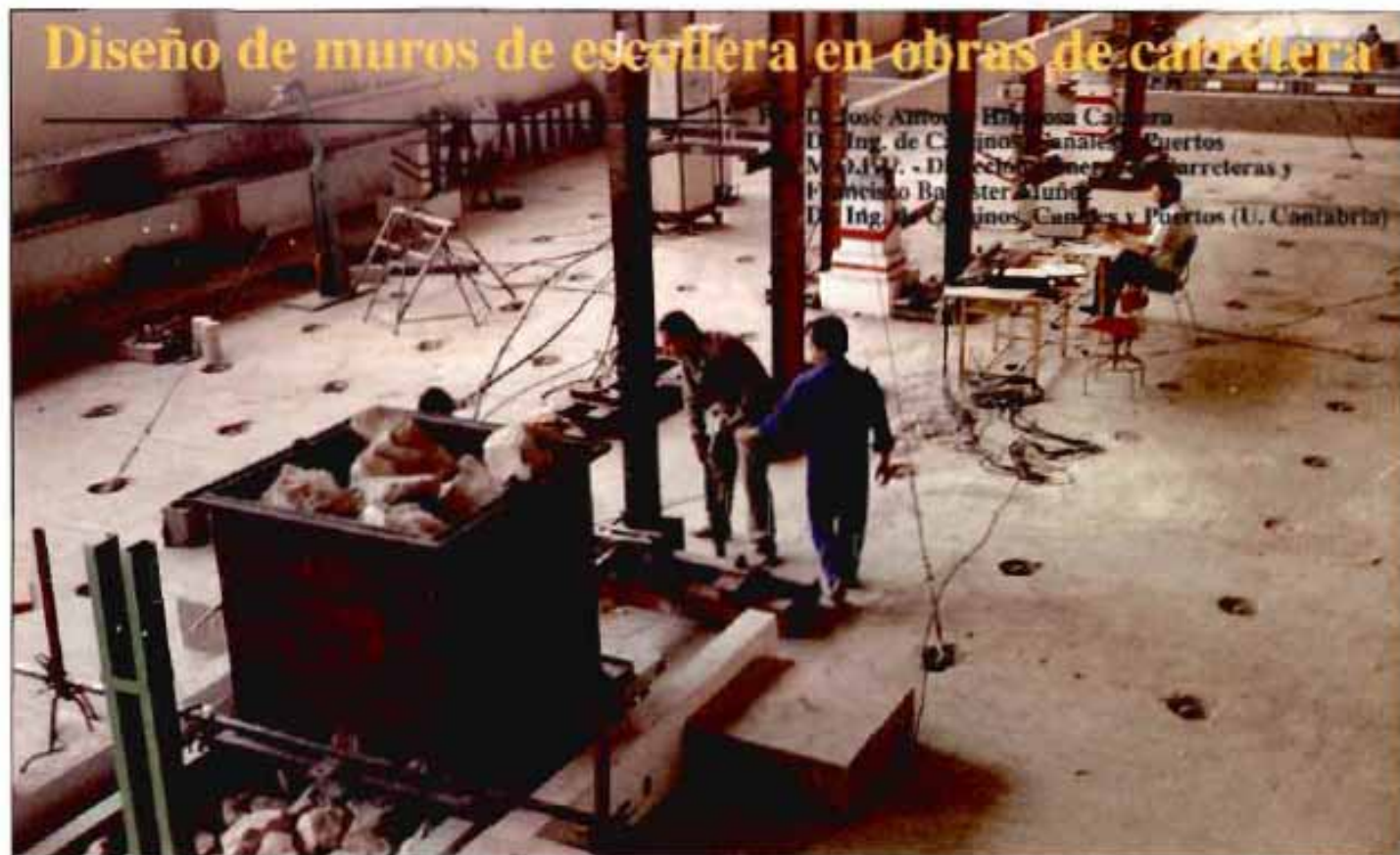


Diseño de muros de escollera en obras de carretera

Por D. José Antonio Hinojosa Cabrera
Dir. Ing. de Caminos, Canales y Puertos
M.O.U. - Dirección General de Carreteras y
Francisco Ballester Muñoz
Dir. Ing. de Caminos, Canales y Puertos (U. Cantabria)



Este artículo es el resumen del Convenio establecido entre la Dirección General de Carreteras y la Universidad de Cantabria bajo el título "Estudio de la caracterización geomecánica de muros de escollera en obras de carretera" que ha sido dirigido por D. José Antonio Hinojosa Cabrera, Subdirector General de Programas y Presupuestos y realizado en el Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos de la Universidad de Cantabria, por D. Francisco Ballester Muñoz (investigador principal), D. Angel Peral San Emeterio, D. Román Blanco Reinoso y D. Pablo Díaz Echevarría (becarios).

1 - Los muros de escollera en obras de carreteras

En las obras públicas muy a menudo debemos de recurrir a las estructuras de contención con el fin de retener a dos masas de tierra a diferente nivel reduciendo de esta forma su talud. Esto ha supuesto un reto a los ingenieros y responsables de las mismas, sobre todo en las regiones montañosas donde la realización de carreteras y ferrocarriles obliga a numerosas obras de fábrica.

Numerosos son los muros de mampostería realizados en la primera mitad de este siglo, los cuales fueron ejecutados por maestros canteros con mampostería en seco y que aún hoy en día nos causan admiración.

Posteriormente con la introducción del hormigón se inició la realización de muros de hormigón en masa o gravedad para pasar más recientemente a muros estructurales de hormigón armado e incluso prefabricados.

El constante encarecimiento de los elementos de la construcción, unido a la facilidad de obtención de bloques de escollera, así como su cuidada colocación en obra, ha vuelto en los últimos años a introducir en nuestras obras públicas el empleo de la piedra (bloques de escollera) como elemento de contención.

El empleo de bloques de escollera se inició en las obras marítimas y posteriormente en el encauzamiento de los ríos. Esto supuso un gran avance en la manipulación y colocación de paramentos de escollera, formándose

superficies adecuadas para la canalización de los ríos.

Pero las solicitudes a que se ve sometida una escollera, tanto en una obra marítima como fluvial no es extrapolable a su comportamiento en una estructura de contención sometida únicamente al empuje de tierras con o sin presencia de agua freática.

Diversas son las ventajas de la utilización de muros de mampostería de escollera en las estructuras de contención:

- Economía frente a los muros tradicionales de hormigón, experimentando ahorros de hasta un 40%.
- Supresión del empuje del agua dada sus características perfectamente drenantes.
- Facilidad a adaptarse a movimientos horizontales y verticales diferenciales del terreno, admitiendo grandes distorsiones sin daño estructural.
- Armonización con el paisaje al utilizar un producto natural.

2 - Ensayos realizados para la obtención de los parámetros de la escollera

Se han realizado una serie de ensayos con el fin de estimar los parámetros que rigen el comportamiento de la escollera en los muros, que se han encaminado a determinar

un ángulo de rozamiento interno aparente, que englobe el comportamiento real de las escolleras sometidas a esfuerzos cortantes.

En un muro de contención o sostenimiento cada bloque de escollera se encuentra sometido a una serie de fuerzas procedentes del empuje de las tierras, de otros bloques contiguos de escollera y sobrecargas exteriores.

Su desplazamiento se producirá cuando la suma de fuerzas horizontales desestabilizadoras supere a la fuerza de rozamiento aparente que será la suma de dos componentes, una de rozamiento puro entre las superficies en contacto y otra de trabazón existente entre dos bloques de escollera.

La existencia de estos dos sumandos es un hecho bien establecido en otros materiales similares. En obras marítimas suele hablarse de "fricción" y "trabazón". En suelos y materiales granulares, el ángulo de rozamiento interno resulta función de la densidad de compactación.

Los ensayos realizados se han encaminado a obtener esta fuerza de rozamiento aparente definida por $\tan \phi$ (ϕ el ángulo de rozamiento), suma de las dos que acabamos de citar.

finada de modo que no se produzcan movimientos en ella.

Se han realizado diez ensayos variando, según el gráfico adjunto (ver Tabla 1), el tamaño de las piedras y la

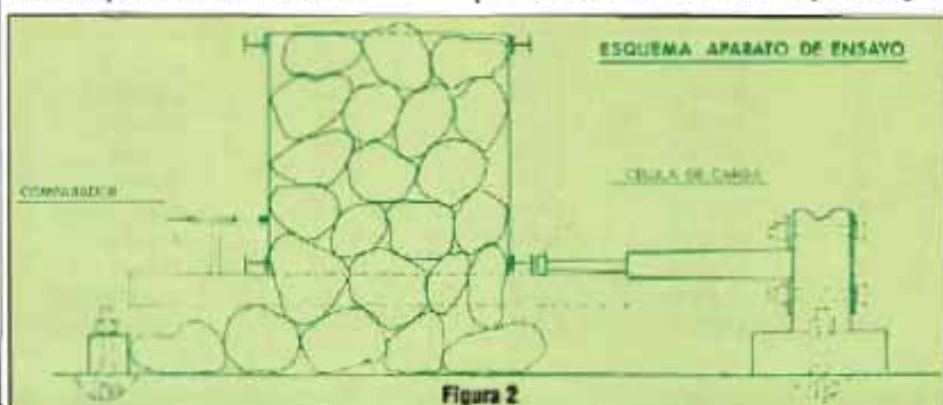


Figura 2

El aparato diseñado para realizar estos ensayos, que se representa esquemáticamente en la figura 2, consta de un cajón sin fondo que se rellena de escollera y desliza por unos raíles empujado por un gato, intentando reproducir a gran escala un

forma de colocación.

Se han considerado tres tamaños de piedra:

Grande 80 - 100 kg que equivalen a 2.160 - 2.700 kg en la realidad

Mediana 30 - 50 kg que equivalen a 810 - 1.350 kg en la realidad

Pequeña 5 - 10 kg que equivalen a 135 - 270 kg en la realidad

Para las dos primeras se han utilizado dos tipos de colocación:

- Muy buena que supone una densidad aparente de 1,9 t/m³
- Buena que supone una densidad aparente de 1,7 t/m³

La variación de la sobrecarga se ha conseguido mediante el llenado total o parcial del cajón del ensayo.

Para los ensayos con balasto se ha realizado una única forma de colocación debido a su pequeño tamaño.

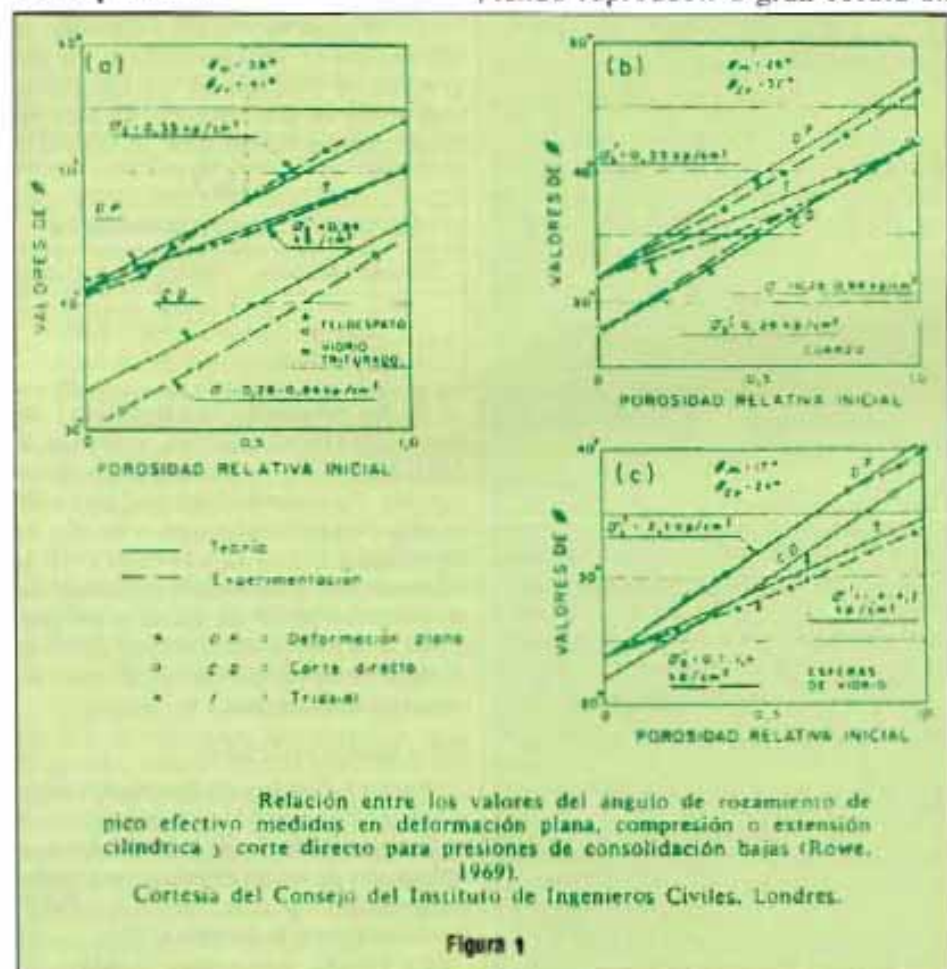


Figura 1

En diacilas rugosas en macizos rocosos, son clásicos los estudios de Patton (1966) y Barton (1973), que definen el ángulo de rozamiento aparente como suma de un rozamiento básico más una componente función de las características de las asperezas de la junta.

ensayo de coste directo.

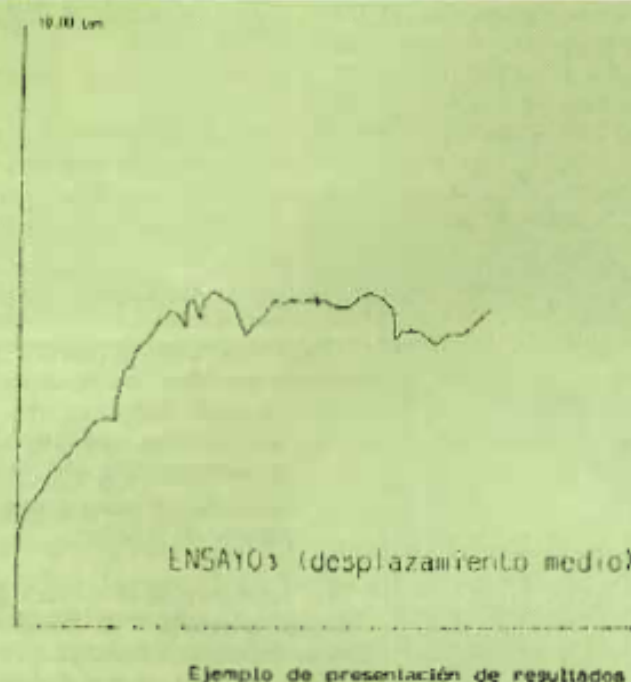
El movimiento que el gato induce al cajón hace que deslice la escollera que se alberga en su interior, sobre la capa que subyace (la cual puede ser bien de escollera, o bien de terreno, según el ensayo que se realice). Esta capa que sirve de sustrato está con-

“**E**l constante encarecimiento de los elementos de la construcción, unido a la facilidad de obtención de bloques de escollera, así como su cuidada colocación en obra, ha vuelto en los últimos años a introducir en nuestras obras públicas el empleo de la piedra (bloques de escollera) como elemento de contención.”

Tabla 1

Ensayos realizados

Nº ensayo	Tamaño piedra	Peso de las piedras-Kg	tg ϕ_r obtenido	Colocación
1	balasto	2.200	1'65	—
2	medio	1.160	2'14	regular
3	medio	2.234	2'25	regular
4	medio	1.292	2'24	buena
5	medio	2.842	1'41	buena
6	medio	1.496	2'5	muy buena
7	grande	2.085	1'34	regular
8	grande	2.026	1'58	buena
9	grande	1.645	2'06	muy buena
10	grande	2.510	2'11	muy buena



3 - El diseño de muros de escollera

3.1 - Suelos granulares

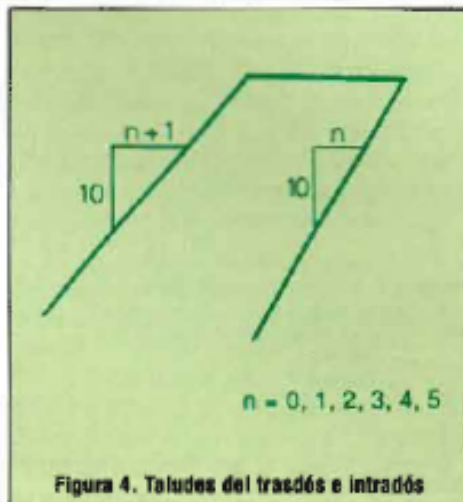
Para estudiar la estabilidad de los muros, se ha utilizado la teoría de Coulomb definiéndose los distintos tipos de terreno utilizados para la confección de los ábacos de cálculo en la tabla 2.

Tabla 2

Tipo y características de los terrenos utilizados

Tipo	$\phi_r(^{\circ})$	$\gamma (t/m^3)$
I	35	1'9
II	25	1'9

Los taludes considerados del trasdós e intradós del muro, se definen en la figura 4.



En todos los casos se ha considerado el valor del ángulo de rozamiento terreno muro δ igual a 0, lo cual supone, en aquellas situaciones en que esto no sea cierto, un error del lado de la seguridad.

“Se ha estudiado la estabilidad del muro frente al vuelco, y frente al deslizamiento interno en distintos niveles, considerándose que una adecuada cimentación con vertido de hormigón entre la escollera de la cimentación, soluciona el problema del deslizamiento en su base, y proporciona una mayor uniformidad tanto en el reparto de cargas en la cimentación como en los asientos.”

El material de escollera utilizado en los muros se ha clasificado en dos grupos, en función de los resultados obtenidos en los ensayos, siendo sus características las definidas en la tabla 3.

Tabla 3

Características de la escollera

Tipo de escollera	tg $\phi_r (^{\circ})$	$\gamma_r (t/m^3)$
Tipo A	2.0	1.9
Tipo B	1.5	1.7

Se ha estudiado la estabilidad del muro frente al vuelco, y frente al deslizamiento interno en distintos niveles, considerándose que una adecuada cimentación con vertido de hormigón entre la escollera de la cimentación, soluciona el problema del deslizamiento en su base, y proporciona una mayor uniformidad tanto en el reparto de cargas en la cimentación como en los asientos.

3.2 - Suelos cohesivos

Para el estudio de los muros cuyo material del trasdós sea cohesivo, se utiliza el método de Bishop, mediante la utilización de un programa de ordenador desarrollado por E. Castillo (1975) modificado por R. Arroyo (1986).

El citado programa analiza la estabilidad de taludes heterogéneos, previa introducción de la geometría y características mecánicas de los distintos materiales que lo componen, mediante el estudio de distintos posibles círculos de rotura (distintas coordenadas de centros y distintos radios).

La definición del círculo pésimo resulta un proceso laborioso e iterativo, lo que hace que no sea un método operativo, para su tabulación en función de distintas geometrías y materiales, resultando sin embargo, una útil herramienta para el estudio de casos concretos.

4 - Descripción del tipo de muro de escollera estudiado

4.1 - Consideraciones generales

El muro de escollera estudiado para la confección de los ábacos de cálculo debe presentar las características que se definen en los apartados siguientes.

4.2 - Características de la escollera

La escollera utilizada en los ensayos proviene de una roca caliza, procedente de voladura, sana y no alterable por los agentes atmosféricos.

Se han estudiado dos tamaños, uno entre 800 y 1.350 kg y otro de 2.000 y 3.000 kg.

Los ensayos realizados a escala 1/3 no ofrecieron grandes diferencias según los tamaños considerados, si bien se ha utilizado, basándose en la experiencia para la realización de los ábacos, piedra de más de 1.000 kg lo que supone una arista media de 70 cm.

La roca caliza a utilizar deberá tener las siguientes características físico-químicas:

- Peso específico real	superior a 2,6 t/m ³
- Resistencia a compresión simple.....	superior a 70 Mpa
- Desgaste coeficiente del ensayo de "Los Angeles" ..	inferior al 35%
- Contenido en carbonato cálcico	superior al 90%
- Pérdida al ser sometido a cinco ciclos de tratamiento con soluciones de sulfato magnésico (ensayo UNE - 7136).....	inferior al 10%

Numerosas obras realizadas en Cantabria cumpliendo estas especificaciones se han comportado correctamente, especialmente desde el punto de vista de la inalterabilidad de la roca.

El posible empleo de otros tipos de piedra requerirán un estudio más detallado, con el fin de garantizar su estabilidad e inalterabilidad. En principio pueden ser válidas las rocas consideradas como adecuadas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales, para obras de Carreteras y Puentes. (PG 4/88 Artículo 331).

4.3 - Colocación de la escollera

La piedra para la realización del muro se colocará de forma estable, manteniendo en todo momento su contrainclinación de 1 a 3 (figura 5).

La tolerancia en abertura entre bloques no superará los 12 cm en ningún punto.

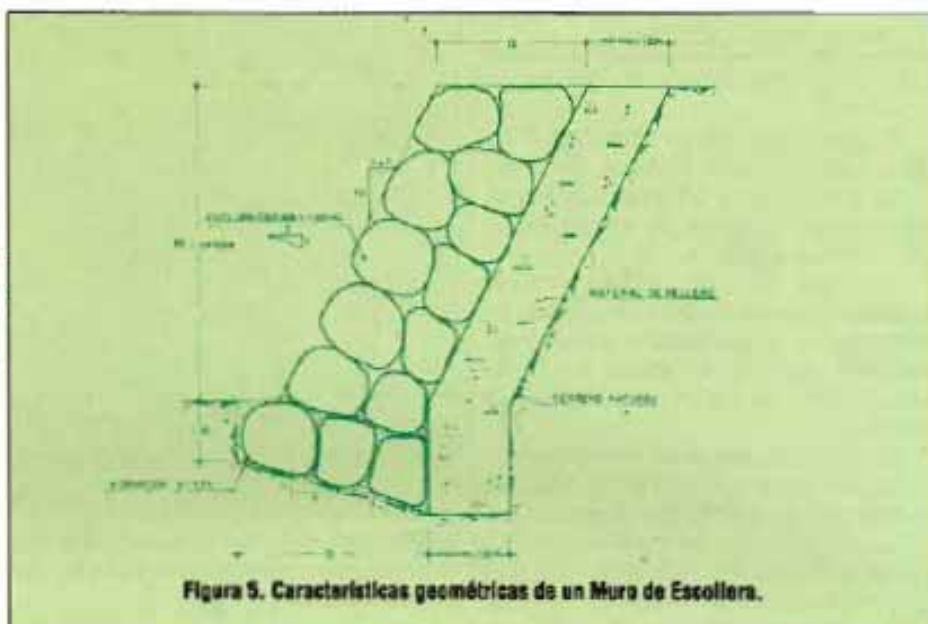


Figura 5. Características geométricas de un Muro de Escollera.

Para su colocación, cada bloque deberá de apoyar su cara inferior en al menos otros dos, estando en contacto con los bloques laterales, con el fin de asegurar la mayor trabazón posible.

A medida que se vaya subiendo las diferentes hiladas, se irá vertiendo el relleno granular del trasdós.

La experiencia indica que con una correcta colocación de la escollera, se alcanzan densidades aparentes próximas a 2 t/m³, habiéndose tomado en este trabajo para la confección de los ábacos una densidad máxima de 1'9 t/m³ para el

d) Reducción casi total de la salida de material arcilloso a través de la escollera y el afloramiento de agua en todo el parámetro del muro.

4.5 - Cimentación

La cimentación del muro de escollera se realiza mediante el vertido de hormigón (H-125) entre los huecos de la parte de escollera situada bajo la rasante del muro.

La zapata presenta una sobreexcavación de 1 m y una profundidad mínima de 1 m según la capacidad portante del terreno.

Con el vertido de hormigón se consigue mayor rigidez en la cimentación, unificando los asientos y facilitando las redistribuciones de las tensiones del terreno. Esta operación se realiza fácilmente y con un sobrecoste reducido, mejorando en gran manera la estabilidad del muro de escollera.

“La experiencia indica que con una correcta colocación de la escollera, se alcanzan densidades aparentes próximas a 2 t/m³, habiéndose tomado en este trabajo para la confección de los ábacos una densidad máxima de 1'9 t/m³ para el caso de colocación muy buena y 1'7 t/m³ para colocación buena.”

caso de colocación muy buena y 1'7 t/m³ para colocación buena. Con una deficiente colocación se alcanzan fácilmente densidades inferiores a 1'4 t/m³ con gran pérdida de resistencia tanto al vuelco como al deslizamiento.

4.4 - Material del trasdós del muro

Las características del material a colocar en el trasdós del muro, en un espesor no inferior a 1 m, son las de un material filtro con tamaño máximo inferior a 15 cm.

La utilización de un material de estas características garantiza cuatro funciones:

- a) Reparto más uniforme de los empujes sobre la escollera.
- b) Reducción de los empujes sobre el muro.
- c) Garantizar el correcto drenaje del muro facilitado por los huecos existentes en la escollera.

5 - Abacos de cálculo

5.1 - Descripción de la tipología estudiada

El programa de ordenador utilizado, calcula el coeficiente de seguridad al vuelco y al deslizamiento, utilizando la teoría de empujes de tierras de Coulomb.

El estudio se ha realizado para distintas combinaciones de altura de muro, ancho en coronación, taludes del trasdós e intradós del muro, así como para distintos tipos de terreno y escollera.

Se han considerado como características de la escollera los valores medios de los resultados obtenidos en los ensayos, que se resumen en la figura 6, habiéndose adoptado los dos tipos de escollera definidos en la tabla 3 y los dos tipos de terreno definidos en la tabla 2.

En el caso de muros de contención se considera que el terreno tiene un

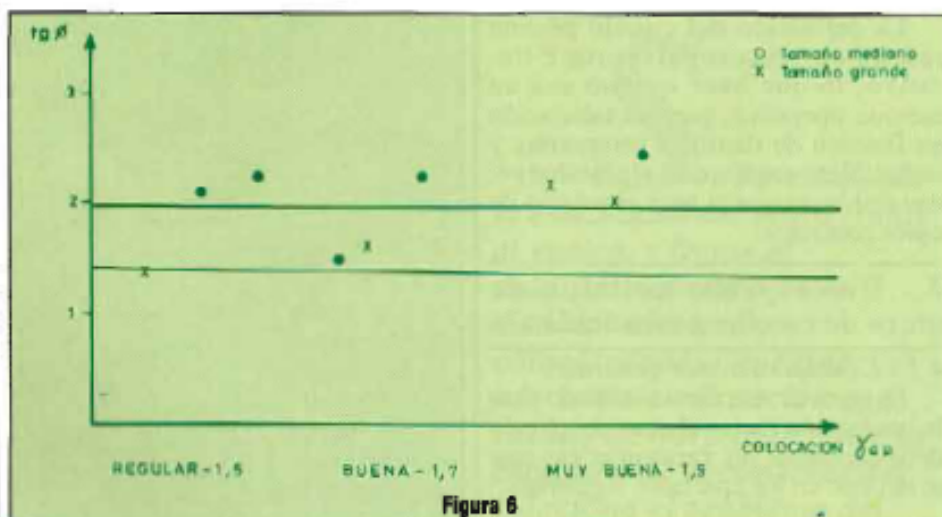


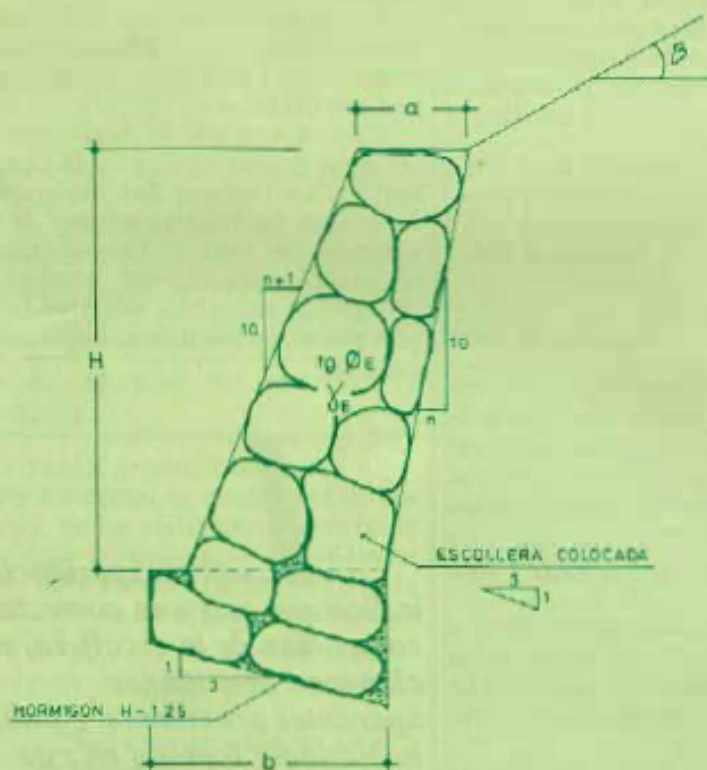
Figura 6

talud indefinido del mismo valor que el ángulo de rozamiento interno del propio material.

En el caso de muros de sostenimiento se ha considerado un terreno horizontal con una sobrecarga indefi-

nida de 3 t/m con la que se pretende englobar el peso propio del firme, el de una capa de aproximadamente 1 m de terreno y el efecto del tren de cargas de la "Instrucción relativa a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carreteras".

5.2 - Muros de contención



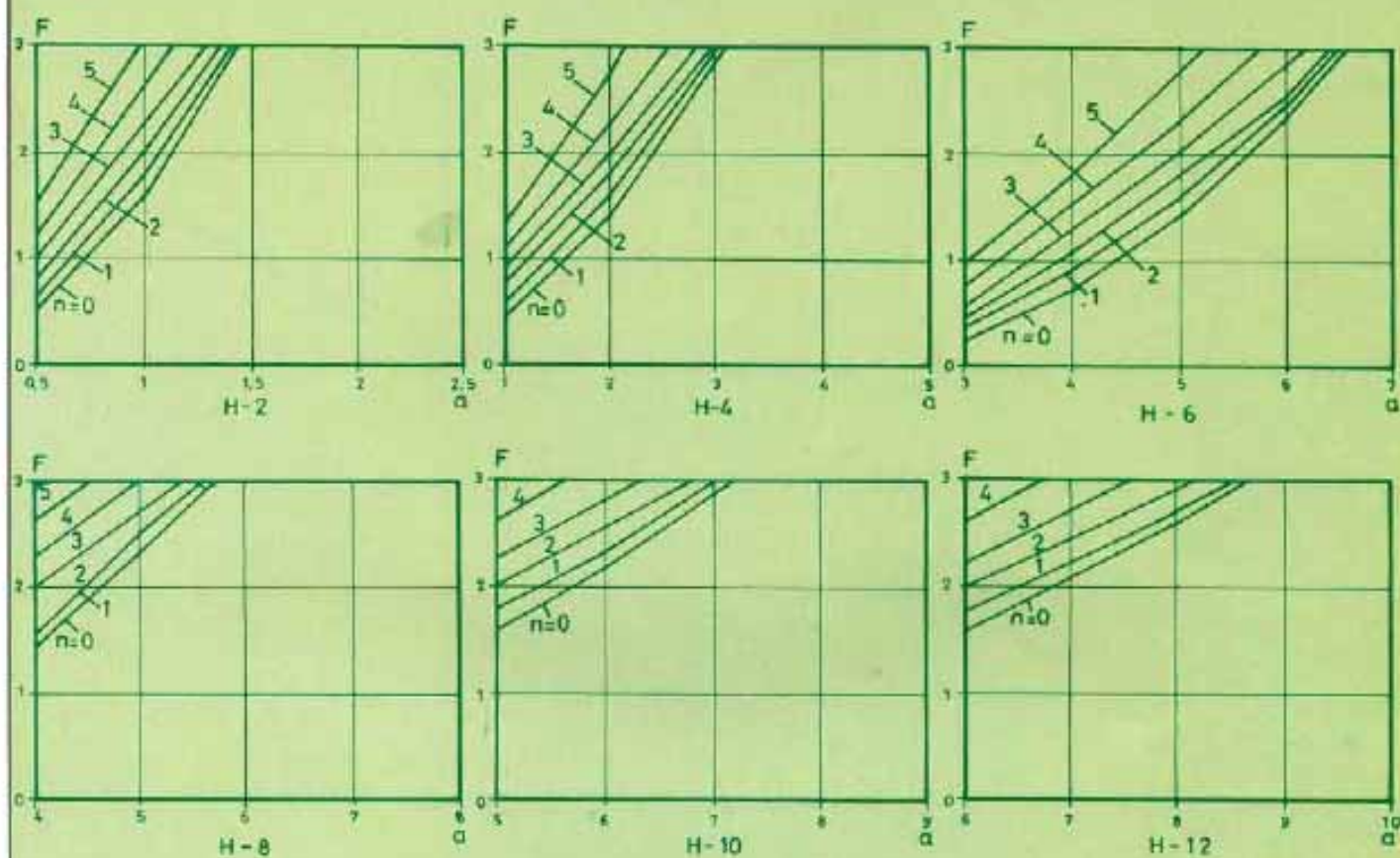
β, γ

a = ANCHO DEL MURO EN CORONACION
 F = COEFICIENTE DE SEGURIDAD DE DISEÑO
 b = ANCHO DEL MURO EN LA BASE

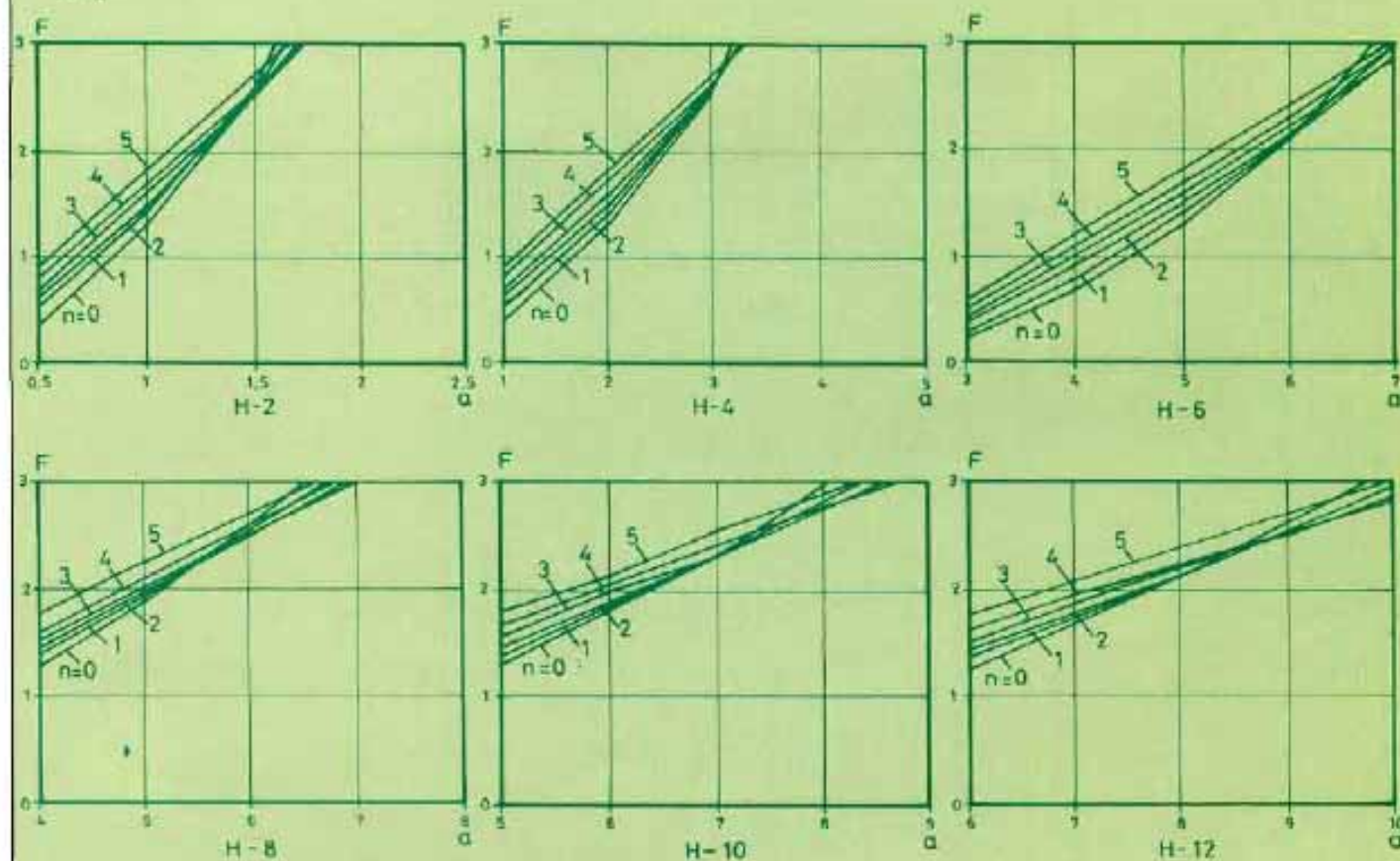
$$b = a \cdot \frac{H}{10}$$

	I _c	II _c	III _c	IV _c	V _c	VI _c
$tg \beta_c$	2	2	2	1,5	1,5	1,5
γ_c	1,9	1,9	1,9	1,7	1,7	1,7
β_r	35°	25°	15°	35°	25°	15°
γ_i	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
β	35°	25°	15°	35°	25°	15°

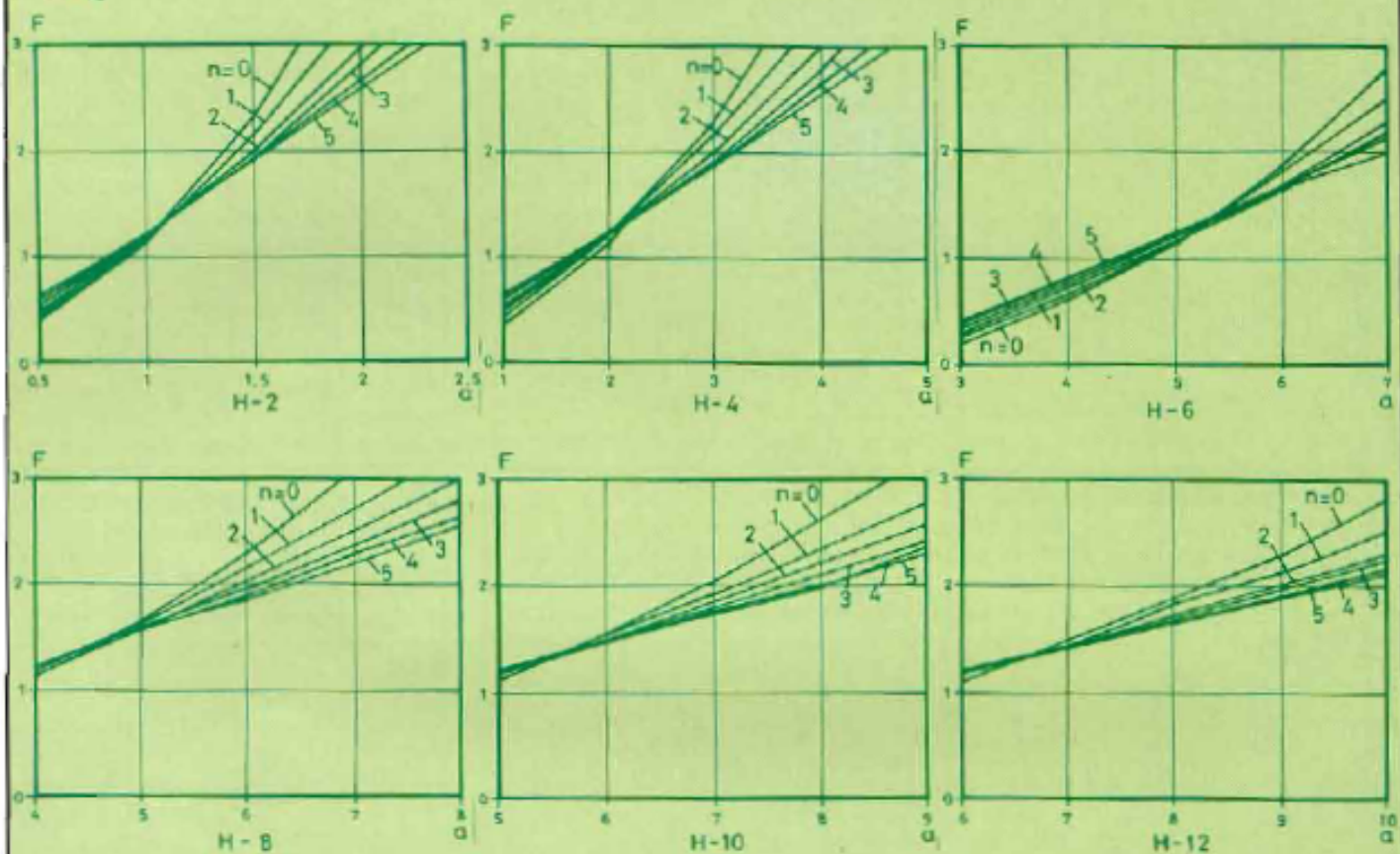
Ic



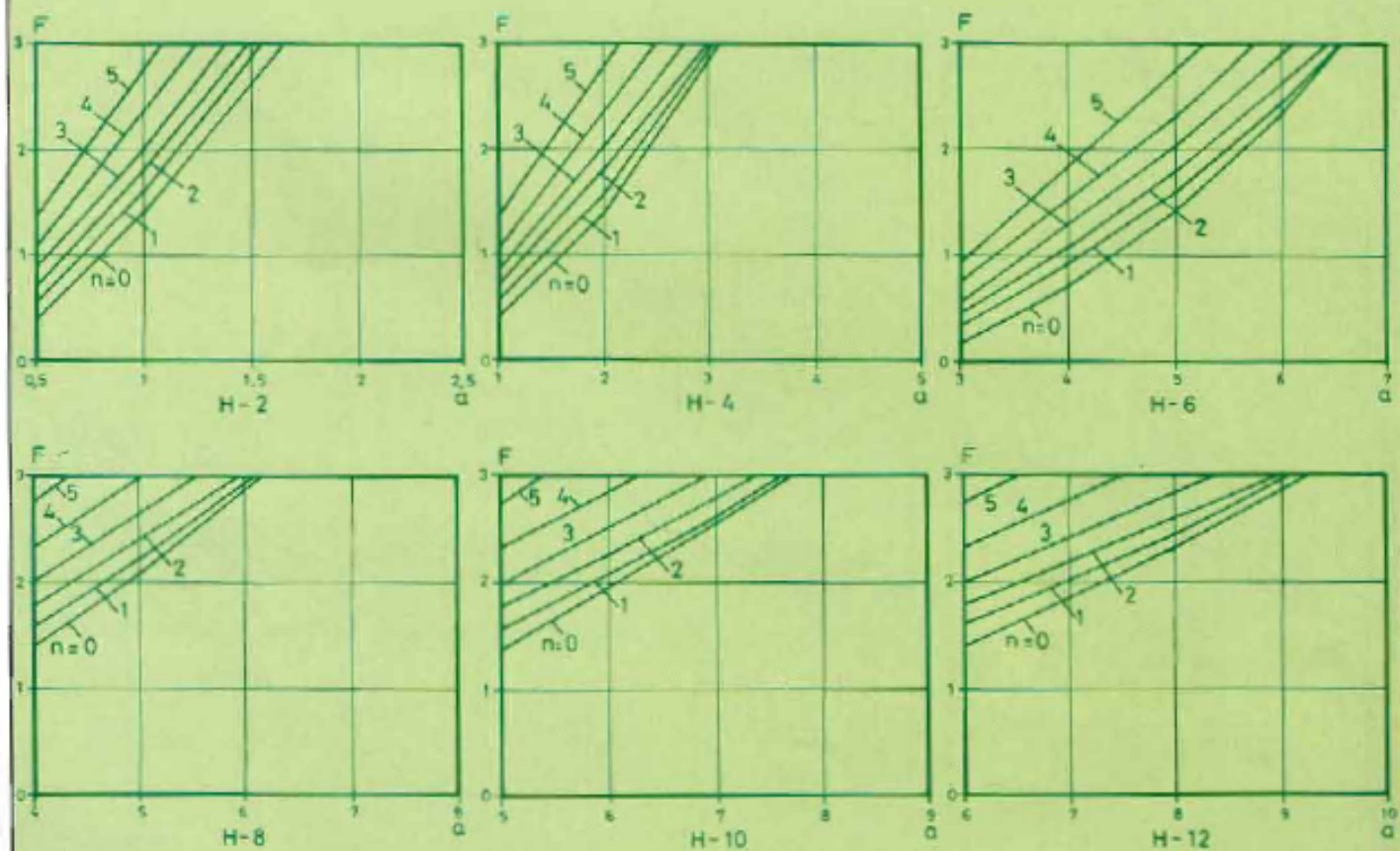
IIc



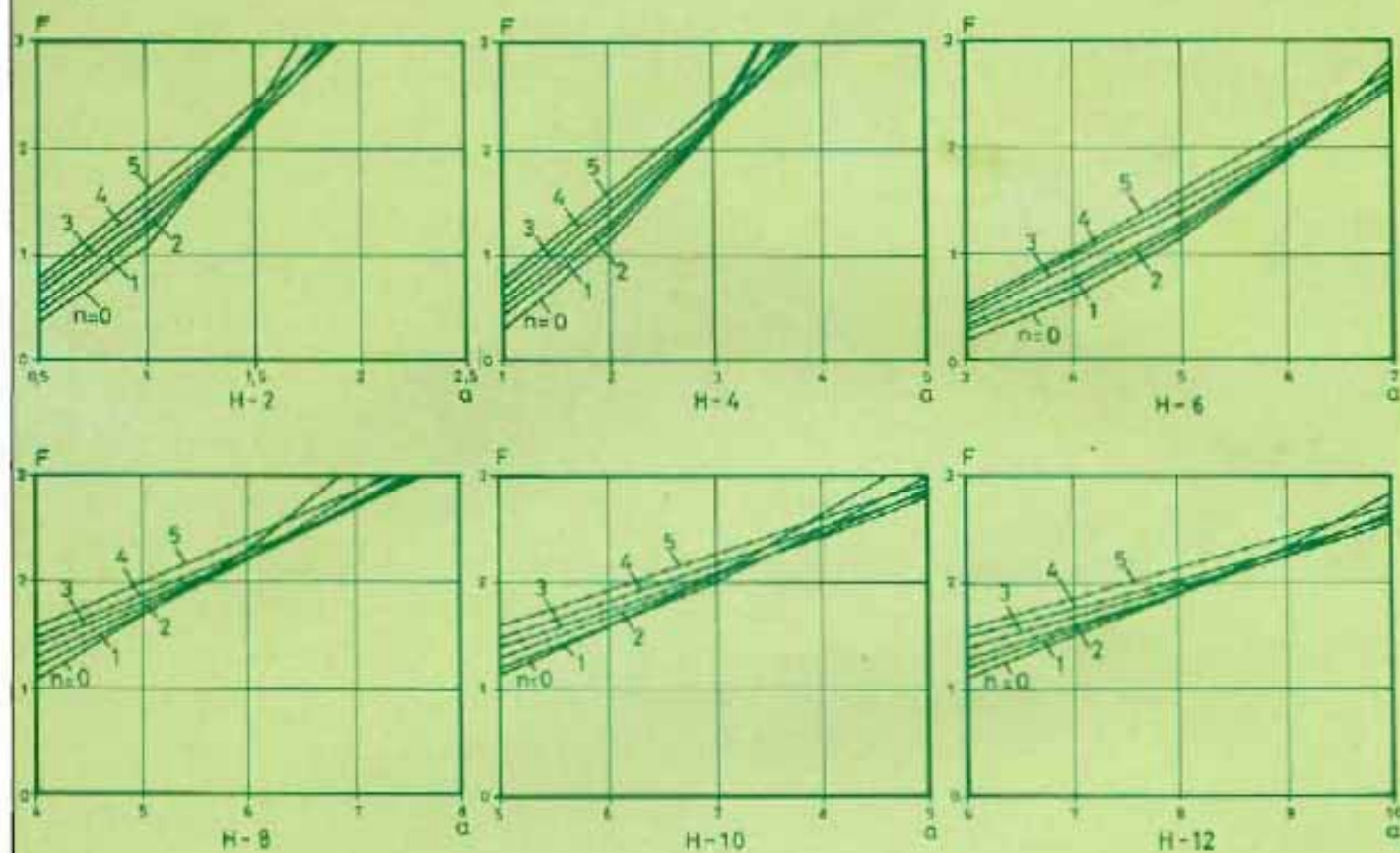
IIIc



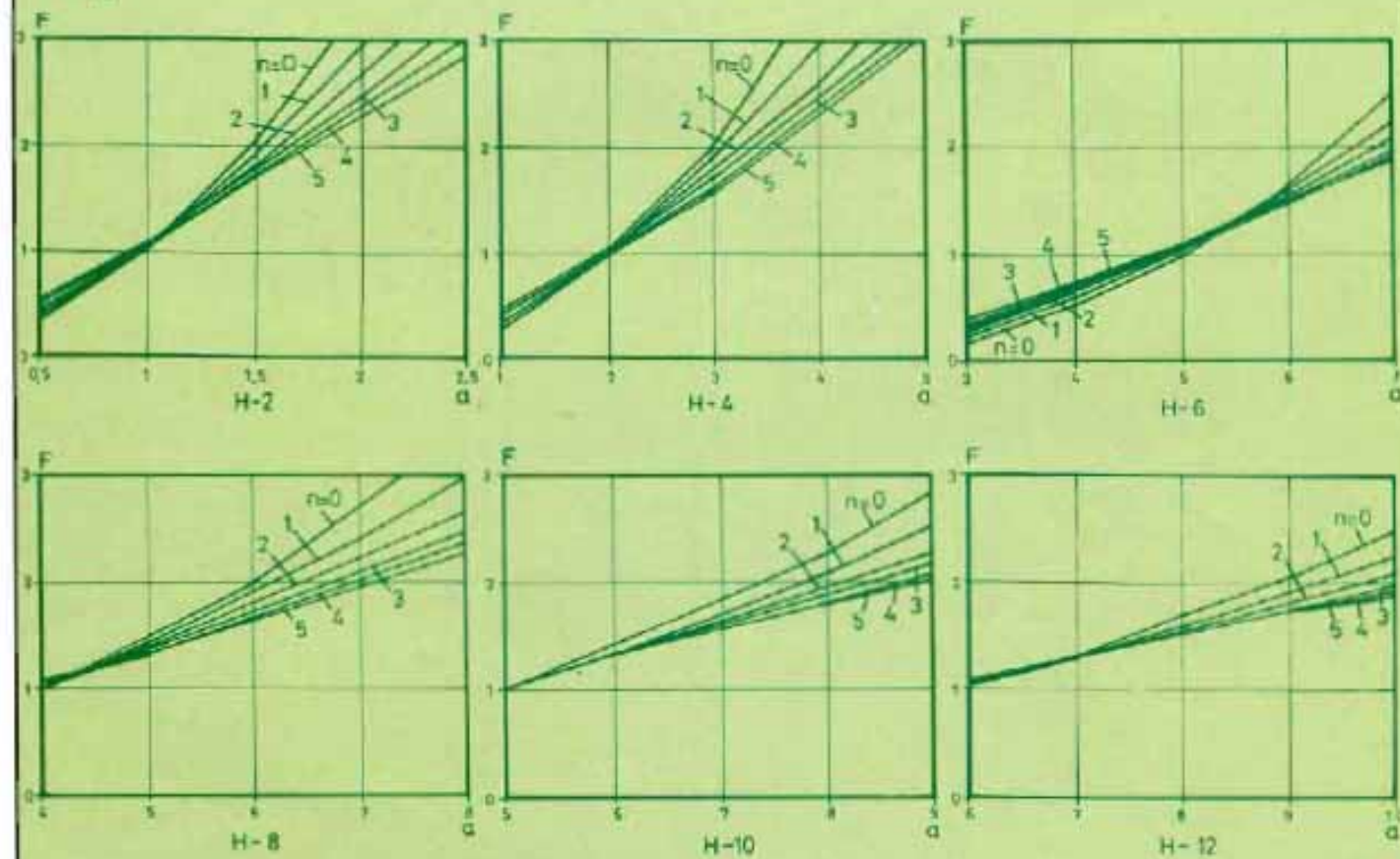
IVc



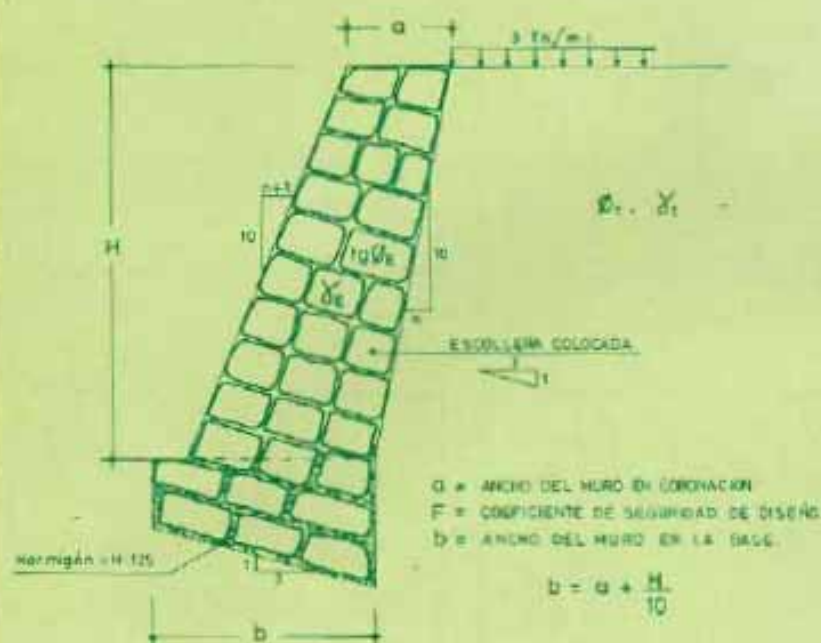
V_c



VI_c



5.3 - Muros de sostenimiento

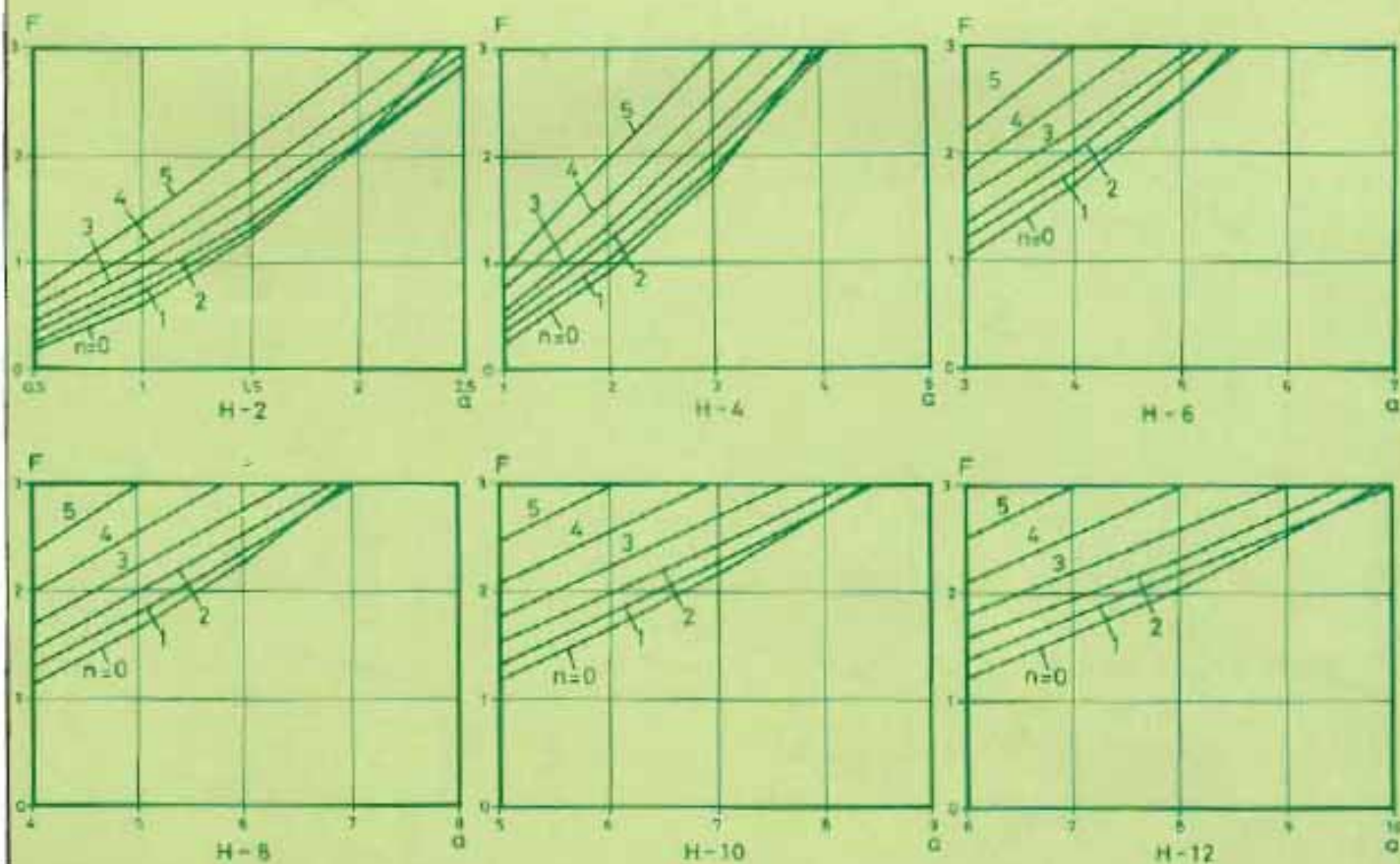


	I _S	II _S	III _S	IV _S
$10\phi_E$	2	2	2	1,5
γ_E	1,9	1,9	1,7	1,7
ϕ_T	35°	25°	35°	25°
γ_i	1,9	1,9	1,9	1,9

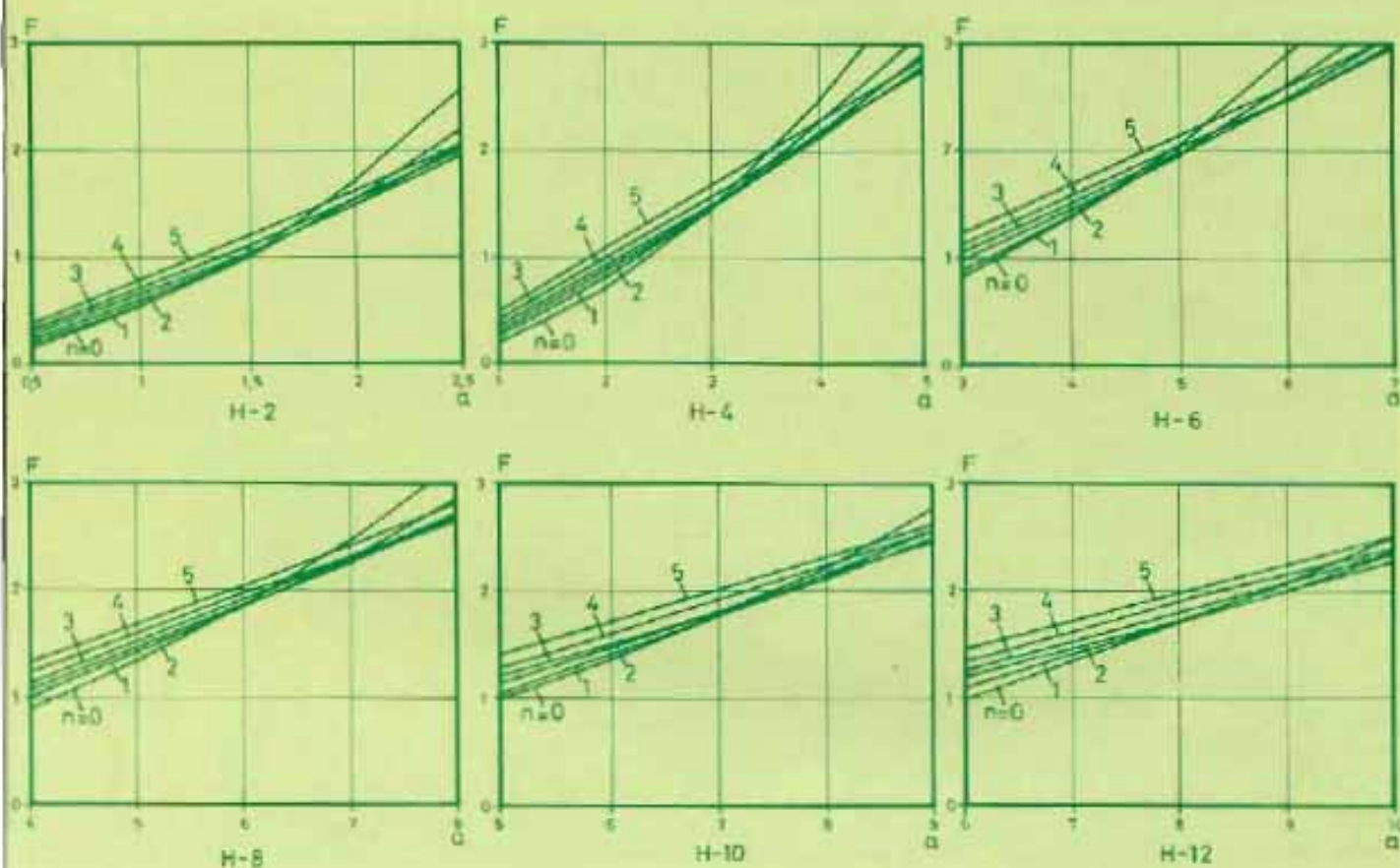
a = ANCHO DEL MURO EN CORONACION
 F = COEFICIENTE DE SEGURIDAD DE DISEÑO
 b = ANCHO DEL MURO EN LA BASE

$$b = a + \frac{H}{10}$$

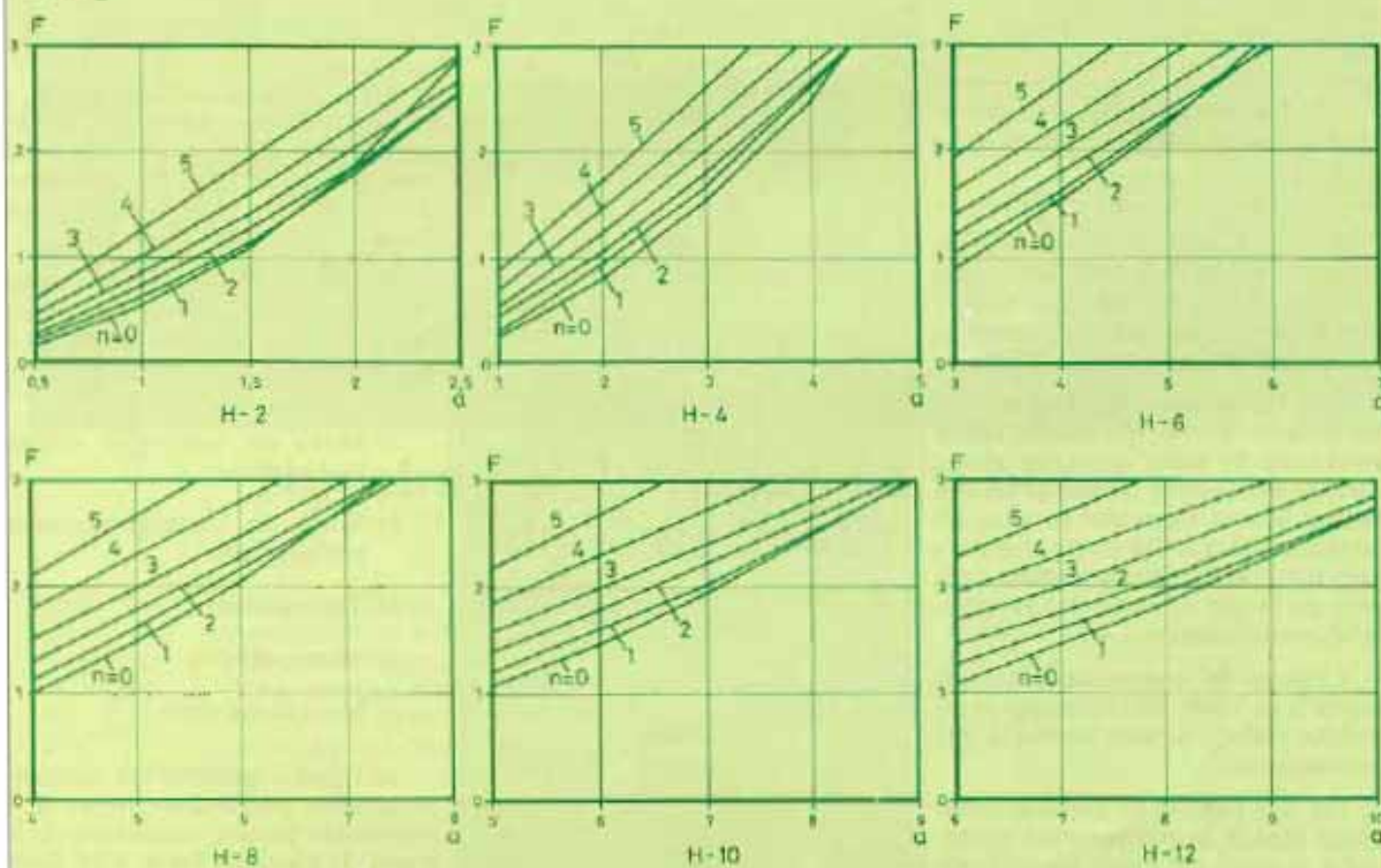
I_S



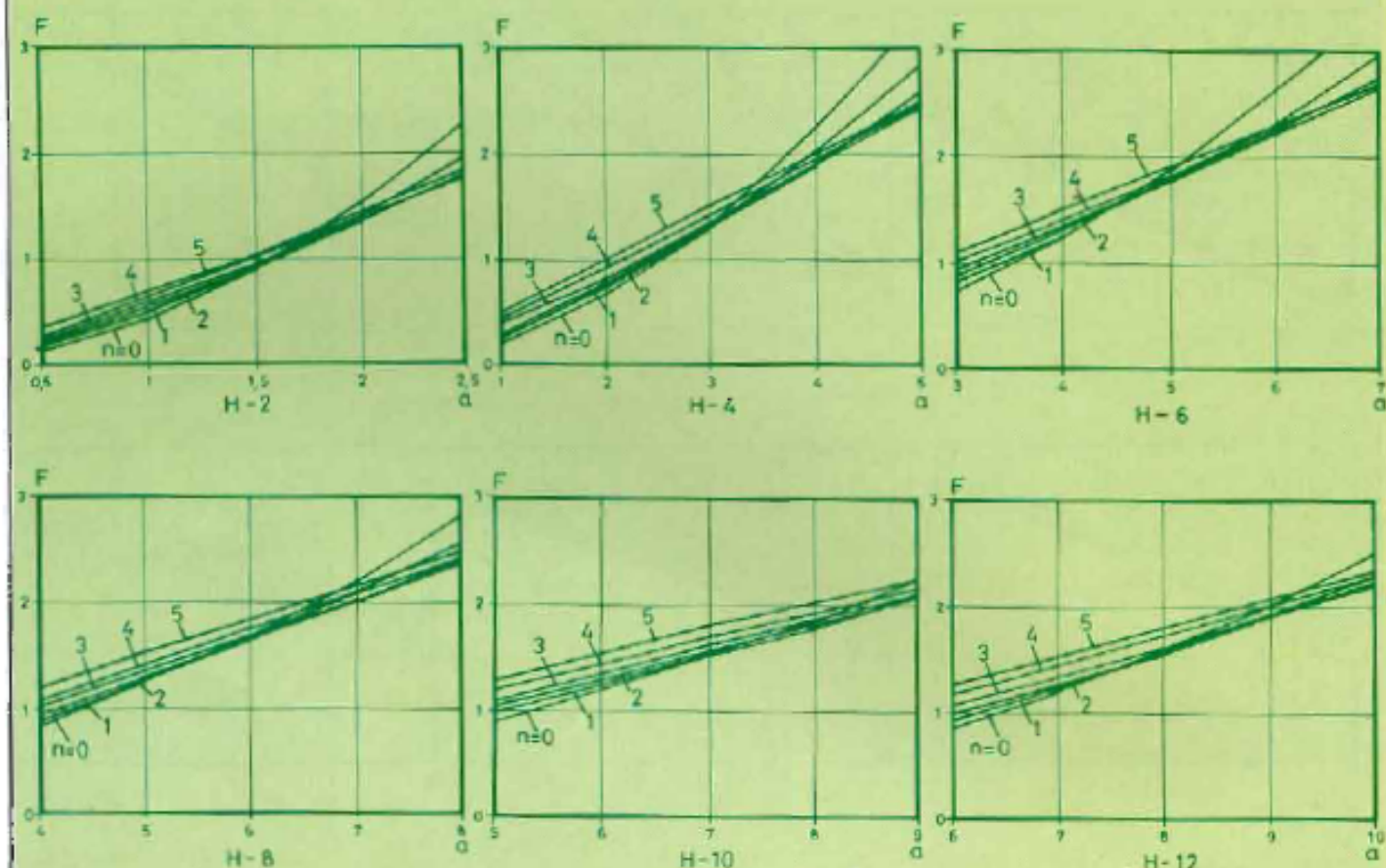
II_S



III_S



IVs



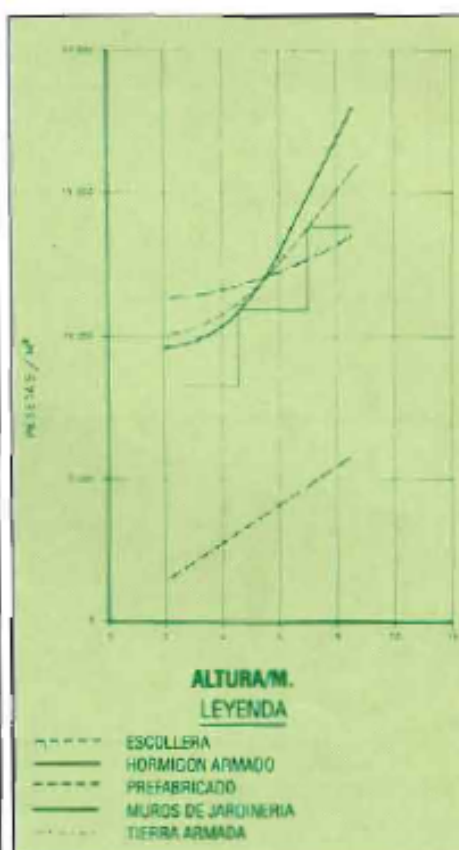
6 - Estudio económico-comparativo de los diferentes tipos de muros de carreteras

Se ha realizado el estudio comparativo de costes de los distintos tipos de muros (tanto convencionales como prefabricados) que se ejecutan en la actualidad.

Para ello se han considerado todos los posibles factores que pueden influir en el coste del muro, como son: altura, calidad del posible relleno y accesibilidad de éste, capacidad portante del terreno, excavación necesaria para cada tipo, características globales de la obra en la que se encuentra el muro, relaciones comerciales, etc.

La altura del muro es un factor que afecta a su coste, es fácilmente comparable y afecta a todos los muros que se construyen.

Por otra parte se ha decidido tomar como unidad de comparación económica, el coste del metro cuadrado de superficie paramentada.



Como base en estos supuestos, se han estimado las curvas altura-coste del metro cuadrado de paramento para cada uno de los tipos de muro considerado, en condiciones análogas para todos los tipos.

Se han estudiado, una vez definida la geometría y características del muro, cinco posibles formas de ejecución

- Muro de hormigón armado hecho in situ.
- Muro de hormigón armado pre-fabricado
- Tierra armada
- Muro jardinería
- Muro de escollera

La figura 7 presenta los resultados obtenidos, pudiéndose observar la importante ventaja económica de los muros de escollera frente a los demás tipos considerados.