

Fig.IX.16. Condiciones usualmente más desfavorables para el diseño de muros rígidos.

Para cálculos prácticos y ejemplos concretos de aplicación se refiere al lector a los problemas resueltos en el Shore Protection Manual (1984)..

Para casos especiales como oleaje con crestas mayores a la altura de la estructura o muros sobre cimentaciones de material suelto o de enrocamiento, ver figs. IX.17 y IX.18, basta con integrar la distribución de presiones sobre la superficie de interés únicamente. Esto se puede expresar como un factor de reducción sobre la fuerza y momento calculados como se mencionó antes, y gráficas para estos factores de reducción se encuentran en el Shore Protection Manual (1984).

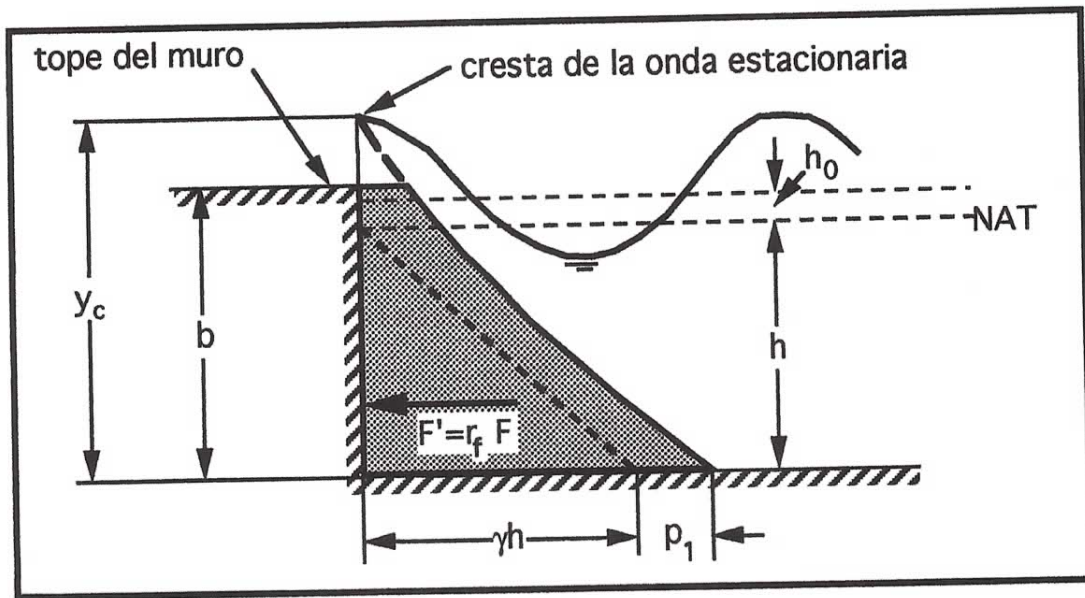


Fig.IX.17. Distribución de presiones para oleaje que rebasa el nivel de tope de muro (fuente: Shore Protection Manual, 1984).

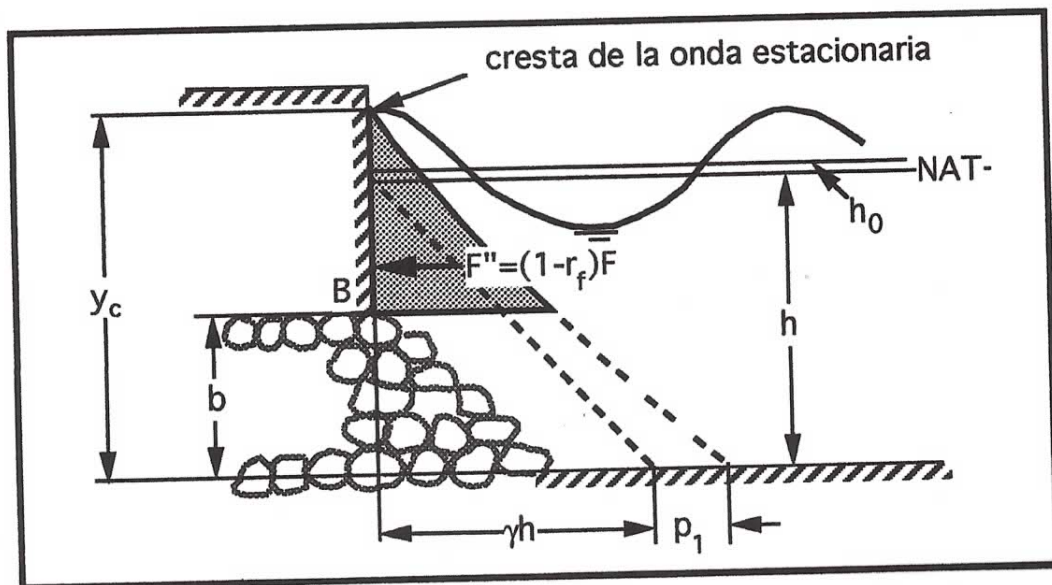


Fig.IX.18. Distribución de presiones sobre un muro apoyado sobre roca suelta.

IX.3.2 Fuerzas por oleaje rompiente.

Las olas rompientes sobre estructuras rígidas con extensas superficies planas producen fuerzas con marcadas diferencias con respecto a las no rompientes. Por un lado, además de las fuerzas de presión, existen fuerzas de impacto. Por otro lado, el atrapamiento de bolsas de aire compresible entre la ola y la superficie rígida produce oscilaciones dinámicas de presión de gran intensidad en forma local sobre algunas zonas de la estructura. Aquí describiremos el método de Minikin (1955, 1963) que, basado en estudios experimentales de laboratorio y observación de estructuras reales, proporciona una *envolvente* de estas presiones dinámicas para diseño global de la estructura. Este modelo no describe bien las presiones observadas durante una realización de un experimento, sino mas bien pretende presentar valores promedio para un ensamble de realizaciones. En forma local y para una sola realización las presiones observadas presentan gran aleatoriedad. Por ejemplo, en el caso presentado en la fig.IX.19, con tres sensores colocados sobre un muro horizontal plano sobre el que incide una ola los registros de presión de los tres sensores podrían ser dramáticamente diferentes, como se muestra en la misma figura.

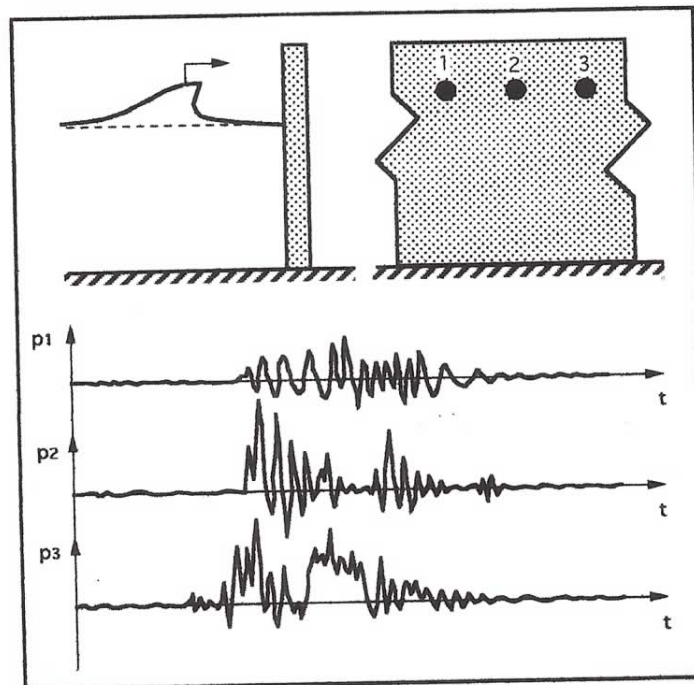


Fig.19. Esquema de una ola rompiente sobre un muro instrumentado con tres sensores de presión y los registros respectivos.

Minikin establece una distribución de presiones como la observada en la fig. IX.20 donde se incluyen las presiones dinámicas por ola rompiente y las hidrostáticas. La presión dinámica máxima se da en el nivel de aguas tranquilas con valor

$$P_{\max} = 101 \gamma \frac{H_b}{L_1} \frac{h}{h_1} (h_1 + h) \quad (\text{IX-45})$$

donde el subíndice 1 indica la longitud de onda y la profundidad, una longitud de onda aguas adentro de la estructura. Originalmente Minikin estableció sus expresiones para muros sobre cimentaciones de material suelto en cuyo caso h_1 es la profundidad al pie de la cimentación y h es la profundidad al pie del muro, como se indica en la fig. IX.21.

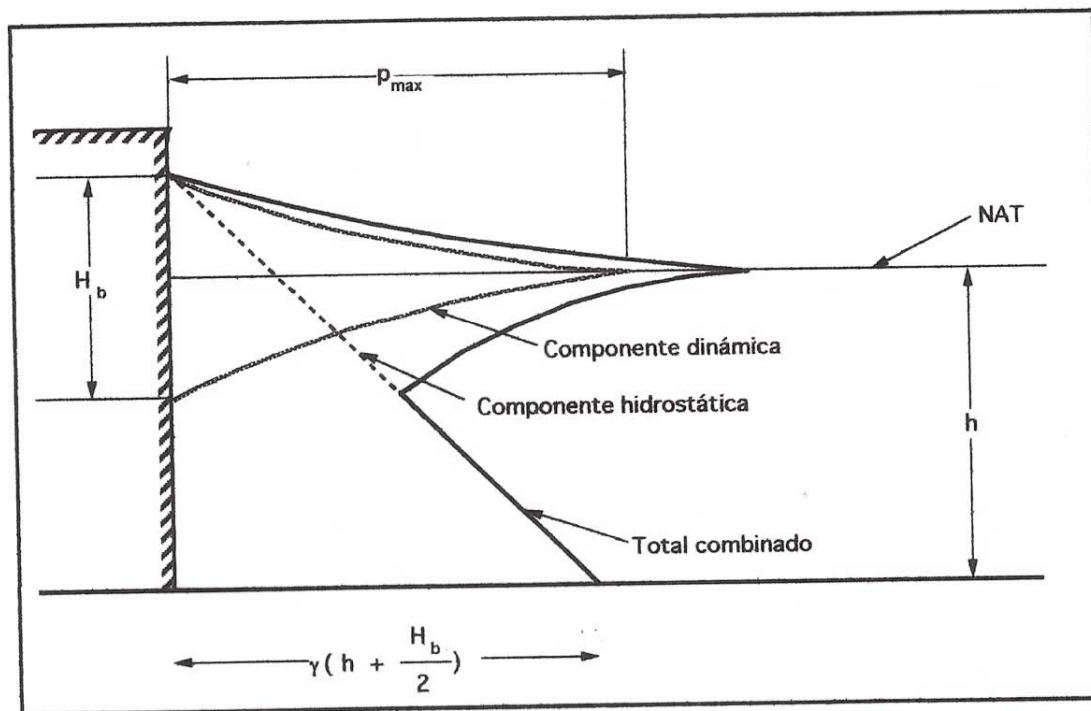


Fig.20. Diagrama de presiones sobre un muro vertical generado por una ola rompiente de acuerdo a Minikin (fuente: Shore Protection Manual, 1984).

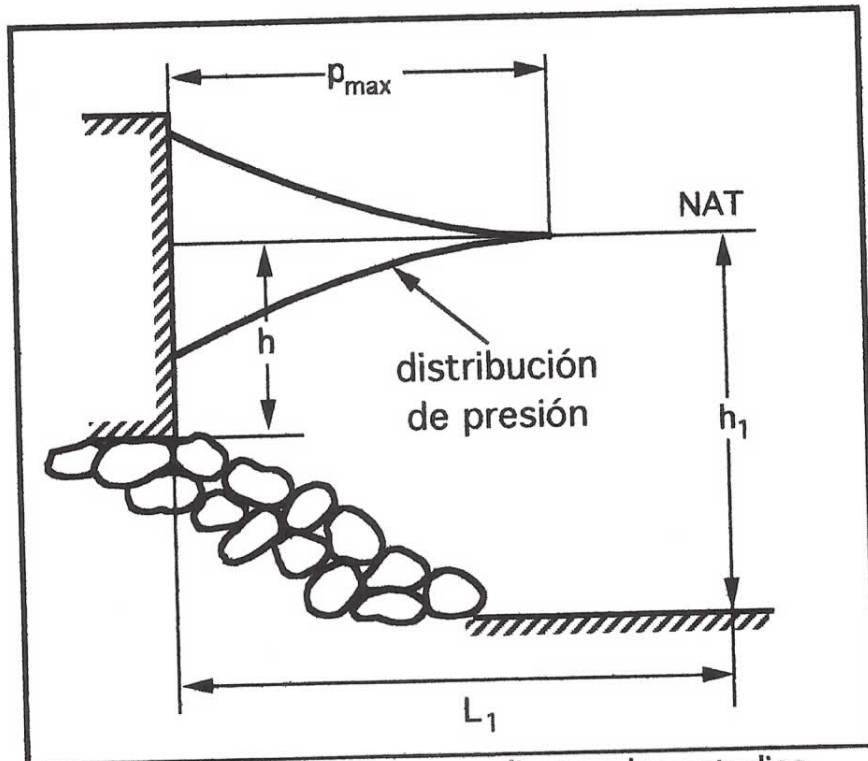


Fig.21. Nomenclatura correspondiente a los estudios originales de Minikin sobre distribución de presiones por ola rompiente sobre un muro (fuente: Shore Protection Manual, 1984).

La distribución de presiones dinámicas decrece del máximo p_{max} en forma parabólica hasta ser cero a una distancia $= H_b/2$ del nivel de aguas tranquilas.

La integración de esta distribución de presiones produce la fuerza total por impacto

$$F_{max} = \frac{P_{max} H_b}{3} \quad (IX-46)$$

mientras que el momento de volteo por impacto de olas rompientes se obtiene considerando el *brazo de palanca* de dicha fuerza

$$M_{max} = F_{max} h \quad (IX-47)$$

A estos, tanto fuerza como momento de volteo, hay que sumar los efectos hidrostáticos.

Para cálculos prácticos se refiere al lector a los problemas resueltos en el Shore Protection Manual (1977,1984). Las figs. IX.22 y IX.23 (y 7-80 de dicha referencia) son una solución gráfica de Minikin para p_{max} y F_{max} .

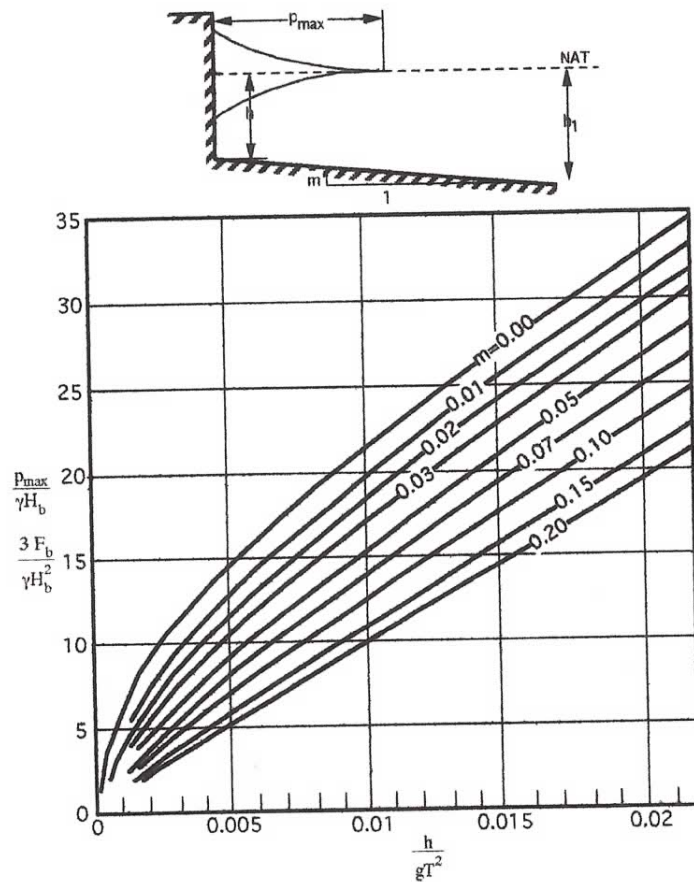


Fig.22. Diagrama para calcular presión máxima (p_{max}) y fuerza (F_b) por ola rompiente de acuerdo a Minikin (fuente: Shore Protection Manual, 1984).

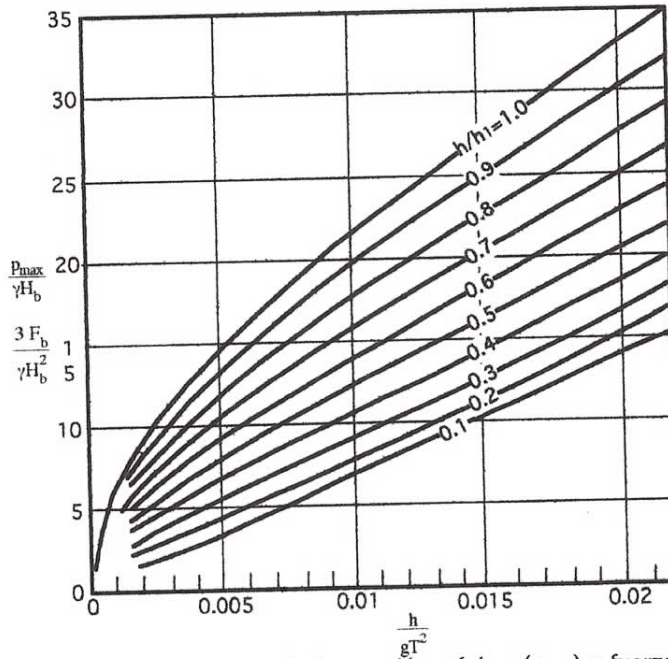


Fig. 23. Diagrama para calcular presión máxima (p_{max}) y fuerza dinámica (F_b) por ola rompiente de acuerdo a Minikin. Nomenclatura en fig.21 (fuente: Shore Protection Manual, 1984).

Para olas rompientes cuya cresta rebasa la altura de la estructura, la integración debe hacerse solo sobre la zona de interés, ver fig. IX.24 y también puede ser expresada como el cálculo ya descrito pero afectado por un factor de reducción para la fuerza y un factor de reducción para el brazo de palanca.

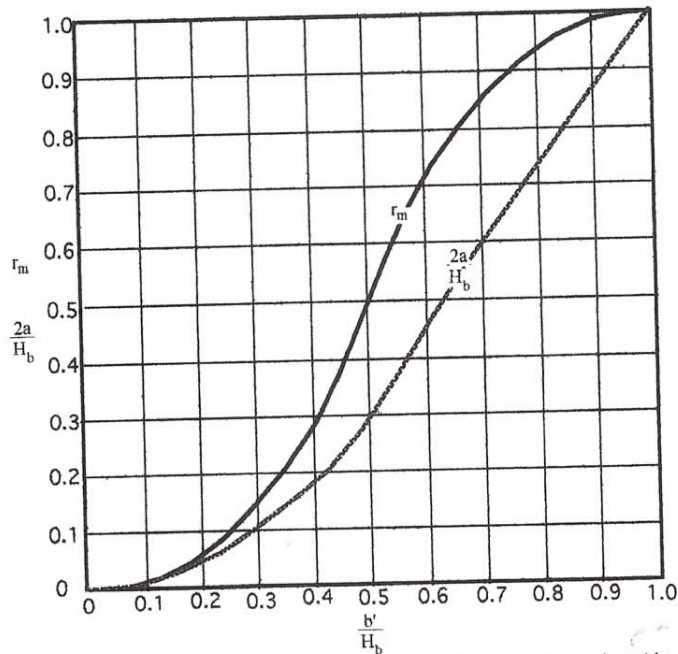
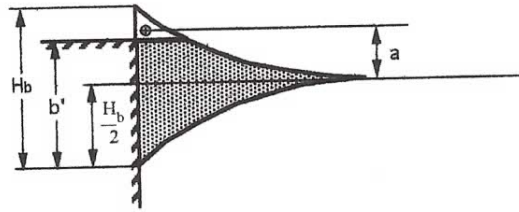


Fig.24. Diagrama para el cálculo de los factores de reducción de fuerza (r_m) y de brazo de palanca (a) para el caso de una ola rompiente que rebasa el tope del muro (fuente: Shore Protection Manual, 1984).

IX.3.3 Fuerzas por oleaje postrompiente.

Para oleaje remanente tras romper, se considera que las fuerzas son, además de la hidrostática, la debida a una columna de agua de altura h_c avanzando a la velocidad de propagación de la ola (en aguas someras), $C = \sqrt{gh_b}$. En este sentido la aplicación a muros mar adentro de la línea de aguas tranquilas⁴, ver fig. IX.25, produce

$$p_{\max} = \frac{\gamma C^2}{2g} = \frac{\gamma h_b}{2} \quad (\text{IX-48})$$

⁴ La línea (o zona) sobre la costa a la que normalmente llega el agua de mar en condiciones de oleaje mínimo.

$$h_c = 0.78 h_b \quad (\text{IX-49})$$

$$F_{\max} = p_{\max} h_c = \frac{\gamma h_b h_c}{2} \quad (\text{IX-50})$$

$$M_{\max} = F_{\max} \left(h + \frac{h_c}{2} \right) \quad (\text{IX-51})$$

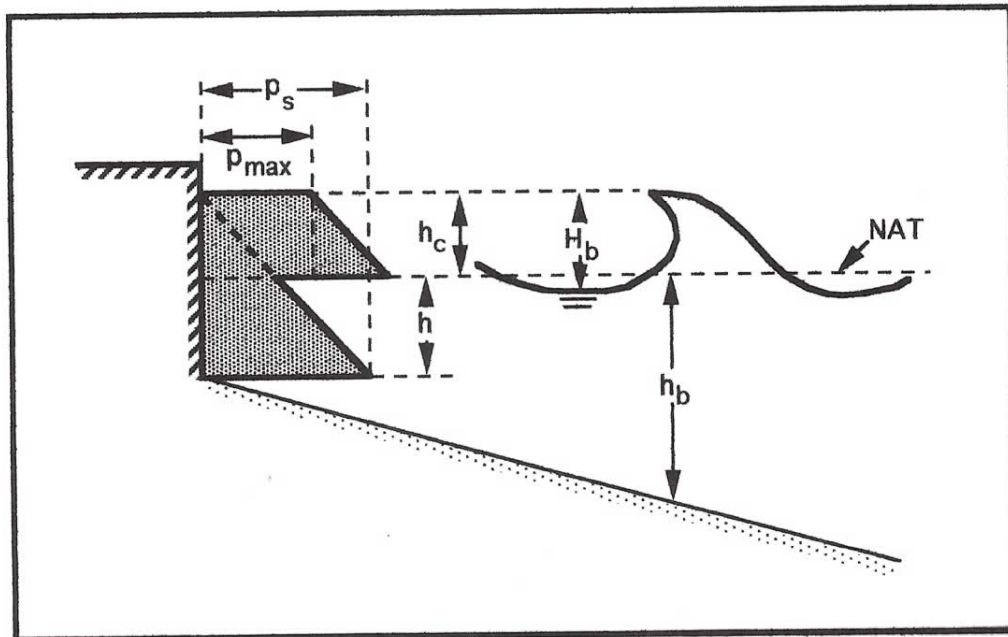


Fig.25. Diagrama de cálculo y nomenclatura para fuerzas de oleaje postrompiente sobre un muro aguas adentro de la línea de costa (fuente: Shore Protection Manual, 1984).

Para muros mar afuera de la línea de litoral para aguas tranquilas, ver fig. IX-26, se usa una velocidad y altura de columna ajustados en lugar de C y h_c .

$$v' = C \left(1 - \frac{x_1}{x_2} \right) = \sqrt{gh_b} \left(1 - \frac{x_1}{x_2} \right) \quad (\text{IX-52})$$

$$h' = h_c \left(1 - \frac{x_1}{x_2} \right) \quad (\text{IX-53})$$

$$p_{\max} = \frac{\gamma v'^2}{2g} = \frac{\gamma h_b}{2} \left(1 - \frac{x_1}{x_2}\right)^2 \quad (\text{IX-54})$$

$$F_{\max} = p_{\max} h' = \frac{\gamma h_b h_c}{2} \left(1 - \frac{x_1}{x_2}\right)^3 \quad (\text{IX-55})$$

$$M_{\max} = F_{\max} \frac{h'}{2} = \frac{\gamma h_b h_c}{4} \left(1 - \frac{x_1}{x_2}\right)^4 \quad (\text{IX-56})$$

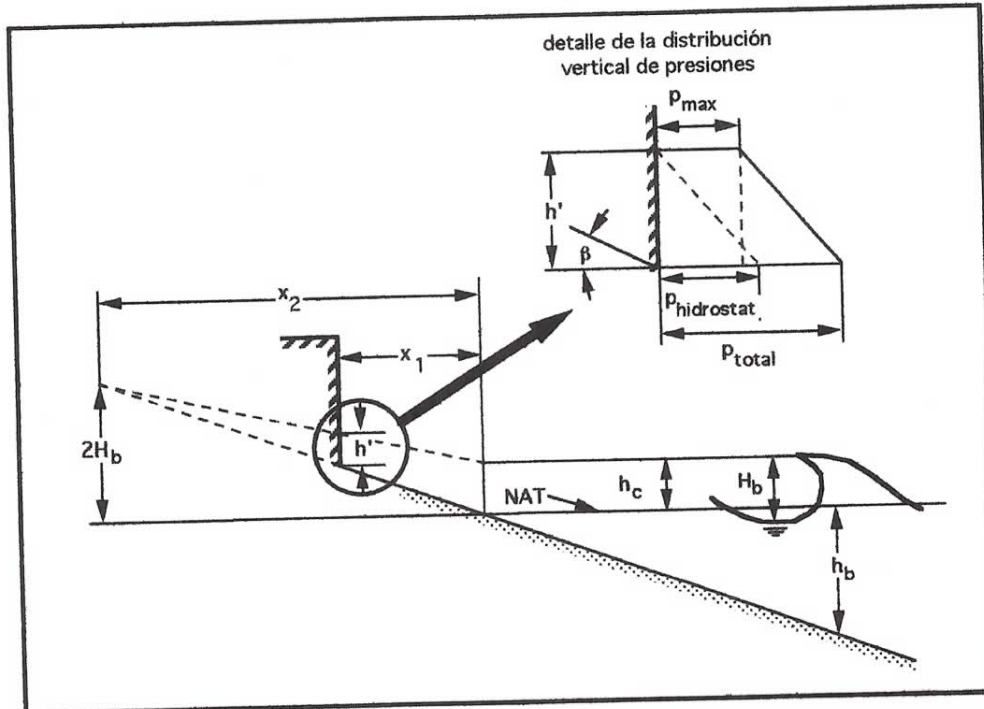


Fig.26. Diagrama de cálculo y nomenclatura para fuerzas de oleaje postrompiente sobre un muro aguas afuera de la línea de costa (fuente: Shore Protection Manual, 1984).

A estos hay que aumentar el efecto hidrostático (suponiendo superficie libre en h_c o h' dependiendo del caso). Numerosos problemas resueltos al respecto de este tema pueden ser consultados en el Shore Protection Manual, 1977, 1984.

Para olas rompientes y postrompientes el ángulo de incidencia y el ángulo con la vertical afectan el cálculo de fuerza reduciéndose conforme a

$$F' = F \text{ sen}^2 \alpha \quad (\text{IX-57})$$

donde α es el ángulo de incidencia (ver fig. IX.27)

$$F'' = F \operatorname{sen}^2 \theta$$

(IX-58)

donde θ es el ángulo de la estructura con la vertical (ver fig.IX.28).

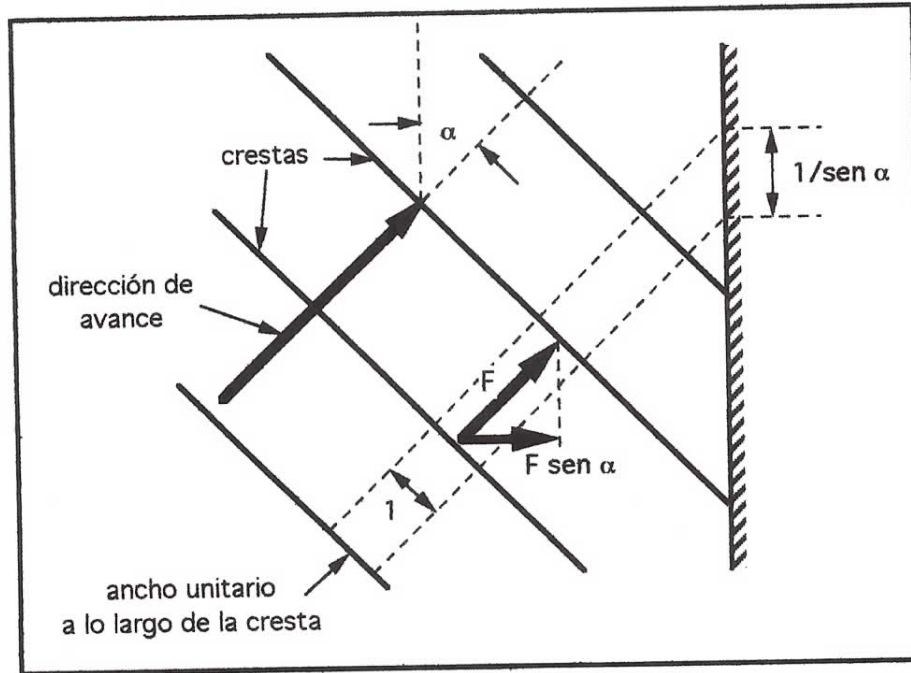


Fig.IX.27. Esquema de reducción de fuerzas de oleaje para incidencia oblicua. Observe que en este caso la fuerza máxima sobre el muro no se da simultáneamente a lo largo de su longitud.

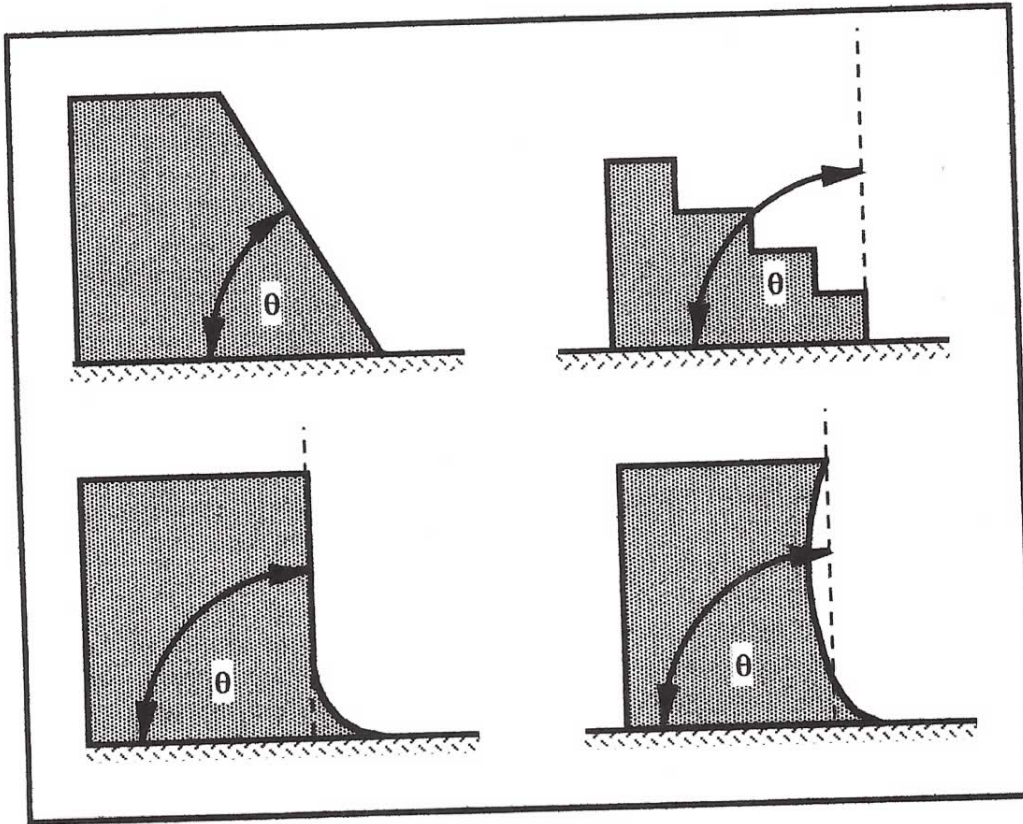


Fig.28. Diagrama para la selección de θ en el caso de oleaje incidente sobre un muro no vertical.

En el caso de incidencia oblicua es importante comentar que las presiones, fuerzas y momentos máximos no se presentan simultáneamente a lo largo de toda la estructura, lo que debe ser considerado en el diseño.

IX.4. ESTABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE MATERIAL SUELTO.

Aquí nos referimos a estructuras hechas de roca o elementos prefabricados de concreto armado o bolsacreto. El detalle del fenómeno de incidencia de oleaje sobre estas estructuras es complicado y no se presta a un tratamiento analítico. Aquí solo mencionaremos brevemente criterios de estabilidad del material superficial de la estructura en cuanto al peso requerido de cada elemento. Se refiere el lector al Shore Protection Manual, 1984. Es importante mencionar que en este tipo de estructuras es común aceptar un cierto daño para las condiciones de diseño ya que fallas

locales no ponen en peligro la integridad completa de la estructura ni su función.

El criterio recomendado por el Shore Protection Manual para el peso de cada elemento es

$$W = \frac{\gamma_s H^3}{K_D (S_r - 1) \cot \theta} \quad (\text{IX-59})$$

donde

W = peso del elemento

γ_s = peso específico del material del elemento

$S_r = \gamma_s / \gamma_{\text{fluido}}$

H = altura de ola

θ = ángulo de la cara de la estructura con la horizontal

K_D = coeficiente de estabilidad

El coeficiente de estabilidad depende de la forma, angularidad, rugosidad y grado de anclaje de los elementos, ver tabla IX-1. Para información mas detalladas se refiere el lector al Shore Protection Manual, 1984.

Tabla IX-1. Valores del coeficiente de estabilidad para diseño de estructuras de material suelto.

Tipo de elemento	número de capas en la armadura	Colocación	Cuerpo de la estructura		Extremo de la estructura		pendiente cot(teta)
			KD rompientes	KD no rompiente	KD rompientes	KD no rompiente	
Roca de cantera lisa redondeada	2	aleatoria	1.2	2.4	1.1	1.9	1.5 a 3
lisa redondeada	>3	aleatoria	1.6	3.2	1.4	2.3	5
aspera angular	1	aleatoria	norecomendado	2.9	norecomendado	2.3	5
aspera angulosa	2	aleatoria	2	4	1.9 1.6 1.3	3.2 2.8 2.3	1.5 2 3
aspera angulosa	>3	aleatoria	2.2	4.5	2.1	4.2	5
aspera angulosa	2	decabeza	5.8	7	5.3	6.4	5
paralelepipedo	2	cuidadosa	7 a 20	8.5 a 24			
Tetrápodos y Quadripodos	2	aleatoria	7	8	5 4.5 3.5	6 5.5 4	1.5 2 3
"Tribar"	2	aleatoria	9	10	8.3 7.8 6	9 8.5 6.5	1.5 2 3
Dolos	2	aleatoria	15.8	31.8	8 7	16 14	2 3
Cubos modificados	2	aleatoria	6.5	7.5		5	5
Hexapodos	2	aleatoria	8	9.5	5	7	5
"Toskane"	2	aleatoria	11	22			
"Tribar"	1	uniforme	12	15	7.5	9.5	5
Roca de cantera angular graduada		aleatoria	2.2	2.5			