfológica y condiciones geotécnicas del terreno, puede obtenerse a partir de las aceleraciones a nivel del techo de roca por medio de los coeficientes de amplificación que se incluyen en dicha Norma.

En la figura 4.6.2.8 se recoge el mapa de peligrosidad sísmica, incluido en la Norma NCSE-02, que suministra simplificada los valores de la aceleración básica en los distintos emplazamientos de España.

Tanto para las formulaciones deterministas como semi-probabilistas o probabilistas se pueden usar, si el análisis se realiza en el dominio del tiempo, tanto acelerogramas artificiales como registros reales de movimientos fuertes; su valor máximo, duración y contenido frecuencial deberán ser compatibles con los valores adoptados para la aceleración máxima o de pico, de acuerdo con las condiciones especificadas en los códigos o normas sísmicas. Si el análisis se realiza en el dominio de la frecuencia se pueden usar los espectros normalizados de respuesta elástica de aceleraciones incluidos en los códigos sísmicos, compatibles con la aceleración máxima adoptada y con las características frecuenciales y de amortiguamiento del conjunto suelo-estructura.

## b) Estado de Maremoto

Un estado de maremoto se define por medio de una oscilación marina en el emplazamiento que representa la variación en el tiempo de la superficie libre del mar, asociada con la manifestación del tsunami. En las proximidades de la plataforma continental, esta oscilación está formada por una secuencia de desplazamientos verticales de la superficie del mar formada por un número pequeño de grupos de ondas (entre 5 y 10) con periodos generalmente entre 2 minutos y 2 horas y longitudes de onda del orden del centenar de kilómetros, precedida por un descenso del nivel del mar y seguida por un tallo o cola oscilatoria con ondas de periodo más corto. Las características concretas de cada tsunami dependen, entre otros factores, de la magnitud del sismo o causa generadora, de la distancia al epicentro, la profundidad del agua en la zona de generación, de la dinámica de propagación y del periodo propio de oscilación de las zonas costeras. La duración del estado de maremoto, normalmente entre media hora y cuatro horas, depende asimismo del origen y la magnitud del sismo o del correspondiente mecanismo de generación, así como de la dinámica de propagación relacionada con la batimetría.

En general el maremoto se comporta en aguas profundas como un tren de ondas largas, lineales, no dispersivas en frecuencias y amplitudes (la celeridad no depende del periodo ni de la amplitud ya que ésta es pequeña respecto a la profundidad de propagación.  $c = \sqrt{gh}$ ). Durante su transformación y aproximación a la costa algunos maremotos se amplifican notablemente tanto que la celeridad comienza a depender de la amplitud [ $c = 1 + (H/2h) \sqrt{gh}$ ] hasta llegar a romper. En función de la forma inicial de las ondas pueden, además, separarse en solitones (ondas solitarias) y, eventualmente romper. Adicionalmente pueden producirse amplificaciones importantes de la amplitud del maremoto por fenómenos de resonancia en dársenas portuarias, ensenadas, rías y estuarios ya que éste contiene un amplio rango de periodos



ese estado límite mediante formulaciones semiprobabilistas o probabilistas. En general, el maremoto se definirá en cada emplazamiento como un agente extraordinario, caracterizándolo como una onda larga regular, definida por medio de la teoría cnoidal, con un valor nominal de altura de ola y periodo, asociado a la experiencia existente localmente.

En la historia sísmica española no se han producido maremotos relevantes para que los efectos de los mismos deban ser tomados en consideración en los procesos de verificación de las obras portuarias, salvo en la fachada Suratlántica, asociados a la falla Azores-Gibraltar. Si bien se han detectado también maremotos en la costa mediterránea y las islas Baleares, asociados a actividad tectónica en el Mar de Alborán y el norte de África, éstos no pueden considerarse relevantes para los procesos de verificación de las obras portuarias ya que, aunque pueden afectar a la operatividad de las instalaciones portuarias, su intensidad y probabilidad de presentación es muy reducida. Tampoco hay antecedentes tectónicos o de otro tipo que justifique la producción de maremotos significativos en el resto de zonas. En la fachada Suratlántica (golfo de Cádiz) hay referencias históricas de que se han producido maremotos de cierta importancia, aunque no hay información suficiente ni para cuantificarlos detalladamente en tamaño en aguas profundas ni para asociarlos a determinados periodos de retorno. En tanto no se disponga de datos más precisos a través de métodos de evaluación de riesgos de generación de maremotos y de procesos de simulación de consecuencias, se pueden adoptar como valores nominales de las variables de estado del maremoto en el golfo de Cádiz en el borde de la plataforma continental en dicha área (línea batimétrica -1.000) los siguientes, que pueden considerarse representativos de un periodo de retorno del orden de 500 años <sup>(25)</sup>:

- ◆  $H_{m, \max} = 1.80 \text{ m}$
- ◆  $T_m = 20\text{-}40 \text{ min}$
- ◆ Dirección: SW

Los valores nominales de las variables de estado del maremoto en el emplazamiento y en presencia de la obra se obtendrán a partir de dichos valores mediante la aplicación de modelos de propagación no lineales de validez reconocida para este tipo de ondas largas (ver ROM 1.0), tomando en consideración los valores compatibles de los agentes climáticos, particularmente los niveles del agua asociados a mareas (Ver tabla 4.6.2.13), así como las posibles amplificaciones por resonancia o por reducirse la sección transversal en dársenas, estuarios y ensenadas <sup>(26)</sup>.

Dichos valores nominales se considerarán para verificaciones de modos de fallo adscritos a estados límites últimos en condiciones excepcionales asociadas a probabilidades de fallo menores del 5%. En España, para probabilidades de fallo más altas en los cálculos no se considerará la presentación de maremotos. Así mismo, en ningún caso será necesario considerarlos para la verificación de modos de fallo asociados a estados límites de servicio y modos de parada operativa.

#### 4.6.2.4.1. FORMULACIÓN DE LAS ACCIONES DEBIDAS AL SISMO ( $Q_{fs,1}$ )

Los valores nominales o representativos de las acciones debidas al sismo, así como sus funciones de distribución, pueden obtenerse o derivarse a partir de los correspondientes al agente sísmico.

Las acciones y otros efectos debidos al sismo que deben tomarse en consideración para la verificación de las obras de atraque y amarre son los siguientes:

- (25) Estos datos están asociados a estudios y simulaciones realizados sobre el tsunami causado por el terremoto de Lisboa de 1755, verificados mediante propagaciones inversas de las referencias históricas consideradas más fiables sobre las alturas de ola y sobrelevaciones en costa (run-up) debidas a dicho maremoto alcanzadas en el litoral peninsular español y portugués.
- (26) Simplificadamente, la altura de ola de un maremoto a una profundidad  $h_1$  ( $H_1$ ) puede obtenerse a partir de la altura de ola de maremoto en aguas profundas a una profundidad  $h_0$  ( $H_0$ ) por medio de la Ley de Green:  $H_1 = [h_0/h_1]^{1/4} H_0$ , aplicable a profundidades mayores que la profundidad de rotura ( $H/h < 0,8$ ). Esta formulación es aplicable a costas abiertas en la que son despreciables los fenómenos de reflexión. Si se quiere cuantificar la amplificación de la onda de maremoto al reducirse la sección transversal en estuarios y ensenadas es aplicable también la Ley de Green modificada tomando en consideración la variación de anchura de la sección transversal en dichas áreas (B):  $H_1 = [B_0/B_1]^{1/2} [h_0/h_1]^{1/4} H_0$ , siempre que los efectos de la reflexión sean así mismo despreciables.

- ◆ *Modificaciones en el comportamiento del terreno natural y de rellenos artificiales debido a la actuación de una acción de carácter dinámico con el sismo, tanto en lo que se refiere a su capacidad resistente y a su comportamiento deformacional como a la generación de incrementos importantes de las presiones intersticiales (Ver ROM 0.5-05)*

De acuerdo con lo señalado en el apartado 3.10. de la ROM 0.5-05, el comportamiento del suelo frente a la acción sísmica podrá considerarse en general que será en condiciones no drenadas para suelos y rellenos con coeficiente de permeabilidad  $k < 5 \cdot 10^{-4}$  m/s, dando lugar, especialmente en los suelos granulares limpios, flojos, saturados y de granulometría uniforme, a crecimientos importantes de las presiones intersticiales, a la reducción o anulación de las tensiones efectivas intergranulares y, consecuentemente, a la pérdida de su capacidad resistente frente a las sollicitaciones de corte. Este fenómeno, denominado licuefacción, es una de las principales causas de fallo a tomar en consideración en el proyecto de obras de atraque y amarre en zonas sísmicas. El potencial de licuefacción de suelos y rellenos, así como la verificación de la seguridad frente a dicho fenómeno puede evaluarse de acuerdo con lo dispuesto en el apartado 3.10.4.2 de la ROM 0.5-05. Cuando el coeficiente de seguridad a la licuefacción no sea aceptable ha de procederse a la realización de tratamientos de mejora o de sustitución de terrenos y rellenos, a la colocación de drenes para facilitar la disipación de las presiones intersticiales generadas o a la utilización de tipologías estructurales reforzadas o menos sensibles a este fenómeno (p.e. obras de atraque fijas de pilotes).

En las situaciones más comunes, los parámetros de resistencia y de deformación del suelo a considerar en los cálculos cuando se verifiquen los estados sísmicos serán los correspondientes a comportamiento no drenado para suelos situados bajo el nivel freático, considerando además la degradación de los parámetros resistentes del suelo debido a la actuación de cargas dinámicas. La excepción son los suelos claramente drenantes en condiciones sísmicas, p.e. escolleras limpias (Ver ROM 0.5-05).

- ◆ *Comportamiento dinámico del conjunto suelo-estructura-agua, que condiciona tanto los esfuerzos y deformaciones de la estructura resistente como las cargas transmitidas al terreno de cimentación*

Dicho comportamiento será tanto más acusado cuanto más próximo sea el periodo propio de vibración de dicho conjunto suelo-estructura-agua al periodo predominante del movimiento sísmico. Las obras de atraque y amarre, excepto las flotantes, tienen periodos propios de oscilación similares a los periodos predominantes en los movimientos sísmicos, por lo que en la mayor parte de los casos es imprescindible analizar el comportamiento dinámico del conjunto suelo-estructura-agua.

El análisis de la interacción suelo-estructura-agua bajo sollicitación sísmica puede realizarse con metodologías diversas de análisis dinámico o con procedimientos empíricos aproximados de carácter pseudo-estático (Ver ROM 0.5-05).

- Para análisis dinámicos en el dominio del tiempo: en general la acción sísmica puede representarse mediante un conjunto de fuerzas de inercia nodales iguales a los productos de las masas del suelo por las aceleraciones sísmicas consideradas en el emplazamiento. También deberán tomarse en consideración los empujes hidrodinámicos generados por la presencia tanto de agua intersticial como libre (Ver subapartado empujes hidrodinámicos del agua intersticial y libre en el apartado siguiente). Para análisis dinámicos en el dominio de la frecuencia, la acción sísmica se representa por el correspondiente espectro de respuesta. Las recomendaciones para el modelado de la estructura y del terreno con el objeto de representar adecuadamente sus características inerciales, de rigidez y de amortiguamiento se desarrollan más detalladamente en las sucesivas Recomendaciones de la serie 2 correspondientes a las distintas tipologías estructurales de las obras de atraque y amarre.
- Para análisis pseudoestáticos: únicamente se considerará aceptable la aplicación de procedimientos empíricos pseudoestáticos para la verificación de obras de atraque y amarre fijas cerradas, así como para la verificación de los muros de contención de tierras que, en su caso, formen parte de obras de atraque y amarre fijas abiertas. En estos casos la acción sísmica se representará por el siguiente conjunto de fuerzas estáticas equivalentes horizontales y verticales (Ver tabla 4.6.2.15):

- Fuerzas de inercia de la estructura: fuerzas horizontales y verticales obtenidas como producto de las acciones gravitatorias y variables verticales que actúan sobre la estructura de atraque y amarre ( $W$ ) <sup>(27)</sup> por los correspondientes coeficientes sísmicos. A falta de estudios específicos, se tomarán los siguientes coeficientes sísmicos horizontal ( $k_h$ ) y vertical ( $k_v$ ):

$$k_h = \alpha \cdot a_{h,max} / g$$

$$k_v = 0.5 \cdot k_h$$

siendo:

$a_{h,max}$  : aceleración horizontal máxima o de pico.

$\alpha$  : factor que trata de evaluar la flexibilidad de la obra frente al sismo. Se define como el cociente entre el valor de la aceleración correspondiente al estado de equilibrio límite (inicio de los desplazamientos) y el valor que produce el desplazamiento máximo compatible con las condiciones de proyecto. Por tanto, su valor será mayor para obras de atraque que pueden tolerar menores desplazamientos. Los valores de  $\alpha$  a adoptar se recogen en la tabla 4.6.2.14.

Se considerará que las fuerzas de inercia actúan en el sentido que produzcan los efectos más desfavorables.

En el caso de obras de pantallas, se pueden despreciar las fuerzas inerciales verticales en la estructura de contención.

**Tabla 4.6.2.14. Valores recomendados para el factor  $\alpha$  que afecta al coeficiente sísmico para obras de atraque y amarre fijas cerradas**

TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL	$\alpha$ (*)
Obras de gravedad	0,5
Obras de recinto de tablestacas	0,5
Obras de pantallas	1
Muros de contención de tierras que, en su caso, formen parte de obras de atraque y amarre fijas abiertas, coaccionados en cabeza	1,35
* En presencia de suelos o rellenos saturados sin cohesión, susceptibles de desarrollar presiones intersticiales elevadas, es recomendable tomar $\alpha$ no menor que 1, independientemente de la tipología estructural.	

- Empujes dinámicos del terreno: la acción sísmica hace que los empujes del terreno se modifiquen respecto a la situación estática. El empuje activo en condiciones sísmicas es mayor que el correspondiente a la situación estática. Por el contrario, el empuje pasivo es menor que el correspondiente a la situación estática. La resultante de los empujes de tierra dinámicos y estáticos que actúan en condiciones sísmicas puede calcularse considerando la condición de equilibrio límite del modelo formado por la estructura, el cimientado y las cuñas activas y pasivas del terreno situadas en el trasdós e intradós de la estructura respectivamente. El cálculo simplificado puede realizarse de acuerdo con la formulación de Mononobe-Okabe recogida en el apartado 3.10.5.2.3 de la ROM 0.5-05, diferenciándose los casos correspondientes a terrenos situados por encima del nivel freático de los situados por debajo. Y en estos últimos, los que tienen un comportamiento drenado y no drenado en el estado sísmico.

(27) En el caso del peso propio se considerará el producto de su masa total (densidad emergida) por la aceleración de la gravedad.

- Empujes dinámicos del agua intersticial: Cuando se consideran condiciones no drenadas, el agua intersticial no es libre de moverse con respecto al esqueleto sólido. En estos casos, puede considerarse que el sismo no produce una presión hidrodinámica adicional a la estática asociada al agua intersticial. Por el contrario, en condiciones drenadas se supondrá que los efectos inducidos por la acción sísmica en el terreno o relleno y en el agua no están acoplados. En este caso, se sumará a las presiones debidas a los niveles de agua en condiciones estáticas un empuje hidrodinámico que puede suponerse igual a la presión hidrodinámica unitaria de Westergaard, dada por la expresión:

$$u_{w,d}(z) = \pm \frac{7}{8} k_h \gamma_w \sqrt{hz}$$

Siendo  $h$  la altura del nivel freático medida desde la base de la obra de atraque y  $z$  la coordenada vertical, medida hacia abajo, con el origen en la superficie libre del agua.

La integración de esta expresión conduce a un empuje total hidrodinámico igual a:

$$E_{w,d} = \pm \frac{7}{12} k_h \gamma_w h^2$$

Este incremento de empuje puede suponerse aplicado a una profundidad 0,60 h, medida desde el nivel freático.

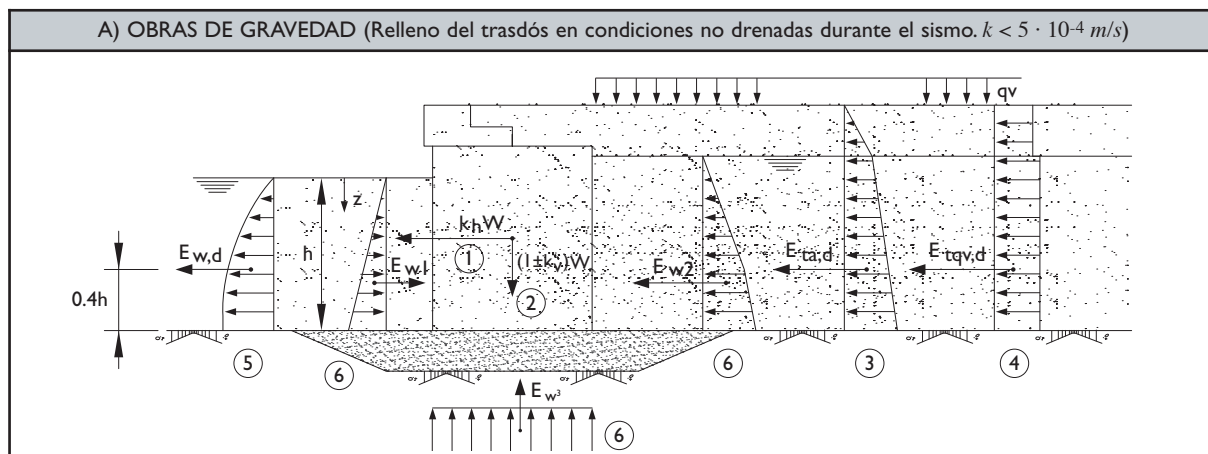
- Empujes hidrodinámicos del agua libre: también deben tomarse en consideración empujes hidrodinámicos del agua libre en el intradós debidos al sismo. A estos efectos, es admisible su aproximación por medio de la formulación de Westergaard.

Solamente podrán aplicarse las especificaciones anteriores si no se pueden producir en el estado sísmico considerado procesos de licuefacción en el terreno natural o en los rellenos.

En general, sobre las obras de atraque y amarre flotantes no se considerarán acciones sísmicas, excepto en caso de maremotos. No obstante lo anterior, deberán investigarse los efectos indirectos inducidos por el sismo en la obra a través del movimiento causado en el sistema de amarre y anclaje.

En el estado sísmico, las acciones debidas al sismo tendrán la misma consideración que el agente causante; es decir un carácter variable. No obstante, simplifcadamente podrán considerarse como extraordinarias o accidentales cuando se considere como estado de proyecto el estado meteorológico (Ver tabla 4.6.2.13).

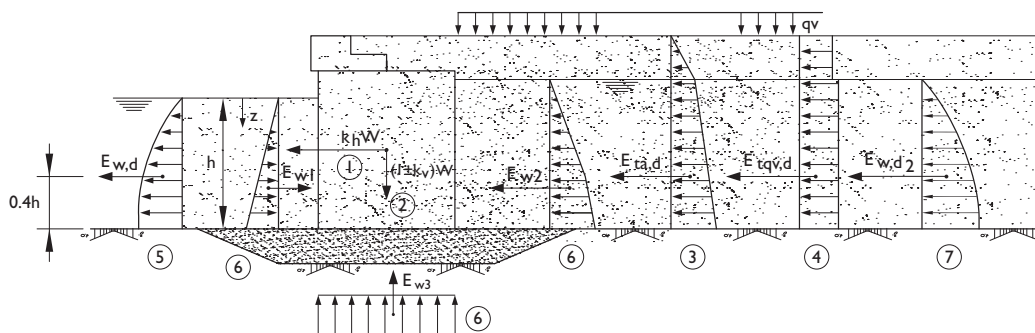
**Tabla 4.6.2.15. Acciones estáticas equivalentes en el estado sísmico sobre obras de atraque y amarre fijas cerradas**



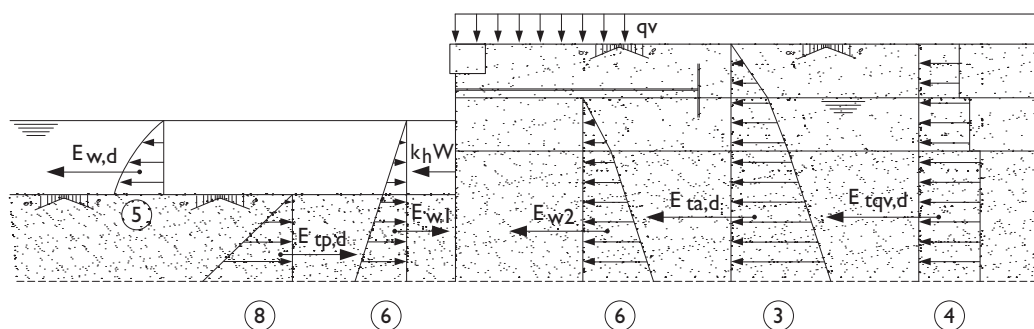


**Acciones estáticas equivalentes en el estado sísmico sobre obras de atraque y amarre fijas cerradas (continuación)**

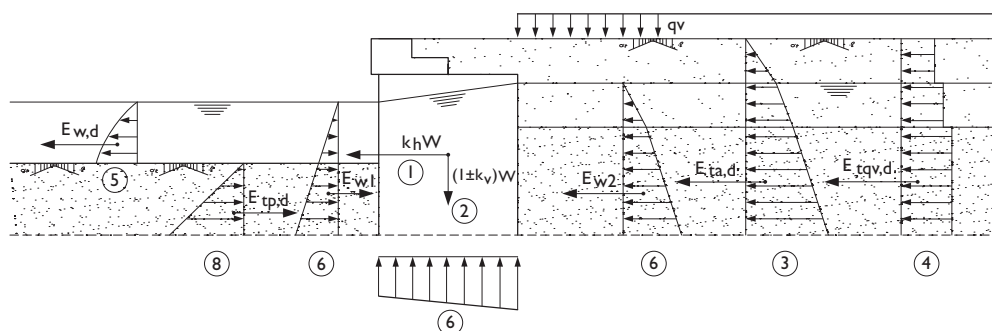
**B) OBRAS DE GRAVEDAD (Relleno del trasdós en condiciones drenadas durante el sismo.  $k \geq 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ )**



**C) OBRAS DE PANTALLAS (Terreno natural y relleno del trasdós en condiciones no drenadas durante el sismo.  $k < 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ )\* \*\***



**D) OBRAS DE RECINTOS (Terreno natural y relleno del trasdós en condiciones no drenadas durante el sismo.  $k < 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ )\* \*\***



**Notas**

\* Si el terreno natural o el relleno del trasdós se comporta en condiciones drenadas durante el sismo deberá añadirse en las zonas en las que así se comporte el empuje hidrodinámico del agua intersticial (7).

\*\* Las acciones estáticas equivalentes en el estado sísmico se definen de forma equivalente sobre el anclaje y demás elementos estructurales considerados aisladamente.

**Leyenda**

- 1) Fuerza de inercia horizontal de la estructura.
- 2) Peso propio + fuerza de inercia vertical de la estructura.
- 3) Empuje activo del terreno en condiciones dinámicas.
- 4) Empuje del terreno inducidos por las sobrecargas de uso y explotación en condiciones dinámicas.
- 5) Empuje hidrodinámico del agua libre.
- 6) Empujes debidos a los niveles de agua libre e intersticial en condiciones estáticas (Ver apartado 4.6.2.1.1.c para los asociados a los niveles de agua debidos a mareas y a los niveles fluviales y apartado 4.6.2.1.1.d para los debidos al oleaje y otras oscilaciones del mar de periodo corto o intermedio simultáneos con el sismo).
- 7) Empuje hidrodinámico del agua intersticial.
- 8) Empuje pasivo del terreno en condiciones dinámicas.

#### 4.6.2.4.2. FORMULACIÓN DE LAS ACCIONES DEBIDAS AL MAREMOTO ( $Q_{fs,2}$ )

Los efectos de los maremotos sobre las estructuras de atraque y amarre pueden aproximarse a través de fuerzas, presiones, depresiones y subpresiones en la dirección normal a la superficie, dependiendo de las características del tsunami en el emplazamiento, así como de la tipología y dimensiones de la estructura y del régimen hidráulico resultante de la interacción del maremoto con la estructura. A su vez, el maremoto puede generar en el terreno y, en su caso, en las banquetas y en los rellenos del trasdós presiones intersticiales que deben tomarse en consideración para la verificación de la estabilidad de la obra y del terreno. Los valores nominales o representativos de estas acciones pueden obtenerse o derivarse a partir de los correspondientes valores de las variables de estado del agente causante que intervienen en la formulación. En ausencia de técnicas numéricas o experimentales más precisas, dichas acciones pueden aproximarse en algunas situaciones más comunes por medio de las siguientes formulaciones:

◆ *Sobre obras de atraque fijas cerradas*

Debido a las características que presentan las ondas de maremoto (grandes longitudes de onda con crestas apuntadas separadas por senos anchos y planos (onda solitaria), las fuerzas predominantes suelen ser fuerzas de difracción durante el paso de cresta y las presiones hidrostáticas durante el paso de seno.

Las acciones del maremoto en condiciones de no rotura sobre las obras de atraque fijas cerradas de gravedad que puedan considerarse semi-infinitas frente al maremoto <sup>(28)</sup> o que estén adosadas a la costa se recogen en la tabla 4.6.2.16.

En dicha formulación, simplificada del lado de la seguridad se considera que en la situación de paso de cresta se mantienen los niveles de agua existentes previamente en el trasdós, tanto si la obra de atraque tiene un relleno en dicho trasdós como si no lo tiene. En consonancia con esta hipótesis, puede admitirse que, a menos que las banquetas incluyan un alto porcentaje de finos (ver formulación de la tabla 4.6.2.7), las subpresiones hidrodinámicas en la cresta del maremoto pueden obtenerse considerando condiciones de flujo estacionario entre trasdós e intradós y que los gradientes de presión hidrodinámica se encuentran completamente equilibrados con la disipación que se produce por fricción en la banqueta (distribución triangular).

En la situación de paso de seno del maremoto, si la obra de atraque con banqueta de cimentación gránular no tiene un relleno en el trasdós o el relleno es altamente permeable ( $K \geq 10^{-5} \text{ m/s}$ ) se considera que las variaciones de los niveles de trasdós e intradós en situación de actuación del seno del maremoto están acopladas. En este caso, en la situación de paso de seno del maremoto únicamente se considerará que éste produce una ley de subpresiones prácticamente rectangular. En el caso de que el relleno del trasdós tenga baja permeabilidad ( $k < 10^{-5} \text{ m/s}$ ) se considerará, del lado de la seguridad, que se mantiene en dicho relleno el nivel de las aguas existente previamente a la actuación del maremoto. Las subpresiones se estiman a partir del análisis de la red de filtración en el relleno considerando condiciones de flujo estacionario (ver ROM 0.5-05 y apartado 4.6.2.1.1. c. de esta Recomendación).

Para la definición del comportamiento, así como de las presiones intersticiales hidrodinámicas en el terreno natural y las presiones hidrodinámicas que actúan en el fondo del mar en las proximidades de la obra o en la superficie de las coronaciones o taludes de las banquetas externas a la base de la misma, debidas a la actuación del maremoto se tomará en consideración lo establecido al respecto en el apartado 4.6.2.1.1 de esta Recomendación.

Las presiones y depresiones sobre los paramentos enterrados en las obras de pantallas y recintos, así como las presiones intersticiales en un terreno natural homogéneo generadas por el maremoto pueden

(28) Las obras de atraque se considerarán semiinfinitas respecto al maremoto cuando la dimensión frontal de la obra sea manifiestamente mayor que dos veces la distancia existente entre dos puntos consecutivos de paso por el nivel medio del mar en la zona correspondiente a la cresta del maremoto incidente de proyecto en el emplazamiento (pseudolongitud de onda  $\bar{L}$ ).



aproximarse de igual forma que la definida para el resto de oscilaciones del mar (apartado 4.6.2.1.1); es decir, puede considerarse que, en aquellos casos en los que el terreno tenga un comportamiento completamente drenado frente al maremoto, en el intradós de la zona enterrada se produce una prolongación de la ley de presiones hidrodinámicas definida para el paramento exterior no enterrado. Así mismo cuando el comportamiento del terreno sea parcialmente drenado es admisible considerar un amortiguamiento lineal de las presiones hidrodinámicas actuantes en el fondo debidas al maremoto en una profundidad igual a:  $\sqrt{(T_m c_v / \pi)} \leq L_m / 2\pi$ , siendo  $T_m$  y  $L_m$  el periodo y la longitud de onda del maremoto en el emplazamiento, respectivamente, y  $c_v$  el coeficiente de consolidación del terreno. En los casos generales puede considerarse que, tanto para el paso de cresta como para el paso de seno, el nivel de las aguas existente en el intradós es el mismo que el existente previamente a la actuación del maremoto. Las presiones hidrodinámicas en el trasdós podrán estimarse a partir del análisis de la red de filtración en dicha zona considerando condiciones de flujo estacionario desde la punta de la pantalla o recinto.

En obras de atraque fijas cerradas que no puedan considerarse como semi-infinitas [ $(\bar{L}/6 < D \approx \bar{L})$ ] o no estén adosadas a la costa, las presiones hidrodinámicas durante el paso de cresta debidas al maremoto se obtendrán mediante la aplicación de modelos de transformación de ondas no lineales que tengan en cuenta especialmente los procesos de difracción, de validez para las condiciones de contorno existentes en la obra y en el emplazamiento, de forma similar a lo dispuesto en el apartado 4.6.2.1.1.  $d_{12}$ ) de esta Recomendación.

#### ◆ Sobre obras de atraque fijas abiertas

La acción del maremoto en condiciones de no rotura sobre los elementos estructurales de sustentación de las obras de atraque fijas abiertas cuando  $D < \bar{L}/6$  puede calcularse por medio de la teoría de Morison utilizada para la definición de las acciones debidas al oleaje sobre ese tipo de estructuras (apartado 4.6.2.1.1  $d_{21}$ ), adoptando para la definición de los campos de velocidades y aceleraciones que intervienen en la formulación de las fuerzas de arrastre e inercia el modelo de onda cnoidal. En la literatura especializada así como en la ROM 1.0 pueden encontrarse las formulaciones de dichos parámetros en esta teoría del oleaje. En estos casos, dado que el maremoto se comporta como una onda larga con importantes amplitudes cuando es relevante y las dimensiones usuales de este tipo de elementos, la fuerza de arrastre suele ser, en general, la componente preponderante (Ver figura 4.6.2.3). La validez de esta formulación está condicionada a que no se produzca de forma significativa la alteración de la progresión o la rotura de la onda por alcanzar o superar la cresta la plataforma superior de la obra de atraque. En este último caso para la cuantificación de las acciones es recomendable la utilización de técnicas experimentales en modelo físico.

Simultáneamente cuando la plataforma superior de la obra de atraque fija abierta esté situada de forma que durante el paso de la cresta del maremoto éste pueda alcanzar la parte superior o inferior de la misma, deberán considerarse empujes verticales causados por las velocidades y aceleraciones verticales de la masa de agua, así como por la propia inmersión de este elemento estructural. Dados la gran cantidad de parámetros que influyen en este fenómeno, estos empujes tienen una muy difícil evaluación analítica general en magnitud y distribución, por lo que para su cuantificación es recomendable la utilización de técnicas experimentales en modelo físico. Como aproximación puede considerarse que para el empuje ascensional estático equivalente sobre la plataforma por unidad de superficie es aplicable la formulación recomendada para el oleaje en el apartado 4.6.2.1.1  $d_{21}$ . Para la obtención del empuje vertical descendente por unidad de superficie puede considerarse que el rebase sobre la estructura alcanza una altura de  $1.50 H_{m,P}$ , medida desde el nivel del mar considerado en dicho estado.

En aquellas obras fijas abiertas en las que el tamaño de los elementos de sustentación no cumplan la condición  $D < \bar{L}/6$  se considerarán estos elementos a los efectos del maremoto como obras fijas cerradas.

#### ◆ Sobre obras flotantes

Dadas las características de los maremotos en las inmediaciones de la costa, muy próximas a la estructura de una onda solitaria, en general las obras de atraque y amarre flotantes con sistemas de amarre

**Tabla 4.6.2.16. Acciones del maremoto en condiciones de no rotura sobre obras lineales de atraque fijas cerradas de gravedad semi-infinitas o adosadas a la costa \***

PASO DE LA CRESTA
PASO DEL SENO
<p><b>Notas</b></p> <p>* La formulación se ajusta al modelo recomendado por Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan (2009), sin perjuicio de la consideración de las acciones estáticas que correspondan debidas a los niveles de agua compatibles con el maremoto.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— <math>H_{m, máx, l}</math> : La altura de onda máxima incidente del maremoto; es decir de la onda progresiva incidente no tomando en consideración la amplificación de la onda en el emplazamiento por efecto de la regresión</li> <li>— Rango de validez recomendado de la formulación para las obras de gravedad:             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fondo horizontal o pendiente muy tendida (<math>tg \alpha &lt; 1/50</math>).</li> <li>• Cualquier dirección de incidencia.</li> <li>• Peralte <math>H_{m, l}/L &lt; 0,04</math>.</li> <li>• Profundidades reducidas: <math>h/L &lt; 0,04</math>.</li> <li>• No rotura.</li> </ul> </li> </ul>

rígidos resultan muy afectadas por el paso de la cresta de un tsunami y muy poco afectadas durante el paso del seno siempre que el sistema de amarre no restrinja el correspondiente movimiento vertical. Para la determinación de las acciones producidas por el paso de la cresta del maremoto sobre este tipo de obras no se dispone de formulaciones analíticas de aplicación generalizable siendo recomendable, tal como se ha señalado para el oleaje, recurrir a técnicas experimentales o numéricas basadas, en este caso, en la aplicación de modelos de transformación de ondas no lineales que tengan en cuenta los movimientos de un cuerpo flotante en el régimen de difracción (Ver apartado 4.6.2.1.1.  $d_3$ ). No obstante lo anterior, en estructuras flotantes de sección rectangular, con dimensiones perpendiculares a la dirección de propagación del maremoto manifiestamente superiores a la pseudolongitud de onda del maremoto ( $\bar{L}$ ) (ver nota 28) y profundidades relativas  $h/\bar{L} > 0,5$  puede considerarse simplificada que durante el paso de cresta el comportamiento de la obra es similar al de una obra de atraque fija cerrada de dimensión frontal equivalente. De igual forma, para dichas profundidades relativas, cuando la dimensión frontal de la estructura es pequeña en relación con la pseudolongitud de la onda de maremoto (ver nota 28), de forma que no quedan afectadas significativamente sus condiciones de propagación, las acciones debidas al maremoto pueden estimarse de igual forma que lo señalado en esta Recomendación para las obras de atraque fijas de dimensiones frontales equivalentes.

Sobre obras de atraque y amarre flotantes con sistemas de amarre flexibles las acciones debidas al maremoto se pueden estimar de igual forma que para obras de atraque y amarre con sistemas de amarre rígidos; es decir mediante técnicas experimentales o numéricas basadas en la aplicación de modelos de transformación de ondas no lineales que tengan en cuenta los movimientos de un cuerpo flotante en el régimen de difracción, pero considerando que la estructura dispone de seis grados de libertad. La resultante de estas acciones causará una importante fuerza de deriva cuya estimación es difícilmente generalizable.

Para cada estado de proyecto, las acciones debidas al maremoto tendrán igual consideración que este agente. Es decir, normalmente tendrán la consideración de acciones extraordinarias cuando se consideren estados meteorológicos o variables cuando se consideren estados de maremoto.

### 4.6.3. Agentes del terreno ( $q_t$ )

Los agentes del terreno están asociados con las acciones provocadas o transmitidas por el terreno natural y por los rellenos artificiales realizados con materiales de préstamo:

- ◆ Al actuar directamente sobre la obra de atraque o el cimiento ( $q_{t,1}$ ). En este apartado se incluyen las presiones debidas al peso efectivo del terreno como los empujes activo, pasivo y al reposo cuando el suelo puede considerarse un macizo semi-infinito o las debidas al efecto silo cuando el suelo se encuentra en situación confinada.
- ◆ Al afectar indirectamente a la estructura o al cimiento a través de los efectos producidos por movimientos globales de los suelos ( $q_{t,2}$ ). En este apartado se incluyen el rozamiento negativo o los empujes horizontales parásitos en estructuras enterradas causados por desplazamientos laterales del terreno durante procesos de consolidación.
- ◆ Al transmitir a través del suelo acciones que actúan sobre la estructura, los cimientos o la superficie del suelo cuyo origen no está ligado al mismo ( $q_{t,3}$ ). En este apartado se incluyen los empujes adicionales del terreno debidos a las cargas de uso y explotación o a las cargas hidrodinámicas producidas por los agentes del medio físico.

No se incluyen como agentes del terreno las acciones debidas al peso propio de los rellenos soportados o incluidos en la obra, los cuales tendrán la consideración de agente gravitatorio y se definirán de acuerdo con lo dispuesto en el apartado 4.6.1 de esta Recomendación, ni las acciones debidas a la actuación directa sobre la estructura, el cimiento o el terreno natural del agua intersticial que tendrán la consideración y tratamiento de acciones debidas a los agentes del medio físico de acuerdo con lo dispuesto en el apartado 4.6.2, ni las acciones resultantes del comportamiento dinámico del conjunto suelo-estructura-agua en presencia de un sismo que tendrán la consideración de acciones sísmicas de acuerdo con lo dispuesto en el apartado 4.6.2.4. Para un mismo suelo o relleno, las acciones que produce sobre una estructura se considerarán como agente del terreno o como

agente gravitatorio dependiendo del modo de fallo analizado y del modelo de cálculo utilizado. Por ejemplo, las acciones debidas al relleno de las celdas de una obra de atraque de cajones se considerarán como un agente gravitatorio cuando se verifiquen modos de fallo geotécnicos o de inestabilidad externa y como un agente del terreno cuando se verifiquen modos de fallo estructurales o de inestabilidad interna.

Las acciones debidas al terreno en cada estado de proyecto dependen fundamentalmente de las propiedades y geometría del terreno y de las condiciones en que se encuentra el agua intersticial en el mismo, así como del resultado de la interacción suelo-estructura-agua en dicho estado en función del tipo de terreno, de las características geométricas y tipológicas de la estructura y de la naturaleza, magnitud y condiciones de aplicación de las cargas actuantes; es decir, del comportamiento del terreno o del relleno artificial en relación con la evolución de las presiones intersticiales y de la deformación relativa entre el suelo y la estructura.

Para definir las acciones del terreno en cada estado de proyecto, así como para la verificación de los modos de fallo en dicho estado, deberá analizarse la variación simultánea de las propiedades y del comportamiento de los suelos, así como de las presiones intersticiales durante todas las fases de proyecto, tanto en relación con el tiempo (p.e. debidos a procesos de consolidación) como en relación con las cargas actuantes (p.e. durante la actuación de una carga oscilatoria como el oleaje o el sismo, o de una carga impulsiva como las cargas de atraque), con el objeto de tomar en consideración y analizar todos los estados límites que pueden presentarse durante cada una de las fases de proyecto o establecer la compatibilidad entre el comportamiento del terreno y las cargas actuantes. A estos efectos, simplificadaamente se considerará que los estados de proyecto se ajustan a alguna de las siguientes situaciones límite:

- ◆ Terreno con comportamiento totalmente drenado.
- ◆ Terreno con comportamiento parcialmente drenado.
- ◆ Terreno con comportamiento no drenado.

En algunos casos (rellenos hidráulicos o determinados rellenos sumergidos recién vertidos) puede ser necesario considerar también una fase líquida. En este caso el suelo se comporta a todos los efectos como un líquido con un peso específico del orden de 12-16 kN/m<sup>3</sup>.

La evolución de las propiedades y del comportamiento del suelo, así como de las presiones intersticiales con el tiempo en cada tipo de terreno o relleno se analiza en la ROM 0.5-05, particularmente en los apartados 3.4 y 3.9 para los procesos naturales de consolidación y para los procesos de mejora del terreno, respectivamente. Así mismo, su variación en relación con las cargas actuantes se analiza en los apartados 3.4.11 y 3.10 de la ROM 0.5-05 en lo que respecta a las oscilaciones del mar o al sismo, así como en el apartado 4.6 de esta Recomendación, en los subapartados correspondientes a los distintos agentes y acciones oscilatorios o impulsivos cuya presentación puede modificar el comportamiento del terreno y la distribución de presiones intersticiales (niveles de agua, oleaje, sismo, maremoto, cargas de atraque, ...).

Una vez identificadas las propiedades, el comportamiento del terreno y las presiones intersticiales que definen el estado de proyecto o que son compatibles con el mismo, las acciones debidas directamente al terreno ( $q_{t,1}$ ) se considerarán de carácter permanente en dicho estado. Las acciones debidas a los efectos producidos por movimientos globales de los suelos ( $q_{t,2}$ ) así como las acciones transmitidas a través del suelo ( $q_{t,3}$ ) tendrán en dicho estado el mismo carácter que el agente o acción que las origina. Tanto las acciones provocadas como las transmitidas por el terreno se considerarán cargas compuestas, dependientes o correlacionadas con aquellos agentes que bien condicionan las propiedades y el comportamiento del terreno, bien definen la distribución de presiones intersticiales y los niveles de saturación o bien la magnitud de las cargas transmitidas. Por ello, en función del tipo de formulación de las ecuaciones de verificación las acciones provocadas o transmitidas por el terreno se definirán:

#### **a) Para formulaciones deterministas y determinista-probabilistas**

Para formulaciones determinista y determinista-probabilista de la ecuación de verificación los valores representativos de los agentes del terreno se definirán en cada estado de proyecto considerando:

- ◆ El valor nominal de los parámetros geométricos, definido en el apartado 4.2 de esta Recomendación.

- ◆ El valor nominal o característico de las propiedades del terreno en el estado de proyecto, definido en el apartado 4.3 de esta Recomendación.
- ◆ El valor nominal de las propiedades del medio físico, definido en el apartado 4.5. de esta Recomendación.
- ◆ El valor nominal de las propiedades de los parámetros de interacción suelo-estructura (p.e. ángulo de rozamiento entre paramento y terreno ( $\delta$ ), en general definido a partir de las características de las estructuras y de los valores nominales o característicos de las propiedades del terreno en dicho estado (Ver ROM 0.5-05).
- ◆ Los valores representativos de las variables de estado de los agentes climáticos que definen el estado meteorológico de proyecto, así como de los agentes oscilatorios o impulsivos de actuación simultánea en dicho estado de los que dependa el comportamiento del terreno, las presiones intersticiales, las fuerzas de arrastre y los empujes adicionales del terreno originados por los mismos (Ver la tabla 4.6.2.2 para definir el valor representativo a adoptar para cada uno de los agentes climáticos en cada condición de trabajo en función del agente climático considerado predominante, el apartado 4.6.2.1.1, subapartados c) Acciones debidas a los niveles de agua asociados a mareas y niveles fluviales y d) Acciones debidas al oleaje, el apartado 4.6.2.4.2. Formulación de las acciones debidas al maremoto y el apartado 4.6.4.4.3. Cargas de atraque).
- ◆ Los valores representativos en el estado de proyecto considerado del resto de los agentes y acciones de actuación simultánea sobre la estructura, los cimientos o la superficie del terreno que originan movimientos globales en el terreno o cuyos efectos son transmitidos por éste, con las reducciones admitidas, en su caso, para cargas actuando indirectamente a través del terreno o rellenos sin considerarse amplificación dinámica y efectos inerciales (Ver subapartados correspondientes a cada una de las acciones del apartado 4.6).

#### **b) Para formulaciones probabilistas**

Para formulaciones probabilistas de la ecuación de verificación, las acciones debidas al terreno se definirán por medio de funciones de distribución obtenidas como derivadas de las funciones de distribución de los agentes que las condicionan o de las que dependan en el ciclo de solicitud considerado. En general, cuando se trabaje en este formato de verificación, para la definición de las acciones del terreno, los parámetros geométricos y las propiedades del medio físico se considerarán de carácter determinista, y se definirán a través de valores nominales, de igual forma que lo dispuesto para las formulaciones determinista y determinista-probabilista.

Para un determinado comportamiento del terreno asociado a una fase de proyecto y un ciclo de solicitud, en general las propiedades del terreno que se utilicen para determinar las acciones del terreno se considerarán también de carácter determinista, definidas a través de valores nominales, sin perjuicio de que puedan definirse a través de su función de distribución, si es posible disponer de ella, cuando su variabilidad pueda considerarse relevante a estos efectos (Ver apartado 4.3.2.). De igual forma se definirán los parámetros de interacción suelo-estructura cuando puedan derivarse de las propiedades del terreno.

Los agentes climáticos que inciden en el comportamiento y las propiedades del terreno o cuyos efectos sobre la estructura o el cimiento son transmitidos por éste durante el ciclo de solicitud analizado se introducirán en la formulación de las acciones del terreno a través de las funciones de distribución conjunta de las variables de estado que caracterizan a dichos agentes en dicho ciclo o, simplificada, por las funciones de distribución marginales y condicionadas de los mismos, de acuerdo con lo dispuesto en el apartado 4.6.2.1 de esta Recomendación. De igual forma, el resto de agentes o acciones que inciden en el comportamiento del terreno o cuyos efectos son transmitidos por éste se definirán, en el caso de que su variabilidad sea relevante en el ciclo de solicitud considerado, por las correspondientes funciones de distribución definidas para cada agente o acción en dicho ciclo (Ver definición probabilística de los agentes y acciones en los subapartados del apartado 4.6 de esta Recomendación correspondientes a cada agente o acción).

#### 4.6.3.1. Formulación de las acciones debidas o transmitidas por el terreno ( $Q_t$ )

En la ROM 0.5-05 se dan los criterios y métodos para la determinación de las acciones debidas o transmitidas por el terreno o los rellenos artificiales al actuar directa o indirectamente sobre distintas tipologías estructurales, tomando en consideración todos los factores que inciden en su valoración. Para el caso particular de las obras de atraque y amarre serán aplicables los siguientes criterios:

- ◆ *Empujes debidos a la actuación directa de un macizo de terreno semi-infinito sobre elementos estructurales lineales de pared rígida, de longitud importante en relación con su dimensión transversal, con el desplazamiento lateral no coartado ( $Q_{t,11}$ )*

En este caso, se considerará que pueden producirse los empujes activo y pasivo, asociados a estados límite de rotura del terreno, el empuje al reposo e, incluso, empujes intermedios en las diferentes zonas de la estructura en función de la dirección del desplazamiento de ésta en relación con el terreno y de la amplitud del mismo. A su vez, dependiendo del estado de proyecto y del ciclo de sollicitación considerados, así como del modo de fallo analizado, para un mismo elemento estructural podrá darse que actúa en la misma zona uno y otro tipo de empuje. En el apartado 3.7 de la ROM 0.5-05 se definen los empujes a considerar en cada caso para la verificación de cada modo de fallo en elementos estructurales de contención de tierras y la forma de determinarlos en función del tipo y geometría del terreno, de su comportamiento, de la distribución de presiones existentes en el mismo y de la geometría y características del trasdós de la estructura (tipo de material, trasdós quebrado, bandejas, pantallas con plataforma superior, ...), así como la influencia que pueden tener en los mismos la existencia de elementos estructurales próximos al trasdós que puedan ejercer un efecto de apantallamiento de los empujes por interferir en las superficies de rotura del terreno (cimentación de vigas carril o plataformas mediante pilotes, ...).

Las obras de atraque fijas cerradas (muelles), tanto de gravedad como pantallas o recintos que puedan considerarse de pared rígida, responden a esta situación. En general, para la verificación de la estructura principal de este tipo de obras respecto a los modos de fallo asociados a estados límites últimos correspondientes a la pérdida de equilibrio estático y a los geotécnicos o de inestabilidad externa se considerará la actuación de empujes activos y pasivos, salvo que el suelo de cimentación sea rígido o poco deformable. Para la verificación de modos de fallo estructurales o de inestabilidad interna puede considerarse, en los casos en que sea más desfavorable, la actuación del empuje al reposo. Para modos de fallo asociados a estados límite de servicio puede ser necesario considerar situaciones intermedias que pueden definirse mediante el análisis de la interacción suelo-estructura, tomando en consideración la variación de los empujes en función de la deformación del terreno (Ver apartado 3.7.11.2. de la ROM 0.5-05). Así mismo, en la parte 4 de la ROM 0.5-05, en los capítulos correspondientes a cada una de las tipologías de las obras de atraque y amarre, se dan recomendaciones más detalladas al respecto.

- ◆ *Empujes debidos a la actuación directa de un macizo de terreno semi-infinito sobre elementos estructurales lineales de pared rígida, de longitud importante en relación con su dimensión transversal, con el desplazamiento lateral coartado por apoyos exteriores o anclajes ( $Q_{t,12}$ )*

Cuando un macizo de terreno que actúa sobre una estructura de pared rígida comprende zonas cuyo desplazamiento lateral esta limitado (p.e. en obras de atraque fijas abiertas de pilotes, las estructuras de contención de tierras de gravedad que sirven de unión con la plataforma en la coronación del talud, en las que pueda considerarse que los desplazamientos en coronación están coartados por apoyar la plataforma), se producen modificaciones de los empujes unitarios debidos al terreno respecto al estado de rotura activo, en general en el sentido de que aumenta el valor de la resultante de los empujes con una redistribución de los empujes unitarios, aumentando en las zonas próximas a los puntos fijos y reduciéndose en las zonas alejadas de éstos.

De forma general, las leyes de empujes podrán obtenerse resolviendo el problema de interacción suelo-estructura (Ver apartado 3.7.11.2. de la ROM 0.5-05). En la literatura técnica especializada pueden encontrarse aproximaciones teóricas de validez reconocida para algunos casos concretos.



- ◆ *Empujes debidos a la actuación directa de un macizo de terreno semi-infinito sobre elementos estructurales lineales de pared flexible, de longitud importante en relación con su dimensión transversal, con el desplazamiento lateral coartado o no coartado por apoyos exteriores o anclajes ( $Q_{t,13}$ )*

De igual forma que para el caso de elementos estructurales de pared rígida con desplazamiento lateral coartado, la posibilidad de deformación de las estructuras de pared flexible, con o sin el desplazamiento lateral coartado por apoyos exteriores o anclajes (p.e. obras de atraque fijas cerradas (muelles) de pantallas de tablestacas ancladas o no), modifica las condiciones de rotura del terreno que actúa sobre dicha estructura respecto a las definidas para los estados activo y pasivo. La flexibilidad de la pared permite la descompresión del terreno en sus proximidades, dando como resultado, respecto a los estados citados, aumentos de empujes unitarios en las proximidades de los apoyos, con disminuciones en las zonas intermedias.

El cálculo teórico de los estados de rotura del terreno y de los empujes asociados no es simple, siendo necesarios estudios de interacción suelo-estructura en los que se haga intervenir la capacidad de deformación de la pared conjuntamente con la del terreno (modelos de elementos finitos o modelos de muelles como el indicado en el apartado 3.7.11.2 de la ROM 0.5-05). No obstante, para algunos tipos estructurales, es admisible considerar simplificadaamente aproximaciones a leyes de empujes obtenidas mediante métodos empíricos de validez reconocida para los mismos (Método de Blum, de la Carga Portante de Brinch-Hansen, Danés, Rowe, Tschbotarioff, ...). Así mismo en la tabla 3.7.31. de la ROM 0.5-05 se incluyen aproximaciones de las leyes de empujes del terreno que pueden adoptarse en el caso de pantallas flexibles con anclajes múltiples prácticamente indeformables, con terreno homogéneo en el trasdós.

- ◆ *Empujes debidos al terreno en situación confinada, actuando directamente sobre los elementos estructurales ( $Q_{t,14}$ )*

En aquellos casos en que se presenten disposiciones estructurales próximas y opuestas (p.e. obras de atraque de recintos, celdas de obras de cajones) que contengan o confinen un relleno, también se producen empujes debidos al terreno confinado que difieren de los empujes activos al estar impedido el desarrollo completo de la superficie de rotura correspondiente a dicho estado.

Los empujes del terreno a considerar en estos casos se definen en los apartados 3.7.9.1. Empuje activo en muros paralelos y 3.7.9.4. Efecto silo de la ROM 0.5-05.

- ◆ *Empujes debidos a la actuación directa del terreno sobre elementos estructurales aislados, con dimensiones longitudinal y transversal del mismo orden de magnitud ( $Q_{t,15}$ )*

Sin perjuicio de lo que específicamente pueda señalar a estos efectos las sucesivas Recomendaciones de la Serie 2 correspondientes a las distintas tipologías estructurales u otros documentos ROM, en los elementos estructurales de pequeña anchura (p.e. pilotes o pilas en obras de atraque fijas abiertas o en duques de alba), en general, salvo estudios de mayor detalle, es admisible calcular aproximadamente los empujes debidos al terreno en aquellas situaciones en las que pueda considerarse que el terreno se encuentra en estados próximos a rotura, como los empujes unitarios por metro lineal, activos o pasivos, correspondientes a estructuras lineales de longitud importante, multiplicados por 3 veces la dimensión del elemento estructural aislado en la dirección perpendicular a la del empuje, con el objeto de tomar en consideración la formación en estos casos de cuñas de rotura del terreno espaciales prismáticas (Ver apartado 3.6.8. de la ROM 0.5-05). Por tanto, esta aproximación será aplicable preferentemente para la verificación de modos de fallo asociados a estados límite últimos.

Otros procedimientos para definir los empujes del terreno sobre estructuras aisladas, aplicables tanto para la verificación de modos de fallo asociados a estados límite últimos como de servicio, son los métodos de análisis que toman en consideración la interacción suelo-estructura. En el apartado 3.6.9. de la ROM 0.5-05 se propone uno de estos métodos en el que las estructuras aisladas (pilotes) se representan mediante una viga elástica y el terreno mediante una serie de resortes cuyas constantes elásticas definen las relaciones carga-desplazamiento en cada punto.

Para alineaciones de elementos estructurales aislados situados próximos unos a otros de forma que puedan interferirse las cuñas de rotura del terreno (separación entre ejes del orden de 3 veces la dimensión del elemento estructural en la dirección perpendicular a la del empuje o una separación menor) (p.e. pantalla discontinua formada por pilotes), los empujes totales podrán aproximarse considerando que son equivalentes a los que se producen en una estructura lineal ficticia de longitud igual a  $L_t + 2b_t$ , siendo  $L_t$  la distancia entre ejes de elementos extremos y  $b_t$  el ancho del área equivalente al conjunto de elementos en la dirección del empuje que iguala la suma de áreas individuales de los elementos estructurales en dicha dirección ( $b_t = \Sigma A_i / L_t$ ); siempre y cuando el empuje así obtenido distribuido entre los distintos elementos estructurales no supere al calculado aisladamente.

◆ *Acciones que actúan sobre las estructuras debidas a movimientos globales de los suelos ( $Q_{t,2}$ )*

Se incluyen en este apartado las acciones de diversos tipos producidas por la oposición que ejerce una estructura resistente a los movimientos de una masa de terreno debidos a causas independientes de la propia estructura. Dichas acciones son, en consecuencia, función de la deformación relativa terreno/estructura y son generalmente relevantes cuando se presentan suelos sueltos o fuertemente compresibles. Estas acciones también se denominan efectos parásitos. Los efectos parásitos más comunes son relevantes principalmente para las estructuras pilotadas, por lo que debe tomarse en consideración su posible ocurrencia y evaluar su importancia en las obras de atraque fijas abiertas de pilotes o pilas y en las cerradas de pantallas con plataforma superior de descarga sustentada por pilotes. Los efectos parásitos más relevantes son:

■ Rozamiento negativo ( $Q_{t,21}$ )

La situación de rozamiento negativo puede considerarse que se presenta cuando se producen asientos diferenciales de la masa de suelo con respecto a la estructura a partir de 1 cm, debidos entre otras a las siguientes causas:

- Terrenos en fase de consolidación por su propio peso.
- Compactaciones artificiales o técnicas de mejora posteriores a la construcción de la estructura.
- Rebajamientos del nivel freático o modificación artificial de las presiones intersticiales.
- Asientos debidos a la actuación de cargas en superficie.
- Asientos inducidos por el sismo.

Esta acción se define como una carga vertical por unidad de superficie, actuando en todo el perímetro de la estructura en contacto con el terreno. La descripción y cuantificación detallada de la misma se incluye en el apartado 3.6.3.4.1 de la ROM 0.5-05.

■ Empujes horizontales causados por sobrecargas verticales en superficie ( $Q_{t,22}$ )

Este tipo de empujes horizontales puede considerarse que se presenta cuando se producen movimientos del terreno perpendiculares a la directriz de la estructura, debidos a compresiones verticales no uniformes del mismo, causados generalmente por la actuación en las proximidades de cargas asimétricas (p.e. considerando una distribución asimétrica de la sobrecarga de estacionamiento y almacenamiento respecto a la estructura analizada). Normalmente no será necesario considerar este efecto cuando la resistencia al corte sin drenaje del suelo ( $s_u$ ) sea superior al valor siguiente:

$$s_u \geq q \frac{DH}{a}$$

siendo:

- $q$  : presión vertical aplicada en superficie.
- $D$  : diámetro del pilote o pila.
- $H$  : espesor del estrato de suelo blando.
- $a$  : 5 m<sup>2</sup> (valor aproximado).



Esta acción se define como una carga horizontal por unidad de superficie, considerando que actúa sobre la estructura en una anchura virtual función, entre otros factores, del ancho de la zona cargada, del diámetro o ancho de la estructura en la dirección perpendicular el empuje y de los espaciamientos existentes entre los distintos elementos estructurales. La descripción y cuantificación detallada de la misma se incluye en el apartado 3.6.3.4.2 de la ROM 0.5-05.

■ Empujes horizontales sobre pilotes en talud ( $Q_{t,23}$ )

En aquellos casos en que estructuras enterradas retengan o atraviesen masas de terreno potencialmente inestables o en movimiento (p.e. talud de derrame de tierras en una obra de atraque fija abierta de pilotes o de pilas) deberá tomarse en consideración la existencia de empujes horizontales parásitos ocasionados por el terreno sobre la estructura en el momento de la inestabilidad.

Esta acción se define como una carga horizontal aplicada a la pila o pilote a una determinada profundidad enterrada del mismo dentro de la masa deslizante definida por la línea de rotura crítica que haya conducido a su determinación (algunos métodos de cálculo consideran que el punto de aplicación se localiza a 2/3 de la profundidad enterrada del pilote o pila dentro de la masa deslizante). Esta carga total puede admitirse que se distribuye de manera linealmente creciente con la profundidad desde la superficie exterior de la masa deslizante hasta la intersección con la línea de deslizamiento. La descripción y la cuantificación detallada de esta acción pueden realizarse de acuerdo con lo dispuesto en el apartado 3.6.3.4.3 de la ROM 0.5-05.

La estructura por debajo de la línea de rotura se considerará sometida a los empujes debidos a la actuación directa del terreno sobre elementos estructurales aislados ( $Q_{t,15}$ ).

◆ Empujes adicionales debidos a la transmisión a través del terreno de acciones que actúan sobre las estructuras, los cimientos o la superficie del suelo y cuyo origen no está ligado al terreno ( $Q_{t,3}$ )

La cuantificación de los empujes adicionales debidos a la transmisión a través del terreno de acciones que actúan directamente sobre el mismo o a través de otras estructuras en los estados activo, pasivo y en reposo se incluye en los apartados 3.7.5 a 3.7.8 de la ROM 0.5-05 respectivamente.

Las leyes de empujes adicionales debidas a esta causa en los casos de estructuras lineales de pared rígida con desplazamiento lateral coartado y en las de pared flexible pueden obtenerse resolviendo el problema de interacción suelo-estructura, integrando las cargas actuantes sobre el terreno y la estructura, de acuerdo con lo dispuesto en esta Recomendación para la determinación de los empujes directos del terreno sobre este tipo de estructuras (Ver apartado 3.7.1.1.2. de la ROM 0.5-05). En la literatura técnica especializada pueden encontrarse aproximaciones teóricas de validez reconocida para algunos casos concretos.

Así mismo los empujes adicionales a considerar en los caso de terreno en situación confinada se definen en los apartados 3.7.9.1. Empuje activo en muros paralelos y 3.7.9.4. Efecto silo de la ROM 0.5-05.

#### 4.6.4. Agentes de uso y explotación ( $q_v$ )

Los agentes de uso y explotación que afectan a una obra de atraque y amarre son aquéllos asociados a la normal operativa y uso de la obra tanto por parte del buque como de la mercancía, del pasajero y de los modos de transporte terrestre, así como a las distintas operaciones portuarias necesarias para el embarque y desembarque de pasajeros y para la manipulación de las mercancías y su transferencia entre modos de transporte.

En función de su origen se diferencian los siguientes agentes de uso y explotación:

- ◆ Estacionamiento y almacenamiento de mercancías ( $q_{v,1}$ ).
- ◆ Manipulación de mercancías y embarque y desembarque de pasajeros ( $q_{v,2}$ ).
- ◆ Tráfico terrestre ( $q_{v,3}$ ).
- ◆ Operaciones de los buques ( $q_{v,4}$ ).

Los agentes de uso y explotación tienen el carácter de variables en los estados representativos tanto de los ciclos de solicitud asociados a condiciones extremas (en general condiciones de inoperatividad de la instalación de atraque) como en los ciclos de solicitud asociados a la normal explotación de la instalación de atraque (condiciones de trabajo operativas). Asimismo, los agentes de uso y explotación se considerarán de carácter permanente en los estados representativos de los ciclos de solicitud asociados a la presentación de un agente extraordinario o insólito (condiciones de trabajo excepcionales).

Estos agentes no son excluyentes y por tanto compatibles entre sí, salvo que no puedan actuar simultáneamente debido a razones operativas o por ocupar el mismo espacio físico <sup>(29)</sup>. A su vez, dado que las cargas que definen a estos agentes son, en general, cargas compuestas formadas por la actuación simultánea de varios agentes que inciden sobre ellos (particularmente de los agentes del medio físico), puede considerarse que los agentes de uso y explotación son normalmente agentes dependientes, estando correlacionados entre sí y con los agentes que inciden en su cuantificación.

#### 4.6.4.1. Estacionamiento y almacenamiento de mercancías ( $q_{v,1}$ )

El agente estacionamiento y almacenamiento de mercancías está asociado fundamentalmente a los pesos de las mercancías y suministros depositados en las áreas de operación y almacenamiento en las que se divide la obra de atraque y amarre en planta, en las condiciones de depósito previstas.

Los parámetros que definen a este agente con carácter excluyente son:

- ◆ Sobrecarga vertical uniformemente repartida ( $q_{v,1r}$ ).
- ◆ Combinación de cargas concentradas verticales ( $q_{v,1p}$ ).

sin perjuicio de las cargas horizontales simultáneas, uniformes o concentradas, que correspondan, derivadas de la actuación del viento sobre las mercancías almacenadas.

Su distribución espacial se considera libre, limitada únicamente por su compatibilidad con las condiciones de explotación establecidas para la obra de atraque y amarre. Se adoptará aquella que produzca los efectos más desfavorables para el modo de fallo analizado.

Las sobrecargas y las cargas concentradas definidas no se consideran de actuación simultánea. La que debe considerarse en una ecuación de verificación depende del tipo de obra y del modo de fallo considerado. En general, las sobrecargas repartidas se tomarán en consideración para la verificación de modos de fallo “globales” como los correspondientes a la pérdida del equilibrio estático o los geotécnicos o de inestabilidad externa, independientemente de la tipología estructural. Por el contrario, la combinación de cargas puntuales se tomará en consideración para la verificación de modos de fallo “locales”, como por ejemplo los estructurales o de inestabilidad interna, particularmente en estructuras fijas abiertas y obras de pantallas.

En general, tanto para las formulaciones determinista o determinista-probabilista como probabilistas, las cargas y sobrecargas de estacionamiento y almacenamiento se definirán a través de valores nominales o representativos, normalmente no determinados de forma estadística sino en base a los límites operativos establecidos por el Promotor para cada área tomando en consideración las reglas y procedimientos de manipulación y transporte de las mercancías y los criterios de explotación, ambientales, legales o de seguridad que se consideren para la obra de atraque y amarre, así como la experiencia de explotación existente localmente para los diferentes usos de la obra de atraque y amarre y tipo de mercancía manipulada. Con carácter general se admitirá que el valor característico de estas cargas y sobrecargas es una estimación prudente del valor máximo que las mismas pue-

(29) En cada uno de los apartados de esta Recomendación en los que se definen los diferentes agentes de uso y explotación se incluyen simplificaciones admisibles sobre la actuación simultánea de los diferentes agentes de uso y explotación, sobre la base de condiciones usuales de explotación portuaria, con el objeto de ayudar al proyectista a obtener las combinaciones más desfavorables para cada modo de fallo, reduciendo y sistematizando toda la casuística posible.

den alcanzar en la fase de proyecto considerada o bien, en su caso, de los límites establecidos en el reglamento de explotación de la instalación. A falta de análisis más detallados sobre la base de la experiencia en el emplazamiento, el resto de valores representativos podrá obtenerse considerando que la función de distribución a la que responden estas cargas es una función normal de media el 80% del valor nominal y coeficiente de variación 0,15. A falta de datos estadísticos, también podrá utilizarse esta función de distribución en las formulaciones probabilistas de las ecuaciones de verificación.

Cuando se disponga de una base estadística obtenida de instalaciones similares que permita la determinación de la función de distribución, podrá utilizarse dicha función en las formulaciones probabilistas de las ecuaciones de verificación. En formulaciones deterministas o determinista-probabilistas, en este caso se adoptará como valor característico el correspondiente al cuantil de la probabilidad de no excedencia del 95%.

*Comentario: Recientes estudios estadísticos realizados en las principales terminales de contenedores en España han permitido estimar las siguientes funciones de distribución de los pesos de las columnas de contenedores (no vacíos) en función de la altura de apilamiento:*

1. altura: Función normal.  $N(\bar{x}, \sigma) = N(190kN, 40kN)$
2. alturas: Función normal.  $N(2\bar{x}, \sqrt{2}\sigma)$
3. alturas: Función normal.  $N(3\bar{x}, \sqrt{3}\sigma)$
4. alturas: Función normal.  $N(4\bar{x}, \sqrt{4}\sigma)$
5. alturas: Función normal.  $N(5\bar{x}, \sqrt{5}\sigma)$

*Estos estudios han mostrado que dicha función de distribución puede considerarse representativa tanto de los contenedores de 20' como de 40', al no ser significativas las diferencias existentes entre los parámetros estadísticos obtenidos correspondientes a cada tipo de contenedores. Por dicha razón, para la cargas de estacionamiento y almacenamiento puede adoptarse idénticas funciones de distribución, considerando del lado de la seguridad para las sobrecargas que éstas son debidas a contenedores de 20' ( $6,06 \times 2,44 \times 2,44 \text{ m}^3$ ) y para las cargas concentradas que son transmitidas por elementos de apoyo de esquina ( $0,178 \times 0,172 \text{ m}^2$ ), considerando los contenedores apilados en bloque (4 esquinas juntas).*

A partir de dichas hipótesis los valores representativos de las cargas y sobrecargas de estacionamiento y almacenamiento para la verificación de modos de fallo adscritos a estados límite últimos se consignan en la tabla 4.6.4.1. Del lado de la seguridad, el valor de combinación fundamental se considerará igual al valor característico.

Para la verificación de modos de fallo adscritos a estados límite de servicio en los que el tipo de combinación de acciones aplicable para dicha verificación en cada condición de trabajo sea la combinación poco probable o fundamental se utilizarán asimismo los valores representativos consignados en la tabla 4.6.4.1. Para la verificación de modos de fallo adscritos a estados límite de servicio en los que el tipo de combinación de acciones aplicable sea la combinación frecuente o cuasi-permanente se adoptarán como valores representativos de las sobrecargas de estacionamiento y almacenamiento los valores frecuentes o cuasi-permanentes definidos en dicha tabla para condiciones excepcionales.

Para valorar la operatividad de la instalación, no se consideran modos de parada operativa asociados a las cargas de estacionamiento y almacenamiento. En ausencia de información estadística suficiente y fiable, los valores nominales de las sobrecargas y cargas de estacionamiento y almacenamiento a considerar para el proyecto de obras de atraque y amarre son las siguientes:

#### **a) Sobrecargas repartidas**

Una vez conocidos los usos y requerimientos operativos y funcionales establecidos por el Promotor para la obra de atraque y amarre, así como las condiciones de explotación de la instalación, los valores nominales de las sobrecargas de estacionamiento y almacenamiento para la fase de servicio se obtendrán a través de la siguiente formulación general, siempre que no se hayan fijado límites operativos o no se hayan previsto instalaciones específicas de almacenamiento como depósitos, silos, etc, de dimensiones definidas. En el caso de que se hayan fijado valores límites de explotación para las sobrecargas de estacionamiento y almacenamiento o se hayan previsto instalaciones específicas de almacenamiento, estos valores tendrán la consideración de valores nominales.

**Tabla 4.6.4.1. Valores representativos de las cargas y sobrecargas de estacionamiento y almacenamiento (Para la verificación de modos de fallo adscritos a estados límite últimos)**

CONDICIÓN DE TRABAJO <sup>1)</sup>	SIN BASE ESTADÍSTICA				CON BASE ESTADÍSTICA			
	Valor característico ( $q_{v,1k}$ )	Valor de combinación ( $\Psi_0 q_{v,ik}$ )	Valor frecuente ( $\Psi_1 q_{v,ik}$ )	Valor cuasi-permanente ( $\Psi_2 q_{v,ik}$ )	Valor característico ( $q_{v,1k}$ )	Valor de combinación ( $\Psi_0 q_{v,ik}$ )	Valor frecuente ( $\Psi_1 q_{v,ik}$ )	Valor cuasi-permanente ( $\Psi_2 q_{v,ik}$ )
Condiciones de trabajo Operativas (CT1) <sup>2)</sup>	Valor nominal	Valor nominal	—	—	Cuantil del 95% de la función de distribución	Cuantil del 95% de la función de distribución	—	—
Condiciones de trabajo Extremas (CT2)	—	Valor nominal	—	—	—	Cuantil del 95% de la función de distribución	—	—
Condiciones de trabajo Excepcionales no sísmicas (CT3,1 y CT3,2) <sup>3)</sup>	—	—	0.95 x (Valor nominal)	0.80 x (Valor nominal)	—	—	Cuantil del 85% de la función de distribución	Cuantil del 50% de la función de distribución
Condiciones de trabajo extremas o excepcionales por presentación de una acción Sísmica (CT3,31 y CT3,32)	—	—	—	0.80 x (Valor nominal)	—	—	—	Cuantil del 50% de la función de distribución

**Notas**

- 1) En cada condición de trabajo se considerará simultáneamente la carga horizontal que corresponda derivada de la actuación del viento sobre las mercancías almacenadas, calculada de acuerdo a lo señalado en esta Recomendación, adoptando como valores representativos de la velocidad y dirección del viento los correspondientes al estado de proyecto analizado y como altura de las mercancías sobre la que actúa el viento la que le corresponda a cada valor representativo de la carga vertical, considerando que ésta se reduce en igual proporción que éste respecto al valor nominal. Por ejemplo, si las condiciones de trabajo normales operativas están definidas por un valor umbral de velocidad del viento en una determinada dirección se adoptará dicha velocidad y dirección del viento. En condiciones extremas, para probabilidades de fallo menores del 5% se adoptará la velocidad del viento en la dirección considerada correspondiente a un periodo de retorno de 50 años o de 5 años respectivamente con las consideraciones señaladas para el caso de variables direccionales, dependiendo si el viento es el agente climático predominante que define el estado meteorológico de proyecto considerado o no es el predominante pero es independiente de éste (Ver tabla 4.6.2.2). En ambos casos la altura de las mercancías a adoptar será la que corresponde al valor nominal de las cargas verticales.
- 2) No se consideran modos de parada operativa asociados a las cargas de estacionamiento y almacenamiento, aunque sí que debe considerarse la actuación simultánea de dichas acciones en la verificación de la obra en cualquiera de las condiciones de trabajo operativas que se analicen (operación de atraque, permanencia de buques, ...). En esos casos no se considerará que las cargas y sobrecargas de estacionamiento y almacenamiento son las cargas variables predominantes de la combinación de acciones al haberse adoptado el valor de combinación igual al valor característico.
- 3) Para la verificación de modos de fallos adscritos a estados límite últimos en condiciones de trabajo excepcionales (CT3,1 y CT3,2) se adoptará el valor frecuente o el valor cuasi-permanente en función de que las cargas de estacionamiento y almacenamiento se consideren o no las cargas variables predominantes para el modo de fallo analizado.

◆ Para todos los usos, excepto contenedores

$$q_{v,1rk} = 0,8 \cdot \gamma_{ap} \cdot H_{a,max}$$

siendo:

$\gamma_{ap}$  : Peso específico aparente de la mercancía o suministros que van a estacionarse o almacenarse en la obra de atraque, considerando tanto la naturaleza y tipo de mercancía como su forma de presentación y, en su caso, elemento de transporte, en las condiciones medioambientales más desfavorables. Para materiales con poca capacidad de drenaje, situados a la intemperie o regados con asiduidad deberá utilizarse el peso específico saturado en el metro superior, salvo que existan experiencias locales que apoyen otra hipótesis. A falta de otros datos, podrán tomarse para las mercancías más usuales en zonas portuarias, tanto a granel como envasadas o ubicadas en diferentes elementos de transporte (contenedores,

semirremolques, etc.), los valores de pesos específicos aparentes consignados en la tabla 4.6.4.2.

- $H_{a,max}$  : Altura máxima de estacionamiento o almacenamiento de la mercancía o suministro. A falta de prescripciones específicas del Promotor, el Proyectista fijará justificadamente la altura máxima de estacionamiento y almacenamiento en base a las condiciones de explotación establecidas para la zona y área considerada, tomando en consideración fundamentalmente:
- La zona considerada y el uso de la misma.
  - La naturaleza y tipo de mercancía o suministro, así como su forma de presentación.
  - Las características de los equipos e instalaciones de manipulación.
  - El lugar de almacenamiento (explanadas exteriores o instalaciones específicas (tinglados, depósitos, muros de retención,...)).
  - El talud natural de los graneles sólidos ( $\text{ctg } \phi$ , siendo  $\phi$  el ángulo de rozamiento interno del material) en relación con el espacio disponible en planta (Ver tabla 4.6.4.2).

Los valores de este parámetro en explanadas exteriores, considerando condiciones usuales de explotación de cada mercancía, se consignan en la tabla 4.6.4.3.

◆ *Para usos de contenedores*

- $q_{v,1rk} = 15 \text{ kN/m}^2$ , para contenedores vacíos apilados en hasta 4 alturas.
- $q_{v,1rk} = 18 \text{ kN/m}^2$ , para contenedores llenos apilados en 1 altura.
- $q_{v,1rk} = 30 \text{ kN/m}^2$ , para contenedores llenos apilados en 2 alturas.
- $q_{v,1rk} = 45 \text{ kN/m}^2$ , para contenedores llenos apilados en 3 alturas.
- $q_{v,1rk} = 60 \text{ kN/m}^2$ , para contenedores llenos apilados en 4 alturas.
- $q_{v,1rk} = 75 \text{ kN/m}^2$ , para contenedores llenos apilados en 5 alturas.

Simultáneamente con las sobrecargas repartidas verticales y con la misma distribución espacial que éstas se considerará una sobrecarga repartida horizontal debida a la acción del viento actuante sobre las mercancías estacionadas o almacenadas, adoptando como valor representativo de la velocidad del viento en magnitud y dirección el correspondiente al estado de proyecto considerado (Ver nota de la tabla 4.6.4.1). Las cargas de viento sobre las mercancías estacionadas o almacenadas se determinarán de acuerdo con lo dispuesto en los apartados 3.2.2.2 a 3.2.2.5 de la ROM 0.4-95. Las superficies expuestas al viento se fijarán de forma compatible con las alturas de estacionamiento o almacenamiento asociadas con los distintos valores representativos de las sobrecargas verticales.

Con los valores nominales de las sobrecargas verticales se adoptarán las siguientes alturas:  $0,8H_{a,max}$  para todos los usos excepto contenedores y altura de apilado para usos de contenedores. Con el resto de valores representativos de las sobrecargas verticales se considerará que la altura de apilamiento o almacenamiento se reduce en igual proporción que la de estos valores respecto al valor nominal.

Para las fases de construcción, reparación y desmantelamiento, se adoptarán como valores nominales de las sobrecargas de estacionamiento y almacenamiento los compatibles con las necesidades de estacionamiento o acumulación de materiales previstas durante los procesos constructivos, de reparación o desmantelamiento.

◆ *Sobrecargas verticales mínimas*

No obstante lo anterior, en previsión de posibles variaciones en las condiciones de utilización y criterios de explotación de la obra de atraque y amarre durante las diferentes fases de proyecto, es recomendable que se adopten como mínimo como valores nominales de las sobrecargas de estacionamiento y almacenamiento los consignados en la tabla 4.6.4.4 en función de las fases de proyecto y, en el caso de la fase de servicio, de los usos y sistemas de manipulación genéricos asignados a la obra de atraque y amarre. La verificación de la obra con la sobrecarga mínima no excluirá su comprobación con sobrecargas mayores surgidas de la concepción del proyecto.

**Tabla 4.6.4.2. Pesos específicos aparentes y ángulos de rozamiento interno de mercancías y suministros usuales estacionados o almacenados en zonas portuarias, según forma de presentación**

GRANELES	$\gamma_{ap}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	MERCANCÍAS APILADAS	$\gamma_{ap}$ (kN/m <sup>3</sup> )
GRANELES SÓLIDOS				
MINERALES			MINERALES	
Alúmina	17	35	Bauxita (en sacos)	9
Mineral de aluminio (bauxita)	14	50(hum)/28(sec)	Mineral de cromo (en cajas)	25
Mineral de cobre (piritas)	26	45	Mineral de manganeso (en sacos)	15
Mineral de cromo	26	40	Mineral de níquel (en sacos)	16,5
Mineral de estaño (casiterita)	20	38	Mineral de níquel (en barriles)	14,5
Mineral de hierro (limonita y magnetita)	30	40	PRODUCTOS METALÚRGICOS Y SIDERÚRGICOS	
Mineral de magnesio	15	35	Acero (en barras)	30
Mineral de manganeso	24	45	Acero (en bobinas)	28
Mineral de plomo (galena)	28	40	Acero (en lingotes)	36
Mineral de zinc (blenda)	18	38	Acero (en planchas)	35
Pirita tostada	14	45	Aluminio (en lingotes)	12,5
PRODUCTOS QUÍMICOS			Cobre (en bobinas)	11
Abonos artificiales	12	40	Cobre (en lingotes)	35
Abonos minerales	12	30	Cobre (en planchas)	35
Azufre	12	40	Estaño (en lingotes)	34
Carburo	9	30	Zinc (en lingotes)	25
Fosfatos	11	35	PRODUCTOS QUÍMICOS	
Potasas	11	35	Azufre (en sacos)	10
COMBUSTIBLES SÓLIDOS			Azufre (en barriles)	7,5
Briquetas de lignito amontonadas	8	30	Fertilizantes (en sacos)	9
Carbón de leña en trozos	4	45	Potasas (en sacos)	10
Coque de hulla	5	40	COMBUSTIBLES SÓLIDOS	
Hulla en bruto húmeda	10	45	Briquetas de lignito (apiladas)	13
Hulla pulverizada	7	25	Turba (en pacas)	5
Hulla en residuos de lavadero	12	0	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	
Hulla en otras formas	8,5	30	Arena (en cajas)	6
Leña en astillas	2	45	Caolín (en sacos)	7,7
Leña troceada	4	45	Cemento (en sacos)	15
Lignito seco	7	35	Cemento (en barriles)	10
Lignito húmedo	10	40	Yeso (en sacos)	8,3
Serrín de madera asentado o húmedo	5	45	MADERAS Y DERIVADOS	
Serrín de madera suelto	2,5	45	Caucho (en balas, sacos o cajas)	5
Turba seca	1,0	35	Caucho (en láminas)	6
Turba húmeda	9,5	—	Corcho	2,4
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN			Madera blanda	7
Arena seca	17	30	Madera dura	10
Arena saturada	20	30	Papel (en bobinas)	15
Arena de pómez	7	35	Papel (en fardos)	11
Cal en polvo	13	25	Pasta de papel (balas prensadas)	6
Cal en terrón	13	45	Serrín (en sacos)	3
Caolín	9,5	35	Tableros	6,5
Cascote o polvo de ladrillos	13	35	Traviesas	7,7
Cemento en polvo	16	25	PRODUCTOS ALIMENTICIOS	
Cenizas volantes	14	25	Arroz (en barriles)	5,3
Clinker de cemento	15	30	Arroz (en sacos)	7
Escoria de alto horno granulada	12	25	Avena (en sacos)	4,3
Escoria de alto horno troceada	17	40	Azúcar (en sacos)	16
Escoria de alto horno machacada espumada	9,0	35	Bebidas (en barriles)	6
Granito labrado	13	35	Café (en sacos)	5,5
Grava seca	16	40	Carne congelada (en cajas)	4,8
Grava saturada	20	40		

**Pesos específicos aparentes y ángulos de rozamiento interno de mercancías y suministros usuales estacionados o almacenados en zonas portuarias, según forma de presentación (continuación)**

GRANELES		$\gamma_{ap}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	MERCANCÍAS APILADAS	$\gamma_{ap}$ (kN/m <sup>3</sup> )
GRANELES SÓLIDOS					
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN				PRODUCTOS ALIMENTICIOS	
Mármol labrado	13	35		Carne congelada (en sacos)	4,4
Piedra caliza (en rocas)	17	35		Carne en lata (en cajas)	6
Piedra partida	18	40		Cebada (en sacos)	6
Yeso y escayola	15	25		Centeno (en sacos)	6,3
PRODUCTOS DE DESECHO				Cocos (en cajas)	4
Basuras de demolición	13	35		Cocos (en sacos)	5,3
Escombros urbanos	6	—		Cítricos (en cajas)	4
Estiércol apelmazado	18	45		Haba de soja (en sacos)	7,2
Estiércol suelto	12	45		Harinas (en barriles)	6,6
Chatarra pesada	16	35		Harinas (en sacos)	8,5
Chatarra ligera	12	30		Huesos (en sacos)	6
PRODUCTOS ALIMENTICIOS				Leche condensada (en barriles)	5
Azúcar	10	35		Leche condensada (en cajas)	5
Carne congelada	3,5	—		Leche en polvo (en sacos)	5,3
Cereales:				Maiz (en sacos)	6,5
Arroz	6	25		Mantequilla (en barriles o cajas)	6
Avena	5	30		Pescado fresco o congelado (en cajas)	5
Cebada	6,5	25		Plátanos (en cajas)	2,6
Centeno	8	35		Queso (en cajas)	7
Maiz	7,5	25		Sal (en cajas)	7
Mijo	7	25		Sal (en sacos)	9
Trigo	7,5	25		Semillas de girasol (en cajas)	5
Colza	7	25		Semillas de girasol (en sacos)	4,8
Forrajes	1,7	—		Tapioca (en sacos)	6,5
Frutas y hortalizas	7,5	30		Té (en fardos)	3,5
Haba de soja	8,5	60		Trigo (en sacos)	6,5
Harina de cereal o soja	6	45		Tubérculos (en cajas)	4
Harina de pescado	8	45		Tubérculos (en sacos)	6
Hielo (en bloques)	8,5	—		Uvas (en cajas)	2,5
Huesos	4	—		Vegetales (en cajas)	6
Legumbres	8	30		Vegetales (en sacos)	5
Malta triturada	4	45		PRODUCTOS ANIMALES Y VEGETALES	
Pienso	5	45		Algodón (en balas)	3,7
Remolacha azucarera desecada y cortada	3	40		Esparto (en balas)	2,5
Sal común	12	40		Heno (en pacas)	3
Sal de roca	22	45		Heno (en balas)	7
Semillas de girasol	5,5	—		Lana (en balas prensadas)	13
Sémola	5,5	30		Pieles húmedas (en balas)	5,5
Tubérculos	7,5	30		Pieles secas (en balas)	2
PRODUCTOS VEGETALES				Pieles secas (en balas prensadas)	10
Lino	6	25		Tabaco (en pacas)	5,0
GRANELES LÍQUIDOS				PRODUCTOS PETROLÍFEROS	
PRODUCTOS PETROLÍFEROS				ACEITES	
Alquitrán	10-13	—		Productos petrolíferos (en barril)	5
Betún	14	—		VEHÍCULOS	
Crudo de petróleo	7,5-10	—		Vehículos a motor	2,5
Fueloil	8-10	—		Vehículos a motor (chatarra en jaulas)	10
Gasoil	8	—			
Gasolina	7,5	—			
Gases licuados (gas natural, metano,...)	5-7	—			
Keroseno	8,3	—			



**Pesos específicos aparentes y ángulos de rozamiento interno de mercancías y suministros usuales estacionados o almacenados en zonas portuarias, según forma de presentación (continuación)**

GRANELES	$\gamma_{ap}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)
<b>GRANELES LÍQUIDOS</b>		
<b>PRODUCTOS QUÍMICOS</b>		
Acido clorhídrico al 40%	12	—
Acido nítrico al 40%	12,5	—
Acido sulfúrico al 50%	14	—
Acetona	8	—
Alcohol etílico	8	—
Anilina	10	—
Bencina	7	—
Benzol	9	—
Sulfuro de carbono	13	—
<b>ACEITES</b>		
De creosota	11	—
De linaza	9,5	—
De minerales	9,3	—
De pescado	9	—
De ricino	9,7	—
Glicerol (glicerina)	12,3	—
Látex	10	—
Melazas	12,5	—
Vegetal	9,2	—
<b>VINOS, BEBIDAS Y DERIVADOS</b>		
Agua dulce	9,8	—
Agua salada	10,1	—
Cerveza	10,1	—
Leche	10,1	—
Vino	10	—

**Tabla 4.6.4.3. Alturas máximas usuales de apilamiento de mercancías y suministros en explanadas exteriores de áreas portuarias (considerando condiciones usuales de explotación) <sup>1)</sup>**

USOS	NATURALEZA Y TIPO DE MARCANCÍAS O SUMINISTROS	$H_{a,max}$ (en m)	
		En área de operación	En área de almacenamiento
COMERCIAL	GRANELES SÓLIDOS		
	Ordinarios o pulverulentos	3,00	10,00
	Pesados (minerales)	3,00	15,00
	MERCANCÍA GENERAL CONVENCIONAL		
	Paletizada	2,00	5,00
	No paletizada Ordinaria	3,00	7,00
	No paletizada Pesada	2,00	5,00
	En barriles	2,00	5,00
	Vehículos vacíos (sin instalación específica de almacenamiento)	1,50 (1 altura)	1,50 (1 altura)
	CONTENEDORES		
	Estacionamiento y almacenamiento sin plataforma o semiremolque	5,00 (2 alturas)	5,00-12,00 (2-5 alturas)
	SUMINISTROS PASAJEROS		
	Paletizados	2,00	—
	No paletizados	3,00	—



**Alturas máximas usuales de apilamiento de mercancías y suministros en explanadas exteriores de áreas portuarias (considerando condiciones usuales de explotación) <sup>1)</sup> (continuación)**

USOS	NATURALEZA Y TIPO DE MARCANCÍAS O SUMINISTROS	$H_{a,max}$ (en m)	
		En área de operación	En área de almacenamiento
PESQUERO	Pescado (en cajas) y suministros	2,50	2,50
NAÚTICO-DEPORTIVO	Suministros	2,00	2,50
INDUSTRIAL		3,00 <sup>2)</sup>	3,00 <sup>2)</sup>
MILITAR	Suministros	3,00	3,00
<b>Notas</b> 1) Las alturas máximas de apilamiento de mercancías y suministros consignadas en esta tabla son las usuales cuando se almacenan en explanadas exteriores sin instalaciones específicas de almacenamiento. En instalaciones específicas de almacenamiento (depósitos, tanques, silos ...) pueden alcanzarse alturas mayores de 20 -30 m. 2) Las alturas que se incluyen en esta tabla son de aplicación para obras de atraque de instalaciones dedicadas tanto a la construcción y reparación de buques como de plataformas offshore. Para otros usos industriales asociados con la recepción o salida de materias primas, así como de productos elaborados, coincidirán con las correspondientes establecidas para el uso comercial equivalente.			

**b) Cargas concentradas**

Las cargas concentradas de estacionamiento y almacenamiento dependen de los usos y requerimientos operativos y funcionales establecidos por el Promotor para la obra de atraque y amarre y, fundamentalmente, de los sistemas para el apoyo de las mercancías (p.e. durmientes), así como de los elementos de transporte (p.e. contenedores, semirremolques, etc.) que se prevea que utilicen la obra de atraque y amarre. Los valores nominales de dichas cargas coincidirán con los límites operativos fijados, en su caso, por el Promotor para la fase de servicio en función de las condiciones de explotación establecidas para la instalación, así como por el Promotor o por el Proyectista para las fases de construcción, reparación y desmantelamiento.

Con las cargas concentradas verticales de estacionamiento y almacenamiento no se considerarán cargas horizontales de actuación simultánea derivadas de la acción del viento sobre las mercancías estacionadas o almacenadas.

◆ **Cargas concentradas mínimas**

En el caso de que no se hayan fijado valores límites de explotación, se adoptarán para usos comerciales los siguientes valores nominales de las cargas concentradas mínimas de estacionamiento y almacenamiento en fase de servicio:

■ **Para graneles sólidos**

No se consideran cargas concentradas mínimas de estacionamiento y almacenamiento (están cubiertas por las de tráfico viario).

■ **Para mercancía general convencional**

En el área de operación

- Ordinaria:  $q_{v,1pk} = 400 \text{ kN}$ , con presiones de contacto de  $0,80 \text{ MPa}$
- Pesada:  $q_{v,1pk} = 900 \text{ kN}$ , con presiones de contacto de  $1,80 \text{ MPa}$

En el área de almacenamiento

- Ordinaria:  $q_{v,1pk} = 700 \text{ kN}$ , con presiones de contacto de  $1,50 \text{ MPa}$
- Pesada:  $q_{v,1pk} = 1.200 \text{ kN}$ , con presiones de contacto de  $2,00 \text{ MPa}$

y superficies de reparto cuadradas en todos los casos.

## ■ Para contenedores

En función de la altura de apilamiento establecida por el Promotor para cada una de las áreas, las cargas concentradas mínimas serán:

- $q_{v,1pk} = 150 \text{ kN}$ , con presiones de contacto de  $1,30 \text{ MPa}$  (equivale a contenedores vacíos de 40' apilados en bloque y 4 alturas).
- $q_{v,1pk} = 300 \text{ kN}$ , con presiones de contacto de  $2,60 \text{ MPa}$  (equivale a contenedores llenos de 40' apilados en bloque y en 1 altura).
- $q_{v,1pk} = 530 \text{ kN}$ , con presiones de contacto de  $4,60 \text{ MPa}$  (equivale a contenedores llenos de 40' apilados en bloque y en 2 alturas).
- $q_{v,1pk} = 710 \text{ kN}$ , con presiones de contacto de  $6,20 \text{ MPa}$  (equivale a contenedores llenos de 40' apilados en bloque y en 3 alturas).
- $q_{v,1pk} = 825 \text{ kN}$ , con presiones de contacto de  $7,20 \text{ MPa}$  (equivale a contenedores llenos de 40' apilados en bloque y en 4 alturas).
- $q_{v,1pk} = 880 \text{ kN}$ , con presiones de contacto de  $7,70 \text{ MPa}$  (equivale a contenedores llenos de 40' apilados en bloque y en 5 alturas).

**Tabla 4.6.4.4. Valores nominales mínimos de las sobrecargas de estacionamiento y almacenamiento en obras de atraque y amarre**

Diagrama de un muelle de atraque y amarre. Muestra una estructura de pilas y un muelle con una rampa. Se indican las cargas de operación ( $q_{v,1}$  OPERACIÓN) y almacenamiento ( $q_{v,1}$  ALMACENAMIENTO) sobre el muelle. El diagrama ilustra la configuración de los pilos y la rampa de acceso al agua.

EN LAS FASES DE CONSTRUCCIÓN, REPARACIÓN Y DESMANTELAMIENTO

		Operación <sup>1)</sup>		Almacenamiento <sup>1)</sup>	
		$q_{v,1rk}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	$H_a$ <sup>3)</sup> (m)	$q_{v,1rk}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	$H_a$ <sup>3)</sup> (m)
		10	2,5	10	2,5

EN LA FASE DE SERVICIO

USOS		SISTEMAS DE MANIPULACIÓN DE MERCANCÍAS	Área operación <sup>1)</sup>		Área almacenamiento <sup>1)</sup>	
			$q_{v,1rk}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	$H_a$ <sup>3)</sup> (m)	$q_{v,1rk}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	$H_a$ <sup>3)</sup> (m)
COMERCIAL	Graneles Líquidos	Sistemas continuos	10 <sup>4)</sup>	1,5	— <sup>5)</sup>	
		Sistemas discontinuos	20	2,5	30	4,0

**Valores nominales mínimos de las sobrecargas de estacionamiento y almacenamiento en obras de atraque y amarre (continuación)**

EN LA FASE DE SERVICIO									
USOS				SISTEMAS DE MANIPULACIÓN DE MERCANCÍAS	Área operación <sup>1)</sup>		Área almacenamiento <sup>1)</sup>		
					$q_{v,1rk}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$H_a$ <sup>3)</sup> (m)	$q_{v,1rk}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$H_a$ <sup>3)</sup> (m)	
COMERCIAL	Graneles sólidos	Ordinarios o pulverulentos		Sistemas continuos	10	1,5	100	8,0	
				Sistemas discontinuos	30	2,5			
		Pesados		Sistemas continuos	10	1,5	200	12,0	
				Sistemas discontinuos	50	2,5			
	Mercancía general	Carga convencional	Ordinaria	Sistemas discontinuos por elevación	30	2,5	60	5,5	
			Pesada		60	1,5	100	4,0	
		Contenedores		Sistemas discontinuos por elevación	20	2,5 <sup>6)</sup>	60	10 <sup>7)</sup>	
		Ro-Ro y Ferris		Medios rodantes	30	2,5	50	4,0	
				Medios rodantes + elevación					
		Multipropósito		Medios rodantes + elevación	30	2,5	100	8,0	
		Pasajeros	Ferris		Medios rodantes	10	1,5	50	4,0
					Medios rodantes + elevación	20	2,5		
	Cruceiros y otras			10	1,5	20	2,5		
PESQUERO					15	2,0	15	2,0	
NAÚTICO-DEPORTIVO		No accesibles al tráfico rodado			5	0,8	—	—	
		Accesibles al tráfico rodado			10	1,5	15	2,0	
INDUSTRIAL					100 <sup>8)</sup>	2,5	100 <sup>8)</sup>	2,5	
MILITAR					50	4,0	50	4,0	
Notas									
1) Las áreas de operación y almacenamiento se definen de acuerdo con lo dispuesto en el apartado 3.2.1.7 de esta Recomendación. Si durante la fase de redacción del proyecto el Promotor no determinara las condiciones de uso y explotación de la instalación se considerará únicamente la sobrecarga mínima correspondiente al área de almacenamiento, afectando a toda la obra de atraque y amarre.									
2) Las sobrecargas mínimas de estacionamiento y almacenamiento en las fases de construcción, reparación y desmantelamiento no serán de aplicación a las obras de atraque y amarre flotantes ni a las fijas que no sean accesibles al tráfico viario.									
3) Alturas de apilamiento a los efectos de definir las sobrecargas horizontales debidas a la actuación del viento sobre las mercancías estacionadas o almacenadas compatibles con las sobrecargas verticales mínimas consignadas en esta tabla.									
4) Las sobrecargas mínimas de estacionamiento y almacenamiento en la fase de servicio en obras de atraque y amarre para graneles líquidos, correspondiente al área de operación, no serán de aplicación a monoboyas, campos de boyas y otras obras flotantes que no sean accesibles al tráfico viario.									
5) En general, las obras de atraque y amarre para graneles líquidos manipulados mediante sistemas continuos carecen propiamente de un área de almacenamiento aneja a la obra de atraque (monoboya, campo de boya o pantalán discontinuo) con efectos para la verificación de la misma. Por dicha razón, no se proponen sobrecargas mínimas en áreas de almacenamiento para estos usos. En el caso de que existiera previsiones de almacenamiento anejo a la obra de atraque, deberán considerarse específicamente las características y distribución de los depósitos asociados a cada tipo de granel líquido, y una sobrecarga de 20 kN/m <sup>2</sup> en el espacio entre depósitos.									
6) Equivale a una altura de estacionamiento de un contenedor.									
7) Equivale a una altura de almacenamiento de cuatro contenedores.									
8) Las sobrecargas mínimas son de aplicación para las obras de atraque de instalaciones dedicadas tanto a la construcción y reparación de buques como de plataformas offshore. Para otros usos industriales asociados con la recepción o salida de materias primas, así como de productos elaborados, coincidirán con las correspondientes establecidas para el uso comercial equivalente.									

En el caso de que los criterios de explotación establezcan específicamente apilamientos en fila podrán reducirse las cargas concentradas anteriores a la mitad, manteniéndose las presiones de contacto.

No obstante, en previsión de posibles variaciones en los criterios de explotación es recomendable adoptar como mínimo la carga concentrada definida para apilamiento en bloque y una altura en áreas de operación, así como la correspondiente a apilamiento en bloque y 4 alturas en áreas de almacenamiento.

■ *Para ro-ro, ferris y pasajeros*

- $q_{v,1pk} = 70 \text{ kN}$ , con presiones de contacto de  $40 \text{ MPa}$  <sup>(30)</sup>

■ *Para multipropósito*

Se considerarán las cargas concentradas y presiones definidas para mercancía general convencional ordinaria.

- *Para graneles líquidos*, así como para los usos *pesquero y náutico-deportivo*, en áreas accesibles al tráfico rodado, se considerarán las cargas concentradas definidas para ro-ro, ferris y pasajeros. Para estos usos, en áreas no accesibles al tráfico rodado se considerará una carga concentrada de estacionamiento y almacenamiento de  $4,5 \text{ kN}$ .
- *Para usos industriales* se aplicarán las cargas concentradas correspondientes a carga convencional pesada en obras de atraque de instalaciones dedicadas a la construcción y reparación de buques, así como a la construcción o reparación de plataformas offshore. Para otros usos industriales asociados con la recepción o salida de materias primas, así como de productos elaborados, las cargas concentradas de estacionamiento y almacenamiento coincidirán con las correspondientes establecidas para el uso comercial equivalente.
- *Para uso militar* se considerarán tanto las cargas concentradas definidas para carga convencional ordinaria como las definidas para ro-ro, ferris y pasajeros.

#### 4.6.4.1.1. FORMULACIÓN DE LAS ACCIONES DEBIDAS A LOS AGENTES DE ESTACIONAMIENTO Y ALMACENAMIENTO ( $Q_{v,1}$ )

Las sobrecargas y cargas concentradas de estacionamiento y almacenamiento solicitan a las obras de atraque y amarre bien de forma directa, bien indirectamente a través de otros elementos estructurales, superestructuras o capas de reparto, así como aumentando los pesos y empujes producidos por el terreno natural o los rellenos sobre los que actúan.

Los criterios de distribución de dichas cargas tanto cuanto actúan directamente sobre un elemento estructural como cuando lo hacen indirectamente a través de otros elementos estructurales, superestructuras o capas de reparto, así como a través de rellenos son idénticos a los establecidos en esta Recomendación para las acciones debidas a los agentes de manipulación de mercancías y embarque y desembarque de pasajeros (ver apartado 4.6.4.2.5).

Los pesos y empujes adicionales debidos a las sobrecargas y cargas de estacionamiento y almacenamiento pueden obtenerse de acuerdo con lo dispuesto en el apartado 3.6 de la ROM 0.5-05 para las obras fijas abiertas y en el apartado 3.7 de la misma Recomendación para las obras fijas cerradas.

Para cada estado de proyecto, las acciones de estacionamiento y almacenamiento tendrán igual consideración que el agente, independientemente de que éste actúe directa o indirectamente sobre la obra de atraque. Así mismo, los valores representativos de estas acciones y sus funciones de distribución pueden obtenerse o derivarse de los correspondientes al agente causante por medio de las relaciones funcionales existentes entre ambos.

(30) Del lado de la seguridad, se consideran la carga y presión de contacto debidas a las ruedas metálicas de  $0,088 \text{ m}$  de anchura y  $0,225 \text{ m}$  de diámetro que sirven de apoyo a un semirremolque estacionado.

#### 4.6.4.2. Manipulación de mercancías y embarque y desembarque de pasajeros ( $q_{v,2}$ )

##### 4.6.4.2.1. MANIPULACIÓN DE MERCANCÍAS EN ÁREAS DE OPERACIÓN

El agente manipulación de mercancías en las áreas de operación está asociado con las cargas transmitidas por los equipos e instalaciones necesarios para la realización de las actividades de carga, descarga, estiba, desestiba y trasbordo, las cuales permiten la transferencia de las mercancías entre buques o entre éstos y tierra u otros medios de transporte, así como para las actividades de transporte horizontal y depósito necesarias para el estacionamiento de las mismas en las condiciones previstas en dicha área y para su traslado a las áreas de almacenamiento o a otras zonas dentro o fuera de la zona de servicio del puerto.

En las obras de atraque y amarre se distinguirán los siguientes agentes de operaciones de manipulación de mercancías en áreas de operación en función del sistema de manipulación considerado para las operaciones de carga, descarga, estiba, desestiba o trasbordo, compatible con los usos y los requerimientos operativos establecidos para la obra de atraque y amarre (ver tabla 2.3.1), y de su variabilidad espacial:

- ◆ *Mediante sistemas discontinuos por elevación ( $q_{v,21}$ )*
  - Equipos fijos y de movilidad restringida ( $q_{v,211}$ ), como grúas y pórticos, que bien son fijos o circulan sobre carriles o bandas con limitación de movimientos según un eje de traslación.
  - Equipos de movilidad no restringida con capacidad de carga y descarga del buque por elevación ( $q_{v,212}$ ), como grúas móviles sobre neumáticos u orugas, sin limitación direccional de movimientos.
  - Equipos auxiliares de transporte horizontal y depósito sobre neumáticos de movilidad no restringida ( $q_{v,213}$ ), como carretillas elevadoras frontales (forklift truck) o laterales (side loader truck), carretillas puente (straddle carriers), carretillas lanzadera (shuttle carriers) y apiladores de alcance (reach stackers).
- ◆ *Mediante sistemas discontinuos por medios rodantes ( $q_{v,22}$ )*
  - Equipos de movilidad no restringida ( $q_{v,221}$ ), como cabezas tractoras con plataformas rodantes de bajo gálibo (Roll trailers) o plataformas sin ruedas (cassettes) y carretillas elevadoras.
- ◆ *Mediante sistemas continuos ( $q_{v,23}$ )*
  - Sistemas de carga y descarga de graneles líquidos ( $q_{v,231}$ ), como mangueras, tuberías flexibles y brazos articulados que pueden ser fijos, de movilidad restringida con limitación de movimientos según un eje de traslación e incluso de movilidad no restringida sobre chasis.
  - Sistemas de carga y descarga de graneles sólidos ( $q_{v,232}$ ), como cargadores (longitudinal, en arco o lineal) o descargadores (elevadores de tornillo o de cangilones, rotopalas,...), montados en general sobre equipos fijos o de movilidad restringida.

Excepto en el caso de sistemas fijos, de movilidad restringida y continuos, la distribución espacial de las cargas transmitidas por los equipos de manipulación de mercancías se considera libre, limitada únicamente por su compatibilidad con las condiciones de explotación establecidas para la obra de atraque y amarre. Se adoptará aquella que produzca los efectos más desfavorables para el modo de fallo analizado. De igual forma, la distribución espacial de las cargas transmitidas por los equipos de manipulación de mercancías de movilidad restringida se considerará libre en su banda de rodadura.

Las cargas debidas a las operaciones de manipulación de mercancías asociadas con cada diferente tipo de sistema de manipulación no se considerarán entre sí de actuación simultánea por razones operativas. Incluso en aquellas obras de atraque y amarre en las que se considere que el sistema de manipulación de mercancías pueda ser simultáneamente por elevación y por medios rodantes (obras de atraque de uso comercial ro-ro, ferris y multipropósito) no se considerarán entre sí de actuación simultánea en el mismo espacio físico al ser común por criterios de seguridad alejar lo máximo posible en el espacio este tipo de maniobras.

A su vez, los diferentes tipos de equipos que pueden operar formando parte de un mismo sistema de manipulación son, en principio, compatibles entre sí, salvo que ocupen el mismo espacio físico o la operación conjunta simultánea no sea posible. No obstante, salvo que el Promotor lo establezca específicamente en los criterios de explotación de la instalación, simplificada en operaciones mediante sistemas discontinuos por elevación no se considerarán de actuación simultánea equipos de elevación fijos y de movilidad restringida (p.e. grúas pórtico) con equipos de elevación de movilidad no restringida (p.e. grúas móviles).

En general, en base a condiciones usuales de explotación portuaria, para la verificación de modos de fallo “globales” será suficiente considerar de forma simplificada sobre el área de operación la más desfavorable para el modo de fallo una vez analizadas las siguientes combinaciones:

- ◆ Cuando la manipulación de mercancías se realiza mediante sistemas discontinuos por elevación:
  - (Cargas transmitidas por los equipos de elevación fijos y de movilidad restringida) + (la más desfavorable de las siguientes: sobrecarga de estacionamiento y almacenamiento ó cargas de tráfico terrestre).
  - (Cargas transmitidas por los equipos de elevación fijos y de movilidad restringida) + (la más desfavorable de las siguientes: carga transmitida por un equipo auxiliar de transporte horizontal y depósito).
  - (Cargas transmitidas por los equipos de elevación de movilidad no restringida) + (la más desfavorable de las siguientes: sobrecarga de estacionamiento y almacenamiento ó cargas de tráfico terrestre ferroviario).
  - (Cargas transmitidas por los equipos de elevación de movilidad no restringida) + (la más desfavorable de las siguientes: carga transmitida por un equipo auxiliar de transporte horizontal y depósito).
- ◆ Cuando la manipulación de mercancías se realiza mediante sistemas discontinuos por medios rodantes:
  - La más desfavorable de las siguientes: cargas transmitidas por un equipo con capacidad de carga y descarga del buque por medios rodantes ó sobrecarga de estacionamiento y almacenamiento ó cargas de tráfico terrestre ferroviario.
- ◆ Cuando la manipulación de mercancía se realiza mediante sistemas continuos:
  - (Carga transmitida por el sistema continuo) + (la más desfavorable de las siguientes: sobrecarga de estacionamiento y almacenamiento ó cargas de tráfico terrestre).

Dichas combinaciones se reducirán o simplificarán en aquellas condiciones de trabajo en las que algunas de las cargas son nulas (p.e. en condiciones extremas y excepcionales debidas a la actuación de viento extraordinario, las cargas transmitidas por los equipos de movilidad no restringida y las correspondientes a tráfico viario son nulas).

Para la verificación de modos de fallo “locales” (estructurales o de inestabilidad interna), en aquellas obras de atraque y amarre en las que sea necesario comprobar dichos modos de fallo (particularmente las fijas abiertas, las de pantallas y las flotantes) deberán tomarse en consideración alternativamente las cargas concentradas más desfavorables transmitidas por los equipos de manipulación considerados, así como las debidas a las mercancías estacionadas o almacenadas y al tráfico terrestre. A estos efectos, no se considerará la actuación simultánea de este tipo de cargas cuando correspondan a diferentes equipos o elementos.

#### 4.6.4.2.1.1. Cargas transmitidas por sistemas discontinuos de carga y descarga del buque por elevación ( $q_{v,21}$ )

##### 4.6.4.2.1.1.1. Cargas transmitidas por equipos fijos y de movilidad restringida con capacidad de carga y descarga del buque por elevación ( $q_{v,211}$ )

Las cargas transmitidas por los equipos fijos y de movilidad restringida a las obras de atraque y amarre están asociadas fundamentalmente con los siguientes factores:

- ◆ Configuración geométrica del equipo, particularmente en la interfase equipo/obra de atraque (equipo fijo o en el caso de equipos de movilidad restringida: distancia entre carriles o bandas de circulación, espacio entre patas, número de ruedas por pata y separación de las mismas, distancia entre topes, disposición de los sistemas de anclaje,...).
- ◆ Peso propio del equipo, incluyendo el peso de los sistemas o dispositivos de elevación o carga (gancho, cuchara o spreader) y, en su caso, de traslación de la carga (carro o trolley).
- ◆ Capacidad de elevación del equipo en relación con su alcance.
- ◆ Efectos inerciales asociados con el movimiento del equipo y con la elevación de la carga (aceleraciones en los sistemas de elevación y traslación de las cargas, aceleraciones en los movimientos de traslación del equipo, ...).
- ◆ Los efectos de los agentes del medio físico, particularmente el viento, la nieve y el sismo.

Los parámetros que definen a este agente se incluyen en la tabla 4.6.4.5. Para una determinada configuración del equipo y posición de la carga manipulada, en general, este agente se define mediante las cargas puntuales, verticales y horizontales, transversales y longitudinales, y momentos transmitidos directamente a la infraestructura o al cimiento en el caso del equipo fijo o, en el caso de equipos de movilidad restringida, a través de las ruedas que situadas en cada una de las patas permiten la movilidad del equipo, así como por los anclajes y brochados en aquéllos estados de proyecto en los cuales se considere la inmovilización de éste.

En el caso de los equipos de movilidad restringida, su distribución espacial se considerará libre en su banda de circulación, con las restricciones asociadas a la configuración geométrica de los equipos, limitada únicamente por su compatibilidad con las condiciones de explotación establecidas para los mismos. Por condiciones de explotación de la instalación, así como por exigencias de seguridad en las operaciones de carga-descarga es recomendable que la distancia entre el cantil de la obra de atraque y el eje del carril lado mar sea mayor de 2,50 m <sup>(31)</sup>, debiéndose garantizar una distancia mínima entre el cantil y la cabina de operación del equipo mayor de 1,50 m para evitar su posible colisión con el buque, bien atracado o durante la maniobra de atraque con un ángulo excesivo de escora de hasta 5° hacia lado tierra (Ver apartado 3.2.1.7.1 y tabla 4.6.4.5), bien con la proa del mismo en función del ángulo de aproximación asociado con el tipo de atraque y con la maniobra de atraque desarrollada (Ver apartado 4.6.4.4.3.2).

Salvo que las condiciones de explotación definan otra cosa, del lado de la seguridad se considerará que varios equipos de movilidad restringida pueden trabajar simultáneamente o estar estacionados en situación de topes unidos. Para cada estado de proyecto, se adoptará la distribución de cargas que se produce simultáneamente en cada pata, correspondiente a la configuración de equipo, posición de la carga y dirección del viento que, siendo compatibles con dicho estado, produzca los efectos más desfavorables para el modo de fallo analizado.

En el caso de equipos de movilidad restringida, en general para la verificación de modos de fallo “globales” es admisible considerar la carga transmitida por cada pata del equipo como una carga lineal equivalente a la carga transmitida por las ruedas, obtenida por división de la carga transmitida por cada una de ellas por la separación entre ejes de ruedas. Dicha carga lineal se extenderá en una distancia igual a la existente entre ejes de ruedas extremas, aumentada en una separación entre ruedas. Sin perjuicio de mantener la diferenciación entre las cargas de cada pata para una mejor optimización de la obra, simplificada para facilitar los cálculos, del lado de la seguridad podrá considerarse en todas las patas de la grúa situadas en cada uno de los lados una misma carga vertical, horizontal transversal y horizontal longitudinal, considerando los valores compatibles asociados al valor mayor de cada una de estas componentes, obtenidos considerando todas las configuraciones del equipo, carga y viento compatibles con el estado de proyecto considerado.

(31) Esta recomendación tiene un carácter general, sin perjuicio de que en algunos casos puede generar dificultades en la cimentación del equipo que no haga conveniente dicha disposición. Por ejemplo en obras de atraque de pantallas, con el objeto de poder apoyar las patas del equipo lado mar sobre la pantalla, pueden admitirse excepcionalmente distancias menores entre el cantil y la vía lado mar, pero nunca menores de 0,80 m. Por otra parte, salvo que las condiciones de explotación establecidas para la instalación de atraque lo exijan específicamente (p.e. separación de flujos de vehículos automáticos y manuales) no es conveniente aumentar demasiado esta distancia ya que encarece el equipo de manipulación para conseguir el mismo alcance efectivo.



**Tabla 4.6.4.5. Parámetros que definen las cargas transmitidas por equipos de movilidad restringida con capacidad de carga y descarga del buque por elevación**

CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA	Distancia entre carriles o bandas de circulación		G	
	Separación entre patas		W	
	Número de ruedas por pata		N	
	Separación de ruedas		S	
	Distancia entre topes		B	
	Distancia entre el tirante de anclaje y el punto de brochado		A	
CARGA POR RUEDA	PATAS LADO MAR (LM)	VERTICAL	$Q_{v,211} _{V,LM,1}$	$Q_{v,211} _{V,LM,2}$
		HORIZONTAL <sub>TRANS</sub>	$Q_{v,211} _{H_t,LM,1}$	$Q_{v,211} _{H_t,LM,2}$
		HORIZONTAL <sub>LONG</sub>	$Q_{v,211} _{H_l,LM,1}$	$Q_{v,211} _{H_l,LM,2}$
	PATAS LADO TIERRA (LT)	VERTICAL	$Q_{v,211} _{V,LT,3}$	$Q_{v,211} _{V,LT,4}$
		HORIZONTAL <sub>TRANS</sub>	$Q_{v,211} _{H_t,LT,3}$	$Q_{v,211} _{H_t,LT,4}$
		HORIZONTAL <sub>LONG</sub>	$Q_{v,211} _{H_l,LT,3}$	$Q_{v,211} _{H_l,LT,4}$
CARGA DE ANCLAJE POR PATA O LADO	TIRANTE (por pata)	VERTICAL	$Q_{v,211} _{V,Tirante}$	
	BROCHADO (por pata)	HORIZONTAL	$Q_{v,211} _{H,Brochado}$	
<b>Notas</b> 1) Para equipos fijos, en general pueden simplificarse los parámetros definidos para equipos de movilidad restringida, reduciéndose a la carga total vertical y horizontal, así como a un momento, en la interfase equipo-obra.				

Las cargas transmitidas por los equipos fijos y de movilidad restringida se obtendrán a partir de la combinación de las acciones simultáneas y compatibles que en cada estado de proyecto representativo de los ciclos de sollicitación asociados a la normal explotación de la instalación de atraque (condiciones de trabajo operativas), a la inoperatividad de la misma (condiciones de trabajo extremas) o a la presentación de un agente extraordinario o insólito (condiciones de trabajo excepcionales) actúan sobre el equipo, tomando en con-



sideración las diferentes configuraciones que puede adoptar el equipo, las diferentes posiciones de la carga manipulada y, en su caso, la disposición o no de sistemas de anclaje, así como la dirección del viento en dicho estado. Para ello, el fabricante del equipo deberá suministrar las cargas verticales y horizontales transmitidas por cada agente actuando aisladamente en cada una de las configuraciones del equipo, posiciones de la carga y sistemas de anclaje que se consideren significativas a estos efectos: posición del brazo (lateral centrada perpendicular a los carriles, lateral centrada paralela a los carriles o brazo en esquina, tanto lado mar como lado tierra) o de la pluma (bajada o elevada) en el caso de las grúas para contenedores y de la carga (máxima capacidad de elevación con el máximo alcance en cada una de las posiciones diferenciadas del brazo o pluma). Para ello es recomendable solicitar estos datos al fabricante de acuerdo con el formato y requerimientos señalados en las tablas 4.6.4.6 y 4.6.4.7 para el caso de grúas pórtico y grúas de contenedores respectivamente, de forma que sea posible definir los valores representativos y, en su caso, las funciones de distribución asociados con dichas cargas.

En función del tipo de formulación de las ecuaciones de verificación, las cargas transmitidas por los equipos de manipulación fijos o de movilidad restringida se definirán:

**a) Para formulaciones deterministas y determinista-probabilistas**

**a<sub>1</sub>) Para la verificación de modos de fallo adscritos a estados límite últimos**

- ◆ En condiciones de trabajo operativas correspondientes al estado límite de realización de las operaciones de carga y descarga con buque atracado, las cargas de operación transmitidas por los equipos fijos o de movilidad restringida podrán definirse a través de valores nominales establecidos directamente por el Promotor cuando no esté en condiciones de explicitar en la fase de proyecto los equipos concretos de manipulación o de valores representativos basados en los límites operativos establecidos por criterios de explotación o bien por criterios ambientales, climáticos, legales o de seguridad existentes para la operatividad de los equipos previstos, tomando en consideración los buques de la flota esperable en el atraque.

**Tabla 4.6.4.6. Formato para la descomposición de las cargas transmitidas por grúas pórtico de movilidad restringida en función de los diferentes agentes actuantes, a suministrar por el fabricante**

AGENTE	POSICIÓN DEL BRAZO	CARGA POR RUEDA								CARGAS EN ANCLAJES		
		PATAS EN CARRIL 1				PATAS EN CARRIL 2				Tirante (por pata)	Brochado (por lado)	
		Vertical		Horizontal		Vertical		Horizontal				
		Pata 1	Pata 2	Pata 1	Pata 2	Pata 3	Pata 4	Pata 3	Pata 4			Vertical
A. Peso propio del equipo	Centrado perpendicular a los carriles										—	—
	Centrado paralelo a los carriles										—	—
	En esquina										—	—
	En posición de estacionamiento										—	—
C. Capacidad de elevación del equipo con máximo alcance	Centrado perpendicular a los carriles										—	—
	Centrado paralelo a los carriles										—	—
	En esquina										—	—

**Formato para la descomposición de las cargas transmitidas por grúas portico de movilidad restringida en función de los diferentes agentes actuantes, a suministrar por el fabricante (continuación)**

AGENTE	POSICIÓN DEL BRAZO	CARGA POR RUEDA								CARGAS EN ANCLAJES	
		PATAS EN CARRIL 1				PATAS EN CARRIL 2				Tirante (por pata)	Brochado (por lado)
		Vertical		Horizontal		Vertical		Horizontal			
		Pata 1	Pata 2	Pata 1	Pata 2	Pata 3	Pata 4	Pata 3	Pata 4	Vertical	Horizontal
D. Cargas inerciales	Centrado perpendicular a los carriles									—	—
	Centrado paralelo a los carriles									—	—
	En esquina									—	—
E. Viento límite de operatividad en dirección transversal <sup>1)</sup>	Centrado perpendicular a los carriles									—	—
E. Viento límite de operatividad en dirección longitudinal <sup>1)</sup>	Centrado paralelo a los carriles									—	—
E. Viento límite de operatividad en dirección 45° <sup>1)</sup>	En esquina									—	—
F. Viento en condiciones extremas en dirección transversal <sup>1)</sup>	Posición de estacionamiento									—	—
F. Viento en condiciones extremas en dirección longitudinal <sup>1)</sup>	Posición de estacionamiento									—	—
F. Viento en condiciones extremas en dirección 45° <sup>1)</sup>	Posición de estacionamiento									—	—
G. Peso propio equipo + viento en condiciones excepcionales en dirección transversal <sup>1)</sup>	Posición de estacionamiento			—	—			—	—		
G. Peso propio equipo + viento en condiciones excepcionales en dirección longitudinal <sup>1)</sup>	Posición de estacionamiento			—	—			—	—		

**Notas**

- Condiciones normales de Operación (equipo en servicio):  $[A+C+D+E]$  (para cada una de las posiciones del brazo)
- Condiciones Extremas (equipo fuera de servicio):  $A$  (en posición de estacionamiento) +  $F$ .
- Condiciones Excepcionales debidas a la presentación de viento extraordinario (equipo fuera de servicio con dispositivos de anclaje activados):  $G$ .

1) Las componentes debidas al viento se obtendrán para una velocidad  $V_0$ . Conocidas las componentes debidas al viento asociadas con esta velocidad del viento pueden obtenerse las asociadas con cualquier otra velocidad  $V_1$  multiplicándolas por la relación  $(V_1/V_0)^2$ .

En el caso de que el Promotor fije directamente el valor nominal límite de dichas cargas deberá asociarlo a una velocidad y dirección del viento para poder combinar estas cargas con las producidas por los otros agentes de actuación simultánea y, también, para poder asociar a las mismas una probabilidad de presentación en el emplazamiento necesaria para la verificación del nivel de operatividad de la instalación correspondiente al modo de fallo de parada operativa “realización de las operaciones de carga y descarga con buque atracado”. Cuando en una fase posterior se conozcan con detalle los equipos o éstos se adquieran por el explotador de la instalación de atraque deberá com-

**Tabla 4.6.4.7. Formato para la descomposición de las cargas transmitidas por equipos de manipulación de contenedores de movilidad restringida en función de los diferentes agentes actuantes, a suministrar por el fabricante**

AGENTE	POSICIÓN DE LA PLUMA	POSICIÓN DE LA CARGA MANIPULADA	CARGA POR RUEDA								CARGAS EN ANCLAJES	
			PATAS LADO MAR (LM)				PATAS LADO TIERRA (LT)				Tirante (por pata)	Brochador (por lado)
			Vertical		Horizontal		Vertical		Horizontal			
			Pata 1	Pata 2	Pata 1	Pata 2	Pata 3	Pata 4	Pata 3	Pata 4	Vertical	Horizontal
<b>A.</b> Peso propio del equipo	Pluma bajada									—	—	
	Pluma elevada									—	—	
<b>B.</b> Peso propio sistemas elevación-traslación de la carga		Máximo alcance LM								—	—	
		Máximo alcance LT								—	—	
		Posición estacionamiento									—	—
<b>C.</b> Capacidad de elevación del equipo		Máximo alcance LM								—	—	
		Máximo alcance LT								—	—	
<b>D.</b> Cargas Inerciales		Máximo alcance LM								—	—	
		Máximo alcance LT								—	—	
<b>E.</b> Viento límite de operatividad en dirección transversal <sup>1)</sup>	Pluma bajada									—	—	
<b>E.</b> Viento límite de operatividad en dirección longitudinal <sup>1)</sup>	Pluma bajada									—	—	
<b>E.</b> Viento límite de operatividad en dirección 45° <sup>1)</sup>	Pluma bajada									—	—	
<b>F.</b> Viento en condiciones extremas en dirección transversal ( $T_R = 50$ años) <sup>1)</sup>	Pluma elevada									—	—	
<b>F.</b> Viento en condiciones extremas en dirección longitudinal <sup>1)</sup>	Pluma elevada									—	—	
<b>F.</b> Viento en condiciones extremas en dirección 45° <sup>1)</sup>	Pluma elevada									—	—	
<b>G.</b> Peso propio equipo y sistemas de elevación + viento en condiciones excepcionales en dirección transversal <sup>1)</sup>	Pluma elevada				—	—			—	—		
<b>G.</b> Peso propio equipo y sistemas de elevación + viento en condiciones excepcionales en dirección longitudinal <sup>1)</sup>	Pluma elevada				—	—			—	—		

**Notas**

- Condiciones normales de Operación (equipo en servicio):  $A$  (pluma bajada) +  $B$  (máximo alcance) +  $C$  +  $D$  +  $E$ .
- Condiciones Extremas (equipo fuera de servicio):  $A$  (pluma elevada) +  $B$  (posición estacionamiento) +  $F$ .
- Condiciones Excepcionales debidas a la presentación de viento extraordinario (equipo fuera de servicio con dispositivos de anclaje activados):  $G$ .

<sup>1)</sup> Las componentes debidas al viento se obtendrán para una velocidad  $V_0$ . Conocidas las componentes debidas al viento asociadas con esta velocidad del viento pueden obtenerse las asociadas con cualquier otra velocidad  $V_1$  multiplicándolas por la relación  $(V_1/V_0)^2$ .

probarse que el valor representativo de las cargas transmitidas por los mismos en las condiciones de explotación que se establezcan, obtenidas de acuerdo con la metodología definida en este apartado, no supera el valor nominal establecido. En caso contrario, deberán definirse nuevas condiciones límites de operación más restrictivas para dichos equipos con el objeto de garantizar esta condición. Lo mismo deberá realizarse si previamente a la entrada en servicio de la instalación de atraque o durante una fase de rehabilitación o readaptación de la misma a nuevas necesidades de la demanda se modifican los equipos previstos en la fase de proyecto.

Cuando estén definidos en la fase de proyecto los equipos de manipulación, el valor representativo de las cargas transmitidas por los mismos se obtendrá como:

El valor más desfavorable para el modo de fallo analizado de las cargas que pueden ser transmitidas por los equipos de proyecto en condiciones de servicio correspondientes a carga y descarga de cada uno de los buques de la flota esperable en el atraque, con elevación de carga máxima con máximo alcance, para las condiciones climáticas establecidas como límite para poder realizar dichas operaciones. Para el cálculo de estos valores, el valor representativo de la velocidad y dirección del viento deberá ser el correspondiente al estado de proyecto considerado, compatible con los valores representativos del resto de acciones climáticas que definen el estado meteorológico en dichas condiciones (Ver tabla 4.6.2.2), e idéntico al adoptado para la definición de los otros agentes de uso y explotación de actuación simultánea que dependen del viento (p.e. cargas de amarre).

- Cuando el viento se adopte como agente predominante para la definición del estado límite de realización de las operaciones de carga y descarga con buque atracado, bien por la paralización de las operaciones de la grúa por condiciones de seguridad bien por causar movimientos en el buque amarrado incompatibles con la realización de las citadas operaciones, se adoptará para la definición de las cargas el menor valor de la velocidad del viento en cada dirección de entre los que limiten estas operaciones. La metodología para definición de las condiciones límite de operatividad correspondientes a la paralización de las operaciones de carga y descarga por incompatibilidad de los movimientos del buque atracado con dichas operaciones, se incluye en el apartado 4.6.4.4.7.1.3. Cargas de amarre, epígrafes  $a_4$  y  $b_2$ , considerando, a falta de criterios o estudios específicos, como movimientos admisibles del buque los señalados en la tabla 4.6.4.22. A su vez, en ausencia de información específica del Promotor o del Fabricante de los equipos de manipulación, se adoptará como viento límite para la realización de estas operaciones por razones de seguridad de los equipos y de la operativa aquél cuya velocidad media en el intervalo (ráfaga) de 3 s a 10 m de altura sea 24 m/s ( $\approx 86$  km/h).
- Para la definición de estados límites en esta condición de trabajo operativa también deberán tomarse en consideración aquéllos casos en los que otro agente climático distinto del viento u operativo se adopte como agente predominante para alguna de las causas de paralización de las operaciones de carga y descarga (p.e. el oleaje o los efectos hidrodinámicos inducidos por buques en tránsito que producen la agitación que impide las operaciones de carga y descarga por producir movimientos del buque no compatibles con la realización de estas operaciones o los niveles de agua que impiden las operaciones de los equipos al poderse producir colisiones entre éstos y los buques por altura de elevación insuficiente sobre el nivel de coronación del atraque o dar lugar a rebases sobre la coronación de la obra (Ver apartado 3.2.2.1. Niveles de coronación). En estos casos se adoptará para la definición de las cargas transmitidas por los equipos de manipulación fijos y de movilidad restringida la velocidad del viento simultáneo compatible con el valor límite de operatividad de dicho agente predominante en el estado meteorológico definido por el mismo (Ver apartado 4.6.2.1. Agentes climáticos). Estos estados límites deberán analizarse por si pudieran ser más desfavorables para el modo de fallo analizado considerando todas las cargas actuantes en estas condiciones de trabajo, aunque sean más limitativos en lo que respecta a la velocidad del viento y, por tanto, a las cargas transmitidas por los equipos. A los efectos de la definición de las cargas transmitidas por equipos fijos y de movilidad restringida, únicamente se tomarán en consideración estas últimas situaciones de proyecto si la velocidad de viento compatible asociado a las mismas no supera el valor umbral más limitativo establecido en aquellos casos en que se

considera que el viento es el agente predominante para la definición del estado límite de realización de las operaciones de carga y descarga con buque atracado.

A falta de estudios más precisos entre movimientos del buque atracado y agente climático actuante de acuerdo, por ejemplo, con la metodología definida en el apartado 4.6.4.4.7.1.3. de cargas de amarre, epígrafes  $a_4$  y  $b_2$ , considerando, a falta de criterios o estudios específicos, como movimientos admisibles del buque los señalados en la tabla 4.6.4.22, pueden adoptarse como valores de los agentes climáticos predominantes que definen los diferentes estados límites correspondientes a la realización de las operaciones de carga y descarga por elevación del buque atracado los recogidos en la tabla 3.2.1.3. Por otra parte, en general los niveles de agua o, en su caso, el oleaje no suelen considerarse que den lugar a causas de paralización de las operaciones de carga y descarga por elevación por rebases de las aguas o por insuficiencia de las alturas de elevación total o sobre coronación de los equipos al recomendarse definir los niveles de coronación de las obras de atraque de forma que estos modos de parada operativa nominalmente no se produzcan (Ver apartado 3.2.2.1. Niveles de coronación).

- ◆ *En otras condiciones de trabajo operativas correspondientes a los estados límites de operaciones de atraque y de permanencia de buques en el atraque sin realizar operaciones de carga y descarga se considerará que el equipo está fuera de servicio en cualquier ubicación de la obra de atraque, con una configuración replegada, en el estado climático representativo de las condiciones operativas consideradas. En esta situación, las cargas transmitidas por los equipos se obtendrán a partir de la combinación del peso propio del equipo con los efectos de los agentes del medio físico, particularmente el viento, de igual forma que lo señalado para condiciones de trabajo extremas, adaptando los valores correspondientes a esta situación al estado meteorológico de proyecto considerado para cada una de las citadas condiciones operativas. Por tanto, para la definición de los valores representativos de las cargas en estas situaciones será de aplicación lo dispuesto para condiciones de trabajo extremas, considerando la velocidad del viento correspondientes al estado meteorológico operativo considerado.*
- ◆ *En condiciones de trabajo extremas se considera que el equipo está en situación fuera de servicio en cualquier ubicación de la obra de atraque, con una configuración replegada, en el estado climático representativo de condiciones extremas (Ver apartado 4.6.2.1). En esta situación las cargas transmitidas por los equipos se obtendrán a partir de la combinación del peso propio del equipo con los efectos de los agentes del medio físico, particularmente el viento.*

Cuando no se esté en condiciones de explicitar en la fase de proyecto los equipos concretos de manipulación, el Promotor podrá fijar los valores nominales de las cargas transmitidas por los mismos en configuración replegada para condiciones extremas, separando la parte debida al peso propio de la debida a una determinada velocidad y dirección del viento con el objeto de poder adaptar dichos valores al estado meteorológico considerado en proyecto para condiciones extremas y poder combinar estas cargas con las producidas por otros agentes de actuación simultánea en dicho estado. En este caso, deberá comprobarse, cuando en una fase posterior se conozcan detalladamente los equipos o éstos se adquieran por el explotador de la instalación, que el valor representativo de las cargas transmitidas por los mismos en las condiciones extremas de proyecto, obtenidas con la metodología definida en este apartado, no superan el valor nominal establecido adaptado a dicho estado. Lo mismo debe realizarse si previamente a la entrada en servicio de la instalación o durante la fase de rehabilitación o readaptación de la instalación de atraque a nuevas necesidades de la demanda se modifican los equipos previstos en la fase de proyecto.

Cuando estén definidos en la fase de proyecto los equipos de manipulación, el valor representativo de las cargas transmitidas por los mismos se definirá como:

El valor más desfavorable para el modo de fallo analizado de las cargas que pueden ser transmitidas por el equipo fuera de servicio, actuando la velocidad del viento en el emplazamiento correspondiente al periodo de retorno considerado para la definición de los valores característicos o de combinación asociados con el agente climático viento en el estado meteorológico de proyecto en condiciones extremas en función, respectivamente, de que éste sea o no el agente climático predominante en

el modo de fallo analizado y, en este último caso, de que sea o no sea independiente del predominante (Ver apartado 4.6.2.1).

La dirección adoptada será la compatible con el resto de las acciones climáticas que definen el estado meteorológico de proyecto en condiciones extremas y la misma que la adoptada para el cálculo de los otros agentes de uso y explotación de actuación simultánea en dicho estado que dependan del agente viento. Para probabilidades de ocurrencia del modo de fallo en estas condiciones de trabajo menores del 5%, dichos valores son los correspondientes a un periodo de retorno de 50 años si el viento es la acción climática predominante del modo de fallo considerado en estas condiciones de trabajo y, por tanto, la que define el estado meteorológico de proyecto considerado en condiciones extremas o los correspondientes a un periodo de 5 años, con las consideraciones señaladas para variables direccionales, si el viento no es la acción climática predominante y es independiente de la predominante (Ver Tablas 4.6.2.2 y 4.6.4.8, así como el apartado 4.1.1.1.1 a).

A partir de una determinada velocidad del viento el equipo no es estable por si mismo al alcanzarse reacciones negativas en las patas de barlovento, debiendo activarse los dispositivos de anclaje (tirantes y brochado). En general esta velocidad está establecida alrededor de una velocidad de ráfaga 3 s a 10 m de altura de 40-42 m/s (144-150 km/h), pudiendo ser menor para las grandes grúas super-post Panamax. A partir de esta velocidad el equipo puede considerarse que los equipos se trasladan a su posición de estacionamiento de tormenta establecida por los criterios de explotación definidos por el Promotor, con activación de los mecanismos de anclaje. Si esto está previsto deberá limitarse la verificación de las condiciones extremas considerando cualquier ubicación del equipo en la obra de atraque para la velocidad límite del equipo sin activar los dispositivos de anclaje, siempre que dicha velocidad sea mayor que el valor característico o de combinación de la velocidad del viento en el estado de proyecto considerado en condiciones extremas.

- ◆ *En condiciones de trabajo excepcionales debidas a la presentación del agente climático viento de carácter extraordinario se considera que el equipo está en situación fuera de servicio, con una configuración replegada, en el estado climático representativo de estas condiciones excepcionales (Ver apartado 4.6.2.1). En general en este estado se considera que el equipo tiene activados sus dispositivos de anclaje y se encuentra ubicado en su posición de estacionamiento de tormenta establecida por los criterios de explotación definidos por el Promotor. En esta situación las cargas transmitidas por los equipos se obtendrán a partir de la combinación del peso propio del equipo con los efectos del viento.*

Cuando no esté en condiciones de explicitar en la fase de proyecto los equipos concretos de manipulación, el Promotor podrá fijar los valores nominales de las cargas transmitidas por los mismos en la citada configuración de estacionamiento de tormenta, separando la parte debida al peso propio de la debida a una determinada velocidad y dirección del viento con el objeto de poder adaptar dichos valores al estado meteorológico considerado en proyecto para estas condiciones excepcionales y poder combinar estas cargas con las producidas por otros agentes de actuación simultánea en dicho estado. Al igual que lo señalado para condiciones extremas, deberá comprobarse, cuando en una fase posterior se conozcan detalladamente los equipos, que el valor representativo de las cargas transmitidas por los mismos en las condiciones excepcionales de proyecto no supera el valor nominal establecido adaptado a dicho estado.

Cuando estén definidos en la fase de proyecto los equipos de manipulación, el valor representativo de las cargas transmitidas por los mismos se definirá como:

El valor más desfavorable para el modo de fallo analizado de las cargas que pueden ser transmitidas por el equipo fuera de servicio (tanto en las ruedas como en los dispositivos de anclaje), actuando la velocidad del viento en el emplazamiento correspondiente al periodo de retorno considerado para la definición de los valores característicos asociados con el agente climático viento en condiciones excepcionales (Ver apartado 4.6.2.1). La dirección considerada será compatible con el resto de acciones climáticas que definen el estado meteorológico en estas condiciones y será la misma adoptada para la definición de los otros agentes de uso y explotación de actuación simultánea en

dicho estado que dependan del agente viento. Para probabilidades de ocurrencia del modo de fallo en dichas condiciones de trabajo menores del 5%, dichos valores son los correspondientes a un periodo de retorno de 500 años (Ver apartado 4.1.1.1.1.b<sub>1</sub>).

La dirección adoptada será la compatible con el resto de las acciones climáticas que definen el estado meteorológico de proyecto en estas condiciones excepcionales y la misma que la adoptada para el cálculo de los otros agentes de uso y explotación de actuación simultánea en dicho estado que dependan del agente viento.

- ◆ *En condiciones de trabajo excepcionales debidas a la presentación de una acción accidental que no sea sismo o viento extraordinario se considera que el equipo puede estar tanto en servicio como fuera de servicio cuando se produce un estado asociado a la presentación de dicha acción accidental, sin perjuicio de que la actuación de la acción accidental pueda estar asociada específicamente a una determinada situación del equipo (p.e. cuando actúa el agente impacto accidental de buques durante las operaciones de atraque debe considerarse que el equipo de manipulación está fuera de servicio).*

Cuando estén definidos en la fase de proyecto los equipos de manipulación, en esta situación el valor representativo de las cargas será su valor frecuente o su valor cuasi-permanente, en función de que el viento sea o no sea la acción climática predominante en el estado meteorológico considerado en estas condiciones. Estos valores se definirán como (Ver apartado 4.1.1.1.1.b<sub>2</sub>):

- Se adoptará como valor frecuente el más desfavorable para el modo de fallo analizado de las cargas que pueden ser transmitidas por el equipo tanto en servicio como fuera de servicio, actuando el valor frecuente de la velocidad del viento (Ver tabla 4.6.2.2) y, cuando se considere el equipo en servicio, el valor cuasi-permanente de cargas en elevación y efectos inerciales asociados.
- Se adoptará como valor cuasi-permanente el más desfavorable para el modo de fallo analizado de las cargas que pueden ser transmitidas tanto por el equipo en servicio como fuera de servicio actuando el valor cuasi-permanente de los agentes variables que actúan sobre el equipo (velocidad del viento y, cuando se considere el equipo en servicio, cargas de elevación y efectos inerciales asociados). No obstante, cuando el viento sea dependiente del agente climático predominante en el estado meteorológico correspondiente a estas condiciones, se adoptará el valor de la velocidad del viento compatible con el valor representativo adoptado para el agente climático predominante (ver tabla 4.6.2.2).

No obstante lo anterior, en aquéllos casos en los que la actuación de la acción accidental este asociada a un determinado estado meteorológico y correlacionada con el viento <sup>(32)</sup>, el valor representativo de las cargas correspondiente a los equipos de manipulación se obtendrá considerando la velocidad del viento correspondiente a dicho estado.

La dirección adoptada para la velocidad del viento será la compatible con el resto de los agentes climáticos que definen el estado meteorológico de proyecto en estas condiciones excepcionales y la misma que la adoptada para el cálculo de los otros agentes de uso y explotación de actuación simultánea en dicho estado que dependan del agente viento.

Cuando en la fase de proyecto no se hayan explicitado los equipos, habiéndose definido valores nominales para condiciones extremas separando la componente del peso propio de la debida a la actuación del viento, de acuerdo con lo recomendado en esta ROM, simplifícadamente en estas con-

(32) Por ejemplo, la acción accidental “impacto accidental del buque durante las operaciones de atraque” está asociada al estado meteorológico límite en el que se pueden realizar las maniobras de atraque (estado límite de operatividad de las operaciones de atraque) en condiciones normales (Ver apartado 4.6.4.4.4). Por tanto, para la obtención de las cargas correspondientes a los equipos de manipulación de actuación simultánea con dicha carga accidental se considerará la velocidad del viento correspondiente al estado límite de operatividad de las operaciones de atraque actuando sobre el equipo fuera de servicio.



diciones excepcionales cuando se considere el equipo fuera de servicio podrá adoptarse un valor reducido de dicho valor nominal, resultado de adaptar la componente del viento al valor representativo de la velocidad del viento correspondiente al estado meteorológico (frecuente, cuasi-permanente o compatible con el agente climático predominante) en estas condiciones excepcionales. (Para definir el factor que permite la adaptación de las componentes de las cargas debidas al viento, ver Nota 1 de las tablas 4.6.4.6. y 4.6.4.7). Para el equipo en servicio, simplifícadamente podrán adoptarse valores reducidos de los valores nominales establecidos para condiciones normales de operación que, para el caso del valor frecuente, serán iguales a 0,95 los correspondientes a dichos valores nominales y para el caso del valor cuasi-permanente a 0,90 de dichos valores.

- ◆ *En condiciones de trabajo extremas o excepcionales debidas a la presentación de una acción sísmica se considera que el equipo puede estar tanto en servicio como en situación de fuera de servicio cuando se produce un estado sísmico en el emplazamiento (Ver apartado 4.6.2.4). En esta situación, en general a los efectos del proyecto de la obra de atraque y amarre no se considerarán las acciones horizontales debidas al sismo asociadas a la masa de la grúa, sin perjuicio de que la grúa como estructura deba diseñarse para resistir el efecto de dichas acciones sin daños (en condiciones extremas) o con daños (descarrilamiento, etc.) asumibles (en condiciones excepcionales).*

Cuando estén definidos en la fase de proyecto los equipos de manipulación, en esta situación el valor representativo de las cargas será su valor cuasi-permanente, definido en el epígrafe de condiciones excepcionales debidas a la presentación de una acción accidental que no sea viento extraordinario.

Cuando en la fase de proyecto no se hayan explicitado los equipos, habiéndose definido valores nominales para condiciones de trabajo operativas y extremas, se procederá de igual forma que lo señalado en el epígrafe de condiciones excepcionales debidas a la presentación de una acción accidental que no sea viento extraordinario, adaptando cuando se considere el equipo fuera de servicio la componente del viento al valor cuasi-permanente de la velocidad del viento o al compatible con el adoptado para el agente climático predominante si no es independiente de éste.

Los valores representativos de las cargas transmitidas por los equipos fijos y de movilidad restringida cuando estén definidos en la fase de proyecto se resumen en la tabla 4.6.4.8.

En ausencia de información más precisa obtenida a partir de los datos suministrados por los fabricantes para los equipos de manipulación previstos por el Promotor en función del tipo de mercancía y del tamaño y características de la flota previsible de buques en el atraque, podrán adoptarse como órdenes de magnitud indicativos de los valores representativos de las cargas transmitidas por los equipos de manipulación de movilidad restringida actualmente considerados como estándar o convencionales los consignados en la tabla 4.6.4.9 para grúas pórtico y en la 4.6.4.10 para grúas para contenedores.

En el caso particular de las grúas para contenedores hay actualmente en el mercado grúas pórtico con características diferentes a las estándar o convencionales cada vez más utilizadas con el objeto de reducir la altura de las mismas en posición de estacionamiento, de permitir una mayor automatización de las operaciones y de conseguir mayores niveles de productividad. De estas grúas no convencionales es más difícil sistematizar las cargas que transmiten.

La necesidad de grúas pórtico de contenedores de menor altura en posición de estacionamiento puede ser debida a exigencias sociales y medioambientales de reducción de su impacto visual, así como a su posicionamiento en la ruta de aproximación de aviones cuando la terminal está cercana a un aeropuerto. La altura de las grúas pórtico de contenedores convencionales en posición de estacionamiento, que puede alcanzar una altura total sobre carriles del orden de 110 metros, puede reducirse hasta 30% mediante grúas de pluma articulada o hasta un 50% con grúas de perfil bajo. La posición de estacionamiento de estas grúas se alcanza mediante la completa traslación horizontal de la pluma hacia el lado de tierra (Ver figura 4.6.4.1). En general, estas grúas pórtico de contenedores no convencionales pueden mantener la misma distancia entre carriles que las grúas convencionales, aunque son grúas mucho más pesadas, que transmiten cargas por rueda más elevadas, y más caras.

**Tabla 4.6.4.8. Valores representativos de las cargas transmitidas por equipos de manipulación de mercancías fijos y de movilidad restringida (Para la verificación de modos de fallo adscritos a Estados Límite Últimos con probabilidades de fallo menores del 5% en la correspondiente condición de trabajo)**

CONDICIÓN DE TRABAJO	VALOR CARACTERÍSTICO ( $q_{v,211k}$ )	VALOR DE COMBINACIÓN ( $\Psi_0 q_{v,211k}$ )	VALOR FRECUENTE ( $\Psi_1 q_{v,211k}$ )	VALOR CUASI-PERMANENTE ( $\Psi_2 q_{v,211k}$ )
Condiciones de Trabajo Operativas correspondientes al estado límite de realización de las operaciones normales de carga y descarga con buque atracado (CT1,1) <sup>1)</sup>	Límites operativos establecidos para las operaciones de carga y descarga con buque atracado (carga más desfavorable transmitida por equipo en condiciones de servicio = [valores nominales de (peso propio + elevación de carga + efectos inerciales) + velocidad del viento límite de operatividad para realizar estas operaciones. En general $V_{v,3s} = 24 \text{ m/s}$ si el viento es el agente predominante considerado para la definición del estado límite <sup>2)</sup> ]			
Condiciones de Trabajo Extremas <sup>3)</sup> (CT2)	Cargas más desfavorables transmitida por el equipo en situación fuera de servicio [valor nominal del peso propio + velocidad del viento correspondiente a:			
	Periodo de retorno ( $T_R$ ) de 50 años, obtenido de la función de distribución de extremos <sup>4)</sup>	Periodo de retorno ( $T_R$ ) de 5 años, obtenido de la función de distribución de extremos, con las consideraciones señaladas para variables direccionales	—	—
Condiciones de Trabajo Excepcionales debidas a la presentación de viento extraordinario (CT3,1)	Cargas más desfavorables transmitida por el equipo en situación fuera de servicio = valor nominal del peso propio + velocidad del viento correspondiente a:			
	Periodo de retorno ( $T_R$ ) de 500 años, obtenido de la función de distribución de extremos	—	—	—
Condiciones de Trabajo Excepcionales debidas a la presentación de una acción accidental que no sea sismo o viento extraordinario <sup>5)</sup> (CT3,2)	Cargas más desfavorables transmitidas por el equipo tanto en situación de servicio como fuera de servicio = valor nominal del peso propio + valor cuasi-permanente de las cargas de elevación y efectos inerciales asociados (0,8 valores nominales) cuando se considere situación de servicio+ velocidad del viento correspondiente a:			
	—	—	Probabilidad absoluta de no excedencia del 85% tomada del régimen medio	Probabilidad absoluta de no excedencia del 50% tomada del régimen medio
Condiciones de Trabajo Extremas o Excepcionales debidas a la presentación de una acción Sísmica (CT3,31 y CT3,32)	Cargas más desfavorables transmitidas por el equipo tanto en situación servicio como fuera de servicio = valor nominal del peso propio + valor cuasi-permanente de las cargas de elevación y efectos inerciales asociados (0,8 valores nominales) cuando se considere situación servicio + velocidad del viento correspondiente a:			
	—	—	—	Probabilidad absoluta de no excedencia del 50% tomada del régimen medio <sup>6)</sup>
<b>Notas</b> 1) En otras condiciones normales de operación correspondientes a los estados límites de operaciones de atraque y de permanencia de buques en el atraque sin realizar operaciones de carga y descarga se considerará, cuando corresponda, la actuación simultánea de cargas transmitidas por equipos de manipulación fijos y de movilidad restringida. En estos casos se considerará que el equipo está fuera de servicio, siendo de aplicación los valores representativos definidos para condiciones extremas, adoptando como velocidad del viento la correspondiente al estado meteorológico de proyecto en las condiciones operativas consideradas. 2) Si el agente predominante considerado para la definición del estado límite de realización de las operaciones de carga y descarga es otro agente climático u operativo (p.e. el oleaje que produce la agitación máxima compatible con las operaciones de carga y descarga) se adoptará la velocidad del viento compatible con el valor umbral de operatividad considerado para dicho agente (ver apartado 4.6.2.1). 3) Se adoptará como valor representativo el valor característico cuando el viento se considere el agente climático predominante para la definición del estado límite en condiciones extremas. En el caso de que el viento no se considere el agente climático predominante se adoptará el valor de combinación, salvo que el viento sea dependiente del agente climático predominante en cuyo caso se considerará el valor compatible con el adoptado para dicho agente (Ver tabla 4.6.2.2) 4) Si el viento es el agente climático predominante considerado para la definición del estado límite en condiciones extremas, para probabilidades de fallo mayores del 5%, el valor característico en condiciones extremas será el obtenido considerando una velocidad del viento cuya probabilidad de excedencia en la fase de proyecto analizada sea igual a la probabilidad de fallo considerada. Si el viento no es el agente climático predominante, ver tabla 4.6.2.2.				

**Valores representativos de las cargas transmitidas por equipos de manipulación de mercancías fijos y de movilidad restringida (Para la verificación de modos de fallo adscritos a Estados Límite Últimos con probabilidades de fallo menores del 5% en la correspondiente condición de trabajo) (continuación)**

- 5) Se adoptará como valor representativo el valor frecuente cuando el viento sea el agente climático predominante para el modo de fallo analizado. En el caso de que el viento no fuera el agente climático predominante se adoptará el valor cuasi-permanente, salvo que el viento sea dependiente del agente climático predominante en cuyo caso se considerará para el viento el valor compatible con el adoptado para dicho agente. (Ver tabla 4.6.2.2). En aquellos casos en los que la acción accidental esté asociada a un determinado estado meteorológico y correlacionada con el viento se considerará la velocidad del viento correspondiente a dicho estado.
- 6) En el caso de que el viento no sea el agente climático predominante y sea dependiente de este último se considerará para el viento el valor compatible con el adoptado para el predominante (Ver tabla 4.6.2.2).
- 7) El proyectista evaluará la incertidumbre estadística asociada a los datos disponibles con los que se ha estimado las funciones de distribución de la velocidad del viento. Salvo justificación detallada, para la obtención de los valores representativos de las cargas transmitidas por los equipos de manipulación se tomarán los valores superiores del intervalo de confianza del 90%.

**Tabla 4.6.4.9. Configuración y valores característicos de las cargas transmitidas por grúas pórtico estándar o convencionales sobre carriles <sup>7)</sup>**

TIPO DE GRÚA PÓRTICO					
Capacidad de elevación bajo gancho (kN) con máximo alcande (m)	60/25	120/25	160/30	300/35	500/40
Tamaño buque máximo de proyecto <sup>1)</sup>	Feeder			Panamax	PostPanamax
Tonelaje (TPM)	< 2.000	2.000-8.000	8.000-15.000	15.000-50.000	> 50.000
Manga del buque (m)	< 14	14-22	22-25	25-32,50	> 32,5
CARACTERÍSTICAS GRÚA					
Gálíbo bajo portal (m)	4,0-5,0	4,0-6,0	5,0-7,0	5,0-8,0	5,0-8,0
Máx. altura elevación sobre carril (m)	28	28	30	32	36
Máx. altura total de elevación (m)	43	43	45	47	51
Peso (kN)	850-950	1.800-2.000	2.500-2.800	3.000-4.500	5.000-6.500

**Configuración y valores característicos de las cargas transmitidas por grúas pórtico estándar o convencionales sobre carriles <sup>7)</sup> (continuación)**

CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA							
Distancia (G) entre carriles (m)			6,00	10,0-12,0	10,0-12,0	10,0-15,0	10,0-15,0
Separación (W) entre patas (m)			6,00	9,0-10,0	9,0-10,0	9,0-10,0	10,0-12,0
Nº ruedas (n) por pata			2	4	4	6	8
Separación (S) de ruedas (m)			0,80-1,20	0,90-1,20	1,00-1,40	1,10-1,40	1,10-1,40
Distancia (B) entre topes (m)			8,00	13,5-14,5	13,5-14,5	16,5-17,5	20,5-22,5
Distancia (A) tirante anclaje/agarre (m)			3,5	5,0-5,5	5,0-5,5	5,0-5,5	5,0-6,0
MÁXIMA CARGA POR RUEDA (kN) <sup>2)</sup>							
En condiciones de Operación <sup>3)</sup>	Verticales pluma en esquina	$Q_{pata\ esquina}$	650	550	600	650	700
		$Q_{patas\ laterales}$	350	350	400	450	450
	Verticales pluma en lado ( $Q_{pata\ lado}$ )		600	500	550	600	650
	Horizontales <sup>6)</sup>		0,13 verticales	0,13 verticales	0,13 verticales	0,13 verticales	0,13 verticales
En condiciones Extremas <sup>4)</sup>	Verticales		370	300	350	350	380
	Horizontales <sup>6)</sup>		0,1 verticales	0,1 verticales	0,1 verticales	0,1 verticales	0,1 verticales
MÁXIMA CARGA EN DISPOSITIVOS DE ANCLAJE							
En condiciones Excepcionales debido a viento extraordinario <sup>5)</sup>	Tracción tirante de anclaje (kN/pata)		580	650	500	990	1.100
	Horizontal en brochado (kN/lado)		230	375	450	650	950

Notas

– Cuando, de acuerdo con lo previsto en esta Recomendación, se adopten los valores consignados en esta tabla para la definición de cargas mínimas, en aquéllos parámetros que se incluya un rango de valores se utilizará a estos efectos el valor medio.

1) El tipo de grúa que se recomienda en función del buque de manga máxima de la flota esperable en el atraque debe tomarse como especialmente indicada para obras de atraque y amarre de usos comerciales para graneles sólidos y mercancía general convencional ordinaria. Para obras de atraque multipropósito, ferris, carga convencional pesada y contenedores debe tomarse en consideración adicionalmente el peso unitario de las cargas a manipular, por lo que es conveniente la utilización como mínimo de grúas 300/35 para estos usos, independientemente del buque de manga máxima.

2) Las cargas máximas por rueda consignadas en esta tabla tienen únicamente un valor indicativo de su orden de magnitud para cada tipo de grúa, habiéndose obtenido del análisis de las correspondientes a diferentes fabricantes. Dependiendo del fabricante, del tipo de carro, de los elementos de izado (gancho, cuchara,...) y de la configuración geométrica las variaciones pueden ser significativas por lo que deben contrastarse con las aportadas, en su caso, por el fabricante elegido. Si ésto no es posible previamente a la realización del proyecto, pueden adoptarse los valores incluidos en esta tabla, estableciéndose los mismos como valores nominales máximos que no deben superarse por los equipos de manipulación, consignándose en el reglamento de explotación de la instalación.

3) Considerando una velocidad de viento límite de operatividad en el emplazamiento  $V_{v,3s}(10\ m) = 24\ m/s$  ( $\approx 86\ km/h$ ), actuando en la dirección de la posición de la pluma y en el sentido más desfavorable, e incluyendo los efectos inerciales asociados con el movimiento del equipo y con la elevación de la carga. Definidas las cargas verticales en las ruedas de las patas más cargadas, las cargas sobre el resto de patas pueden obtenerse considerando la posición de la pluma y que la suma de todas las cargas deben igualar a las cargas verticales actuantes (peso propio+máxima carga izada+efectos inerciales). Los efectos inerciales incluidos en las cargas consignadas en esta tabla pueden estimarse como el 15% de la máxima carga izada.

4) Considerando que la velocidad de viento en el emplazamiento correspondiente a condiciones extremas es  $V_{v,3s}(10\ m) = 40\ m/s$  ( $\approx 144\ km/h$ ) en la dirección perpendicular o paralela a la banda de circulación del equipo. Definidas las cargas en las ruedas de las patas más cargadas, las cargas verticales de actuación simultánea sobre el resto de patas pueden obtenerse considerando que la suma de todas las cargas deben igualar a las cargas verticales actuantes (peso propio). Para la determinación de las cargas por rueda para otra velocidad del viento, puede utilizarse el siguiente procedimiento simplificado:

– Considerar que el peso propio de equipo se reparte uniformemente entre todas las patas. De esta forma se puede obtener las componentes de la carga debido al viento en cada pata ( $Q_{fc,2\ |\ v_0}$ ) tanto cargada como descargada para la velocidad del viento  $V_0 = 40\ m/s$ .

– Considerar que la componente del viento para una velocidad  $V_1$  ( $Q_{fc,2\ |\ v_1}$ ) puede obtenerse mediante la relación:

$$Q_{fc,2\ |\ v_1} = Q_{fc,2\ |\ v_0} \cdot (V_1/V_0)^2$$

5) Considerando que la velocidad de viento en el emplazamiento correspondiente a condiciones excepcionales debido a viento extraordinario es  $V_{v,3s}(10\ m) = 50\ m/s$  ( $\approx 180\ km/h$ ) en la dirección perpendicular o paralela a la banda de circulación del equipo. Las máximas cargas por rueda en dicha condición de trabajo, así como las cargas de actuación simultánea con las cargas máximas en las ruedas de las patas descargadas, pueden determinarse a través del procedimiento establecido en 4) a partir de las definidas para condiciones extremas, considerando la velocidad del viento correspondiente a estas condiciones excepcionales. Así mismo, utilizando la metodología incluida en la Nota 4) pueden obtenerse las fuerzas de tracción en el tirante y la fuerza horizontal en el brochado para otra velocidad del viento. A estos efectos se considerará que, en esta condición, en los brochados se concentra la totalidad de la fuerza horizontal debida al viento.

**Configuración y valores característicos de las cargas transmitidas por grúas pórtico estándar o convencionales sobre carriles <sup>7)</sup> (continuación)**

**Notas**

- 6) Carga horizontal en dirección transversal o en dirección longitudinal a la dirección de rodadura, concordante con la dirección de actuación del viento. Definidas las cargas horizontales en las patas más cargadas, puede considerarse que sobre las otras patas actúa la misma carga horizontal. En condiciones de operación, para una velocidad del viento límite de operatividad de 24 m/s, la componente de la acción horizontal debida al viento puede aproximarse al 3% de la carga vertical sin considerar la componente vertical debida a los efectos inerciales. En condiciones de operación debe considerarse que también actúa simultáneamente una acción horizontal longitudinal adicional en la dirección de la banda de circulación del equipo, causada por los posibles movimientos del equipo (traslación o frenada) en la dirección de rodadura. Esta última acción horizontal puede estimarse como el 15% de las cargas verticales.
- 7) Los otros valores representativos (de combinación, frecuente y cuasi-permanente) en condiciones del equipo fuera de servicio pueden aproximarse a partir de las máximas cargas por rueda correspondientes a condiciones extremas, considerando la velocidad del viento que le corresponda a cada valor representativo de acuerdo con lo dispuesto en la tabla 4.6.4.8., calculados a través del procedimiento establecido en la cláusula 4). En condiciones del equipo en servicio, simplificadaamente podrán adoptarse valores reducidos de los valores establecidos para condiciones normales de operación que, para el caso del valor frecuente serán iguales a 0,95 los correspondientes a dichos valores y para el caso del valor cuasi-permanente el 0,90.

Por otra parte, algunas grúas de contenedores incorporan respecto a las grúas convencionales elementos, estructuras y dispositivos dirigidos a permitir un cierto grado de automatización de las operaciones. Uno de estos dispositivos es dotar a la grúa de dos carros de elevación y traslación (double trolley), con el objeto de posibilitar que el movimiento completo del contenedor entre el buque y el muelle o equipo auxiliar de transporte y depósito sea efectuado en dos partes, facilitando la automatización de la última operación, la cual es mucho más factible de automatizar que la primera debido a las dificultades que suponen los movimientos de la grúa y el buque. Para ello, dichas grúas incorporan una plataforma auxiliar, situada a una cota intermedia entre la pluma y la superficie del muelle, que constituye el punto de depósito intermedio que permite la independencia de operaciones y en el que tiene lugar el enganche o desenganche del contenedor por cada uno de los carros. Estas grúas pueden suponer aumentos de productividad de hasta el 50% respecto a una grúa convencional. Sin embargo, son mucho más rígidas y pesadas, dan lugar a mayores costes operativos y son entre un 30 y un 50% más caras que una grúa de contenedores convencional de capacidad de elevación y alcance equivalentes.

Asimismo, otras tecnologías están siendo incorporadas paulatinamente a las grúas pórtico de contenedores para aumentar su productividad o la precisión y efectividad de los sistemas de control de carga, especialmente para las grúas de mayor alcance tanto en el lado mar como en el lado tierra, como los dispositivos de enganche y desenganche en tándem (spreader twin-lift), con capacidad para mover simultáneamente dos contenedores de 40', uno de 40' y dos de 20' o cuatro de 20', los carros múltiples en plumas simples o en tándem o los sistemas MOT (Machinery on Trolley) en los que la maquinaria que regula el movimiento del carro se desplaza conjuntamente con el mismo.

En general, estas grúas también son más pesadas que las convencionales. Por ejemplo, una grúa dotada con dispositivos de enganche dobles da lugar a cargas por rueda entre un 35 y un 40% superiores a las transmitidas por una grúa convencional de capacidad de elevación y alcance equivalente. Asimismo, una grúa dotada de sistemas MOT de tracción del carro da lugar a cargas por rueda aproximadamente un 15% superiores a las transmitidas por una grúa convencional equivalente con un sistema de tracción del carro tipo RTT.

◆ **Cargas mínimas**

En previsión de posibles variaciones razonables en las condiciones de utilización y criterios de explotación de la obra de atraque y amarre durante su vida útil o de incertidumbres que puedan producirse entre la fase de proyecto y de servicio de la obra, es recomendable que se adopten como mínimo los siguientes valores representativos de las cargas transmitidas por equipos de movilidad restringida en las obras de atraque y amarre de los siguientes usos en las que estén previstos sistemas de manipulación de mercancías discontinuos por elevación: