

LIBRO: PRY. PROYECTO
TEMA: PUE. Puertos
PARTE: 1. ESTUDIOS
TÍTULO: 07. Estudios de Transporte Litoral
CAPÍTULO: 003. Caracterización Mineralógica y Granulométrica de los Sedimentos

A. CONTENIDO

Este Manual contiene los procedimientos para realizar la caracterización mineralógica y granulométrica de los sedimentos, necesaria para la elaboración del estudio de transporte litoral para puertos, que realice la Secretaría con recursos propios o mediante un Contratista de Servicios y que se indica en la Fracción E.2. de la Norma N·PRY·CAR·1·07·001, *Ejecución de Estudios de Transporte Litoral*.

B. OBJETIVO DE LA CARACTERIZACIÓN

Permite definir y determinar las características más importantes de los sedimentos que conforman la línea costera, y que son:

- El tamaño y la forma de las partículas.
- Su composición mineralógica.
- Las características generales de la masa de sedimento.

C. REFERENCIAS

Este Manual se complementa con las siguientes:

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Ejecución de Estudios de Transporte Litoral	N·PRY·PUE·1·07·001
Reconocimiento de Zonas Costeras	M·PRY·PUE·1·07·002
Granulometría para Suelos y Materiales para Terracerías	M·MMP·1·06
Límites de Consistencia	M·MMP·1·07

D. CARACTERIZACIÓN POR TAMAÑO Y FORMA DE LAS PARTÍCULAS QUE COMPONEN EL SEDIMENTO

D.1. CLASIFICACIÓN VISUAL

Es la clasificación más general y sólo sirve para dar una idea básica del tamaño y forma de las partículas predominantes en la playa. Para la clasificación visual en campo, se sugiere el sistema de clasificación de Wentworth, el cual se basa en la granulometría del sedimento, mismo que se indica en la Tabla 1 de este Manual.

D.2. CLASIFICACIÓN GRANULOMÉTRICA MEDIANTE CRIBADO

El tamaño de las partículas se define en función de un diámetro característico, el cual se determina a partir de la abertura de la malla donde las partículas se retienen.

La caracterización del sedimento por tamaño (granulometría) permite detectar diferencias que indiquen los procesos particulares o eventos geológicos pasados a los que estuvo sometido el material en estudio y así estimar aspectos como la calidad del mismo y su posible origen.

Por lo que respecta a la forma, basta con dar una descripción de la redondez de las partículas.

TABLA 1.- Clasificación Modificada de Wentworth ^[1]

Unidades en mm

Material	Límite superior	Límite inferior
Canto rodado	<1 024	256
Guijarros grandes	<256	128
Guijarros pequeños	<128	64
Gravas muy grandes	<64	32
Gravas grandes	<32	16
Gravas medianas	<16	8
Gravas pequeñas	<8	4
Gránulos	<4	2
Arena muy gruesa	<2	1
Arena gruesa	<1	0,5
Arena media	<0,5	0,25
Arena fina	<0,25	0,125
Arena muy fina	<0,125	0,062 5

[1] De acuerdo con el US Army Corps of Engineers, *Coastal Engineering Manual*, Parte III, Cap. 1, Washington, EUA (2001)

D.2.1. Procedimiento para clasificar el sedimento mediante cribado

El procedimiento de prueba para obtener la granulometría del sedimento se determina en el Manual M-MMP-1-06, *Granulometría para Suelos y Materiales para Terracerías*.

Para efectuar la prueba que se señala en este Inciso, se tomarán las cantidades de material que indica la Tabla 2, de acuerdo con el tamaño predominante de las partículas. Es conveniente contar con material en exceso a fin de evitar el regreso al sitio por material faltante.

TABLA 2.- Tamaños de las muestras para el análisis de distribución de tamaños ^[1]

Descripción	Masa de la muestra kg	Volumen aproximado cm³
Fragmentos de roca	32	-
Cantos rodados	16 - 32	-
Gravas	1	500
Arena	1	500
Limo	1	750
Arcilla	1	750

[1] Las muestras de material se obtendrán de acuerdo con lo indicado en el Inciso F.2.3. del Manual M-PRY-PUE-1-07-002, *Reconocimiento de Zonas Costeras*, en cantidad suficiente para satisfacer los requisitos de este Manual.

D.2.2. Obtención de medidas de tendencia central

Dentro de la clasificación por tamaños, las medidas de tendencia central son útiles para representar una muestra y, por consiguiente, el sedimento de una localidad con un diámetro característico.

Cabe destacar que las tres medidas siguientes son iguales cuando la función de densidad de probabilidad de la muestra es normal.

D.2.2.1. Media

La media, también conocida como diámetro medio \bar{D} , se calcula como:

$$\bar{D} = \frac{\sum D_i P_i}{100}$$

Donde:

\bar{D} = Media aritmética de los diámetros, (mm)

D_i = Diámetro de cada malla, (mm)

P_i = Masa retenida por cada malla, (%)

D.2.2.2. Diámetro central (Mediana)

El diámetro central de los granos M_d , corresponde al valor para el cual el 50% de las partículas tienen un diámetro superior al valor de M_d . Este valor se obtiene fácilmente de la curva granulométrica. El diámetro central también se conoce como D_{50} .

D.2.2.3. Moda

Es el valor del tamaño predominante de la muestra.

D.2.3. Obtención de medidas de dispersión

Los valores de las medidas de dispersión se calculan en función de diámetros obtenidos de la curva granulométrica y son los mostrados en los Párrafos siguientes.

Los coeficientes abajo citados son parte de una caracterización completa del sedimento y se utilizan para futuros cálculos estadísticos del sedimento y ajuste de la distribución probabilística del sedimento a un modelo teórico que podrá utilizarse para estimar el transporte de sedimento (dependerá de la formulación elegida).

D.2.3.1. Desviación estándar

Este parámetro se calcula como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (D_i - \bar{D})^2 P_i}{\sum P_i}}$$

Donde:

σ = Desviación estándar de la muestra, (mm)

\bar{D} = Diámetro medio, (mm)

D_i = Diámetro de cada malla, (mm)

P_i = Masa retenida por cada malla, (%)

D.2.3.2. Coeficiente de asimetría

Es una medida de donde se localiza la mayor frecuencia de una distribución. Se determina a partir de:

$$S_k = \frac{\sum (D_i - \bar{D})^3 P_i}{\sum P_i}$$

Donde:

S_k = Coeficiente de asimetría o sesgo, (mm³)

\bar{D} = Diámetro medio, (mm)

D_i = Diámetro de cada malla, (mm)

P_i = Masa retenida por cada malla, (%)

Generalmente es conveniente expresar el coeficiente de asimetría en función de un coeficiente adimensional, de modo que:

$$a = \frac{S_k}{\sigma^3}$$

Donde:

a = Coeficiente adimensional de asimetría, que dependiendo de su valor se tiene que:

- Si a es igual a 0 la distribución es simétrica
- Si a es positivo la distribución está sesgada hacia la derecha
- Si a es negativo la distribución está sesgada hacia la izquierda

σ = Desviación estándar de la muestra, (mm)

S_k = Coeficiente de asimetría o sesgo, (mm³)

D.2.3.3. Coeficiente de curtosis

Es una medida de la esbeltez de una distribución, se calcula como:

$$K = \frac{\sum (D_i - \bar{D})^4 P_i}{\sum P_i}$$

Donde:

K = Coeficiente de curtosis, (mm⁴)

\bar{D} = Diámetro medio, (mm)

D_i = Diámetro de cada malla, (mm)

P_i = Masa retenida por cada malla, (%)

En este caso también conviene expresarlo en función de un parámetro adimensional, el cual se define como:

$$k = \frac{K}{\sigma^4}$$

Donde:

σ = Desviación estándar de la muestra, (mm)

k = Coeficiente adimensional de curtosis, que dependiendo de su valor se tiene que:

- Si $k = 0$ La distribución es normal (mesocúrtica)
- Si $k > 3$ La distribución es muy aguda (leptocúrtica)
- Si $k < 3$ La distribución es aplanada (platicúrtica)

D.3. CLASIFICACIÓN POR SEDIMENTACIÓN DEL MATERIAL FINO (MENOR A LA MALLA N°200)

La clasificación por sedimentación es útil básicamente para determinar la distribución por tamaños de los sedimentos finos (arcillas y limos). El material se clasifica en función de la velocidad de caída en un fluido, según se muestra en la Figura 1.

El estudio de sedimentación sólo se realizará si el porcentaje de finos es superior al 10% de la masa total de la muestra.

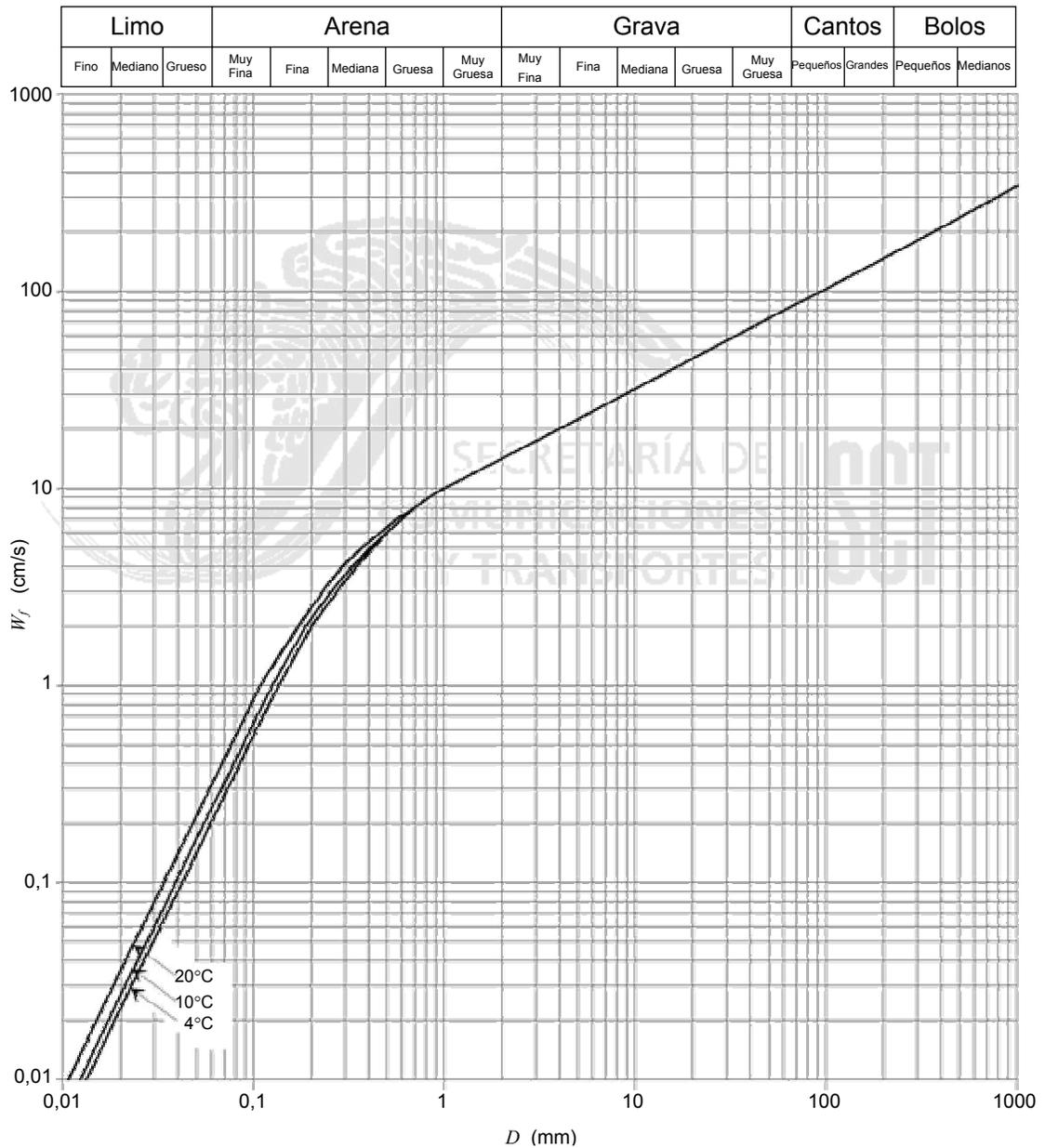


FIGURA 1.- Clasificación del sedimento en función de la velocidad de caída

D.3.1. Determinación de la velocidad de caída

Cuando una partícula cae a través de un fluido se acelera hasta que alcanza su velocidad de sedimentación, la cual es la velocidad máxima que la partícula alcanza cuando la fuerza de arrastre que actúa sobre ésta es igual a la fuerza ejercida por la aceleración de la gravedad.

La velocidad de caída es función, entre otros factores, de la densidad, forma y tamaño de la partícula, lo mismo que de la densidad y viscosidad del fluido en el que se mueve.

Para cada tamaño de sedimento se calcula su velocidad de caída mediante la siguiente expresión y, en base a ésta, se determina su clasificación mediante la Figura 1 de este Manual.

$$W_f = \left[\frac{4}{3} \frac{g}{C_D} \frac{D}{\rho} (\rho_s - 1) \right]^{1/2}$$

Donde:

W_f = Velocidad de caída, (m/s)

C_D = Coeficiente de arrastre, calculado conforme a lo establecido en el Inciso D.3.2., (adimensional)

D = Diámetro del grano de interés, (m)

ρ_s = Densidad del sedimento, (kg/m³)

ρ = Densidad del agua de la zona bajo estudio, (kg/m³)

g = Aceleración debida a la fuerza de gravedad, (m/s²)

D.3.2. Determinación del coeficiente de arrastre y del número de Reynolds

El número de Reynolds del fluido R_e , se determina mediante la siguiente expresión:

$$R_e = \frac{W_f D}{\nu}$$

Donde:

R_e = Número de Reynolds del fluido, (adimensional)

ν = Viscosidad cinemática del agua de la zona en estudio, (m²/s)

W_f = Velocidad de caída, (m/s)

D = Diámetro del grano de interés, (m)

Posteriormente se determina el coeficiente de arrastre C_D en función de dicho número de Reynolds como se muestra en la Figura 2, donde se distinguen tres zonas, para las que el coeficiente de arrastre en cada una se calcula como sigue:

- Primera zona (número de Reynolds menor de 0,5): la fuerza de arrastre decrece linealmente al aumentar el número de Reynolds; en esta región las partículas pequeñas caen lentamente y la fuerza de arrastre es dominante. El coeficiente de arrastre se calcula con la siguiente expresión:

$$C_D = \frac{24}{R_e} = \frac{24 \nu}{W_f D}$$

Donde:

C_D = Coeficiente de arrastre, (adimensional)

W_f = Velocidad de caída, (m/s)

- D = Diámetro del grano de interés, (m)
- R_e = Número de Reynolds del fluido, (adimensional)
- ν = Viscosidad cinemática del agua de la zona en estudio, (m²/s)

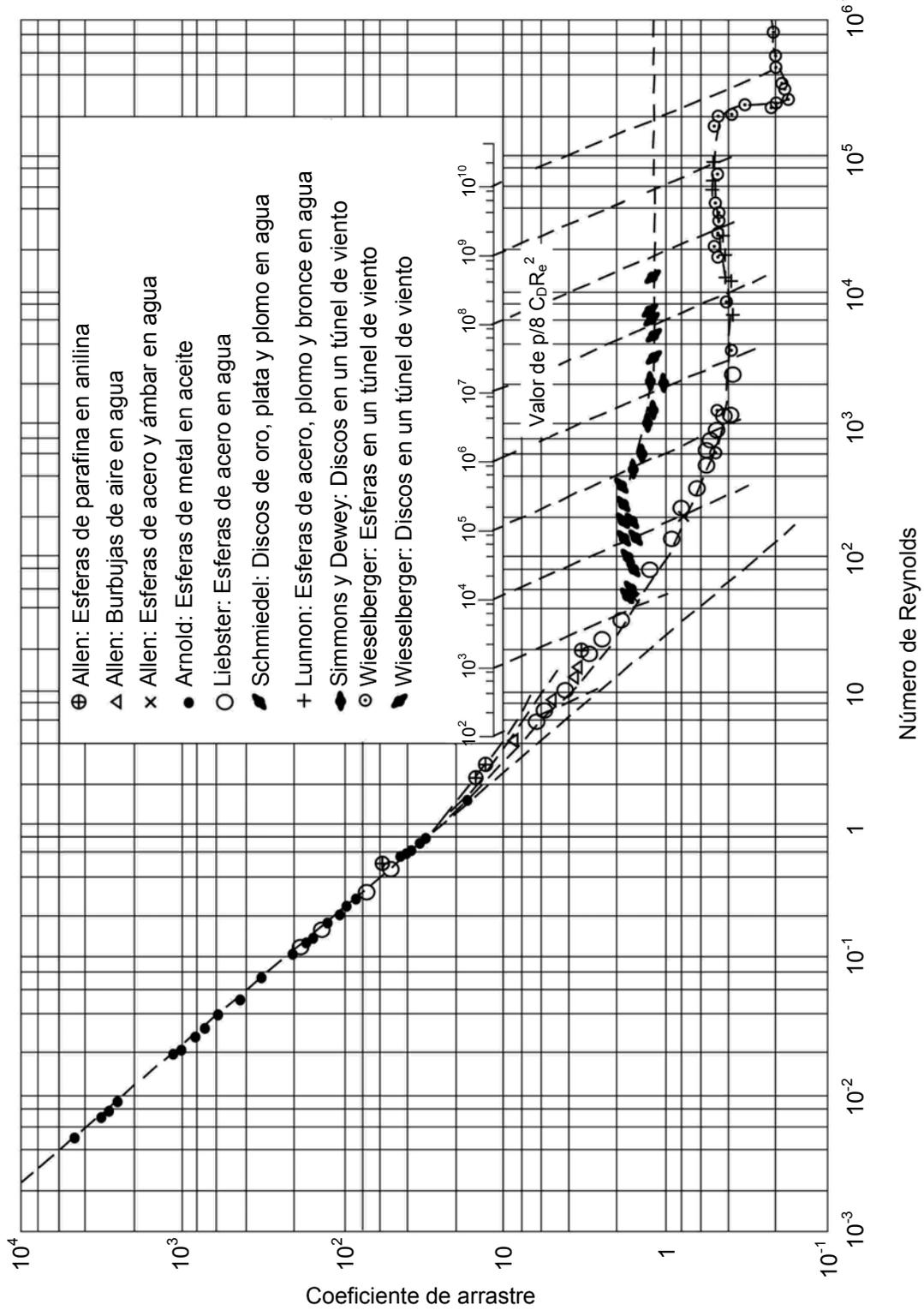


FIGURA 2.- Coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds

- Zona intermedia (número de Reynolds entre 400 y 200 000): las partículas son más grandes y pesadas, por lo que las velocidades de caída son mayores. En esta región el coeficiente de arrastre C_D tiene un valor constante aproximado de 0,5.
- Tercera zona: el coeficiente de arrastre decrece rápidamente, las partículas mayores caen a velocidades mucho más grandes. Para esta zona, se puede tomar como valor promedio $C_D = 0,2$.

Además, para cada región de las indicadas anteriormente, también se podrá determinar la velocidad de caída de las partículas mediante el número de Reynolds, para lo cual se emplean las expresiones descritas en la Tabla 3.

TABLA 3.- Relación entre el número de Reynolds y la velocidad de caída de las partículas

Número de Reynolds R_e	Velocidad de caída W_f
$R_e < 0,5$	$W_f = \frac{gD^2}{18\nu} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)$
$400 < R_e < 200\ 000$	$W_f = 1,6 \left[gD \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \right]^{1/2}$
$R_e > 200\ 000$	$W_f = 2,6 \left[gD \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \right]^{1/2}$

Donde D , g , ρ , ρ_s , tienen el significado indicado en el Inciso D.3.1., mientras que ν tiene el significado indicado en este Inciso

D.4. CARACTERIZACIÓN DE UNA PLAYA MEDIANTE SU PENDIENTE MEDIA

En la zona costera es posible caracterizar el tipo de material de una playa en función de la pendiente media del perfil como se indica en la Figura 3. Dicha pendiente media de la playa se puede obtener a partir de datos batimétricos.

E. CARACTERIZACIÓN POR LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DEL SEDIMENTO

Esta caracterización tiene como base la determinación de las siguientes propiedades del material.

E.1. DENSIDAD

Algunos valores de densidad de minerales se muestran en la Tabla 4, siendo el más común el cuarzo. Para detectar los minerales, se requiere de un laboratorio de geología o bien de un geólogo en campo.

TABLA 4.- Densidades comunes de los sedimentos costeros

Unidades en kg/m^3

Mineral	Densidad
Cuarzo	2 648
Feldespato	2 650
Ilita	2 660
Montmorillonita	2 608
Caolinita	2 564
Calcita	2 716
Dragonita	2 931
Dolomita	2 866

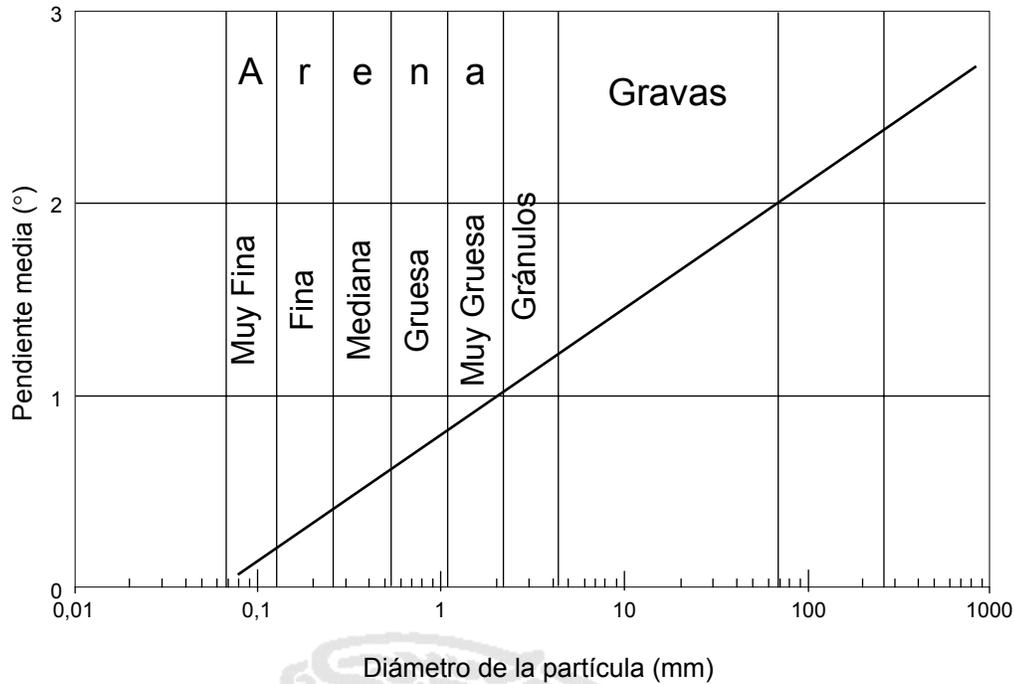


FIGURA 3.- Relación entre la pendiente de la playa y el tamaño de la partícula

En la Tabla 5 se indican los valores de densidad de las rocas más frecuentemente encontradas en las zonas costeras.

TABLA 5.- Densidades promedio de rocas

Unidades en kg/m³

Tipo de roca	Densidad
Basalto	2 740
Dolorita - diabasa	2 890
Granito	2 660
Arenisca	2 220
Dolomita	2 770
Caliza	2 540

E.2. MASA ESPECÍFICA Y MASA ESPECÍFICA RELATIVA

Los siguientes conceptos forman parte de una caracterización formal del material y se utilizan en el cálculo del transporte de sedimentos:

- E.2.1.** La masa específica de un material se define como su densidad multiplicada por la aceleración de la gravedad.
- E.2.2.** La masa específica relativa de un material es su densidad dividida por la densidad del agua a 4°C, que es de 1 000 kg/m³. La masa específica relativa es adimensional.
- E.2.3.** La masa específica relativa se obtiene a través del método del hidrómetro, cuya ley fundamental es debida a Stokes y proporciona una relación entre la velocidad de sedimentación de las partículas del suelo en un fluido y el tamaño de esas partículas; refiérase a Juárez Badillo en la Cláusula G. de este Manual.

F. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO CONSTITUIDO POR MATERIAL COHESIVO

Las playas con limos o arcillas se presentan principalmente en costas ubicadas cerca de desembocaduras de grandes ríos que han pasado por planicies de pendiente muy baja. El lodo en este tipo de playas puede presentarse en cuatro estados:

- Suspensión
- Suspensión en alta concentración
- Fondo consolidado
- Fondo

Se podrá definir en forma visual de acuerdo con la turbidez del agua y se reportará lo observado.

F.1. CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SEDIMENTO

Las propiedades con que se caracterizan a los materiales cohesivos son los contenidos de arcilla, limo y arena, de agua ω y de material orgánico, así como sus límites líquido ω_L y plástico ω_P y los índices plástico I_p y de consistencia, las cuales se determinarán mediante las fórmulas y procedimientos comúnmente aceptados en el medio, para lo cual se podrá referir a la bibliografía citada en la Cláusula G. de este Manual.

F.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS COHESIVOS

Los suelos se clasifican como *suelos finos* cuando el 50% de sus partículas o más, son de tamaño menor de 0,075 mm (malla N°200) y se clasifican de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) que se describe en la Tabla 6. En dicha Tabla aparece la sección correspondiente a suelos gruesos, que si bien forma parte integrante del SUCS, para efectos de este Manual, no se tomará en cuenta.

Los suelos finos se clasifican según sus características de plasticidad, en:

F.2.1. Limo (M)

El suelo fino se clasifica como *limo* cuando su límite líquido (ω_L) y su índice plástico (I_p), determinados como se indica en el Manual M-MMP-1-07, *Límites de Consistencia*, definen un punto ubicado en las zonas I o III de la Carta de plasticidad que se muestra en la Figura 4 de este Manual y se identifica con el símbolo M (del sueco *mo* y *mjala*). Si dicho punto se aloja en la zona I, el material se clasifica como *limo de baja compresibilidad* y se identifica con el símbolo ML; si se ubica en la zona III, se clasifica como *limo de alta compresibilidad* y se identifica con el símbolo MH.

Si el material contiene una cantidad apreciable de materia orgánica y el punto definido por su límite líquido (ω_L) y su índice plástico (I_p) se ubica cercano y por debajo de la línea A de la Carta de plasticidad, se clasifica como *limo orgánico de baja compresibilidad* si su límite líquido (ω_L) es menor de 50% y se identifica con el símbolo OL, o como *limo orgánico de alta compresibilidad* si su límite líquido (ω_L) es mayor y se identifica con el símbolo OH.

F.2.2. Arcilla (C)

El suelo fino se clasifica como *arcilla* cuando su límite líquido (ω_L) y su índice plástico (I_p), determinados como se indica en el Manual M-MMP-1-07, *Límites de Consistencia*, definen un punto ubicado en las zonas II o IV de la Carta de plasticidad que se muestra en la Figura 4 de este Manual y se identifica con el símbolo C (*Clay*). Si dicho punto se aloja en la zona II, el material se clasifica como *arcilla de baja compresibilidad* y se identifica con el símbolo CL, si se ubica en la zona IV, se clasifica como *arcilla de alta compresibilidad* y se identifica con el símbolo CH.

F.2.3. Altamente orgánicos (Pt)

El suelo fino se clasifica como *altamente orgánico* cuando se identifica por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa; se le denomina *turba* y se identifica con el símbolo P_t .

Esta clasificación se puede ejemplificar de acuerdo con lo siguiente: un suelo con 25% de grava, 20% de arena y 55% de partículas que pasan la malla N°200, obtenidos de un análisis granulométrico, con un límite líquido mayor de 50% y un índice plástico de 55 en la carta de plasticidad, se identifica como una arcilla de alta compresibilidad, con el símbolo CH.

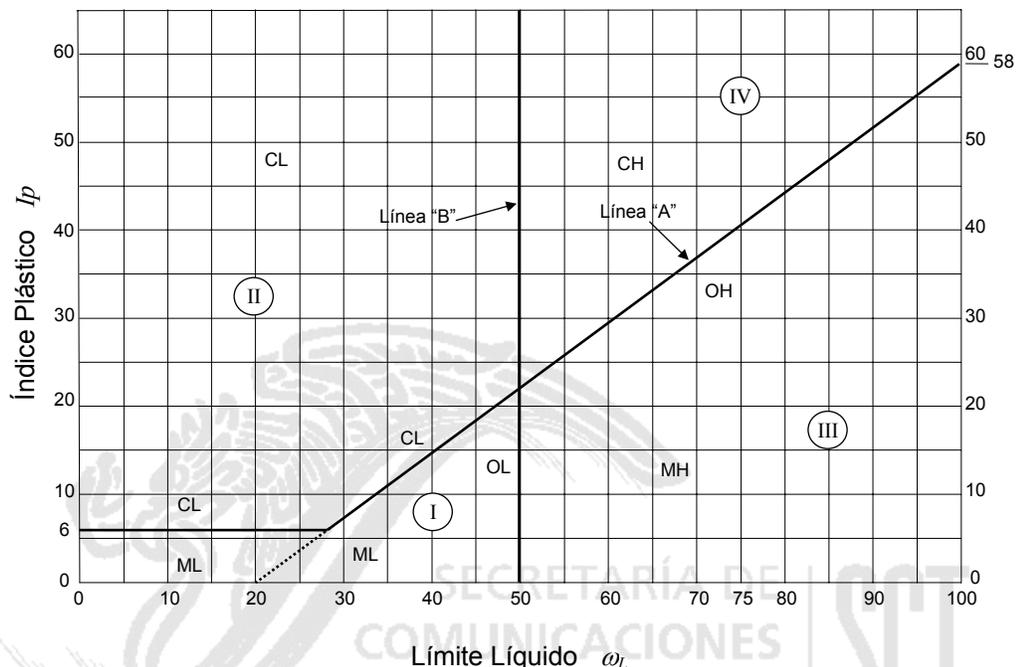


FIGURA 4.- Carta de plasticidad

G. BIBLIOGRAFÍA

Centre for Civil Engineer Research and Codes, *Design Manual for Pitched Slope Protection*, Holanda (1995)

Juárez Badillo, E., *Mecánica de suelos*, Ed. Limusa, México (1975)

Maza, J. y García, M., *Origen y Propiedades de los Sedimentos*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, (1998)

Silvester, R. y Hsu, J., *Coastal Stabilization*, Singapur (1997)

US Army Corps of Engineers, *Coastal Engineering Manual*, Parte III, Cap. 1, Washington, EUA (2001)

US Army Corps of Engineers, *Coastal Engineering Technical Note CETN-VI-7, 8/81*, Washington, EUA (1981)

TABLA 6.- Clasificación de suelos con base en el SUCS

Tipo	Sub-Tipos		Identificación		Símbolo de Grupo		
Suelos (partículas menores de 7,5 cm)	SUELOS GRUESOS Más de la mitad del material se retiene en la malla N°200 (0,075 mm)	GRAVA Más de la mitad de la fracción gruesa se retiene en la malla N°4	GRAVA LIMPIA	Grava bien graduada; mezcla de grava y arena con poco o nada de finos. Tendrá un coeficiente de uniformidad (C_u) mayor de 4 y un coeficiente de curvatura (C_c) entre 1 y 3 ^[1]	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	GW	
			(Poco o nada de partículas finas)	Grava mal graduada; mezcla de grava y arena con poco o nada de finos. No satisface los requisitos de graduación para GW.	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	GP	
			GRAVA CON FINOS	Grava limosa; mezcla de grava, arena y limo.	Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como ML o MH (véanse abajo los grupo ML y MH)	GM	
			(Cantidad apreciable de partículas finas)	Grava arcillosa; mezclas de grava, arena y arcilla	Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como CL o CH (véanse abajo los grupo CL y CH)	GC	
			ARENA Más de la mitad de la fracción gruesa pasa la malla N°4	ARENA LIMPIA	Arena bien graduada; mezcla de arena y grava con poco o nada de finos. Tendrá un coeficiente de uniformidad (C_u) mayor de 6 y un coeficiente de curvatura (C_c) entre 1 y 3 ^[1]	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	SW
				(Poco o nada de partículas finas)	Arena mal graduada; mezcla de arena y grava con poco o nada de finos. No satisface los requisitos de graduación para SW.	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	SP
		ARENA CON FINOS		Arena limosa; mezcla de arena, grava y limo.	Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites consistencia clasifican a la fracción fina como ML o MH (véanse abajo los grupo ML y MH)	SM	
		(Cantidad apreciable de partículas finas)		Arena arcillosa; mezclas de arena, grava y arcilla	Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como CL o CH (véanse abajo los grupo CL y CH)	SC	
		SUELOS FINOS Más de la mitad del material pasa la malla N°200 (0,075 mm)	LIMO Y ARCILLA Límite líquido	Menor de 50%	Limo de baja compresibilidad; mezcla de limo de baja plasticidad, arena y grava; polvo de roca. Se localiza dentro de la zona I de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 4 de este Manual.	ML	
					Arcilla de baja compresibilidad; mezcla de arcilla de baja plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona II de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 4 de este Manual.	CL	
	Limo orgánico de baja compresibilidad; mezcla de limo orgánico de baja plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona I de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 4 de este Manual.				OL		
	Mayor de 50%			Limo de alta compresibilidad; mezcla de limo de alta plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona III de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 4 de este Manual.	MH		
				Arcilla de alta compresibilidad; mezcla de arcilla de alta plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona IV de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 4 de este Manual.	CH		
				Limo orgánico de alta compresibilidad; mezcla de limo orgánico de alta compresibilidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona III de la Carta de plasticidad mostrada en la Figura 4 de este Manual.	OH		
	ALTAMENTE ORGÁNICOS	Turba, fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa.		P _t			

[1] Los coeficientes de uniformidad C_u y de curvatura C_c , que se utilizan para determinar la graduación de los suelos GW, GP, SW y SP están dados por las siguientes expresiones:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}, \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Donde D_{10} , D_{30} y D_{60} son los tamaño de las partículas para el cual el 10, 30 y 60% en masa del material es menor que esos tamaños, respectivamente, determinados gráficamente de la curva granulométrica como se indica en el Manual M-MMMP-1-06, *Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías*.