CARACTERÍSTICAS DEL SUELO MARINO (LAMA) EN PANAMÁ

Ing. Carlos Mesa, M.I.
Universidad Tecnológica de Panamá
Centro Experimental de Ingeniería
Laboratorio de Suelos y Asfalto
e-mail: cmesa@utp.ac.pa
Panamá, Rep. de Panamá

RESUMEN.

La importancia de las construcciones en la Bahía de Panamá, ha ido en aumento en los últimos años y lo más probable es que continúe este aumento. Dentro de tales construcciones se encuentra la construcción de Costa del Este, El viaducto del Corredor Sur, Muelle de Cruceros en Amador, Puerto de Balboa, Islas artificiales de Punta Pacífica (construcción en proyecto), tuberías de drenaje de aguas negras y lluvias. El correcto funcionamiento de estas obras depende en gran medida de la estabilidad del suelo que la sustenta y de las cargas que éste le transmite. Estos factores (estabilidad y fuerzas del suelo) dependen a la vez de las características del fondo marino superficial (lama). El propósito de este trabajo es presentar las características encontradas hasta ahora en el lecho marino de la llamada arcilla (lama) de Panamá. La información que se presenta se basa en los resultados obtenidos de las exploraciones geotécnicas para la construcción de Costa del Este, El Corredor Sur, Muelle de Cruceros en Amador, Puerto de Balboa, Islas artificiales de Punta Pacífica (construcción en proyecto), Puerto de Manzanillo, Puerto de Coco Solo, Puerto de Cristóbal y France Field entre otros.

Palabras claves: Bahía de Panamá, características físico-química de la lama, estratigrafía, suelo marino.

ABSTRACT

The importance of construction in the Bay of Panama has increased during the past years and in all probability will continue to grow. Among this construction we find Costa del Este Development, the viaduct of the Southern Corridor, the Cruise Ship Dock at Amador, Port of Balboa, man-made Islands at Pacific Point (in project), sewage and storm drainage pipelines. The proper performance of these works greatly depends upon the stability of the supporting soil and the applied loading. These factors (stability and soil strength) also rely on the characteristics of the superficial marine soil (loam). This purpose of this paper is to present the characteristics encountered to date in the marine bottom of the so called Panama clay (loam). The information presented is based upon the results of the geotechnical surveys for construction of Costa del Este Development, the Southern Corridor, Cruise Ship Dock at Amador, Port of Balboa, man-made island at Pacific Point (in project), Port of Manzanillo, Port of Coco Solo, Port of Cristobal and France Field among others.

Keywords: Bay of Panama, loam mechanics characteristics, stratigraphy, sea soil.

1. Introducción

En períodos geológicos relativamente recientes, la superficie de la tierra se encontraba a un nivel más elevado que el presente y los grandes ríos cortaron valles profundos. Siguió un período de subsidencia, causando la reducción de la velocidad de las corrientes, particularmente a lo largo de los cursos bajos, dando como resultado la deposición de sedimentos de suelos finos (limos y arcillas), así como de detritos vegetales arrastrados por las corrientes. Transformaciones periódicas del mar dieron origen a áreas salobres y a las mezclas de arcillas, limos y materia vegetal arrastradas por las corrientes, con sedimentos marinos como arenas y fragmentos de conchas. El último movimiento geológico en las costas, levantó 1,20 m la superficie de los estuarios, pantanos y de las áreas transformadas por las mareas. La formación resultante de estos procesos de deposición es conocida como la arcilla (lama) de Panamá que hace parte del subsuelo de los estuarios, pantanos, manglares, lecho marino, etc.

La lama se encuentra ampliamente distribuida en el lado Atlántico del Istmo, donde rellena canales de corrientes antiguas en el lago Gatún.

Algunos de estos depósitos tienen más de 60 m de espesor. Comprende los valles de los ríos Chagres, Trinidad y Gatún, asociados con las áreas costeras y pantanosas. En el lado del Pacífico se extiende desde las cercanías de las esclusas de Miraflores hasta la Bahía de Panamá, registrándose espesores hasta de 14 m.

El origen de los grandes espesores de arcilla (lama) se atribuye al aporte de los ríos, transportando materiales del tamaño de limos y arcilla, los cuales son depositados en las zonas de baja velocidad de las corrientes, particularmente a lo largo de los cursos bajos. En la Bahía de Panamá los principales causes que aportan sedimentos son: El

Río Matasnillo, Río Abajo, Matías Hernández, Juan Díaz, Tocumen y Chepo.

2. Fisiografía

La topografía es de un relieve suave (pendientes de 1 m/km) y esencialmente es el producto de una sedimentación progresiva, en contraste con los procesos de erosión que caracterizan las áreas adyacentes.

3. Estratigrafía

Los depósitos de esta arcilla (lama) son uniformemente suaves y débiles. Están compuestos predominantemente por sedimentos del tamaño de limo. Su contenido de agua, en su estado natural es muy alto. Se reconocen cuatro (4) fases [1] descritas a continuación:

- La Primera fase, fase inferior, que se encuentra en contacto con las rocas de formaciones más antiguas, consiste de una arcilla limosa de color azul a azul grisáceo.
- La segunda fase depositada en agua salobres a marinas, contiene abundantes cantidades de conchas en una matriz orgánica, limosa, de color negro.
- La tercera fase es la pantanosa que está compuesta por materiales de color negro, orgánicos, de granulometría muy fina, mezclados con madera y otras substancias vegetales semi-descompuestas, intercaladas con suelos finos (limos y arcillas).
- La cuarta fase consiste en una arcilla de consistencia suave, de color gris claro a café grisáceo, plástica y yace sobre la fase pantanosa, orgánica.

Las cuatro fases se integran lateralmente, encontrándose lentes de arena localmente. Los estratos son esencialmente horizontales.

4. Propiedades

4.1 Relación de Vacíos u Oquedad

Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos. Se expresa con la letra e y se define como:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \qquad (2\text{-}1)$$

Varía teóricamente entre 0 ($V_v = 0$) a ∞ (Valor correspondiente a un espacio vacío). En la práctica no suele hallarse valores menores de 0,25 (arena con finos muy compacta) ni mayores de 15, en el caso de algunas arcillas altamente compresibles. A continuación se presenta las relaciones de vacíos encontradas. [2, 3].

La relación de vacíos de la lama (Pacific Muck) varía entre 1,12 a 5,44

La relación de vacíos de la lama (Atlantic Muck) varía entre 1,24 a 2,45

4.2 Grado de Saturación

Es la relación entre el volumen del agua y el volumen de vacíos. Se expresa con las letras S_r y se define como sigue:

$$S_r\% = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100 \qquad (2\text{-}2)$$

Como se observa, también se acostumbra expresarlo como un porcentaje. Teóricamente varía entre 0% (suelo seco) a 100% (suelo totalmente saturado). En el campo se tiene que siempre se cumple que $0\% < S_r \leq 100\%$. El grado de saturación en la mayoría de los casos de la arcilla (lama) fue del 100% [2, 3].

S_r de la lama (Pacific Muck) 68 – 100 %

S_r de la lama (Atlantic Muck) 88 – 108 %

4.3 Contenido de Agua

Es la relación entre la masa del agua y la masa de los sólidos de una muestra de suelo. Se expresa con la letra w y se define de la siguiente manera:

$$w\% = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 \qquad (2\text{-}3)$$

Esta relación se puede expresar como porcentaje o en forma decimal. Teóricamente varía de 0 a ∞.

En la práctica varía desde 0% (en el suelo secado artificialmente en laboratorio) hasta 1 400 % en arcillas japonesas. En la tabla No.1 se presenta algunos valores típicos del contenido de agua para diferentes arcillas [2, 3, 4].

TABLA No. 2-1 Valores del Contenido de Agua en Arcillas

Tipo de Suelo	W%
Arcillas japonesas	1200 – 1400
Arcilla de la C.D de México	500 – 600
Arcilla del Sureste de México	1000
Lama (Pacific Muck)	33 – 261
Lama (Atlantic Muck)	43 – 138

Tipo de Material	Ss
Cuarzo	2,67
Calcita	2,72
Arena de Chame (hierro)	3,0
Turba (alta / orgánico)	1,5
Arcilla de la C.D de México	2,20 – 2,60
Lama (Pacific Muck)	2,22 – 2,67
Lama (Atlantic Muck)	2,46 – 2,79

4.4 Límites de Consistencia

Los índices de plasticidad de las arcillas (lama) varían entre 14 y 59 %, teniendo límites líquidos cercanos al contenido natural de agua con valores que en su mayoría varían entre 42 y 101 %; sólo en el caso de algunas zonas cercanas a la costa, donde las arcillas son limosas o arenosas el límite líquido llega a tener valores tan bajos como de 30% [2, 3].

En la Figura No.2-1, se muestra la carta de plasticidad para las arcillas (lama) del Pacífico (Pacific Muck) y del Atlántico (Atlantic Muck) [2, 3].

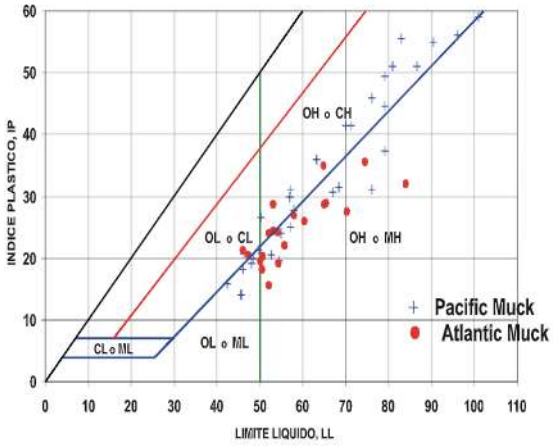


Figura No- 2-1 Carta de Plasticidad para la Clasificación de Suelos de Partículas Finas. La mayoría de las arcillas encontradas pertenecen a la clasificación de suelos de alta plasticidad.

4.5 Densidad de los Sólidos del Suelo

Resulta igual numéricamente a lo que se le ha llamado densidad relativa de los sólidos del suelo, o a la mal llamada gravedad específica (dado que no depende de la gravedad). La diferencia radica en que la densidad de los sólidos tiene unidades mientras que la densidad relativa no.

Densidad Relativa:

$$G_s = S_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot 100 \qquad (2\text{-}4)$$

Densidad:

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (2\text{-}5)$$

La densidad relativa de la mayoría de las partículas minerales constituyentes de un suelo (S_s) varía entre 2,6 – 3,0. En la Tabla No. 2-2, se presenta los valores encontrados para los minerales y suelos más frecuentes [2, 3, 4].

TABLA No. 2-2 Valores Típicos de la Densidad de Sólidos

4.6 Pesos Específicos

El peso de un cuerpo en un cierto lugar, se define como la masa de ese cuerpo multiplicada por la aceleración de la gravedad local.

$$W = m \cdot g \qquad (2\text{-}6)$$

Por otra parte, el peso específico (peso volumétrico) se define como la relación que existe entre el peso de un cierto material y el volumen que ocupa.

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g \qquad (2.7)$$

En la Tabla No. 2-3 se presentan valores típicos del peso volumétrico seco y natural para algunos suelos [2, 3, 4].

TABLA No. 2-3 Valores Típicos de Pesos Específicos

Tipo de Suelo	γm (t/m3)	γd (t/m3)
Arena uniforme a bien gradada	1,89 – 2,32	1,43 – 2,12
Limo	1,54 – 1,87	0,85 – 1,38
Arcilla orgánica	1,43	0,68
Bentonita	1,27	0,43
Lama (Pacific Muck)	1,29 – 1,70	0,68 – 1,09
Lama (Atlantic Muck)	1,44 – 1,84	0,73 – 1,28

γm Peso específico húmedo

γd Peso específico seco

4.7 Propiedades Mecánicas en Muestras Inalteradas

La resistencia al corte de las arcillas (lama) varía generalmente entre 0,2 a 2,1 t/m^2, aunque excepcionalmente llega a 2,5 t/m^2; para fines prácticos se puede considerar como valor medio 1 t/m^2 [2, 3]. Estos valores de la resistencia deben ser tomados en cuenta tanto en el análisis de las fuerzas de interacción suelo estructura, como en los problemas de excavación y dragado. La sensibilidad de las arcillas determinada mediante la realización de pruebas de cortante con veleta miniatura en muestras inalteradas varió entre 0,1 a

3,5 t/m^2, pudiéndose considerar sin embargo como valor medio 1,5 t/m^2 [2, 3].

La resistencia a compresión simple (q_u) determinada con penetrómetro de bolsillo en muestras inalteradas de arcilla (lama) varió entre 0,19 a 3,0 t/m^2 [2, 3].

En pruebas de consolidación realizadas a muestras inalteradas de arcilla (lama) se registraron los siguientes valores [2, 3]:

- El esfuerzo crítico o presión de preconsolidación (p_c) varió entre 0,18 a 0,80 kg/cm^2
- El coeficiente de consolidación (c_v) crece en forma monótona con la relación de vacíos de 0,11 x 10^{-4} a 125 x 10^{-4} cm^2/s
- El módulo edométrico (m_v) fue variable de 0,001 a 0,202 cm^2/kg
- El índice de compresión (c_c) varió de 0,20 a 1,71

En la Tabla No. 2-4 debida a A. Casagrande y R.E. Fadum, aparece las interrelaciones entre el coeficiente de permeabilidad, los tipos de suelos y el grado de permeabilidad [4]. El grado de permeabilidad de la arcilla (lama) es prácticamente impermeable y clasifica según Casagrande como arcillas homogéneas impermeables.

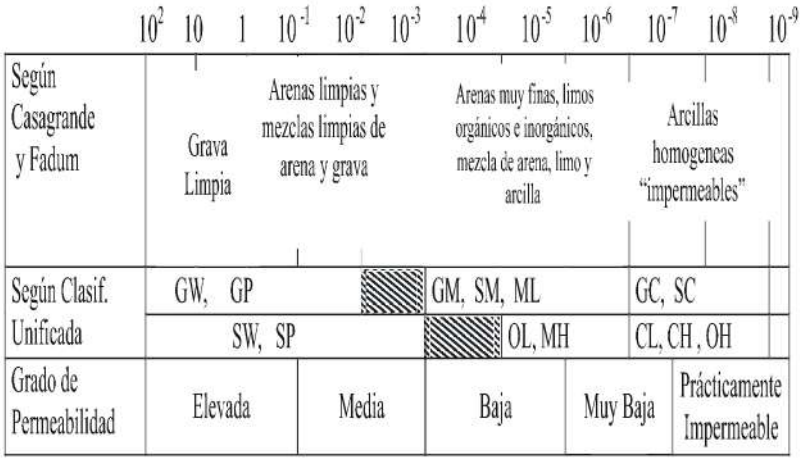
- El coeficiente de permeabilidad vertical (k_V) de la arcilla (lama) varía entre 1,97 x 10^{-7} cm/s a 0,1 x 10^{-9} cm/s

- El coeficiente de permeabilidad horizontal (kH) de la arcilla (lama) varía entre 1,25 x 10-7 cm/s a 9,9 x 10-8 cm/s.

Las características de la mayoría de los materiales granulares encontradas superficialmente corresponden a arenas medias con alto contenido de carbonato (conchas y fragmentos de coral), con granos angulosos.

En particular, cuando los materiales granulares provienen de la descomposición de un arrecife o bancos de coral, sus granos están constituidos por fragmentos de conchas y del mismo coral. Existen sin embargo algunas zonas cercanas a las costas donde se encontraron superficialmente materiales areno limosos que pueden ser susceptibles a licuación en el evento de un sismo o por efectos de cargas cíclicas de oleajes durante tormentas.

TABLA No. 2-4 Coeficiente de Permeabilidad, k en cm/s (Escala Logarítmica)



En la Tabla No. 2-5 se presenta el intervalo de valores de las propiedades mecánicas de la lama de Panamá [2, 3].

TABLA No. 2-5 . Propiedades Mecánicas de la Lama

Parámetros de Resistencia	Pacific Muck	Atlantic Muck
Cohesión, t/m^2 (c)	0,3 – 2,1	0,2 – 1,95
Ángulo de fricción interna, grados (ϕ)	4 - 12	2 – 13
Presión de presconsolidación, kg/cm^2 (p_c)	0,18 – 0,80	0,22 – 0,80
Coeficiente de consolidación, 10^{-4} cm^2/s (c_v)	0,16 - 125	0,11 – 20,9
Módulo edométrico, cm^2/kg (m_v)	0,001 – 0,42	0,002 – 0,202
Indice de compresión (c_c)	0,20 – 1,47	0,40 – 1,71
Coeficiente de permeabilidad , 10^{-7} cm/s (k)	0,001 – 5,07	0,0022 – 4,22

TABLA No. 2-6 pH del Suelo

Acidez del Suelo	**pH**
Muy fuertemente ácido	4,0
Fuertemente ácido	4,5
Ácido	5,0
Moderadamente ácido	5,5
Ligeramente ácido	6,0
Muy ligeramente ácido	6,5
Neutro	7,0
Alcalino	7,5

TABLA No.2-7 Análisis Químicos en Muestras de Lama

Elementos Químicos	Valor Obtenido, %
Silicio (Si)	18,7 – 21,0
Calcio (Ca)	3,6 – 4,3
Hierro (Fe)	7,0 – 7,34
Aluminio (Al)	10,6 – 11,64
Azufre (S)	0,2 – 0,4
Magnesio (Mg)	0,12 – 0,18
Sodio (Na)	0,14 – 0,22
Potasio (K)	0,16 – 0,24
Cloruros (Cl^-)	0,2 – 0,5
Sulfatos (SO_4^{2-})	0,2 – 0,4
Cobre (Cu)	0,004 – 0,0065
Níquel (Ni)	0,00325 – 0,0055
Plomo (Pb)	< 0,001
Cromo (Cr)	0,01375 – 0,027

TABLA No.2-8 Valores Típicos de Elementos Químicos, **%**

Elemento	Suelos arcillosos	Suelos Siliceos
Silicio (Si)	18 – 22	< 75,0
Calcio (Ca)	1 – 5	< 1,0
Hierro (Fe)	1 – 5	< 1,0
Aluminio (Al)	3 – 5	< 1,0
Azufre (S)	0,05 – 0,1	< 0,5
Magnesio (Mg)	0,5 – 1,0	< 1,0
Sodio (Na)	< 3	< 1,0
Potasio (K)	< 3	< 1,0

4.8 Propiedades Químicas del Suelo

Las propiedades índices y mecánicas de la arcilla (lama) pueden cambiar al variar los cationes canjeables de diferentes elementos químicos (Na^{+}, k^{+}, Ca^{++}, Mg^{++}, Al^{+++}, Fe^{++}, Cu^{++}, Zn^{++}, etc.). La capacidad del intercambio catiónico aumenta con el grado de acidez de la partícula de arcilla (lama), es decir es mayor (capacidad de intercambio) si el pH del suelo es menor; la actividad catiónica se hace notable, en general, para pH menor que 7. El pH de la arcilla (lama) encontrado varió entre 6,8 a 7,0 [3, 5]. En la Tabla No. 2-6 se presenta la acidez del suelo de acuerdo al pH [6].

Además se determinó el pH del agua de la arcilla (lama), varía entre 6,9 a 7,6 y el pH del agua del mar, varía entre 7,1 a 7,2 [3, 5]. En la Tabla No. 2-7 se presentan los resultados de análisis químicos en muestras de arcilla[3, 5] (lama) y en la Tabla No. 2-8 los valores típicos de elementos químicos en los suelos arcillosos [6].

5. Descripción de la Lama

Arcilla, color gris oscuro, con arena y conchas, plasticidad media a alta, consistencia natural muy suave a suave (se escurre al apretarla). Presenta materia orgánica (restos de raíces, madera, conchas y otras sustancias vegetales semi-descompuestas), contenido natural de agua medio a alto, grado de permeabilidad prácticamente impermeable; nombre local lama (Pacific Muck o Atlantic Muck).

Por lo general estas arcillas son plásticas, se contraen al secarse, presentan marcada cohesión según su contenido de agua, son compresibles y al aplicárseles una carga en su superficie se comprimen lentamente. Otra característica interesante, desde el punto de vista de la construcción, es que la resistencia perdida por remoldeo se recupera parcialmente con el tiempo (tixotropía).

Se puede decir que un contenido mínimo del 15% de lama en un suelo le dará a éste las propiedades de la arcilla.

6. Conclusiones

Las principales conclusiones del presente trabajo son las siguientes:

- Los suelos superficiales del fondo marino de la Bahía de Panamá y la costa de Colón corresponden a una arcilla, color gris oscuro, con arena y conchas, plasticidad media a alta, consistencia natural muy suave a suave (se escurre al apretarla). Presenta materia orgánica (restos de raíces, madera, conchas y otras sustancias vegetales semi-descompuestas), contenido natural de agua medio a alto, grado de permeabilidad prácticamente impermeable; nombre local lama (Pacific Muck o Atlantic Muck).
- Por lo general estas arcillas son plásticas, se contraen al secarse, presentan marcada cohesión según su contenido de agua, son compresibles y al aplicárseles una carga en su superficie se comprimen lentamente. Otra característica interesante, desde el punto de vista de la construcción, es que la resistencia perdida por remoldeo se recupera parcialmente con el tiempo (tixotropía).
- Este material (lama) de plasticidad media a alta, impermeable y pH $\leq$ 7,0 sólo podrá ser utilizado para impermeabilización de tanques de almacenamiento de agua para uso agrícola, ganadero y piscicultura.
- Se puede decir que un contenido mínimo del 15% de lama en un suelo le dará a éste las propiedades de la arcilla.
- Existen en algunas zonas materiales granulares susceptibles a licuación que requieren de un análisis cuidadoso para conocer su potencialidad a licuarse y las consecuencias que se tendrían al ocurrir tal fenómeno.

7. Referencias

[1] Traducción de los Anexos 3, 4 y 5 del Informe del Gobernador del Canal de Panamá, Estudios del Canal Interoceánico, 1947.

[2] Exploraciones geotécnicas realizadas por: Ingenieros Constructores Asociados (ICA), Tecnilab, S.A., Ingenieros Geotécnicos, Laboratorio de Suelos de U.T.P., para la construcción de Costa del Este, El Corredor Sur, Muelle de Cruceros en Amador, Puerto de Balboa, Islas artificiales de Punta Pacífica (construcción en proyecto), Puerto de Manzanillo, Puerto de Coco Solo, Puerto de Cristóbal y France Field entre otros, 1970 - 2000.

[3] Memoria geotécnica del proceso constructivo sin retirar la arcilla (lama) de Islas Artificiales de "Punta Pacífica", en Panamá, República de Panamá. División de Ingeniería de ICA, 2000.

[4] Juarez Badillo y Rico Rodriguez, Fundamentos de Mecánica de Suelos Tomo 1, México: Limusa, tercera edición, 1992.

[5] Laboratorio de Química. Centro Experimental de Ingeniería. UTP. República de Panamá, 2000.

[6] Hans W. Fassbender, Química de Suelos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas 1978.