

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL FENÓMENO DE  
TUBIFICACIÓN EN PRESAS DE TIERRA”**

**Presentada por:  
ERICK ABAD ROSALES ASTO**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO  
MAGISTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

**Lima - Perú**

**2021**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**

**“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL FENÓMENO DE  
TUBIFICACIÓN EN PRESAS DE TIERRA”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO  
MAGÍSTER SCIENTIAE**

**Presentada por:**

**ERICK ABAD ROSALES ASTO**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

Ph.D. David Ascencios Templo  
**PRESIDENTE**

Mg.Sc. Teresa Velásquez Bejarano  
**ASESOR**

Mg.Sc. Miguel Sánchez Delgado  
**MIEMBRO**

Dr. Abel Mejía Marcacuzco  
**MIEMBRO**

## DEDICATORIA

A mis padres, Nieves Asto Duran y  
Edson Rosales Mallma por darme la vida  
y por enseñarme valores que me han  
ayudado a crecer como persona.

A mi esposa Liz y a mi hijo Eduardo,  
por ser el motor de mi vida. Sin ustedes  
esto no hubiera sido posible.

A mis hermanos Johann, Karen, Margot y Paúl  
por su apoyo, cariño y por estar en los momentos  
más importantes de mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

Mis agradecimientos a la Escuela de Postgrado de la UNALM – Maestría en Recursos Hídricos,  
por mi formación académica y profesional durante los años de enseñanza.

A la Mg.Sc. Teresa Velásquez Bejarano, asesora de la presente tesis de maestría por su tiempo,  
orientación y consejos.

Al Ingeniero Hermes Valdivia Aspilcueta, quien me impartió sus conocimientos y experiencias  
que han sido fundamental en mi formación profesional.

Al Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

# ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN .....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1	TIPO DE PRESAS .....	3
2.1.1	Presas de tierra. ....	4
2.2	INVENTARIO DE PRESAS EN EL PERÚ .....	5
2.3	PRINCIPALES CAUSAS DE FALLAS EN PRESAS.....	7
2.3.1	Causas del deterioro y falla de presas de material suelto.....	8
2.4	TUBIFICACIÓN .....	8
2.4.1	Condiciones generales de la tubificación .....	11
2.4.2	Ubicación del inicio de la erosión interna y la ruta de falla.....	13
2.4.3	Mecanismo de falla por tubificación.....	14
2.4.4	Factores que interviene el fenómeno de tubificación.....	16
2.5	MÉTODOS DE PRUEBA PARA SIMULAR MECANISMOS DE EROSIÓN DEL SUELO .....	18
2.5.1	Prueba de erosión de agujeros (HET) .....	18
2.5.2	Interpretación del ensayo .....	19
2.6	SUELOS DISPERSIVOS O EROSIONABLES .....	25
2.7	TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE SUELOS DISPERSIVOS .....	26
2.7.1	Ensayo de Pinhole .....	26
2.7.2	Ensayos químicos .....	27
2.7.3	Ensayo de Crumb .....	28
2.7.4	Ensayo de doble hidrómetro.....	28
2.8	FLUJO DE AGUA A TRAVÉS DEL SUELO .....	29
2.8.1	Ecuación hidrodinámica del flujo del agua en el suelo.....	30
2.8.2	Descripción del movimiento de un fluido.....	31
2.8.3	Velocidades y gradientes hidráulicos en una red de flujo.....	32

2.9	PRINCIPALES TIPOS DE SUELO.....	35
2.10	PROPIEDADES ÍNDICES DEL SUELO.....	37
2.10.1	Gravedad específica .....	37
2.10.2	Superficie específica. ....	38
2.10.3	Consistencia del suelo .....	38
2.10.4	Análisis hidrométrico .....	39
2.10.5	Clasificación del suelo .....	40
2.11	COMPACTACIÓN DE SUELOS.....	42
2.11.1	Principios generales de compactación.....	42
2.11.2	Proctor estándar.....	42
2.11.3	Proctor modificado.....	43
2.11.4	Factores que afectan la compactación .....	44
2.11.5	Tipos de curvas de compactación.....	44
2.11.6	Efecto del esfuerzo de compactación .....	45
III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	46
3.1	SELECCIÓN DE MUESTRAS DE SUELOS .....	46
3.2	DISEÑO DE EQUIPO PARA ENSAYOS DE TUBIFICACIÓN .....	46
3.3	ENSAYOS ESTÁNDARES Y ESPECIALES EN LABORATORIO .....	48
3.4	ENSAYOS DE SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE TUBIFICACIÓN.....	50
3.5	METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA INTERPRETACIÓN DE LOS ENSAYOS DE TUBIFICACIÓN.....	54
IV.	RESULTADOS Y DISCUSION .....	57
4.1	PROPIEDADES ÍNDICE DE LOS SUELOS.....	57
4.2	PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN, PERMEABILIDAD Y GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SÓLIDOS.....	61
4.3	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TUBIFICACIÓN .....	63
4.4	PARÁMETROS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS DE TUBIFICACIÓN.....	76
4.5	DINÁMICA DEL PROCESO DE LA TUBIFICACION .....	79

4.6	COMPARACIÓN DEL PROCESO DE TUBIFICACIÓN ENTRE LOS 7 TIPOS DE SUELOS .....	82
V.	CONCLUSIONES .....	85
VI.	RECOMENDACIONES .....	86
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
VIII.	ANEXO .....	91

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Número de presas por Autoridad Administrativa del Agua. ....	5
Cuadro 2. Número de presas por departamento. ....	6
Cuadro 3. Presas de acuerdo a su tipología. ....	6
Cuadro 4. Estadística de fallas en grandes presas de tierra. ....	7
Cuadro 5. Susceptibilidad de los suelos a la tubificación. ....	17
Cuadro 6. Relación cualitativa del índice representativo de la tasa de erosión y la progresión de la erosión interna. ....	23
Cuadro 7. Relación entre $\check{I}_{HET}$ y clasificación de suelos para suelos no dispersivos. ....	24
Cuadro 8. Criterios para clasificar los suelos dispersivos de acuerdo con el ESP. ....	27
Cuadro 9. Criterios para evaluar el grado de dispersión. ....	29
Cuadro 10. Límites de tamaño de suelos. ....	35
Cuadro 11. Valores típicos de la gravedad específica de las partículas. ....	37
Cuadro 12. Valores típicos de gravedad específica. ....	37
Cuadro 13. Valores de índice de plasticidad. ....	39
Cuadro 14. Sistema de clasificación de suelos AASHTO. ....	40
Cuadro 15. Sistema unificado de clasificación de suelos. ....	41
Cuadro 16. Características del ensayo proctor estandar D698. ....	43
Cuadro 17. Características del ensayo proctor modificado D1557. ....	43
Cuadro 18. Ensayos estándares y ensayos especiales realizados. ....	48
Cuadro 19. Consideraciones para el ensayo proctor modificado. ....	51
Cuadro 20. Propiedades índices de las muestras de suelos. ....	60
Cuadro 21. Resultados de compactación, permeabilidad y gravedad específica de sólidos. ....	62
Cuadro 22. Resultados de los ensayos de tubificación. ....	66
Cuadro 23. Estimación del índice representativo, tasa de erosión y cortante crítico. ....	77
Cuadro 24. Duración de los ensayos de tubificación en cada muestra de suelo. ....	80
Cuadro 25. Promedio del Índice representativo de tasa de erosión de cada grupo analizado. ....	83
Cuadro 26. Características del comportamiento de los suelos. ....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relleno de tierra y enrocado en la construcción de presas. ....	3
Figura 2. Principales variantes de presas de relleno de tierra y relleno de tierra enrocado. ....	4
Figura 3. Tubificación de una presa de tierra por erosión interna regresiva. ....	9
Figura 4. Arrastre de granos de suelo por efecto de tubificación retrógrada ....	10
Figura 5. Sifonamiento debajo de una presa de mampostería cimentada en arena. ....	11
Figura 6. Erosión interna en la presa iniciada por erosión hacia atrás. ....	12
Figura 7. Erosión interna en la presa iniciada por fuga concentrada. ....	12
Figura 8. Erosión interna en la fundación iniciada por erosión hacia atrás. ....	12
Figura 9. Erosión interna en el terreno de fundación y el cuerpo de la presa. ....	12
Figura 10. Ejemplo de posible localización de iniciación de erosión interna. ....	13
Figura 11. Posible localización de iniciación de erosión interna en la sección de la presa. ....	13
Figura 12. Detalle de un estrato pequeño que puede causar una falla aguas abajo. ....	14
Figura 13. Proceso de erosión regresiva que conduce a la tubificación. ....	15
Figura 14. Ensayo de Sherard para la susceptibilidad de los suelos a la erosión interna. ....	16
Figura 15. Diagrama esquemático de la prueba de erosión del agujero (HET). ....	19
Figura 16. Control de volumen de un flujo entre dos secciones de un tubo inclinado. ....	20
Figura 17. Patrón de flujo aguas arriba y aguas abajo de la muestra de prueba. ....	21
Figura 18. Esquema de resultados típicos prueba de erosión del agujero. ....	25
Figura 19. Potencial de dispersividad en función del contenido químico, según los criterios de Sherard y otros 1976. ....	26
Figura 20. Grado de dispersión del suelo. ....	27
Figura 21. Trayectoria de las partículas de agua en régimen laminar y turbulento. ....	29
Figura 22. Distribución de la velocidad de un fluido que circula dentro de un tubo. ....	30
Figura 23. Elemento de una región sujeta a flujo tridimensional. ....	31
Figura 24. Fuerzas de filtración. ....	32
Figura 25. Gradiente crítico de ebullición. ....	33
Figura 26. Curva de distribución del tamaño de partículas (curvas granulométricas). ....	36
Figura 27. Carta de plasticidad. ....	36
Figura 28. Superficie específica versus radio equivalente de partículas esféricas. ....	38
Figura 29. Área específica versus gravedad específica de sólidos. ....	38
Figura 30. Límites de Atterberg. ....	39
Figura 31. Principios de compactación. ....	42

Figura 32. Cuatro tipos de curvas de compactación encontradas en los suelos. ....	44
Figura 33. Efectos de la energía de compactación sobre una arcilla arenosa. ....	45
Figura 34. Celdas para el ensayo de tubificación. ....	47
Figura 35. Componentes del equipo para el ensayo de tubificación. ....	48
Figura 36. Proceso Metodológico del análisis experimental. ....	49
Figura 37. Esquema del ensayo de tubificación. ....	50
Figura 38. Perforación de la muestra con una broca de 3 milímetros de diámetro. ....	51
Figura 39. Celda para pruebas de tubificación. ....	52
Figura 40. Pruebas de tubificación. ....	52
Figura 41. Aspecto final del orificio formado de una prueba (derecha) y plantilla de orificio de parafina (izquierda). ....	53
Figura 42. Esquema para la interpretación de ensayos. ....	54
Figura 43. Esquema para determinar el coeficiente e índice de tasa de erosión ....	56
Figura 44. Curva de distribución del tamaño de partículas de suelos. ....	58
Figura 45. Carta de plasticidad de Casagrande. ....	61
Figura 46. Curvas de compactación. ....	63
Figura 47. Resultados de las pruebas de tubificación en muestras CH. ....	67
Figura 48. Resultados de las pruebas de tubificación en muestras CL arenoso. ....	69
Figura 49. Resultados de las pruebas de tubificación en muestras CL. ....	71
Figura 50. Resultados de las pruebas de tubificación en muestras SC. ....	72
Figura 51. Resultados de las pruebas de tubificación en muestras ML. ....	73
Figura 52. Resultados de las pruebas de tubificación en muestras MH. ....	73
Figura 53. Resultado de la prueba de tubificación en muestra SM. ....	74
Figura 54. Presión versus tiempo. ....	75
Figura 55. Estimación del índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) y la tensión de corte crítico ( $\tau_c$ ). ....	78
Figura 56. Dinámica del proceso de tubificación. ....	79
Figura 57. Relación del diámetro promedio final en función con el material de arrastre. ....	81
Figura 58. Relación del diámetro promedio final en función con el material de arrastre. ....	81
Figura 59. Relación del índice de tasa de erosión con el cortante crítico. ....	82
Figura 60. Índice representativo de tasa de erosión para cada tipo de suelo. ....	83
Figura 61. M-15 arcilla inorgánica muy plástico (CH) después del ensayo de tubificación. ....	155
Figura 62. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica muy plástico (M-15) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	155

Figura 63. M-01 arcilla inorgánica medianamente plástico (CH) después del ensayo de tubificación.....	156
Figura 64. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástico (M-01) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	156
Figura 65. M-14 arcilla inorgánica muy plástico (CH) después del ensayo de tubificación. ....	157
Figura 66. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica muy plástico (M-14) y el inicio de falla del suelo por tubificación.....	157
Figura 67. M-19 arcilla inorgánica muy plástico (CH) después del ensayo de tubificación. ....	158
Figura 68. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica muy plástico (M-19) y el inicio de falla del suelo por tubificación.....	158
Figura 69. M-21 arcilla inorgánica muy plástico (CH) después del ensayo de tubificación. ....	159
Figura 70. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica muy plástico (M-21) y el inicio de falla del suelo por tubificación.....	159
Figura 71. M-12 arcilla inorgánica medianamente plástico (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.....	160
Figura 72. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástico (M-12) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	160
Figura 73. M-16 arcilla inorgánica medianamente plástico (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.....	161
Figura 74. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástico (M-16) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	161
Figura 75. M-17 arcilla inorgánica medianamente plástico (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.....	162
Figura 76. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástico (M-17) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	162
Figura 77. M-22 arcilla inorgánica medianamente plástico (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.....	163
Figura 78. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástico (M-22) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	163
Figura 79. M-24 arcilla inorgánica medianamente plástico (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.....	164
Figura 80. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástico (M-24) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	164

Figura 81. M-26 arcilla inorgánica medianamente plástico (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.....	165
Figura 82. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástico (M-26) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	165
Figura 83. M-27 arcilla inorgánica ligeramente plástico (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.....	166
Figura 84. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica ligeramente plástico (M-27) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	166
Figura 85. M-28 arcilla inorgánica ligeramente plástico (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.....	167
Figura 86. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica ligeramente plástico (M-28) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	167
Figura 87. M-20 arcilla inorgánica ligeramente plástico (CL) después del ensayo de tubificación. ....	168
Figura 88. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica ligeramente plástico (M-20) y el inicio de falla del suelo por tubificación ....	168
Figura 89. M-02 arcilla inorgánica medianamente plástico (CL) después del ensayo de tubificación.....	169
Figura 90. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástico (M-02) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	169
Figura 91. M-04 arcilla inorgánica medianamente plástico (CL) después del ensayo de tubificación.....	170
Figura 92. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástico (M-04) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	170
Figura 93. M-08 arcilla inorgánica ligeramente plástico (CL) después del ensayo de tubificación. ....	171
Figura 94. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica ligeramente plástico (M-08) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	171
Figura 95. M-10 arcilla inorgánica medianamente plástico (CL) después del ensayo de tubificación.....	172
Figura 96. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástico (M-10) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	172
Figura 97. M-13 arcilla inorgánica medianamente plástico (CL) después del ensayo de tubificación.....	173

Figura 98. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástico (M-13) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	173
Figura 99. M-18 arcilla inorgánica medianamente plástico (CL) después del ensayo de tubificación.....	174
Figura 100. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástico (M-18) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	174
Figura 101. M-03 arena arcillosa ligeramente plástico (SC) después del ensayo de tubificación .....	175
Figura 102. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arena arcillosa ligeramente plástico (M - 03) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	175
Figura 103. M-23 arena arcillosa ligeramente plástico (SC) después del ensayo de tubificación. ....	176
Figura 104. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arena arcillosa ligeramente plástico (M - 23) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	176
Figura 105. M-11 arena arcillosa medianamente plástico (SC) después del ensayo de tubificación. ....	177
Figura 106. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arena arcillosa medianamente plástico (M - 11) y el inicio de falla del suelo por tubificación .....	177
Figura 107. M-05 limo inorgánico ligeramente plástico (ML) después del ensayo de tubificación. ....	178
Figura 108. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta el limo inorgánico ligeramente plástico (M - 05) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	178
Figura 109. M-06 limo inorgánico ligeramente plástico (ML) después del ensayo de tubificación. ....	179
Figura 110. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta el limo inorgánico ligeramente plástico (M - 06) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	179
Figura 111. M-07 limo inorgánico medianamente plástico (ML) después del ensayo de tubificación.....	180
Figura 112. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta el limo inorgánico medianamente plástico (M - 07) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	180
Figura 113. M-09 limo inorgánico medianamente plástico (ML) después del ensayo de tubificación.....	181
Figura 114. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta el limo inorgánico medianamente plástico (M - 09) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	181

Figura 115. M-025 arena limosa no plástica (SM) después del ensayo de tubificación. ....	182
Figura 116. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arena limosa no plástica (M-25) y el inicio de falla del suelo por tubificación. ....	182

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1.- Resultados de ensayos granulométricos – hidrómetro.....	92
ANEXO 2.- Resultados de ensayos de compactación.....	120
ANEXO 3.- Resultados de ensayos de sólidos en suspensión. ....	148
ANEXO 4.- Gráficos de estimación de la tasa de erosión y la tensión de corte crítico.....	151
ANEXO 5.- Resultados de los ensayos de tubificación. ....	155
ANEXO 6.- Cuadro de resumen de los resultados de laboratorio. ....	183

## RESUMEN

La tubificación es una de las causas principales de los daños o fallas en presas de tierra (Nakano 1991). Este fenómeno ocurre cuando hay arrastre de las partículas de suelo en el interior de la masa por efecto de las fuerzas erosivas generadas por el flujo de agua. Una vez que las partículas empiecen a ser removidas van quedando en el suelo pequeños canales por donde el agua circula a mayor velocidad con mayor poder de arrastre, de manera que el fenómeno de tubificación tiende a crecer continuamente, aumentando siempre el diámetro de los canales que se van formando en el interior (Rico y Del Castillo 2000). Por lo tanto para seleccionar los suelos adecuados para la construcción de presas de tierra. El objetivo del presente estudio es evaluar la susceptibilidad a la tubificación de suelos utilizados en la construcción de presas de tierra en base a ensayos experimentales de laboratorio, para ello se ha desarrollado un dispositivo experimental basado en los métodos para evaluar la erosión en suelos cohesivos desarrollados por Wan y Fell (Santos *et al.* 2012) y en métodos estándar para identificación de suelos dispersivos (Norma ASTM – D4647). Se evaluaron 28 muestras de suelo agrupados en 7 tipos (CH, CL arenoso, CL, SC, ML, MH y SM) del cual se determinaron el esfuerzo cortante crítico ( $\tau_c$ ) y el índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) el cual permite caracterizar el comportamiento de los suelos analizados como extremadamente rápida para la muestra SM, muy rápida para las muestras ML, moderadamente rápida para las muestras MH y CH y modernamente lenta para las muestras CL, CL arenoso y SC cuyos valores para las condiciones realizadas varían de 0.1588 a 0.6607 siendo este parámetro adimensional.

**Palabras claves:** Tubificación, presas, compactación, esfuerzo cortante crítico, índice de tasa de erosión.

## ABSTRACT

Piping is one of the main causes of damage or failure in earth dams (Nakano 1991). This phenomenon occurs when there is dragging of the soil particles inside the mass due to the erosive forces generated by the flow of water. Once the particles begin to be removed, small channels remain in the soil through which the water circulates at a higher speed with greater drag power, so that the phenomenon of piping tends to grow continuously, always increasing the diameter of the channels that they are forming inside (Rico y Del Castillo 2000). Therefore, to select the suitable soils for the construction of earth dams. The objective of this study is to evaluate the susceptibility to piping of soils used in the construction of earth dams based on experimental laboratory tests, for this an experimental device has been developed based on the methods to evaluate erosion in cohesive soils developed by Wan y Fell (Santos *et al.* 2012) and in standard methods for identification of dispersive soils (ASTM Standard - D4647). 28 soil samples grouped into 7 types (CH, sandy CL, CL, SC, ML, MH and SM) were evaluated from which the critical shear stress ( $\tau_c$ ) and the representative erosion rate index ( $\tilde{I}$ ) were determined. allows characterizing the behavior of the soils analyzed as extremely fast for the SM sample, very fast for the ML samples, moderately fast for the MH and CH samples and modernly slow for the CL, sandy CL and SC samples whose values for the conditions carried out vary from 0.1588 to 0.6607 being this parameter dimensionless.

**Keywords:** Piping, dams, compaction, critical shear stress, erosion rate index.

## I. INTRODUCCIÓN

Los suelos usados en la construcción de presas de tierra pueden ser susceptibles a desarrollar procesos de tubificación y siendo este fenómeno una de las causas que da origen a la falla de las presas de tierra (Nakano 1991), es necesario analizar dicho fenómeno mediante ensayos experimentales en laboratorio.

La estructura más importante de una presa de tierra es el núcleo, el cual al ser compactado debe cumplir con dos condiciones; baja permeabilidad y buena estabilidad. Cuando la presa entra en operación, esta se satura por debajo de la línea de superior de flujo y la masa de suelo saturado está en la condición de suelo sumergido cuya densidad es la diferencia de la densidad del suelo saturado y la densidad del agua.

Debido a un mal proceso de compactación durante el proceso constructivo y el uso excesivo de materiales sensibles se puede producir tubificación en el talud aguas abajo, este fenómeno se presentan debido a que el empuje hidrodinámico generado por la carga hidráulica supera la resistencia del suelo sumergido. Los materiales que se utilizan son arcillas limosas con pequeños porcentajes de arena y grava fina (Juárez y Rico 2011); la arcilla limosa debe ser de mediana a baja plasticidad ya que una arcilla de plasticidad alta puede ser expansiva reduciendo la estabilidad.

En la presente investigación se efectuó pruebas de erosión por flujo a través de un agujero de 3 milímetros en la parte central de la muestra para simular las condiciones de tubificación a lo largo de una ruta de flujo en una presa de tierra. Con la finalidad de evaluar la susceptibilidad a la tubificación se analizaron 28 muestras de suelo efectuando ensayos estándar y especiales de acuerdo a las normas ASTM (American Society of Testing Materials) y su equivalente NTP (Norma Técnica Peruana) agrupándolas en 7 tipos según sus propiedades índices. Con los resultados de los ensayos de laboratorio se determinan parámetros para caracterizar el comportamiento de los suelos a la tubificación.

## **OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **General**

Evaluar la susceptibilidad a la tubificación de suelos utilizados en la construcción de presas de tierra en base a ensayos experimentales de laboratorio.

### **Específico**

Diseñar un equipo y establecer una metodología que permita obtener parámetros para evaluar la tubificación en suelos.

Evaluar la incidencia de las variables de los suelos en el proceso de tubificación.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 TIPO DE PRESAS

Las presas pueden clasificarse en categorías de acuerdo al uso, al proyecto hidráulico, o los materiales que conforman la estructura (Bureau Of Reclamation 1966).

Según el uso las presas pueden clasificarse de acuerdo a la función más general que va a desempeñar, como de almacenamiento, de derivación, o regulación (Velásquez 2014).

Según el proyecto hidráulico se clasifican en presas vertedoras o no vertedoras. Las presas vertedoras se proyectan para descargar sobre sus coronas y deben estar hechas de materiales que no se erosionen. Las presas no vertedoras son las que se proyectan para que no rebase el agua por su corona, este tipo de proyecto permite ampliar la elección de los materiales incluyendo las presas de tierra y las de enrocado (Bureau Of Reclamation 1966).

Según los materiales que conforman la estructura se mencionan la presa de tierra, enrocado, de concreto tipo gravedad, de concreto tipo arco, de concreto tipo contrafuerte (Velásquez 2014).

Las presas pueden clasificarse (Figura 1), como presas de tierra o de enrocado, la división entre estas dos variantes no es absoluta (Novak *et al.* 2001).

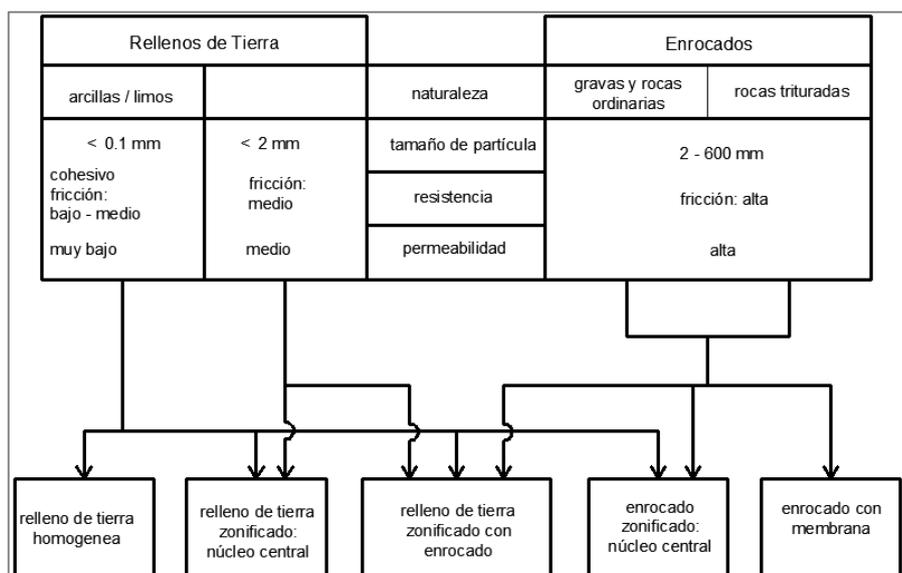


Figura 1. Relleno de tierra y enrocado en la construcción de presas.

Fuente: Novak *et al.* (2001)

### 2.1.1 Presas de tierra.

Las presas de tierra son estructura que tiene por objeto el almacenamiento de agua. Su construcción se requiere para regular los aportes del río y suplir las demandas durante épocas de sequía. Constituyen el tipo de presas más común, porque en su construcción se usan suelos en estado natural que requieren el mínimo tratamiento. Una forma de clasificación se basa en los materiales que conforman la estructura (Velásquez 2014).

Se denomina presa de tierra si los suelos compactados representan más del 50 por ciento del volumen colocado. Una presa de relleno de tierra se construye principalmente con suelos seleccionados, con una compactación uniforme e intensiva, en capas delgadas y con un contenido de humedad controlada (Novak *et al.* 2001). En la Figura 2 se muestra las variantes de presas de relleno de tierra y enrocado.

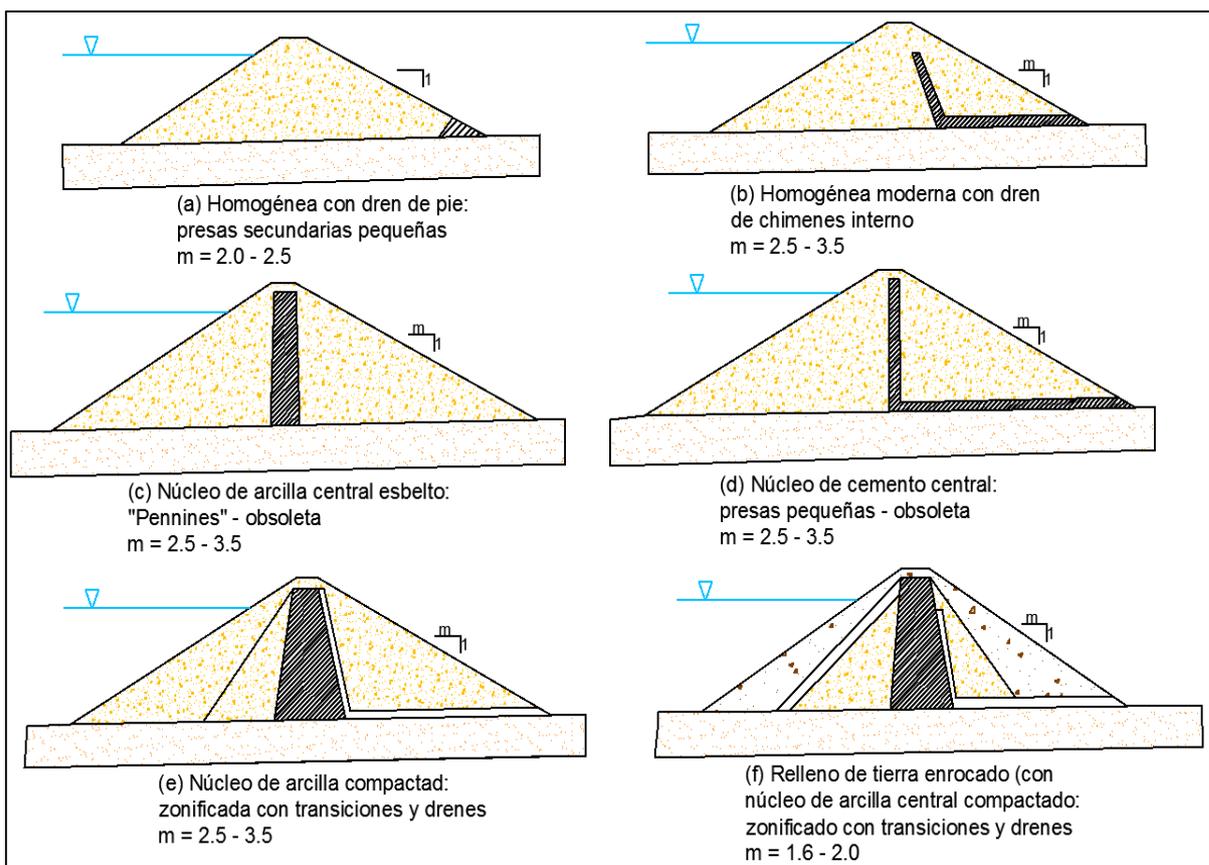


Figura 2. Principales variantes de presas de relleno de tierra y relleno de tierra enrocado.

Fuente: Novak *et al.* (2001)

## 2.2 INVENTARIO DE PRESAS EN EL PERÚ

La Autoridad Nacional del Agua, ha realizado un inventario de las presas que existen en el país tomando las siguientes consideraciones (a) Presas previamente registradas en el ICOLD, (b) Presas de almacenamiento y regulación, además de las presas de relave para uso minero, (c) Presas de propiedad estatal o privada, (d) Presas que presentan una altura igual o mayor a cuatro metros (medida desde la cota más baja de su cimentación) o que conformen un reservorio de capacidad mayor de 300 000 m<sup>3</sup> y (e) Presas que se encuentran en operación (Autoridad Nacional del Agua 2015).

En el Cuadro 1 se muestra el número de presas registrado por las Autoridades Administrativas de Agua.

Cuadro 1. Número de presas por Autoridad Administrativa del Agua.

N°	Autoridad Administrativa del Agua (AAA)	N° de presas
1	Huarmey - Chicama	131
2	Cañete - Fortaleza	129
3	Mantaro	93
4	Pampas - Apurímac	84
5	Huallaga	58
6	Urubamba - Vilcabamba	57
7	Caplina - Ocoña	51
8	Marañon	40
9	Chaparra - Chincha	39
10	Jequetepeque - Zarumilla	28
11	Titicaca	16
12	Madre de Dios	9
13	Ucayali	8
TOTAL		743

Fuente: Autoridad Nacional del Agua. (2015)

En el Cuadro 2 se muestran el número de presas inventariadas en las distintas regiones del Perú.

Cuadro 2. Número de presas por departamento.

N°	Departamentos	N° de presas
1	Ancash	143
2	Lima	115
3	Cusco	86
4	Junín	72
5	Ayacucho	48
6	Pasco	49
7	Huancavelica	48
8	Arequipa	37
9	Cajamarca	30
10	Puno	28
11	La Libertad	25
12	Apurímac	23
13	Huánuco	10
14	Lambayeque	10
15	Tacna	8
16	Moquegua	7
17	Piura	3
18	San Martín	1

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (2015)

En el Cuadro 3 se muestra el número de presas en el Perú según su tipología.

Cuadro 3. Presas de acuerdo a su tipología.

N°	Tipología	N° de presas
1	Presas de gravedad de concreto o mampostería. Se incluye las presas arco - gravedad y las de concreto armado.	294
2	Presas de material suelto (homogéneas, zonificadas, con núcleo de material impermeable).	249
3	Presas de enrocado y/o material suelto con pantalla de concreto o de acero.	29
4	Presas de contrafuertes.	5
5	Presas mixtas (de gravedad y diques de material suelto).	3
6	Presas de arco - gravedad.	4
7	Presas de bóveda.	1
8	Otros.	45
9	Presas de relaves.	113

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (2015)

Velásquez (2014) menciona que en el Perú, la mayoría de presas construidas se han desarrollado para proyectos de irrigaciones, el 74 por ciento se encuentra operando a fin de afianzar los recursos de agua para la agricultura. El segundo lugar de uso de estas presas lo tienen los proyectos para centrales hidroeléctricas que cubren un 24 por ciento y el 2 por ciento de presas han sido desarrolladas para fines de abastecimiento de agua poblacional.

### 2.3 PRINCIPALES CAUSAS DE FALLAS EN PRESAS

Nakano (1991) menciona que el factor de seguridad 1.2, no significa que la presa es segura. Las causas principales de los daños o fallas en presas son:

1. Sobrevertimiento
2. Tubificación y erosión interna.
3. Falla de taludes.

Osorio (2017) menciona que la falla de grande presas construidas entre 1800 y 1986, excluyendo las que fueron construidas en Japón y China que la erosión interna ha sido responsable de aproximadamente la mitad de las fallas en presas de tierra de las que se conoce el modo de falla. En el Cuadro 4 se muestra la estadística de falla en grandes presas de tierra.

Cuadro 4. Estadística de fallas en grandes presas de tierra.

Modo de falla	Erosión		Deslizamiento del terraplén	
	Erosión externa (sobrevvertimiento)	Erosión interna	Inestabilidad estática	Inestabilidad sísmica
% en el mundo	48	46	4	2
	94		6	

Fuente: Osorio (2017)

La erosión interna en presas de tierra, se manifiesta por la migración de partículas del suelo que conforma el cuerpo de la presa a través de la fracción granular, estas partículas son arrastradas por las fuerzas de infiltración asociadas a los gradientes hidráulicos.

Cualquier proceso que inicie en el cuerpo de la presa o fundación, es probable la existencia de inestabilidad en los taludes y la obstrucción de los sistemas de drenaje, generando aumento en las presiones de poro, lo que implica el desarrollo de esfuerzos críticos que sobrepasen la resistencia al corte y por lo tanto se generen superficies de falla (Osorio 2017).

### **2.3.1 Causas del deterioro y falla de presas de material suelto**

Las causas del deterioro y la falla de presas de tierra son:

- a) Rebose de agua sobre el coronamiento de la presa por falla de la capacidad de los aliviaderos para la evaluación de las avenidas extremas.
- b) Erosión interna del cuerpo de la presa, tanto por la mala impermeabilización de su contacto con el terreno de cimentación (en el fondo y los estribos de la boquilla), por inexistencia o precariedad de filtros y drenes.
- c) Heterogeneidad de la cimentación con zonas débiles poco consolidadas o de alta permeabilidad y que sean potencialmente erosionables por el agua de filtración.
- d) Fugas de agua y sifonamiento provocados por filtraciones a través de agrietamientos producidos en el cuerpo de la presa, o cimentación.
- e) Licuefacción de suelos no cohesivos existentes en la cimentación o materiales mal compactados en el cuerpo de la presa, por causas de sismo de gran magnitud.
- f) Deslizamiento de taludes por deficiencias en el diseño o uso de materiales inadecuados como relleno del cuerpo del apresa, que puedan ser socavados por el agua de lluvia, por las filtraciones y por el oleaje dentro del embalse (Autoridad Nacional del Agua 2017).

## **2.4 TUBIFICACIÓN**

La tubificación es un fenómeno donde se presenta una remoción del material del cuerpo o cimentación de la presa, debido a las fuerzas de filtración y por lo regular a lo largo de una línea de flujo. El material es removido desde el talud aguas debajo de la salida del flujo, formándose progresivamente rápida un tubo por donde se liberan las fuerzas de filtración arrastrando el material, pudiendo llegar al flujo total y por ende el colapso.

La tubificación se inicia cuando hay arrastre de las partículas de suelo en el interior de la masa por efecto de las fuerzas erosivas generadas por el flujo de agua. Una vez que las partículas empiecen a ser removidas van quedando en el suelo pequeños canales por donde el agua circula a mayor velocidad con mayor poder de arrastre, de manera que el fenómeno de tubificación tiende a crecer continuamente, aumentando siempre el diámetro de los canales que se van formando en el interior del terraplén (Rico y Del Castillo 2000).

Muchos diques cimentados sobre suelos han fallado por la formación, aparentemente instantánea, de un túnel o sifón de descarga debajo de la base del dique y dentro de los suelos de fundación. La erosión, causada por el flujo de agua que se produce, aumenta rápidamente el ancho y la profundidad del túnel o sifón hasta que, en un momento dado, la estructura que ha quedado en el aire, rompe en fragmentos y es arrastrada por el flujo de agua. La forma de rotura descrita se conoce como ruptura por sifonaje (Terzaghi y Ralph 1973).

Según Jimenez y De Justo (1975) el fenómeno de tubificación consiste en la apertura, por erosión regresiva (Figura 3) de uno o varios conductos a través del suelo. Estos conductos, irán aumentando de sección y pueden conducir a la ruina de la obra.

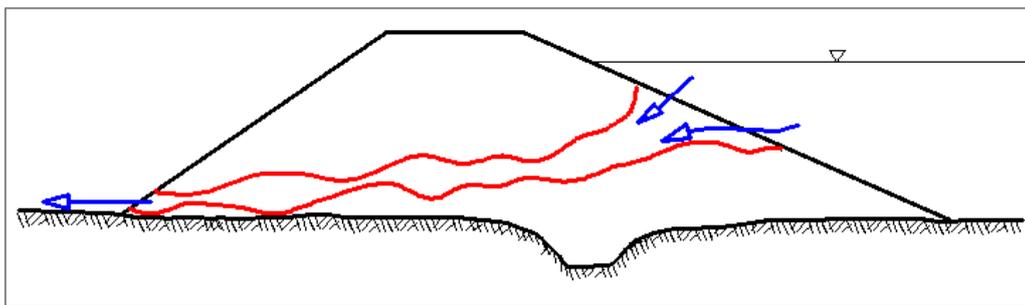


Figura 3. Tubificación de una presa de tierra por erosión interna regresiva.

Fuente: Jimenez y de Justo (1975)

Li y Arroyo (2011) mencionan que la tubificación es el término que más se emplea, aunque frecuentemente en forma ambigua, para describir los problemas asociados con fuerzas de filtración. La tubificación (Figura 4) es el proceso de remoción de partículas de suelo bajo un gradiente hidráulico saliente, con el resultado de la formación de un ducto desde la salida del agua. El fenómeno así definido se refiere en la literatura como tubificación retrógrada, ya que el proceso siempre sucede desde el lado aguas abajo hacia aguas arriba en contra de la dirección del flujo de agua. En ocasiones, este término se ha usado indebidamente como sinónimo de levantamiento, erosión interna o migración.

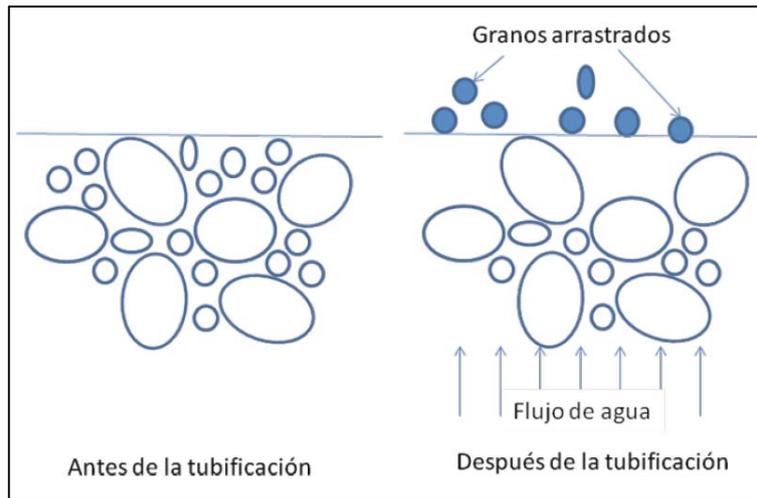


Figura 4. Arrastre de granos de suelo por efecto de tubificación retrógrada.

Fuente: Li y Arroyo (1975)

Levantamiento es el movimiento de un bloque de suelo en la superficie bajo efectos de gradiente hidráulico. Puede ocurrir en suelos cohesivos y granulares. El problema se presenta en taludes aguas abajo de donde sobresalen flujos de salida.

El fenómeno de tubificación se presenta cuando las filtraciones a través de un suelo se presentan con velocidades críticas (Villaseñor 1978).

Si el suelo dentro de una zona de agitación es arrastrado por la corriente de agua, se forma un hoyo o fosa. Esto produce una concentración de agua y un aumento en el gradiente hidráulico, porque se acorta el camino del flujo; como consecuencia la agitación se hace más violenta y el hoyo más profundo, abriéndose camino en dirección aguas arriba a una velocidad creciente hacia el lugar de donde viene el agua, como se muestra en la Figura 5. Esto produce en el suelo una abertura o conducto y al proceso de esta continua erosión se le llama sifonamiento o tubificación (Sowers y Sowers 1986).

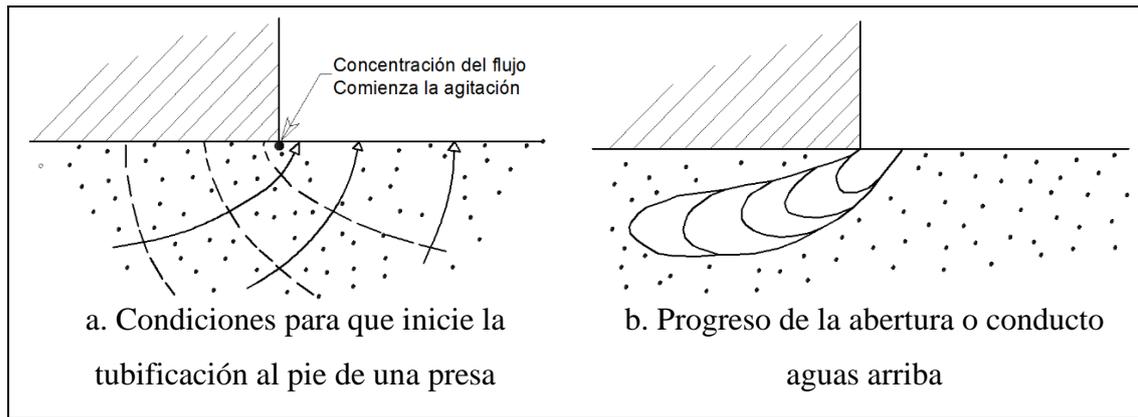


Figura 5. Sifonamiento debajo de una presa de mampostería cimentada en arena.

Fuente: Sowers y Sowers (1986)

La resistencia al corte de un suelo granular es directamente proporcional a la presión efectiva. Cuando un suelo sin cohesión se somete a un estado hidráulico que da lugar a presiones efectivas nulas, la resistencia del suelo se hace cero; entonces se dice que existe una condición de sifonamiento.

El gradiente necesario para que se produzca el estado de sifonamiento, denominado gradiente crítico  $i_c$ , es igual al cociente del peso sumergido y el peso específico del agua, como el cociente suele ser muy próximo a la unidad, el gradiente crítico es prácticamente igual a la unidad (Lambe y Whitman 1976).

Cuando el gradiente hidráulico máximo en una superficie de salida horizontal, se aproxima al gradiente crítico, se tienen la condición de arenas movedizas y la tubificación es inminente (Marsal y Reséndiz 1975).

#### 2.4.1 Condiciones generales de la tubificación

Fell *et al.* (2005) menciona que debe existir tres condiciones para que se produzcan tubificación:

1. Debe haber una ruta de flujo de filtración y una fuente de agua.
2. Debe haber material erosionable dentro de la ruta de flujo y este material debe ser transportado por el flujo de filtración.
3. Debe haber una salida desprotegida (abierta, sin filtrar), desde la cual el material erosionado puede escapar.

La tubificación puede ocurrir en el cuerpo y en el terreno de fundación de la presa.

La tubificación en el cuerpo de la presa se muestra en la Figura 6 y 7.

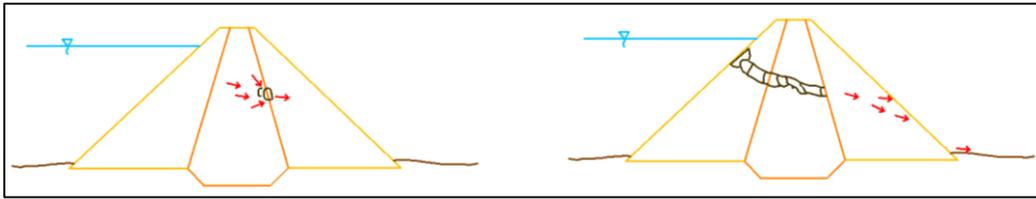


Figura 6. Erosión interna en la presa iniciada por erosión hacia atrás.

Fuente: Fell *et al.* (2005)

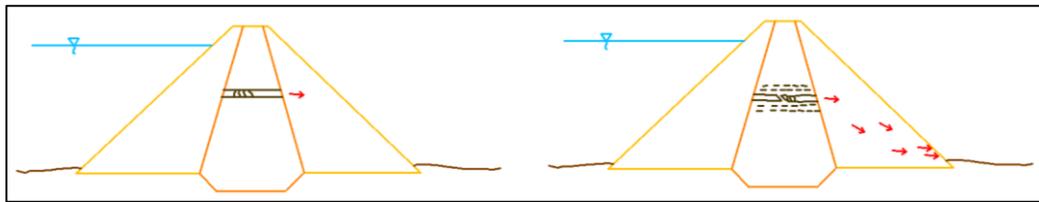


Figura 7. Erosión interna en la presa iniciada por fuga concentrada.

Fuente: Fell *et al.* (2005)

La tubificación en el terreno de fundación de la presa se muestra en la Figura 8.

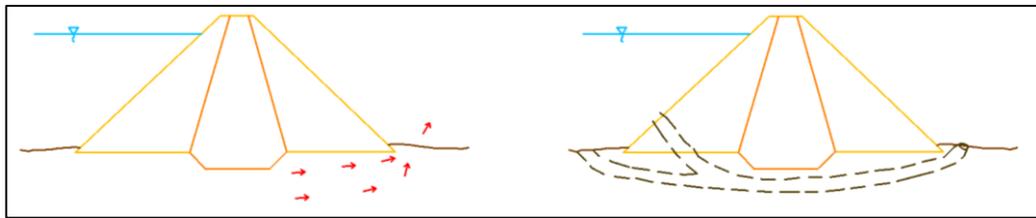


Figura 8. Erosión interna en la fundación iniciada por erosión hacia atrás.

Fuente: Fell *et al.* (2005)

La tubificación desde el cuerpo de la presa hasta el terreno de fundación se muestra en la Figura 9

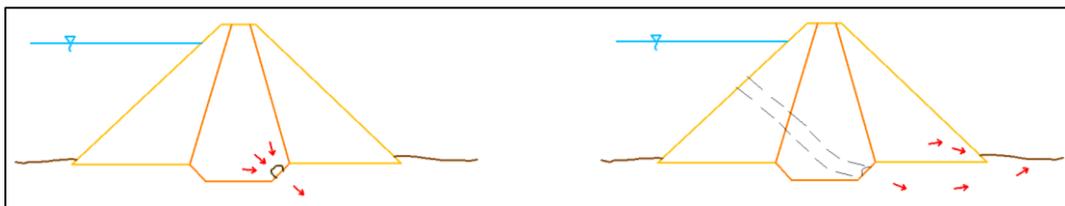


Figura 9. Erosión interna en el terreno de fundación y el cuerpo de la presa.

Fuente: Fell *et al.* (2005)

## 2.4.2 Ubicación del inicio de la erosión interna y la ruta de falla

Todas las posibles ubicaciones de inicio de la erosión interna (Figura 10 y 11) deben definirse para la presa. Muchos casos de erosión a lo largo de los conductos (tubería de descarga), la interfaz del núcleo con el vertedero, grietas debido a asentamientos diferenciales y el contacto entre la base y el núcleo.

Hay tres categorías de modos de erosión interna en un análisis típico, erosión interna en el cuerpo de la presa, erosión en el terreno de fundación, erosión interna del terraplén de la presa en los cimientos (Fell y Fry 2007).

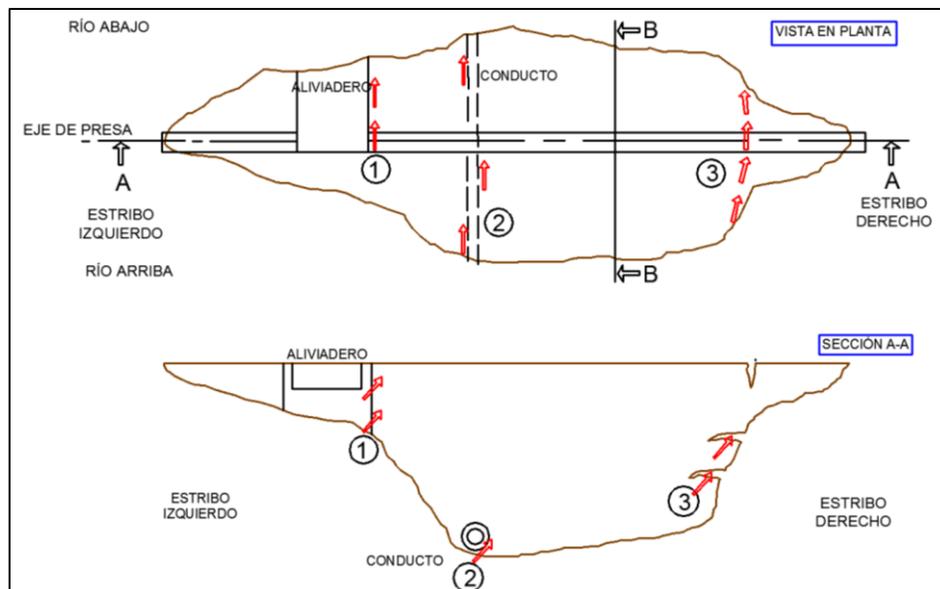


Figura 10. Ejemplo de posible localización de iniciación de erosión interna.  
Fuente: Fell y Fry (2007)

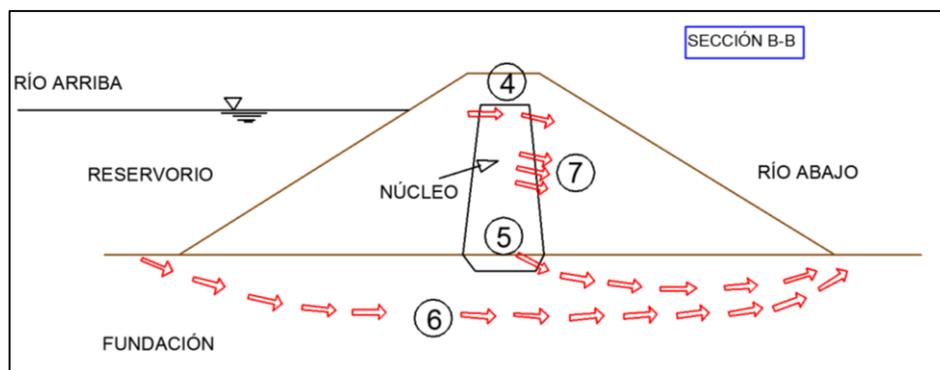


Figura 11. Posible localización de iniciación de erosión interna en la sección de la presa.  
Fuente: Fell y Fry (2007)

Leyenda:

- 1.- Interfaz de la pared del vertedero.
- 2.- Adyacente al conducto (tubería de descarga).
- 3.- Grieta asociada al perfil de pilar empinado.
- 4.- Deseccación en la parte superior del núcleo.
- 5.- Terraplén a fundación
- 6.- Fundación (si la fundación es tierra o roca erosionable).
- 7.- Acoplamiento a través de una capa mal compactada, grieta (o por erosión hacia atrás si el núcleo es cohesivo).

### 2.4.3 Mecanismo de falla por tubificación

Según Flores (2000) el fenómeno se presenta cuando las fuerzas resistentes a la erosión son menores que las fuerzas del flujo de agua, de manera que las partículas de suelo son removidas y llevadas por la corriente.

Las fuerzas resistentes dependen de la cohesión, del efecto de amarre entre las partículas y del peso de estas. En la Figura 12 se muestra el detalle de un estrato pequeño que puede causar una falla aguas abajo.

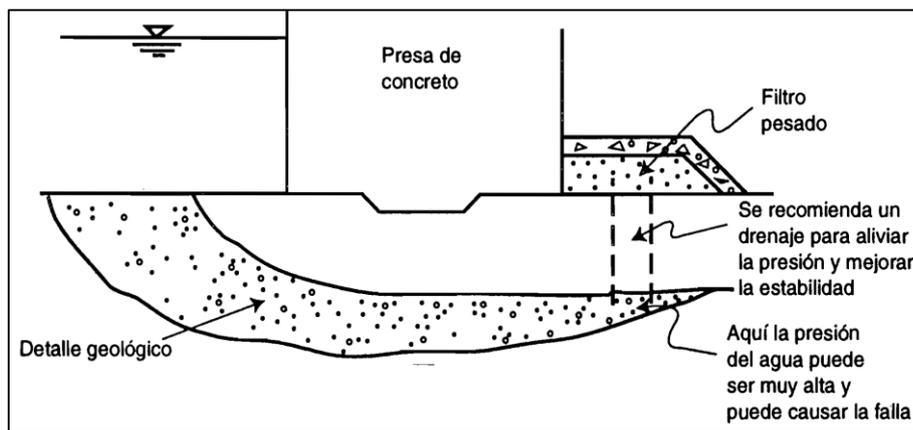


Figura 12. Detalle de un estrato pequeño que puede causar una falla aguas abajo.

Fuente: Flores (2000)

Este problema se puede iniciar en cualquier grieta causada por asentamientos diferenciales, temblores o grietas de tensión, e incluso a partir de agujeros dejados por raíces o troncos podridos. La falla puede suceder desde el primer llenado o después de varios años de construida la presa.

Marsal y Resendiz (1975) indican que el agua que fluye a través de un cuerpo poroso ejerce una fuerza por unidad de volumen en dirección del gradiente hidráulico, que es igual a producto de dicho gradiente por el peso volumétrico del agua. El suelo resiste esta acción, una parte, mediante las fuerzas de cohesión de las partículas y, otra, gracias al soporte que cada partícula le brindan las que se encuentran aguas debajo de ella.

Un proceso de erosión iniciado en el lado de aguas debajo de una presa (sobre el talud o en la cimentación) puede progresar de esta manera hacia el embalse en la forma de un ducto o tubo, como se indica en la Figura 13.

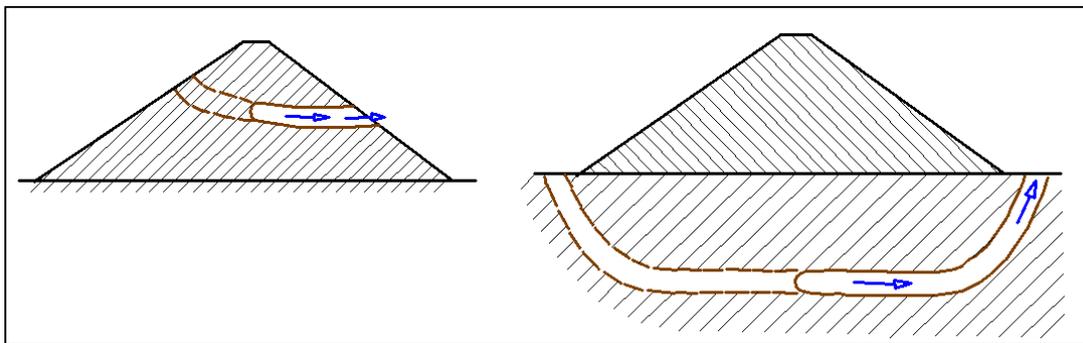


Figura 13. Proceso de erosión regresiva que conduce a la tubificación.  
Fuente: Marsal y Resendiz (1975)

En determinados suelos arcillosos, los tubos formados tienen gran estabilidad, y es posible que el proceso se estabilice durante meses o años. Pero en otras arcillas y en prácticamente todos los suelos de transición la erosión la ensancha con gran rapidez, conduciendo a la catástrofe. El índice de dispersión es importante para prever el comportamiento del suelo; pero Sherard ha puesto a punto otro ensayo más directo (Figura 14), que consiste en observar el comportamiento de una muestra de suelo, en la que existe un conducto de un milímetro de diámetro, producido por medio de un pinchazo con una aguja de esas dimensiones, y por el cual se hace circular agua (Jimenez y de Justo 1975).

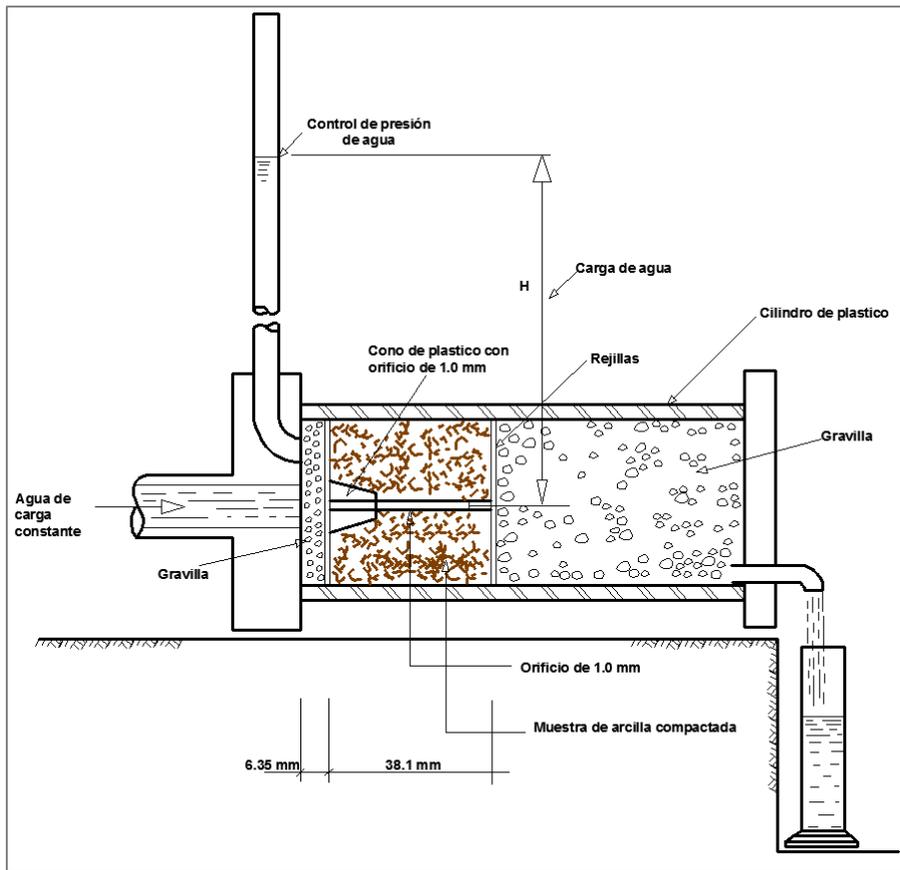


Figura 14. Ensayo de Sherard para la susceptibilidad de los suelos a la erosión interna.

Fuente: Jimenez y de Justo (1975)

#### 2.4.4 Factores que interviene el fenómeno de tubificación.

Un factor que contribuye a la tubificación es la insuficiencia en la compactación en el terraplén, cuando esta afecta a los suelos susceptibles (Rico y Del Castillo 2000).

La susceptibilidad de un suelo compactado a la tubificación depende de la cohesión, y por tanto es función del tipo de material, de la energía de compactación y del contenido de humedad en el suelo, principalmente.

La propiedad más importante de un material en cuanto a su resistencia a la tubificación es el índice de plasticidad, las arcillas de plasticidad alta ( $I_p > 15$ ) ofrecen la máxima resistencia de arrastre de partículas por las fuerzas de filtración, en tanto que los materiales con índice de plasticidad menores a seis constituyen los precedentes menos satisfactorios, mientras las arcillas con alto contenido de iones de sodio en el agua de poro son una excepción (Marsal y Resendiz 1975).

El movimiento de las partículas de suelo, en las presas de tierra, depende de la composición granulométrica, de la densidad y de los gradientes de filtración. El sifonamiento del material aumenta con la inclinación de la curva de composición granulométrica de los suelos.

Los componentes químicos de los suelos también influyen en el sifonamiento y depende de su composición, del grado de mineralización, del flujo de filtración, de los catalizadores de procesos químicos, de la impermeabilización de la tierra, de los gradientes de filtración, de la temperatura y del estado tensional de los suelos (Liapichev 1984).

El Cuadro 5 es un resume de la experiencia sobre la susceptibilidad de los suelos a la tubificación, en orden descendente de resistencia al fenómeno de tubificación.

Cuadro 5. Susceptibilidad de los suelos a la tubificación.

Gran resistencia a la tubificación	Arcilla muy plásticas ( $I_p > 15$ por ciento), bien compactadas. Arcillas muy plásticas ( $I_p > 15$ por ciento) con compactación deficiente.
Resistencia media a la tubificación	Arenas bien graduadas o mezcla de arena y grava, con contenido de arcilla de plasticidad media ( $I_p$ mayor a seis por ciento), bien compactadas. Arenas bien graduadas o mezcla de arena y grava, con contenido de arcilla de plasticidad media ( $I_p$ mayor a seis por ciento), deficientemente compactadas. Mezclas no plásticas bien graduadas y bien compactadas, de grava arena y limo ( $I_p$ menor a seis por ciento).
Baja resistencia a la tubificación	Mezcla no plástica bien graduada y deficientemente compactada, de grava arena y limo ( $I_p$ menor a seis por ciento). Arenas limpias, finas, uniformes ( $I_p$ menor a seis por ciento) bien compactadas. Arenas limpias, finas, uniformes ( $I_p$ menor a seis por ciento), deficientemente compactadas.

Fuente: Juárez y Rico (2011)

## **2.5 MÉTODOS DE PRUEBA PARA SIMULAR MECANISMOS DE EROSIÓN DEL SUELO**

Los métodos de prueba para simular mecanismos de erosión del suelo, pero que no están destinados a determinar el esfuerzo cortante crítico y la tasa de erosión, son pruebas de dispersividad como la Prueba Pinhole, la Prueba de filtro sin erosión en la que se prueban los materiales del núcleo de la presa y el filtro al mismo tiempo u otros métodos diversos de pruebas de erosión interna mediante el flujo a través de muestras de suelo intactas utilizando permeámetros (Luthi 2011).

Luthi (2011) menciona que la prueba de erosión por flujo a través del agujero se establece para simular condiciones a lo largo de una grieta o cualquier otra ruta de flujo en una estructura de tierra. Estos tipos de pruebas implican una muestra de suelo no perturbada o remoldeada en la que se realiza un agujero preformado antes de la prueba. El espécimen preparado se somete luego a un flujo de presión controlado por la altura o la velocidad de flujo, mientras que las condiciones hidráulicas se controlan para determinar el esfuerzo cortante y la velocidad de erosión. Wan y Fell desarrollaron dos dispositivos controlados por una carga hidráulica, la Prueba de erosión de ranura (SET) y la Prueba de erosión de agujero (HET).

### **2.5.1 Prueba de erosión de agujeros (HET)**

La Prueba de erosión de agujeros (HET) es una prueba de índice para modelar la erosión en represas de tierra.

En un HET, un espécimen de suelo reconstituido con orificio axial realizada, se somete a un flujo de presión de carga constante. La velocidad de erosión y el esfuerzo cortante se determinan usando la velocidad media del flujo, el gradiente hidráulico y el diámetro final del orificio. Con el mayor énfasis en la tasa de erosión en lugar del esfuerzo crítico de corte, los suelos de prueba se caracterizan por un número de grupo de suelo, que generalmente varía de 1 (erosión extremadamente rápida) a 6 (erosión extremadamente lenta) Luthi (2011). En la Figura 15 se muestra el esquema de las pruebas de erosión del agujero.

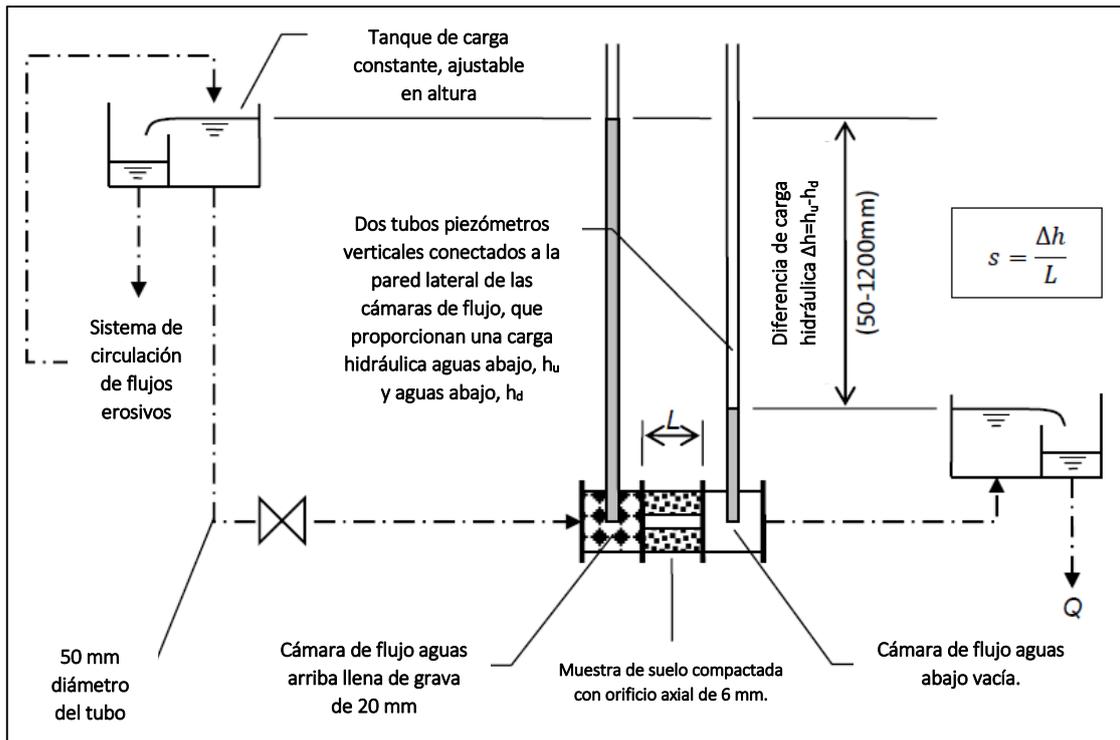


Figura 15. Diagrama esquemático de la prueba de erosión del agujero (HET).

Fuente: Luthi (2011)

## 2.5.2 Interpretación del ensayo

Santos *et al.* (2012) describen los fundamentos teóricos asociados a los ensayos en laboratorio que se basan en los principios de flujo de fluidos viscosos a través de tubos circulares de superficie rugosa.

Considerando el equilibrio de fuerzas en un volumen de control de un fluido, que llena un agujero con una sección transversal circular y que se mueve por diferencia de dimensión piezométrica (Figura 16), y dadas las relaciones de continuidad e impulso, se obtiene, en un instante dado  $t$ .

$$\Delta h_t = \Delta Z + \frac{\Delta p_t}{\rho_w g} = \frac{4\tau_t}{\rho_w g D_t} \frac{L}{D_T} \quad (1)$$

con

$$\Delta h_t = i_t \cdot L \quad (2)$$

Donde:

$\Delta h_t$  (m): caída de presión a lo largo del orificio en el tiempo  $t$  sobre una longitud  $L$ .

$\Delta Z$  (m): diferencia de dimensión entre los extremos del agujero.

$\Delta p_t$  (N/m<sup>2</sup>): diferencia de presión sobre la longitud del agujero en el tiempo  $t$ .

$\rho_w$  (Kg/m<sup>3</sup>): densidad del fluido.

$g$  (m/s<sup>2</sup>): aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>).

$\tau_t$  (N/m<sup>2</sup>): esfuerzo cortante en el fluido en la superficie de contacto con el agujero en el tiempo  $t$ .

$D_t$  (m): diámetro del agujero en el tiempo  $t$ .

$L$  (m): longitud del agujero.

$i_t$  : gradiente hidráulico sobre la longitud del agujero en el tiempo  $t$ .

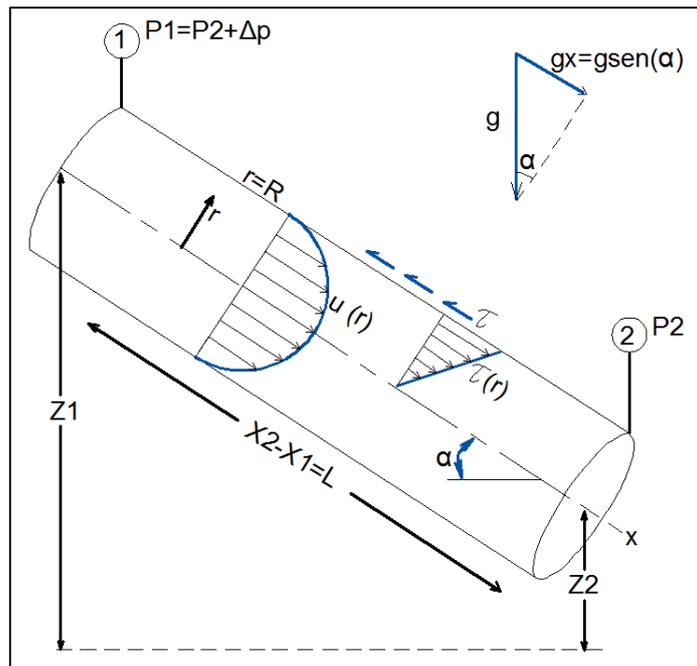


Figura 16. Control de volumen de un flujo entre dos secciones de un tubo inclinado.

Fuente: Santos *et al.* (2012)

Para las pruebas realizadas con agujeros de eje horizontal,  $\Delta Z$  es nulo. Combinando las ecuaciones (1) y (2) resultando (Santos *et al.* 2012).

$$\tau_t = \rho_w \cdot g \cdot i_t \frac{D_t}{4} \quad (3)$$

En la Figura 17 se muestra el esquema del patrón de flujo aguas arriba y aguas debajo de la muestra de prueba.

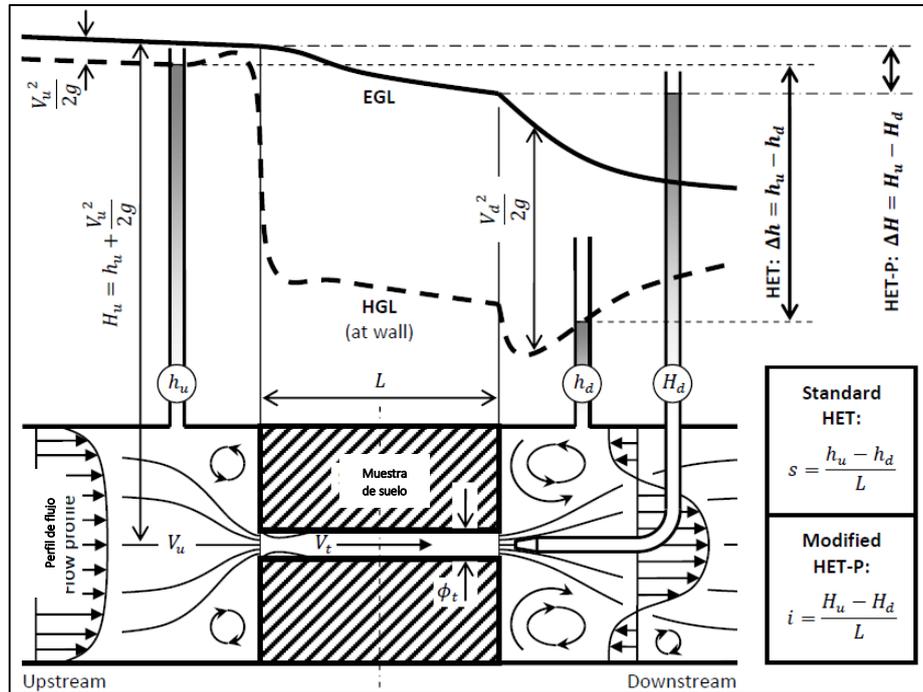


Figura 17. Patrón de flujo aguas arriba y aguas abajo de la muestra de prueba.

Fuente: Luthi (2011)

Santos *et al.* (2012) menciona que la tasa de erosión corresponde a la cantidad de masa de partículas sólidas que es efectivamente eliminado de la superficie del orificio preformado por unidad de tiempo y área en contacto con el fluido, en cada momento  $t$ , denotada por  $\dot{\varepsilon}_t$  ( $\text{kg /s/m}^2$ ). Se puede obtener mediante siguiente relación:

$$\dot{\varepsilon}_t = \frac{1}{\psi_t} \frac{dM_t}{dt} \quad (4)$$

Donde

$$\psi_t = \pi D_t \cdot L \quad (5)$$

y

$$dM_t / dt = \rho_t \cdot L \cdot dA_t / dt \quad (6)$$

$\Psi_t$  ( $\text{m}^2$ ): es el área de superficie del agujero preformado en el tiempo  $t$ .

$dM_t/dt$  (Kg/s): la tasa de masa de partículas sólidas eliminadas debido a la erosión en el tiempo  $t$ .

$\rho_d$  (Kg/m<sup>3</sup>): es la densidad seca del suelo.

Para un orificio de sección circular,

$$\frac{dA_t}{dt} = \frac{d(\pi D_t^2 / 4)}{dt} = \frac{\pi}{2} D_t \frac{dD_t}{dt} \quad (7)$$

La combinación de las ecuaciones (4), (5), (6) y (7) da la siguiente relación:

$$\dot{\varepsilon}_t = \frac{\rho_d}{2} \frac{dD_t}{d_t} \quad (8)$$

Resultados experimentales de varios investigadores con el objetivo de evaluar la erodibilidad del suelo, permite constatar la existencia, a partir de un valor límite dado, una relación entre la tasa de erosión, y el corte hidráulico aplicado,  $\tau_t$ .

En general se considera que para valores por debajo del cortante crítico no existe erosión relevante. Esta relación se puede expresar a través de:

$$\dot{\varepsilon}_t = \begin{cases} C_e (\tau_t / \tau_c - 1)^\alpha, & \tau_t > \tau_c \\ 0 & , \tau_t \leq \tau_c \end{cases} \quad (9)$$

$C_e$  (Kg/(s.m<sup>2</sup>)) : es un coeficiente de erosión del suelo.

$\tau_c$  (N/m<sup>2</sup>) : se llama el esfuerzo cortante crítico y corresponde al valor límite de  $\dot{\varepsilon} = 0$ .

$\alpha$  : Alfa es una constante empírica.

Para la interpretación de HET es habitual considerar el valor de  $\alpha = 1$ . La condición relacionada con la aparición de erosión corresponde a una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la tasa de erosión dada por:

$$\dot{\varepsilon}_t = k_{er} (\tau_t - \tau_c) \quad (10)$$

Donde

$k_{er} = C_e / \tau_c$  (s / m) es otro coeficiente de erodabilidad,  $k_{er}$  corresponde a un valor del orden de  $10^{-1}$  a  $10^{-6}$  s/m y la de tasa de erosión ( $I_{HET}$ ) está definido como:

$$I_{HET} = -\log(k_{er}) \quad (11)$$

Cuanto mayor sea el valor del esfuerzo cortante crítico,  $\tau_c$ , y menor el valor del coeficiente de erodabilidad ( $k_{er}$ ) mayor es la resistencia a la erosión del suelo.

Para muestras con un grado de compactación del 95 por ciento y un contenido óptimo de agua compactada en laboratorio, este parámetro se llama índice representativo tasa de erosión,  $\tilde{I}_{HET}$  (Santos *et al.* 2012).

Luthi (2011) presenta valores típicos de  $\tilde{I}_{HET}$  que varían de 0 a 6, donde un valor bajo indica que un suelo se erosiona rápidamente que un suelo con un valor más alto. Los suelos de prueba se clasifican en seis grupos en función de su índice de tasa de erosión representativo, que describe el valor estandarizado de  $\tilde{I}_{HET}$  a una densidad seca máxima del 95 por ciento y un contenido óptimo de agua, el cual se presenta en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Relación cualitativa del índice representativo de la tasa de erosión y la progresión de la erosión interna.

Número de grupo	Índice de tasa de erosión. $\tilde{I}_{HET}$	Progreso de la erosión interna
1	< 2	Extremadamente rápida
2	2-3	Muy rápida
3	3-4	Moderadamente rápida
4	4-5	Moderadamente lenta
5	5-6	Muy lenta
6	>6	Extremadamente lenta

Fuente: Luthi (2011)

Fell *et al.* (2008) asumieron una relación entre el índice representativo de la tasa de erosión,  $\tilde{I}_{HET}$ , y la clasificación del suelo como se muestra en el Cuadro 7. Esta relación considerada solo apta para suelos con un grado de compactación entre 95 y 98 por ciento, para suelos no dispersivos (Luthi 2011).

Cuadro 7. Relación entre  $\tilde{I}_{HET}$  y clasificación de suelos para suelos no dispersivos.

Clasificación de suelo	Índice de tasa de erosión, $\tilde{I}_{HET}$		
	Mínimo probable	Mejor estimación	Máximo probable
SM con finos < 30%	1	<2	2.5
SM con finos > 30%	<2	2 a 3	3.5
SC con finos < 30%	<2	2 a 3	3.5
SC con finos > 40%	2	3	4
ML	2	2 a 3	3
CL-ML	2	3	4
CL	3	3 a 4	4.5
CL-CH	3	4	5
MH	3	3 a 4	4.5
CH con wl < 65%	3	4	5
CH con wl > 65%	4	5	6

Fuente: Santos *et al.* (2012)

El gradiente hidráulico medido a través de la muestra de suelo y la velocidad de flujo se utilizan para determinar indirectamente la velocidad de erosión por unidad de superficie y el esfuerzo cortante de la pared a lo largo del orificio axial, en cualquier momento durante la prueba. Luego se usa la Figura 18 como referencia para determinar gráficamente el esfuerzo cortante crítico,  $\tau_c$ , el coeficiente de erosión del suelo,  $C_e$  e índice de tasa de erosión, suponiendo:

$$\dot{\varepsilon}_{HET} = C_e (\tau_{HET} - \tau_c) \quad (12)$$

$$I_{HET} = -\log_{10}(C_e) \quad (13)$$

La ecuación (12) expresa la erosibilidad del suelo en términos de tasa de erosión cuando el esfuerzo cortante aplicado excede el valor crítico. La tasa de eliminación de masa por unidad de superficie para representar la tasa de erosión se considera más apropiada porque se tiene en cuenta la porosidad y la densidad del material del suelo.

El coeficiente de erosión del suelo se define como la pendiente de la línea de mejor ajuste donde ambos aumentan. El esfuerzo cortante crítico describe la facilidad de la erosión y tiene el significado físico del valor del esfuerzo cortante en el que comienza la erosión. Se define como la intersección en el eje x de la línea de mejor ajuste lineal extrapolada como se ilustra en la Figura 18 (Luthi 2011).

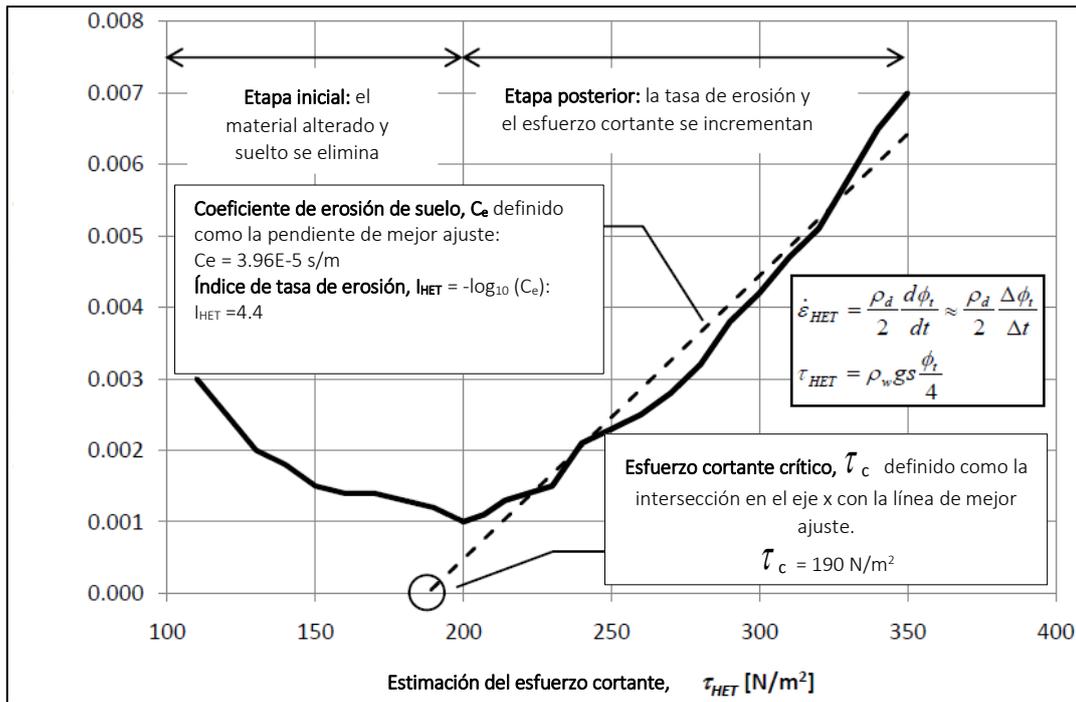


Figura 18. Esquema de resultados típicos prueba de erosión del agujero.

Fuente: Luthi (2011)

## 2.6 SUELOS DISPERSIVOS O EROSIONABLES

En los suelos dispersivos las fuerzas repulsivas entre las partículas finas (arcillas) exceden a las fuerzas de atracción de esas partículas, ello se debe a su conformación mineralógica de las partículas, debido a ello en presencia de agua, los suelos flocculan, es decir, se separan los agregados y quedan partículas de menor tamaño que son más fácilmente arrastradas por el flujo del agua con cierta velocidad, produciéndose la erosión interna en estos suelos. Los agregados de partículas o flóculos están constituidos por partículas arcillosas, y suelen tener una proporción elevada de sales disueltas, cuyo valor está por encima del 12 por ciento en el agua que esta ocluida en los poros de los suelos (González *et al.* 2002). En la Figura 19 se muestra las zonas que permites clasificar un suelo con el potencial de dispersividad en función del contenido químico.

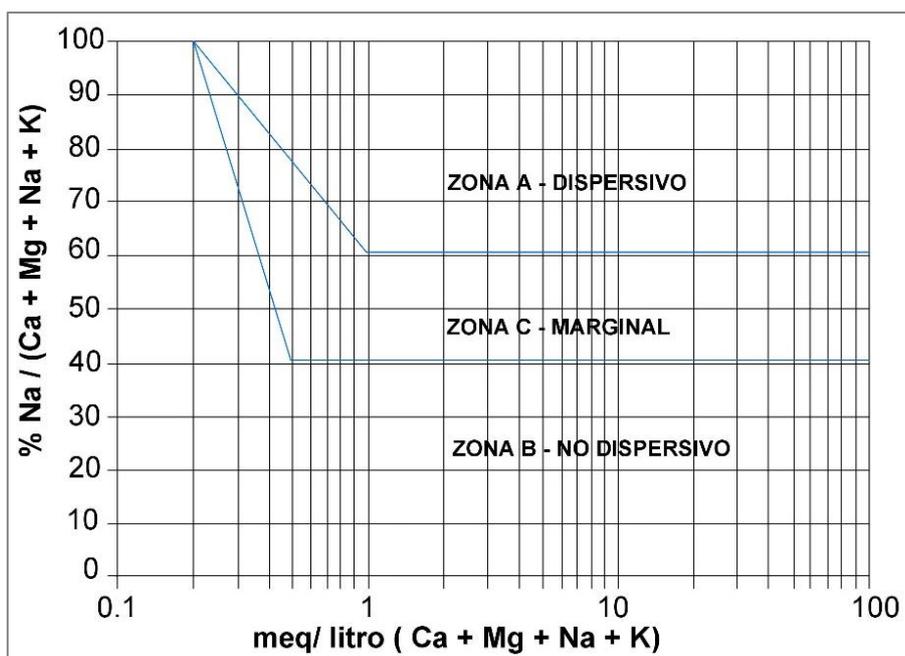


Figura 19. Potencial de dispersividad en función del contenido químico, según los criterios de Sherard y otros 1976.

Fuente: González *et al.* (2002)

## 2.7 TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE SUELOS DISPERSIVOS

Los suelos dispersivos pueden ser identificados mediante los ensayos de Crumb, el ensayo de doble hidrómetro, el ensayo de Pinhole y los ensayos químicos.

### 2.7.1 Ensayo de Pinhole

El ensayo de Pinhole se realiza para evaluar si una muestra de suelo experimenta dispersión, para ello, se hace circular agua a través de un orificio pequeño practicado a la muestra de suelo. Este flujo de agua simula la infiltración del agua en el suelo al cual puede estar sometido en la naturaleza a través de poros, orificios, grietas, canales, que pueden existir en terraplenes o en el corazón de presas.

El orificio por el cual se hace circular el agua es de 1.0 mm de diámetro, practicado a un espécimen cilíndrico de suelo de 25.0 mm de longitud por 35.0 mm de diámetro. El líquido que se hace circular a través de este orificio es agua destilada con una carga hidráulica de 50, 180 y 380 mm, en donde se registra la velocidad alcanzada durante la infiltración que puede ser de 30 a 60 cm/seg, así como la turbidez que experimente el agua (Gallegos *et al.* 2002). En la Figura 20 se muestra el grado de dispersión que puede presentar un suelo.

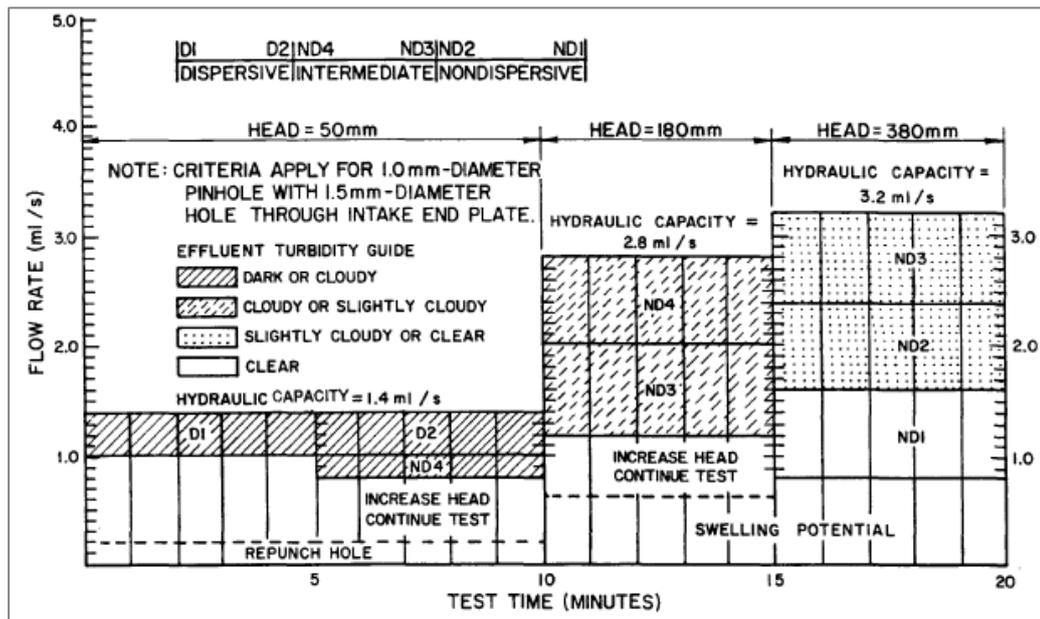


Figura 20. Grado de dispersión del suelo.

Fuente: American Society of Testing Materials D4647 (2006)

### 2.7.2 Ensayos químicos

Gallegos *et al.* (2012) mencionan que el porcentaje de sodio intercambiable (ESP) es un factor que contribuye al comportamiento dispersivo de las arcillas.

$$ESP = \frac{\text{Exchangeable sodium}}{\text{CEC Catione Exchange Capacity}} \times 100 = \frac{Na^+}{Na^+ + Mg^{2+} + K^+ + Ca^{2+}} \times 100$$

Los suelos con un  $ESP \geq 10$  que presentan lixiviados o contienen sales, se clasifican como dispersivos. Los criterios para clasificar los suelos dispersivos en base al ESP son los que se muestran en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Criterios para clasificar los suelos dispersivos de acuerdo con el ESP.

ESP	Grado de dispersión
< 7	No dispersivo
De 7 a 10	Intermedio
>10	Dispersivo

Fuente: Gallegos *et al.* (2012)

Otro parámetro comúnmente utilizado para evaluar la dispersión provocada por el sodio presente en las sales disueltas en el agua de poro es la relación de adsorción de sodio (SAR).

$$SAR = \frac{Na}{[0.5(Ca + Mg)]^{0.5}}$$

### 2.7.3 Ensayo de Crumb

La prueba estándar para determinar características dispersivas de suelos arcillosos se realiza mediante el ensayo de Crumb, que consiste en colocar una muestra de suelo en agua destilada, observando la dispersión del suelo, para luego clasificarlo en distintos grados (American Society of Testing Materials D6572 2006).

El ensayo consiste en preparar una muestra de suelo de forma cúbica de 15 mm por lado, con su contenido de agua natural, o también puede ser utilizado un grumo de suelo de igual volumen, con su contenido de agua natural. Este espécimen se coloca cuidadosamente en un recipiente que contenga 250 ml de agua destilada. Como el espécimen comienza a hidratarse, las partículas coloidales comienzan a desflocularse y a quedar en suspensión.

Los resultados son interpretados en intervalos de tiempo y se pueden registrar cuatro grados de reacción: 1.- Ninguna reacción; 2.- Ligera reacción; 3.- Reacción moderada y 4.- Reacción fuerte (aquí los coloides cubre totalmente el fondo del recipiente). De esta forma es posible evaluar el potencial de dispersión del suelo (Gallegos *et al.* 2002).

### 2.7.4 Ensayo de doble hidrómetro

El ensayo de doble hidrómetro permite evaluar la dispersión de suelos arcillosos. Se determina realizando un hidrómetro utilizando el procedimiento estándar y de forma paralela se desarrolla el ensayo del hidrómetro a otra muestra del mismo tipo de suelo, pero sin agitación mecánica y sin dispersante químico. Con este ensayo se obtiene el porcentaje de dispersión de la muestra de suelos (American Society of Testing Materials D4221 2005).

Gallegos *et al.* (2012) mencionan que el porcentaje de dispersión es la relación entre el porcentaje de partículas menores a 0.005 mm obtenido mediante el ensayo del doble hidrómetro, sin desfloculante, dividido con el porcentaje de partículas menores a 0.005 mm obtenido mediante el ensayo estándar de doble hidrómetro, expresado en porcentaje. El criterio para evaluar el grado de dispersión es el que se presenta en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Criterios para evaluar el grado de dispersión.

% de Dispersión	Grado de Dispersión
<30	No dispersivo
30 a 50	Intermedio
>50	Dispersivo

Fuente: Gallegos *et al.* (2012)

Es conveniente recalcar que la composición mineralógica es de gran importancia en la identificación de las arcillas dispersivas a través de los ensayos citados. Es necesario la interpretación adecuada de los resultados. Aún más, si se adopta, como solución para el problema en uso de filtro, el ensayo hidrométrico doble para su dimensionamiento sería conveniente ejecutar ensayos de filtro en laboratorio que represente las condiciones más desfavorables *in situ*; o sea probetas de arcilla compactada, acanaladas de 3 mm, en contacto con filtros de diferentes granulometrías, sujetas a una carga de agua destilada, con la finalidad de observar y determinar si se produce realmente erosión interna o si efectivamente el filtro retiene las partículas coloidales (Obilinovic 1981).

## 2.8 FLUJO DE AGUA A TRAVÉS DEL SUELO

Flores (2000) señala que existe dos tipos de flujo de agua (Figura 21): el laminar, donde las partículas de agua se mueven con trayectorias paralelas entre sí, y el turbulento, donde la trayectoria de las partículas se mueven en forma irregular y se cruzan.

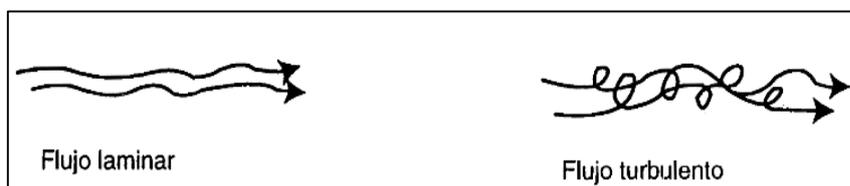


Figura 21. Trayectoria de las partículas de agua en régimen laminar y turbulento.

Fuente: Flores (2000)

El valor de la velocidad crítica de un fluido cualquiera puede determinarse por el número de Reynolds,  $Re$ , expresado en términos de las fuerzas de inercia y de viscosidad.

Experimentalmente se ha observado que esta distribución, cuando tienen un régimen laminar es del tipo parabólico, mientras que en el caso de régimen turbulento dicha distribución es del tipo trapezoidal como se muestra en la Figura 22.

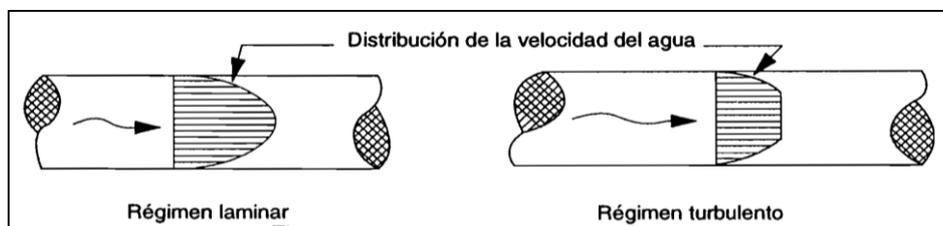


Figura 22. Distribución de la velocidad de un fluido que circula dentro de un tubo.

Fuente: Flores (2000)

Juárez y Rico (2012) indican que al resolver problemas de infiltración en el cuerpo y terreno de fundación de una presa de tierra se debe tener en cuenta el gasto de infiltración en la zona de flujo, influencia del flujo sobre la estabilidad y la posibilidad de producirse arrastre, erosión o tubificación. Cuando el agua fluye la presión es hidrodinámica que puede alterar la densidad del suelo sumergido.

Si el flujo es vertical hacia abajo se incrementa la densidad sumergida, si es hacia arriba se ejerce un efecto boyante y disminuye la densidad sumergida. El incremento de la presión de poros disminuye los esfuerzos efectivos y por lo tanto la resistencia al esfuerzo cortante.

La ley de Darcy tiene su valides en suelo saturado, flujo establecido (flujo laminar) no depende del tiempo.

Para que el flujo cambie de laminar a turbulento el número de Reynolds varía entre 1 y 12. Si la velocidad es igual a 0.25 cm/s entonces el número de Reynolds es menor a 1 siempre y cuando el diámetro de promedio de las partículas de suelo sean menor o igual a 0.4 mm (arena gruesa).

### 2.8.1 Ecuación hidrodinámica del flujo del agua en el suelo

Se considera una región de flujo (un elemento de suelo a través del que fluye agua), de la que forma parte un elemento paralelepípedo de dimensiones diferenciales ( $dx$ ,  $dy$  y  $dz$ ), como se muestra en la Figura 23.

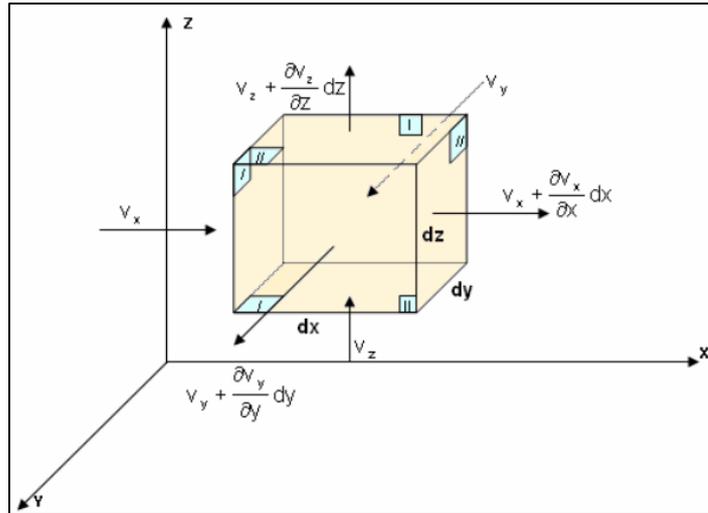


Figura 23. Elemento de una región sujeta a flujo tridimensional.

Fuente: Juárez y Rico (2012)

$$v_x \cdot \partial y \cdot \partial z + v_y \cdot \partial x \cdot \partial z + v_z \cdot \partial x \cdot \partial y = \left( v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot dx \right) dy dz + \left( v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot dy \right) dx dz + \left( v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \cdot dz \right) dy dx$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (16)$$

La ecuación anterior se conoce como la ecuación de continuidad. Las hipótesis que implican la aceptación de la ecuación de continuidad son: régimen establecido, el agua y las partículas del suelo son incompresibles y el flujo no altera la estructura del suelo.

Por lo tanto la ecuación de Darcy es válida y podrá escribirse para la velocidad de descarga del agua a través del elemento (Juárez y Rico 2012).

$$v = -k \cdot \frac{\partial h}{\partial L} \quad (17)$$

### 2.8.2 Descripción del movimiento de un fluido

Urzúa (2017) señala que para describir el movimiento de un fluido es necesario conocer las variaciones de ciertas magnitudes físicas como: la densidad, la velocidad, la presión, la temperatura y el esfuerzo en función del tiempo y en todo punto del dominio del espacio.

Para describir el movimiento de un fluido existen dos métodos. En el primer método se analiza cualquier partícula arbitraria con sus cambios de velocidad, aceleración u otra magnitud física, que se llama descripción Lagrangiana. El segundo método estudia los

cambios de velocidad en posiciones fijas del espacio y en el tiempo, esta es la descripción Euleriana.

Para Lachouette *et al.* (2007) el suelo erosionado por un flujo de agua, puede ser analizado simplificando las ecuaciones de conservación de masa y la ecuación de momento en un volumen de control considerando un marco euleriano.

### 2.8.3 Velocidades y gradientes hidráulicos en una red de flujo

La presión hidrodinámica se calcula mediante:

$$P_h = \Delta h \cdot \gamma_w \quad (18)$$

Y el empuje hidrodinámico mediante la siguiente expresión.

$$J = \Delta h \cdot \gamma_w \cdot \Delta A \quad (19)$$

Y expresado por unidad de volumen es independiente de la velocidad y del coeficiente de permeabilidad.

$$j = k \cdot \frac{J}{\Delta A \cdot l} = \gamma_w \cdot i \quad (20)$$

Por lo tanto las fuerzas de filtración (Figura 24), son debido a la resistencia viscosa que las partículas del suelo generan en el fluido. Un fenómeno ligada con el flujo del agua a través del suelo es la ebullición de las arenas que es una manifestación del fenómeno de licuación.

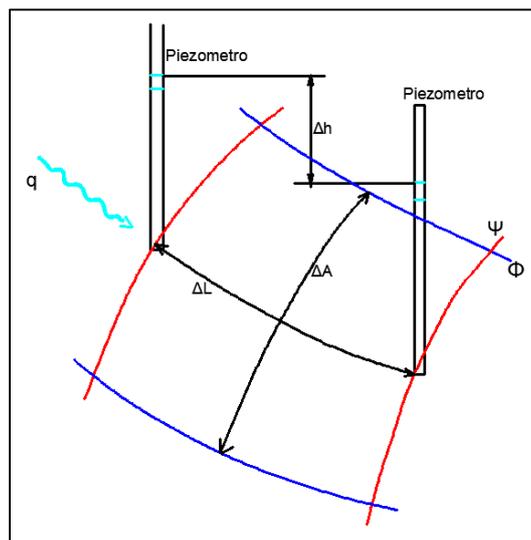


Figura 24. Fuerzas de filtración.  
Fuente: Juárez y Rico (2012)

La red de flujo en un tablestacado (Figura 25), en esa red se muestra el equilibrio en la zona de salida aguas abajo (Juárez y Rico 2012).

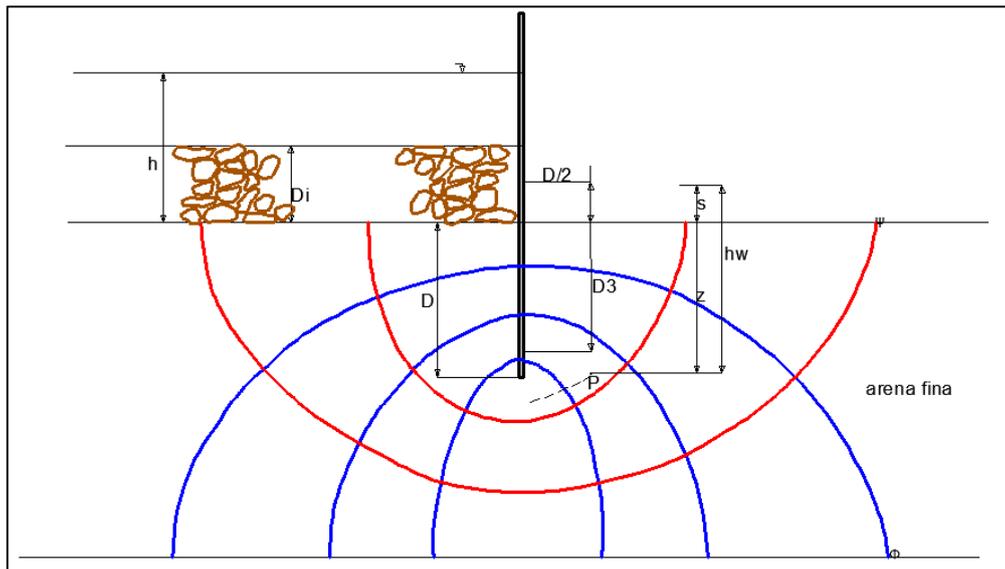


Figura 25. Gradiente crítico de ebullición.

Fuente: Juárez y Rico (2012)

Juárez y Rico (2012) mencionan que la tubificación se inicia cuando la presión hidrodinámica del agua ascendente vence el peso sumergido del prisma.

$$\frac{D}{2} \cdot D_3 \cdot \gamma_b \quad (21)$$

La carga de agua  $h$  debe ser menor que el valor límite  $h_p$  (carga crítica) y el nivel de la base del prisma  $D_3$  está determinado cuando  $h_p$  es mínimo.

Para conocer la presión hidrodinámica a ese nivel debe conocerse la presión del agua a esa profundidad.

Si se considera el punto  $P$  la presión del agua vale  $h_w$  la cual está compuesta por:

$$\mu_3 = Z \cdot D_3 \cdot \gamma_w + S \cdot \gamma_w \quad (22)$$

Donde:

$S\gamma_w$ : Presión hidrodinámica. La condición de arrastre es que no supone su peso sumergido

$$\frac{D}{2} \cdot D_3 \cdot \gamma_b.$$

$$s \cdot \gamma_w = \Delta H \cdot n_d \cdot \gamma_w \quad (23)$$

$n_d$ : Número de caídas potenciales, contados desde la salida.

Dibujando la distribución de presiones en la base  $\frac{D}{2}$  se tiene la presión hidrostática promedio en dicha base  $h_a \cdot \gamma_w$  y el empuje hidrodinámica ascendente será:

$$U = \frac{D}{2} \cdot h_a \cdot \gamma_w \quad (24)$$

Y el valor de S será expresado por

$$S = h \cdot \frac{n_d}{n_e} = h \cdot cte \quad (25)$$

$n_e$  : número total de caídas de potencial

El prisma será levantado cuando la presión hidrodinámica cuando se excede el valor de la igualdad.

$$\frac{D}{2} \cdot h_a \cdot \gamma_b = \frac{D}{2} \cdot D_3 \cdot \gamma_b \quad (26)$$

$$h_a \cdot \gamma_b = \frac{D_3 \cdot \gamma_b}{\gamma_w} \quad (27)$$

$h = h_p$  (h critico)

Donde:  $h_a = m \cdot h_p$  (carga hidrodinámica en la base del prisma)

$$m \cdot h_p = \frac{D_3 \cdot \gamma_b}{\gamma_w} \quad (28)$$

$$h_p = \frac{D_3 \cdot \gamma_b}{m \cdot \gamma_w} \quad (29)$$

El gradiente hidráulico critico cuando la tubificación comienza

$$i_c = \frac{h_a}{D_3} = \frac{\gamma_b}{\gamma_w} \quad (30)$$

## 2.9 PRINCIPALES TIPOS DE SUELO

Crespo (2008) señala que los suelos se dividen en dos amplios grupos: orgánicos e inorgánicos cuyo origen se debe a la descomposición física y/o química de las rocas.

En general los suelos son llamados gravas, arena, limos y arcillas, dependiendo del tamaño predominante de las partículas. La descripción de los tamaños límites de las partículas de los suelos ha sido desarrollada por varias organizaciones. En el Cuadro 10 se muestran los límites de los tamaños de suelos por separado (Das 2001).

Cuadro 10. Límites de tamaño de suelos.

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	< 0.002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	> 2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	< 0.002
Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	< 0.002
Sistema unificado de clasificación de suelos (U.S. Army Corps of Engineers; U.S. Bureau of Reclamation; American Society for Testing and Materials)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (es decir, limos y arcillas) < 0.075	

Fuente: Das (2001)

Para determinar la distribución granulométrica (Figura 26) que presenta un suelo se realizan ensayos en laboratorio que se denominan: análisis granulométrico por tamizado y por sedimentación utilizando el hidrómetro (González *et al.* 2002).

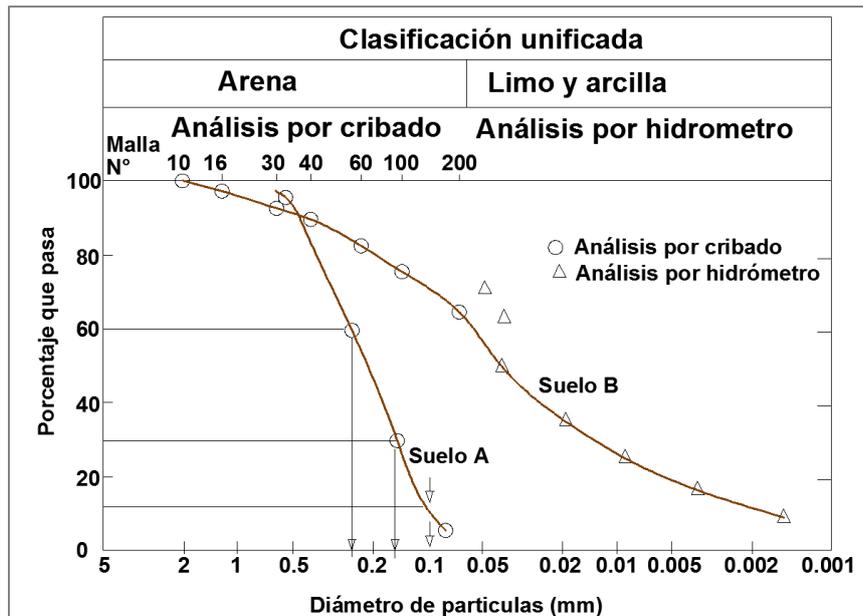


Figura 26. Curva de distribución del tamaño de partículas (curvas granulométricas).

Fuente: Das (2011)

Das (2001) señala que las gravas son fragmentos de roca ocasionalmente de cuarzo y feldespatos, las arenas están formadas principalmente de cuarzo y feldespatos aunque también están presentes otros minerales, los limos son fracciones microscópicas de suelos finos conformados por cuarzo y fragmentos de minerales micáceos, las arcillas son principalmente partículas microscópicas en forma de escamas conformado por minerales arcillosos. Las arcillas se definen como partículas menores a dos micras.

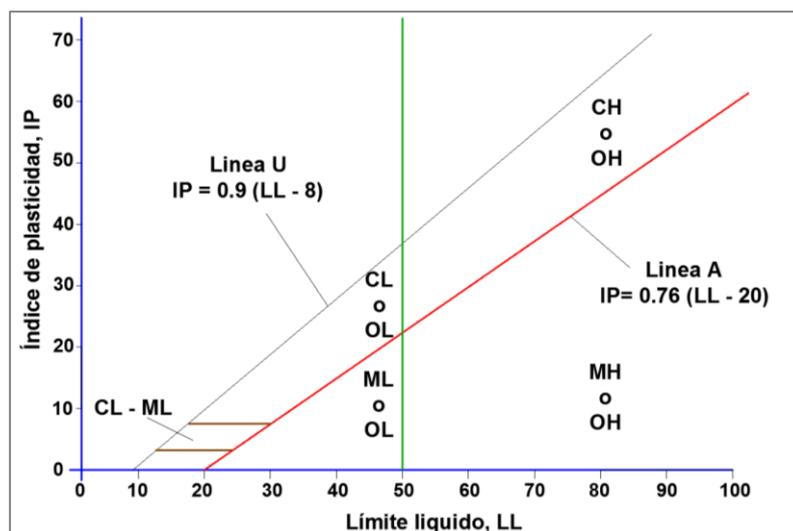


Figura 27. Carta de plasticidad.

Fuente: Das (2011)

## 2.10 PROPIEDADES ÍNDICES DEL SUELO

### 2.10.1 Gravedad específica

La gravedad específica de un suelo se define como el peso unitario del material dividido por el peso unitario del agua destilada a una temperatura de cuatro grados centígrados (Bowles 1982). Es fundamental para la definición de algunas propiedades de los suelos (Berry y Reid 1993), como la relación de vacíos, para el análisis granulométrico por hidrómetro y para predecir el peso unitario de un suelo (Bowles 1982).

El valor de la gravedad específica depende de la composición mineralógica de las partículas que constituye el suelo (Berry y Reid 1993); algunos valores típicos se muestran en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Valores típicos de la gravedad específica de las partículas.

Tipo de suelo	G <sub>s</sub>
Grava, arena y limo	2.65
Arcilla inorgánica	2.70
Arcilla orgánica	2.60
Turba amorfa	2.00
Turba fibrosa	1.50

Fuente: Berry y Reid (1993)

Los valores típicos de gravedad específica que pueden ser utilizados como guía para calibrar los resultados en ensayos de laboratorio se muestra en el Cuadro 12 (Bowles 1981).

Cuadro 12. Valores típicos de gravedad específica.

Tipo de suelo	G <sub>s</sub>
Arena	2.65 - 2.67
Arena limosa	2.67 - 2.70
Arcilla Inorgánica	2.70 - 2.80
Suelos con micas o hierro	2.75 - 3.00
Suelos orgánicos	Variable, puede ser inferior a 2.00

Fuente: Bowles (1981)

### 2.10.2 Superficie específica.

La superficie específica (Figura 28) relaciona el área superficial de un material con el peso o su volumen, siendo generalmente referido al volumen (Bowles 1982).

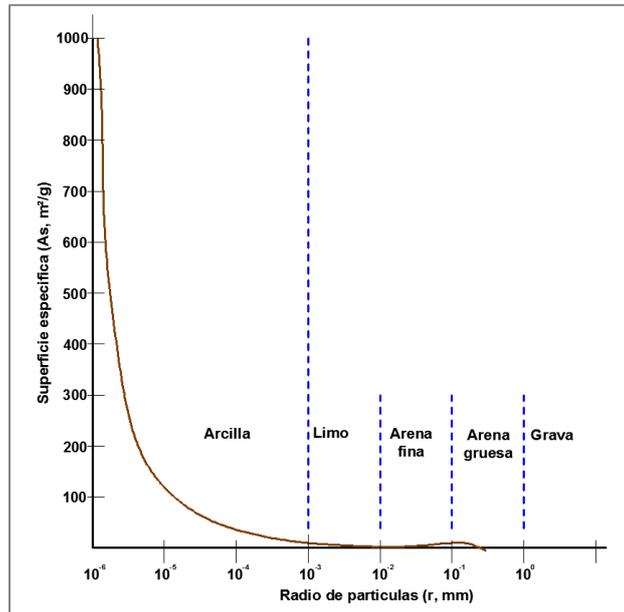


Figura 28. Superficie específica versus radio equivalente de partículas esféricas.

Fuente: Tsuyoshi Miyasaki (2006)

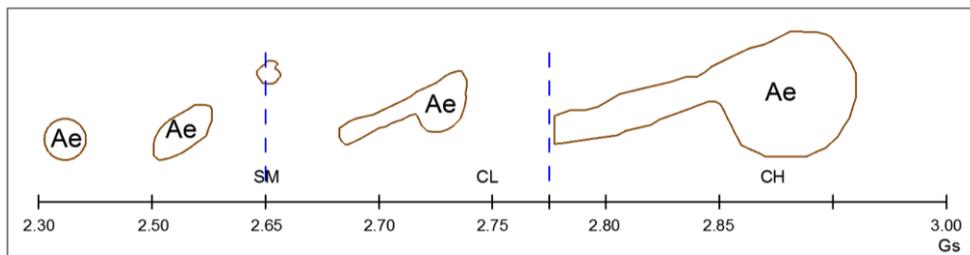


Figura 29. Área específica versus gravedad específica de sólidos.

### 2.10.3 Consistencia del suelo

Das (2001) menciona que la presencia de minerales de arcilla en un suelo de grano fino, puede ser remodelado en presencia de humedad sin desmoronarse y se clasifica arbitrariamente en cuatro estados básicos, denominados sólido, semisólido, plástico y líquido, como muestra la Figura 30.

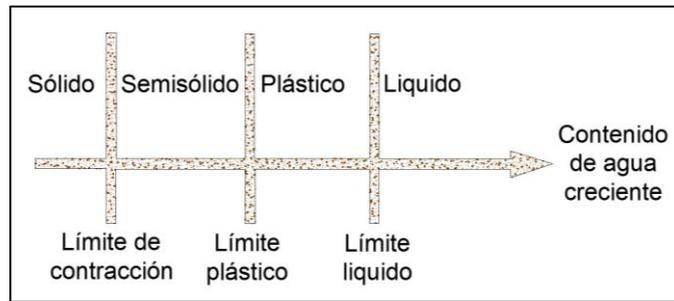


Figura 30. Límites de Atterberg.  
Fuente: Das (2011)

La plasticidad se determina con el índice de plasticidad. La muestra se prepara eliminando las partículas más gruesas que el tamiz N° 4 (Sowers y Sowers 1986). En el Cuadro 13 se muestra los valores del índice de plasticidad.

Cuadro 13. Valores de índice de plasticidad.

Término usado	IP	Resistencia en estado seco	Ensayos en campo
No plástico	0 - 3	Muy baja	Cae en pedazos fácilmente
Ligeramente plástico	4 - 15	Ligera	Se tritura fácilmente con los dedos
Medianamente plástico	15 - 30	Mediana	Difícil de triturar
Muy plástico	31 o mayor	Alta	Imposible de triturar con los dedos

Fuente: Sowers y Sowers (1986)

#### 2.10.4 Análisis hidrométrico

Das (2011) menciona que el análisis hidrométrico se basa en el principio de la sedimentación de granos de suelo en agua. Cuando un espécimen de suelo se dispersa en agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. Por simplicidad, se supone que todas las partículas de suelo son esferas y que la velocidad de las partículas se expresa por la ley de Stokes, según la cual.

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18.n} D^2 \quad (31)$$

Donde:

v = velocidad

$\rho_s$  = densidad de las partículas de suelo

$\rho_w$  = densidad del agua

n = viscosidad del agua

D = diámetro de las partículas del suelo

## 2.10.5 Clasificación del suelo

Das (2011) menciona que los suelos con propiedades similares se clasifican en grupos y subgrupos. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar en forma concisa las características generales de los suelos. Actualmente, se usan el Sistema de Clasificación AASHTO (Cuadro 14) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Cuadro 14. Sistema de clasificación de suelos AASHTO.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz Nº 200)						Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz Nº 200)				
	A-1		A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Grupo:	A-1-a	A-1-b									
Porcentaje que pasa: Nº 10 (2mm) Nº 40 (0,425mm) Nº 200 (0,075mm)	50 máx 30 máx 15 máx	- 50 máx 25 máx	- 51 mín 10 máx	- - 35 máx			- - 36 mín				
Características de la fracción que pasa por el tamiz Nº 40 Límite líquido Índice de plasticidad	- 6 máx		- NP	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín
Materiales componentes	Fracmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa			Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Tasa general de los subrasantes	Excelente a bueno						Pobre a malo				

Fuente: Adaptado de Das (2011)

Los suelos de grano grueso que son de naturaleza tipo grava y arenosa con menos del 50 por ciento pasando por la malla Nº. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo G o S. G significa grava o suelo gravoso y S significa arena o suelo arenoso.

Los suelos de grano fino con 50 por ciento o más pasando por la malla Nº. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo M, que significa limo inorgánico, C para arcilla inorgánica u O para limos y arcillas orgánicos. El símbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos (Das 2011).

En el Cuadro 15 se muestra el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) de las divisiones principales.

Cuadro 15. Sistema unificado de clasificación de suelos.

DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS
<b>SUELOS DE GRANO GRUESO</b>	<b>GRAVAS</b>  Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	<b>Gravas limpias</b>	<b>GW</b> Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.
		(sin o con pocos finos)	<b>GP</b> Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.
		<b>Gravas con finos</b>	<b>GM</b> Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.
		(apreciable cantidad de finos)	<b>GC</b> Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.
	<b>ARENAS</b>  Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	<b>Arenas limpias</b>	<b>SW</b> Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.
			(pocos o sin finos)
		<b>Arenas con finos</b>	<b>SM</b> Arenas limosas, mezclas de arena y limo.
			(apreciable cantidad de finos)
<b>SUELOS DE GRANO FINO</b>  Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200	<b>Limos y arcillas:</b>		<b>ML</b> Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.
			<b>CL</b> Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.
	Límite líquido menor de 50		<b>OL</b> Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.
	<b>Limos y arcillas:</b>		<b>MH</b> Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.
			<b>CH</b> Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.
	Límite líquido mayor de 50		<b>OH</b> Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.
<b>Suelos muy orgánicos</b>		<b>PT</b>	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.

Fuente: Berry y Reid (1993)

## 2.11 COMPACTACIÓN DE SUELOS

En la construcción de terraplenes para carreteras, presas de tierra y otras estructuras de la ingeniería, los suelos sueltos deben ser compactados para incrementar las características de resistencia, aumentando así la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos. La compactación también disminuye los asentamientos de las estructuras e incrementa la estabilidad de los taludes de terraplenes (Das 2011).

### 2.11.1 Principios generales de compactación

Das (2011) menciona que la compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco. Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, ésta actúa como un agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre sí y se muevan a una posición de empaque más denso. En la Figura 31 se muestra el principio de compactación de suelos.

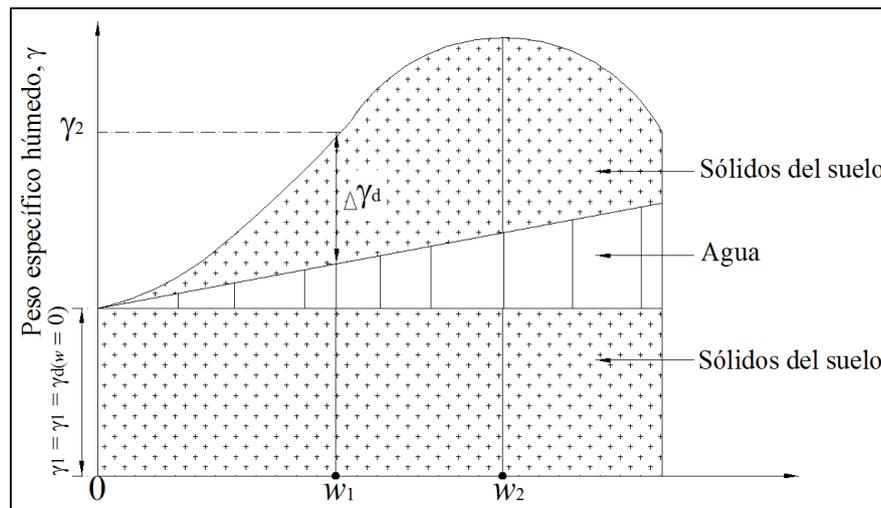


Figura 31. Principios de compactación.

Fuente: Das (2011)

### 2.11.2 Proctor estándar

En la prueba, el suelo es compactado en un molde que tiene un volumen de  $943.3 \text{ cm}^3$ . El diámetro del molde es de 101.6 mm. El suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego se compacta en tres capas iguales por medio de un pisón que transmite 25 golpes a cada capa (Das 2011). En el Cuadro 16 se muestra la características técnicas del ensayo proctor estándar según la norma ASTM – D698.

Cuadro 16. Características del ensayo proctor estandar D698.

<b>Proctor Estandar ASTM D 698</b>		
Ec = Energía de compactación	= 12 300 Lb-ft/ft <sup>3</sup>	
W = Peso del martillo	= 5.5 lb	
h = Altura de caída del martillo	= 12 pulgadas	
N = Numero de golpes por capas	= depende del molde	
n = Numero de capas	= 3	
V = Volumen del molde cm <sup>3</sup>	= depende del método de prueba	
Suelo y molde a utilizar		
<b>Método A</b>	<b>Método B</b>	<b>Método C</b>
Pasa la malla N° 4	Pasa la malla N° 3/8"	Pasa la malla N° 3/4"
Molde 4 pulgadas de diámetro	Molde 4 pulgadas de diámetro	Molde 6 pulgadas de diámetro
V = 1/30 ft <sup>3</sup>	V = 1/30 ft <sup>3</sup>	V = 1/13.3 ft <sup>3</sup>
N = 25 golpes/ capa	N = 25 golpes/ capa	N = 56 golpes/ capa

Fuente: American Society of Testing Materials D698 (2005)

### 2.11.3 Proctor modificado

La prueba proctor estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo, a ésta se le llama prueba proctor modificada. Para llevar a cabo la prueba proctor modificada se usa el mismo molde, con un volumen de 943.3 cm<sup>3</sup>, como en el caso de la prueba proctor estándar. Sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un pisón que pesa 10 lb. La caída del martillo es de 457.2 mm (Das 2011). En el Cuadro 17 se muestra la características técnicas del ensayo proctor modificado según la norma ASTM – D1557.

Cuadro 17. Características del ensayo proctor modificado D1557.

<b>Proctor Modificado ASTM D 1557</b>		
Ec = Energía de compactación	= 56 250 Lb-ft/ft <sup>3</sup>	
W = Peso del martillo	= 10 lb	
h = Altura de caída del martillo	= 18 pulgadas	
N = Numero de golpes por capas	= depende del molde	
n = Numero de capas	= 5	
V = Volumen del molde cm <sup>3</sup>	= depende del método de prueba	
Suelo y molde a utilizar		
<b>Método A</b>	<b>Método B</b>	<b>Método C</b>
Pasa la malla N° 4	Pasa la malla N° 3/8"	Pasa la malla N° 3/4"
Molde 4 pulgadas de diámetro	Molde 4 pulgadas de diámetro	Molde 6 pulgadas de diámetro
V = 1/30 ft <sup>3</sup>	V = 1/30 ft <sup>3</sup>	V = 1/13.3 ft <sup>3</sup>
N = 25 golpes/ capa	N = 25 golpes/ capa	N = 56 golpes/ capa

Fuente: American Society of Testing Materials D1557 (2005)

### 2.11.4 Factores que afectan la compactación

El contenido de agua tiene una gran influencia en el grado de compactación logrado para un suelo dado. Además de esto, otros factores importantes que afectan la compactación son el tipo de suelo y el esfuerzo de compactación (Das 2011).

### 2.11.5 Tipos de curvas de compactación.

La distribución granulométrica, la forma de los granos del suelo, la densidad de sólidos del suelo y la cantidad y el tipo de minerales arcillosos presentes, tiene una gran influencia en el peso específico seco máximo y en el contenido de agua óptimo.

En la Figura 32 se muestra diferentes tipos de curvas de compactación: tipo A son aquellas que tienen un solo pico, y se encuentran generalmente en suelos que tienen un límite líquido de entre 30 y 70. La curva tipo B es una curva con un pico y medio y la curva C es una curva de tipo pico doble. Las curvas de compactación tipos B y C se encuentran en suelos que tienen un límite líquido menor a aproximadamente 30. Las curvas de compactación tipo D son aquellas que no tienen un pico definido y se designan como tipo raro. Los suelos con un límite líquido mayor a aproximadamente 70 exhiben curvas de compactación del tipo C o D.

Los suelos que producen curvas del tipo C y D no son muy comunes (Das 2011).

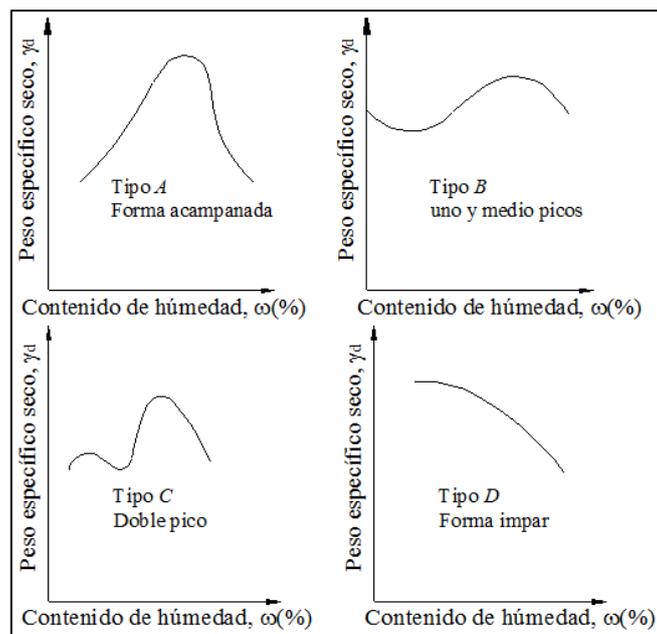


Figura 32. Cuatro tipos de curvas de compactación encontradas en los suelos.

Fuente: Das (2011)

### 2.11.6 Efecto del esfuerzo de compactación

Conforme se incrementa el esfuerzo de compactación, el peso específico seco máximo de compactación también aumenta, el contenido de agua óptimo disminuye en alguna medida. Sin embargo, el grado de compactación no es directamente proporcional al esfuerzo de compactación. En la Figura 33 se muestra los efectos de la energía de compactación sobre una arcilla arenosa.

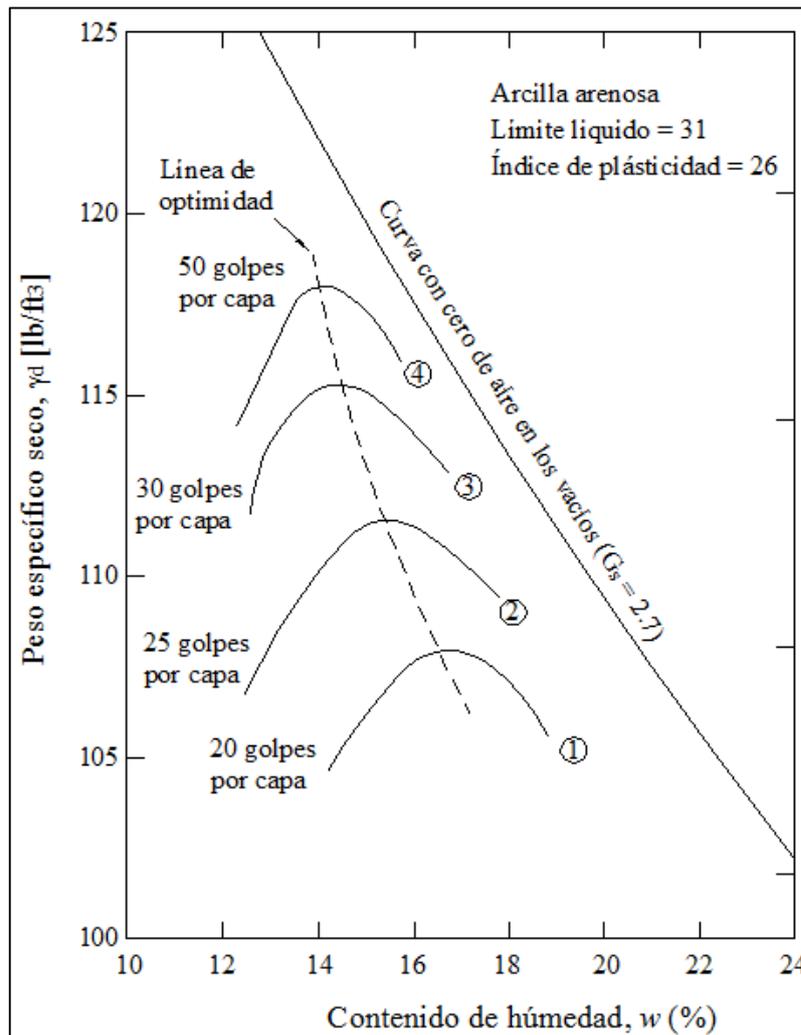


Figura 33. Efectos de la energía de compactación sobre una arcilla arenosa.

Fuente: Das (2011)

El comportamiento mecánico de los suelos arcillosos es variado; la energía de compactación que se le aplique tratando de obtener la mejor estabilidad y estanqueidad no siempre es la mayor que pueda soportar el suelo, ya que los suelos arcillosos pueden presentar comportamientos variados en condición seca y saturada (Palomino 2017).

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para el desarrollo de la investigación se usaron materiales de medición e instrumentos de laboratorio establecidos en las normas ASTM (American Society of Testing Materials) y su equivalente NTP (Norma Técnica Peruana) de mecánica de suelos.

La metodología de la investigación comprendió los siguientes aspectos:

- Selección de muestras de suelos.
- Diseño de equipo para ensayos de tubificación.
- Ensayos estándares y especiales en laboratorio.
- Ensayos de simulación del fenómeno de tubificación.
- Interpretación de los ensayos.

#### **3.1 SELECCIÓN DE MUESTRAS DE SUELOS**

Para el análisis experimental del fenómeno de tubificación se seleccionaron 28 muestras de suelos usados en la construcción de presas de tierra y suelos de terreno de fundación.

#### **3.2 DISEÑO DE EQUIPO PARA ENSAYOS DE TUBIFICACIÓN**

Para realizar los ensayos de simulación del fenómeno de tubificación en laboratorio se desarrolló el diseño de un equipo basado en los métodos para evaluar la erosión en suelos cohesivos desarrollados por Wan y Fell (Santos *et al.* 2012) y en métodos estándar para identificación de suelos dispersivos (Norma ASTM – D4647).

El equipo está constituido por tres celdas de acero. La celda central que contiene al suelo a evaluar es el molde del ensayo de compactación estándar (Norma ASTM D-1557).

La primera celda (las dimensiones son iguales al molde del ensayo de compactación estándar) es la cámara de carga la cual está conectada a un manómetro para medir la presión de ingreso.

La segunda celda (el diámetro interno es cuatro pulgadas y la longitud es ocho pulgadas) conectada extremo del molde de compactación sirve para receptionar el material erosionado. En la Figura 34 se muestran las celdas para el ensayo de simulación del fenómeno de tubificación.



Figura 34. Celdas para el ensayo de tubificación.

En la Figura 35 se muestran los componentes del equipo de simulación del fenómeno de tubificación que consta de las celdas, un motor trifásico de 0.5 Hp, una bomba para impulsar el agua y un manómetro para controlar la presión de ingreso.

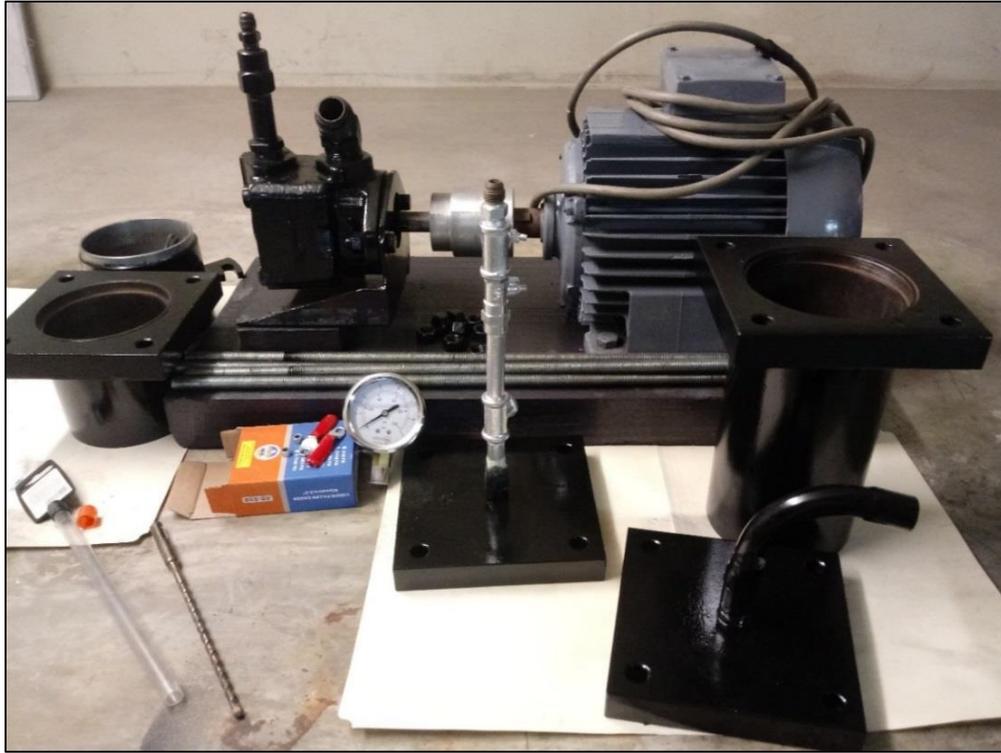


Figura 35. Componentes del equipo para el ensayo de tubificación.

### 3.3 ENSAYOS ESTÁNDARES Y ESPECIALES EN LABORATORIO

Se realizaron ensayos estándares y especiales de mecánica de suelos, de acuerdo a los procedimientos establecidos en las normas ASTM (American Society of Testing Materials) y su equivalente NTP (Norma Técnica Peruana). En el Cuadro 18 se muestra los ensayos realizados.

Cuadro 18. Ensayos estándares y ensayos especiales realizados.

Ensayos	Normas Técnicas		Número de ensayos
Contenido de humedad	ASTM D2216	NTP 339.127	28
Límite líquido	ASTM D4318	NTP 339.129	28
Límite plástico	ASTM D4318	NTP 339.129	28
Clasificación SUCS	ASTM 2487	NTP 339.134	28
Clasificación AASHTO	AASHTO M-145	NTP 339.135	28
Granulometría por hidrómetro	ASTM D422	NTP 339.128	28
Gravedad específica de sólidos	ASTM D854	NTP 339.131	28
Próctor modificado	ASTM D-1557	NTP 339.141	28
Permeabilidad	ASTM D-5084	NTP 339.156	28
Ensayos de tubificación	-	-	28

En la Figura 36 se muestra el proceso metodológico del análisis experimental empleado.

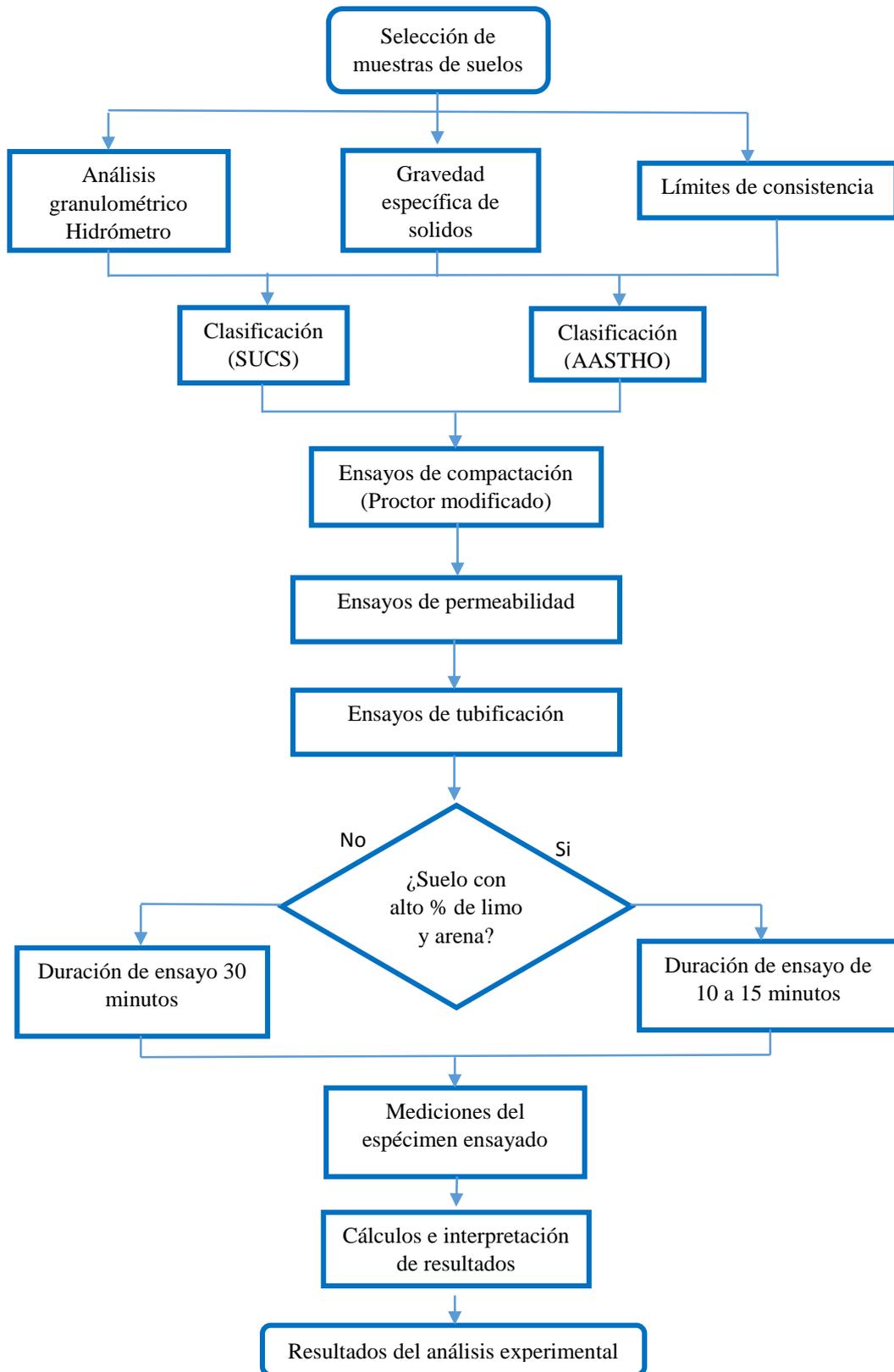


Figura 36. Proceso Metodológico del análisis experimental.

### 3.4 ENSAYOS DE SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE TUBIFICACIÓN

Los principales aspectos que se desarrolló para las pruebas de tubificación son:

- Preparación de muestras de suelo.
- Compactación.
- Perforación de agujero de tres milímetros a las muestras.
- Ensayos de tubificación.
- Mediciones posteriores del espécimen ensayado.

En la Figura 37 se muestra el esquema del ensayo de simulación del fenómeno de tubificación.

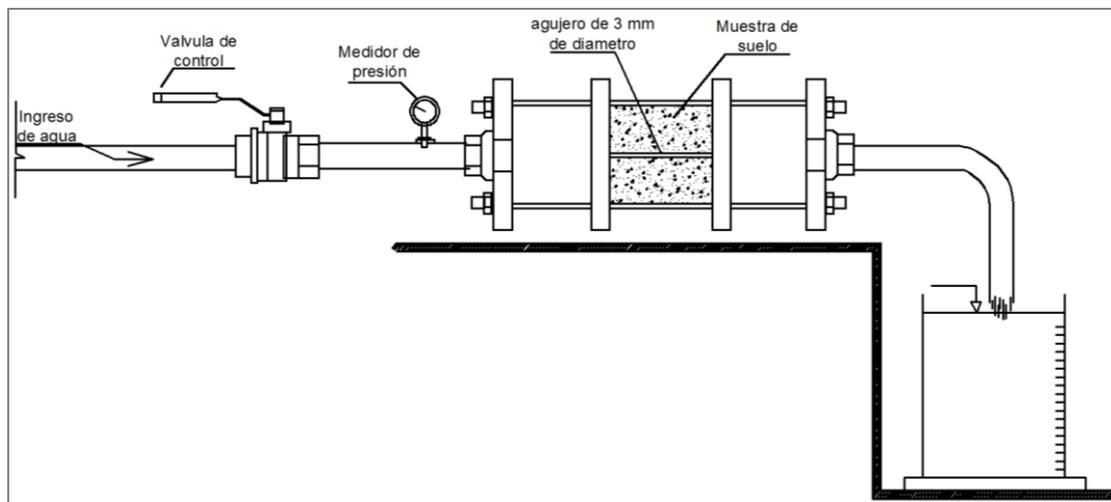


Figura 37. Esquema del ensayo de tubificación.

La preparación de las muestras de suelo se llevó a cabo considerando sus propiedades físicas obtenidas de los ensayos de laboratorio acuerdo a los procedimientos establecidos en las normas ASTM (American Society of Testing Materials).

La compactación de las muestras para el ensayo de tubificación se llevó a cabo considerando los resultados de densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo obtenidos de los resultados de compactación (ASTM D-1557).

En el Cuadro 19 se muestra las características del método de proctor modificado utilizado para la compactación de los suelos.

Cuadro 19. Consideraciones para el ensayo proctor modificado.

Proctor Modificado ASTM D 1557 - Método A	
Ec = Energía de compactación	= 56 250 Lb-ft/ft <sup>3</sup>
W = Peso del martillo	= 10 lb
h = Altura de caída del martillo	= 18 pulgadas
N = Numero de golpes por capas	= depende del molde
n = Numero de capas	= 5
V = Volumen del molde cm <sup>3</sup>	= 943
Suelo y molde a utilizar	
Suelos pasa la malla N° 4	
Molde 4 pulgadas de diámetro	
V = 1/30 ft <sup>3</sup>	
N = 25 golpes/ capa	

Fuente: American Society of Testing Materials D1557 (2005)

Después de la compactación de cada muestra, se perforó un agujero, con una broca de tres milímetros de diámetro (Obilinovic 1981), y a través del agujero fluyo agua a diferentes cargas hidráulicas y duraciones variables. En la Figura 38 se aprecia la perforación de tres milímetros de diámetro de la muestra.



Figura 38. Perforación de la muestra con una broca de 3 milímetros de diámetro.

Las cámaras de acero se conectaron aguas arriba y aguas abajo de la muestra, contenida en la celda de proctor. Las celdas de prueba se colocaron horizontalmente y se conectó a través de mangueras de alta presión para el ingreso de agua, controlado con válvulas, desde el depósito aguas arriba del espécimen. En la Figura 39 se muestra la celda para las pruebas de tubificación.

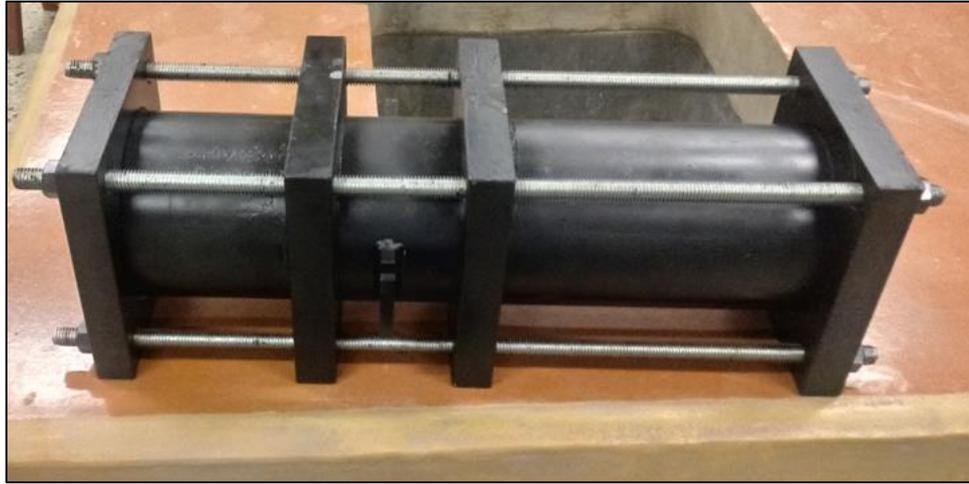


Figura 39. Celda para pruebas de tubificación.

El suministro de agua se conectó a la cámara aguas arriba y se reguló con válvulas de control y con un medidor de presión (manómetro). En la Figura 40 se muestra todos los componentes utilizados para las pruebas de tubificación.

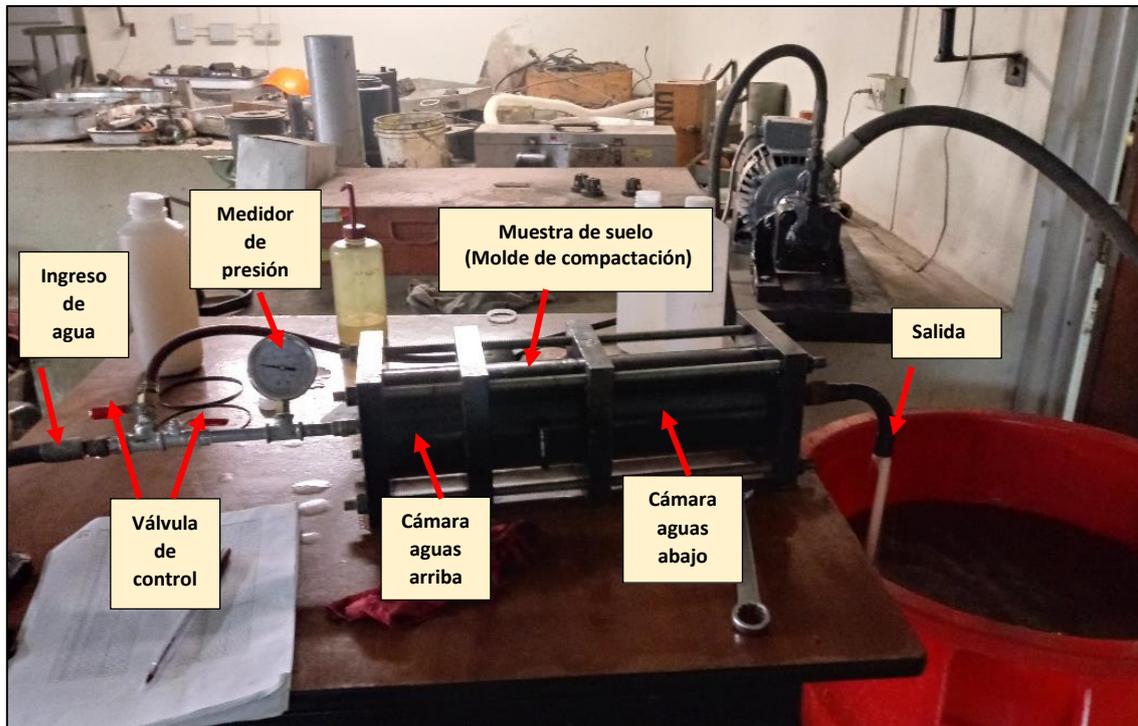


Figura 40. Pruebas de tubificación.

El ingreso del flujo se realizó de forma gradual durante la prueba, el caudal de ingreso y la presión se registraron en intervalos de 30 segundos.

El tiempo de las pruebas se realizaron en 30 minutos, en algunos casos en menor tiempo debido a las características físicas (porcentajes de arena, limo y arcilla) de los suelo, se tomaron tres medidas del material de arrastre en intervalos de 10 minutos.

El desmontaje del equipo de tubificación se realizó vaciando la celda de prueba aguas abajo. Esta operación se llevó a cabo lentamente y con cuidado para evitar el desmoronamiento de la muestra de suelo.

Se retiraron las varillas roscadas que conectaban las cámaras de acero al molde de compactación.

El agujero de la muestra de suelo al final de la prueba se midió con parafina fundida para obtener una plantilla de agujero. En la Figura 41 se muestra el aspecto final y la plantilla del orificio con parafina de una de las muestras.



Figura 41. Aspecto final del orificio formado de una prueba (derecha) y plantilla de orificio de parafina (izquierda).

Después de secar la parafina, la muestra se extrajo del molde de compactación y el suelo alrededor del molde de parafina.

El diámetro promedio del molde de parafina se midió en cuatro secciones intermedias equidistantes y se estimó el diámetro promedio final del orificio formado al final de las pruebas de tubificación.

### 3.5 METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA INTERPRETACIÓN DE LOS ENSAYOS DE TUBIFICACIÓN

Para comprender las pruebas de tubificación realizadas, se presenta la Figura 42 donde se muestra el esquema para interpretación de los ensayos.

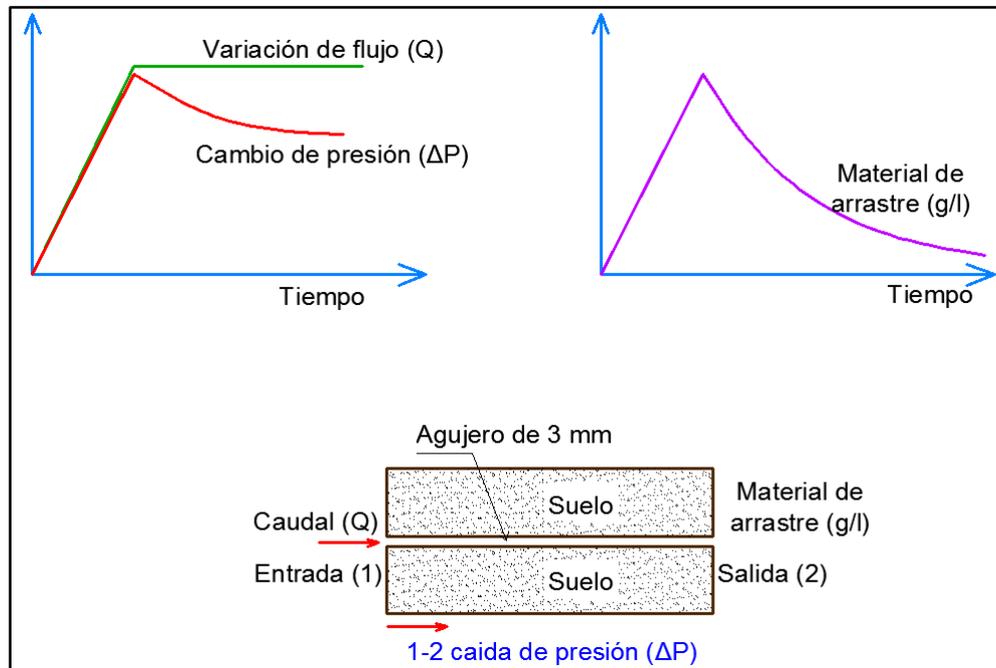


Figura 42. Esquema para la interpretación de ensayos.

El procedimiento de cálculo consistió en la interpretación de los principios del flujo de fluido viscoso a través de tubos de superficie rugosa.

Considerando el equilibrio de las fuerzas de un fluido (Santos *et al.* 2012) que se mueve por un agujero de sección circular por diferencias piezométricas en un instante  $t$  se tiene:

$$\Delta h_t = \Delta Z + \frac{\Delta p_t}{\rho_w g} = \frac{4\tau_t}{\rho_w g D_t} \frac{L}{D_T} \quad (32)$$

Con

$$\Delta h_t = i_t \cdot L \quad (33)$$

Igualando las dos ecuaciones se consigue el esfuerzo cortante en un instante  $t$ .

$$\tau_t = \rho_w \cdot g \cdot i_t \frac{D_t}{4} \quad (34)$$

Donde:

$\Delta h_t$  (m): caída de presión a lo largo del orificio en el tiempo t sobre una longitud L.

$\Delta Z$  (m): diferencia de dimensión entre los extremos del agujero.

$\Delta p_t$  (N/m<sup>2</sup>): diferencia de presión sobre la longitud del agujero en el tiempo t.

$\rho_w$  (Kg/m<sup>3</sup>): densidad del fluido.

g (m/s<sup>2</sup>): aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>).

$\tau_t$  (N/m<sup>2</sup>): esfuerzo cortante en el fluido en la superficie de contacto con el agujero en el tiempo t.

$D_t$  (m): diámetro del agujero en el tiempo t.

L (m): longitud del agujero.

$i_t$  : gradiente hidráulico sobre la longitud del agujero en el tiempo t.

El gradiente hidráulico medido a través de las muestras de suelo y la velocidad de flujo se utilizaron para determinar indirectamente la velocidad de erosión por unidad de superficie y el esfuerzo cortante de la pared a lo largo del orificio axial, en cualquier momento durante la prueba.

Para determinar la tasa de erosión (Santos *et al.* 2012) en cada instante t, denotado por  $\dot{\varepsilon}_t$  (kg /s/m<sup>2</sup>) se utilizó la siguiente relación.

$$\dot{\varepsilon}_t = \frac{\rho_d}{2} \frac{dD_t}{d_t} \quad (35)$$

La Figura 43 se muestra como referencia para determinar gráficamente el esfuerzo cortante crítico,  $\tau_c$ , el coeficiente de erosión del suelo, Ce e índice de tasa de erosión.

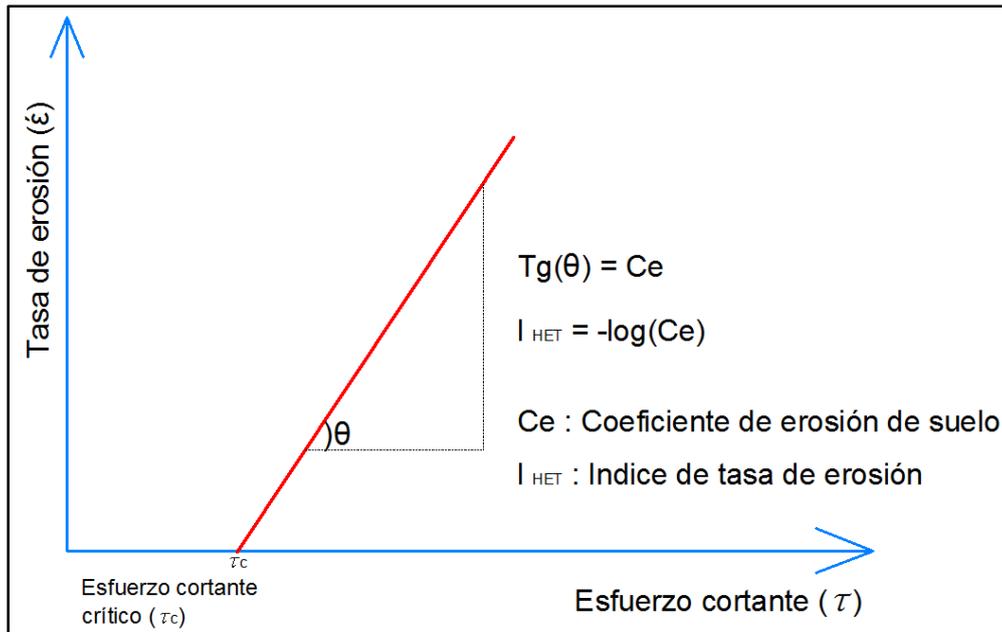


Figura 43. Esquema para determinar el coeficiente e índice de tasa de erosión.

La ecuación (36) expresa la tasa de erosión (Luthi 2011) cuando el esfuerzo cortante aplicado excede el valor crítico.

$$\dot{\mathcal{E}}_{HET} = C_e (\tau_{HET} - \tau_c) \quad (36)$$

Donde:

$C_e$  (Kg/(s.m<sup>2</sup>)) : es un coeficiente de erosión del suelo.

$\tau_c$  (N/m<sup>2</sup>) : se llama el esfuerzo cortante crítico

Para determinar el índice tasa de erosión (Luthi 2011) se utilizó la siguiente relación

$$I_{HET} = -\log_{10}(C_e) \quad (37)$$

Para muestras con un grado de compactación del 95 por ciento y un contenido óptimo de agua compactada en laboratorio, este parámetro se llama índice representativo tasa de erosión,  $\tilde{I}_{HET}$  (Santos *et al.* 2012).

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSION**

Los experimentos realizados en laboratorio incluyeron ensayos estándar, ensayos especiales y ensayos de tubificación a 28 muestras de suelo.

Las muestras de suelo se clasificaron utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) de acuerdo con la norma ASTM D2487. Las pruebas de distribución del tamaño de grano se llevaron a cabo utilizando análisis de hidrómetro siguiendo las normas ASTM D422. Los límites de Atterberg de los suelos (límite líquido LL y el límite plástico PL), se determinaron como se describe en la norma ASTM D4318. Las pruebas de compactación modificada se realizaron de acuerdo a la norma ASTM D1557, ello permitió determinar el contenido óptimo de agua, y la densidad seca máxima el cual permitió remoldear las 28 muestras y realizar las pruebas de tubificación.

Se diseñó un equipo para la simulación del fenómeno de tubificación, y se realizaron las pruebas a cada muestra de suelo de acuerdo con el procedimiento descrito en la metodología.

### **4.1 PROPIEDADES ÍNDICE DE LOS SUELOS**

Con los resultados de los ensayos realizados en laboratorio a las 28 muestras de suelos se agruparon en 7 tipos, CH (arcilla inorgánica de alta plasticidad), CL arenoso (arcilla arenosa de plasticidad media), CL (arcilla inorgánica de plasticidad media), SC (arena arcillosa), ML (limo inorgánico), MH (limo inorgánico) y SM (arena limosa) de acuerdo a su clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).

En la Figura 44 se presenta las curvas granulométricas de los suelos analizados cuya distribución granulométrica varía por los porcentajes de arena, limo y arcilla que presentan cada tipo de suelo.

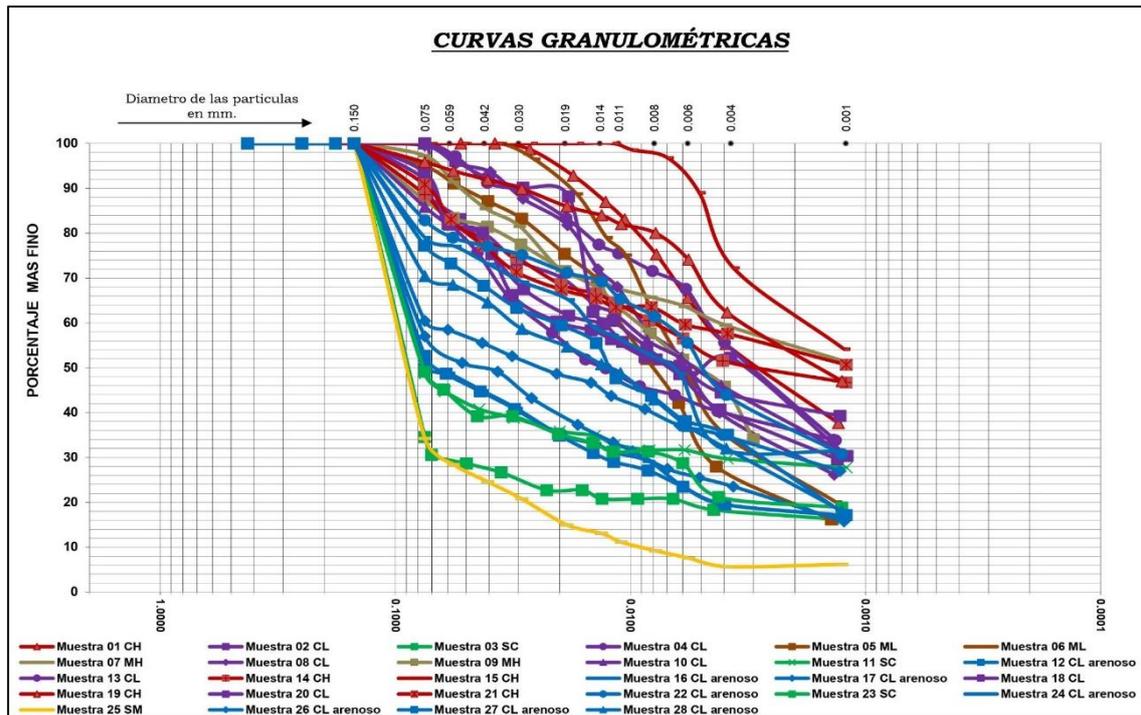


Figura 44. Curva de distribución del tamaño de partículas de suelos.

Fueron necesario conocer los porcentajes de arena, limo y arcilla de las muestras, para evaluar la influencia en el proceso de tubificación, para ello se efectuaron los ensayos granulométricos por hidrómetro.

En el Cuadro 20 se muestra las propiedades índices de los suelos, donde las muestras CH (arcilla inorgánica de alta plasticidad) presentan un porcentaje de arena que varía de 0.00 a 11.40, el porcentaje de limo varía de 37.87 a 57.48, el porcentaje de arcilla varía de 43.52 a 60.20, con un límite líquido que varía de 51.60 a 77.74 por ciento y un índice de plasticidad que varía de 27.43 a 46.80 por ciento.

Las muestras CL arenoso (arcilla arenosa de plasticidad media) presentan un porcentaje de arena que varía de 17.08 a 49.24, el porcentaje de limo varía de 30.02 a 54.10, el porcentaje de arcilla varía de 17.88 a 35.17, con un límite líquido que varía de 29.76 a 44.00 por ciento y un índice de plasticidad que varía de 10.50 a 19.00 por ciento.

Las muestras CL (arcilla inorgánica de plasticidad media) presentan un porcentaje de arena que varía de 0.00 a 14.09, el porcentaje de limo varía de 49.17 a 68.77, el porcentaje de arcilla varía de 30.76 a 41.10, con un límite líquido que varía de 26.00 a 46.22 por ciento y un índice de plasticidad que varía de 8.00 a 24.39 por ciento.

Las muestras SC (arena arcillosa) presentan un porcentaje de arena que varía de 50.88 a 65.46, el porcentaje de limo varía de 17.56 a 29.50, el porcentaje de arcilla varía de 16.98 a 28.46, con un límite líquido que varía de 32.00 a 34.00 por ciento y un índice de plasticidad que varía de 12.00 a 17.00 por ciento.

Se realizó los ensayos para dos muestras con clasificación SUCS ML (limo inorgánico) cuyo resultado para la muestra M-05 presenta 5.01 por ciento de arena, 74.89 por ciento de limo, 20.10 por ciento de arcilla, límite líquido 34.07 por ciento y un índice de plasticidad de 8.00 por ciento. La muestra M-06 presenta 0.00 por ciento de arena, 74.76 por ciento de limo, 24.24 por ciento de arcilla, límite líquido 36.21 por ciento y un índice de plasticidad de 11.37 por ciento.

Se realizó los ensayos para dos muestras con clasificación SUCS MH (limo inorgánico) cuyo resultado para la muestra M-07 presenta 2.72 por ciento de arena, 43.06 por ciento de limo, 54.22 por ciento de arcilla, límite líquido 62.41 por ciento y un índice de plasticidad de 28.78 por ciento. La muestra M-09 presenta 12.68 por ciento de arena, 49.34 por ciento de limo, 37.98 por ciento de arcilla, límite líquido 56.00 por ciento y un índice de plasticidad de 25.00 por ciento.

Se realizó los ensayos para una muestra con clasificación SUCS SM (arena limosa) cuyo porcentaje de arena es 65.77, limo 28.24 por ciento, arcilla 5.99 por ciento, límite líquido 25.00 por ciento y un índice de plasticidad de 3.10 por ciento.

Cuadro 20. Propiedades índices de las muestras de suelos.

FRACCIÓN GRANULOMÉTRICO ( % Arena, Limo, Arcilla)				LIMITES DE ATTERBERG		INDICE DE PLASTICIDAD	HUMEDAD NATURAL	CLASIFICACIÓN	
Muestra	% Arena	% Limo	% Arcilla	L.L (%)	L.P (%)	I.P	w (%)	SUCS	AASTHO
Grupo I (CH)									
M-01	0.00	56.48	43.52	51.60	24.17	27.43	11.27	CH	A-7-6
M-14	11.40	40.29	48.31	60.32	27.22	33.10	25.40	CH	A-7-6
M-15	0.00	39.80	60.20	76.00	34.00	42.00	30.21	CH	A-7-6
M-19	4.16	43.75	52.09	68.77	27.39	41.38	15.63	CH	A-7-6
M-21	9.15	37.87	52.98	77.74	30.94	46.80	18.40	CH	A-7-6
Grupo II (CL arenoso)									
M-12	45.69	30.02	24.29	40.76	23.02	17.74	20.10	CL arenoso	A-2-7
M-16	49.24	32.88	17.88	38.10	21.10	17.00	15.20	CL arenoso	A-2-7
M-17	43.01	38.66	18.33	36.20	20.30	15.90	12.50	CL arenoso	A-2-7
M-22	17.08	47.75	35.17	40.00	21.00	19.00	16.50	CL arenoso	A-2-7
M-24	20.98	47.39	31.63	44.00	26.00	18.00	23.21	CL arenoso	A-2-7
M-26	39.54	30.79	29.67	40.59	23.87	16.72	23.71	CL arenoso	A-2-7
M-27	22.80	54.10	23.10	32.86	22.36	10.50	8.62	CL arenoso	A-2-6
M-28	29.55	47.72	22.73	29.76	19.25	10.51	10.00	CL arenoso	A-2-7
Grupo III (CL)									
M-02	0.00	62.36	37.64	36.00	19.00	17.00	10.66	CL	A-7-6
M-04	0.00	58.90	41.10	42.00	20.00	22.00	37.21	CL	A-7-6
M-08	0.47	68.77	30.76	37.03	24.42	12.61	25.30	CL	A-7-6
M-10	14.09	49.17	36.74	43.59	24.21	19.38	32.53	CL	A-7-6
M-13	6.43	57.48	36.09	46.22	21.83	24.39	28.32	CL	A-7-6
M-18	0.00	66.72	33.28	45.00	23.00	22.00	18.20	CL	A-7-6
M-20	8.03	50.96	41.01	26.00	18.00	8.00	15.23	CL	A-2-7
Grupo IV (SC)									
M-03	65.46	17.56	16.98	34.00	22.00	12.00	11.28	SC	A-2-7
M-23	50.88	29.50	19.62	32.00	19.00	13.00	20.40	SC	A-2-7
M-11	51.32	20.22	28.46	34.00	17.00	17.00	12.30	SC	A-2-6
Grupo V (ML)									
M-05	5.01	74.89	20.10	34.07	26.07	8.00	11.62	ML	A-4
M-06	0.00	74.76	25.24	36.21	24.84	11.37	15.30	ML	A-5
Grupo VI (MH)									
M-07	2.72	43.06	54.22	62.41	33.63	28.78	26.82	MH	A-7-5
M-09	12.68	49.34	37.98	56.00	31.00	25.00	22.64	MH	A-7-5
Grupo VII (SM)									
M-25	65.77	28.24	5.99	25.00	21.90	3.10	4.50	SM	A-2-4

En el Figura 45 se muestra la carta de plasticidad de Casagrande donde se ubica las muestras analizadas de acuerdo a su clasificación SUCS donde se relaciona el límite líquido (LL) y el índice de plasticidad (IP).

Las muestras que se presentan son CH (arcilla inorgánica de alta plasticidad), CL (arcilla inorgánica de plasticidad media), ML (limo inorgánico) y MH (limo inorgánico) con un límite líquido que varía de 26.00 a 77.74 por ciento y un índice de plasticidad que varía de 8.00 a 46.80 por ciento.

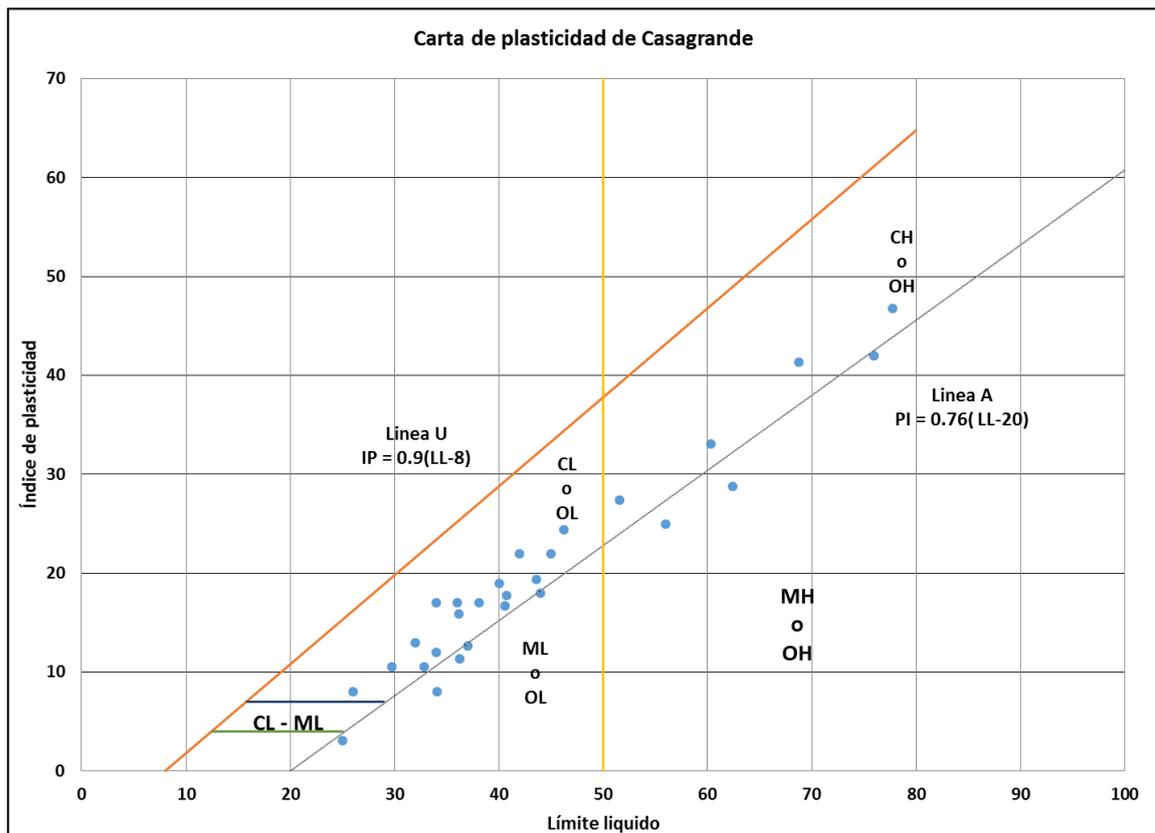


Figura 45. Carta de plasticidad de Casagrande.

#### 4.2 PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN, PERMEABILIDAD Y GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SÓLIDOS

Se realizó pruebas de compactación de acuerdo a la norma ASTM D1557, ensayos de permeabilidad de acuerdo a la norma ASTM D-5084 y ensayos de gravedad específica de sólidos de acuerdo a la norma ASTM D854), para los 7 grupos, cuyos resultados se muestran en el Cuadro 21.

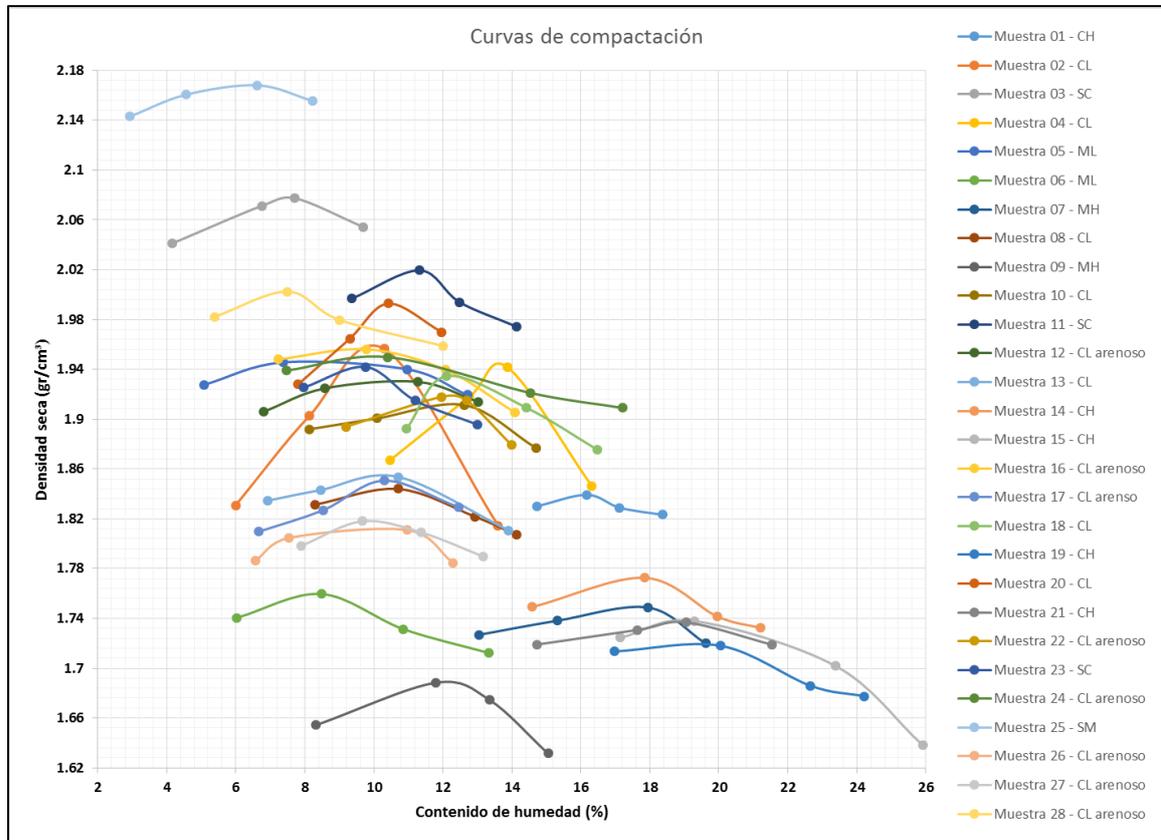
Cuadro 21. Resultados de compactación, permeabilidad y gravedad específica de sólidos.

Muestra	Proctor modificado		Permeabilidad	Gravedad específica
	M.D.S	O.C.H		
	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	(w %)	(cm/s)	(Gs)
<b>GRUPO I (CH)</b>				
M – 01	1.841	15.70	1.36E-07	2.76
M – 14	1.782	16.50	7.33E-07	2.74
M – 15	1.736	19.60	5.02E-07	2.72
M – 19	1.728	18.50	6.64E-07	2.70
M – 21	1.737	19.30	8.26E-06	2.70
<b>GRUPO II (CL arenoso)</b>				
M – 12	1.932	10.30	1.04E-06	2.73
M – 16	1.958	9.21	3.64E-06	2.72
M – 17	1.852	10.90	3.21E-06	2.72
M – 22	1.918	12.10	3.64E-06	2.76
M – 24	1.951	9.80	4.48E-06	2.70
M – 26	1.821	9.50	2.96E-06	2.72
M – 27	1.818	9.81	2.48E-06	2.72
M – 28	2.005	6.90	3.14E-06	2.73
<b>GRUPO III (CL)</b>				
M – 02	1.958	10.80	2.78E-06	2.75
M – 04	1.944	14.20	5.02E-07	2.72
M – 08	1.846	10.10	9.66E-07	2.72
M – 10	1.912	12.20	1.98E-06	2.70
M – 13	1.855	10.80	9.88E-07	2.70
M – 18	1.938	12.60	7.10E-07	2.70
M – 20	1.998	10.80	5.85E-07	2.70
<b>GRUPO IV (SC)</b>				
M – 03	2.078	7.90	5.13E-06	2.72
M – 23	1.947	9.10	3.73E-06	2.69
M – 11	2.025	10.60	2.96E-06	2.71
<b>GRUPO V (ML)</b>				
M – 05	1.949	8.80	4.67E-06	2.75
M – 06	1.762	7.90	1.62E-06	2.77
<b>GRUPO VI (MH)</b>				
M – 07	1.751	17.40	1.15E-06	2.72
M – 09	1.689	11.60	2.71E-06	2.72
<b>GRUPO VII (SM)</b>				
M – 25	2.168	6.20	1.02E-05	2.83

La compactación se realizó con la finalidad de incrementar la resistencia al esfuerzo cortante. Los resultados de todos los ensayos están asociados a la energía de compactación del proctor modificado. En la Figura 46 se muestra las curvas de compactación de cada tipo de suelos (CH, CL arenoso, CL, SC, ML, MH y SM). El cual presenta una forma acampanada. Donde

la máxima densidad seca obtenido varía de 1.68 gr/cm<sup>3</sup> a 2.168 gr/cm<sup>3</sup> y la humedad optima de compactación varia de 6.20 a 19.60 por ciento.

Figura 46. Curvas de compactación.



### 4.3 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TUBIFICACIÓN

Se analizaron los siete grupos de muestras de suelos, que presentan distinta composición granulométrica para evaluar el efecto del contenido de arena, limo y arcilla sobre el proceso de tubificación.

El diámetro inicial del agujero para todas las muestras analizadas fue de 3 milímetros y la presión aplicada se realizó de forma gradual hasta alcanzar el punto crítico, el cual dio inicio a la tubificación.

En el Cuadro 22 se muestra los resultados de los ensayos de tubificación donde el tiempo de ensayo en las muestras CH (arcilla inorgánica de alta plasticidad) fue de 30 minutos, la presión aplicada a las muestras varía de 1.4 a 7.0 bares, el caudal de ingreso a las muestras fue de 19.32 litros por minuto en promedio, el diámetro promedio final del agujero después

de la prueba de tubificación varía de 13.19 a 43.91 milímetros, el material de arrastre se midió en intervalos de 10 minutos el cual varía de 1.164 a 4.936 g/l.

El tiempo de ensayo de las muestras CL arenoso (arcilla arenosa de plasticidad media) fue de 30 minutos, la presión aplicada a las muestras varía de 1.6 a 5.0 bares, el caudal de ingreso a las muestras fue de 19.64 litros por minuto en promedio, el diámetro promedio final del agujero después de la prueba de tubificación varía de 11.10 a 28.00 milímetros, el material de arrastre se midió en intervalos de 10 minutos el cual varía de 1.353 a 11.726 g/l.

El tiempo de ensayo de las muestras CL (arcilla inorgánica de plasticidad media) fue de 30 minutos, la presión aplicada a las muestras varía de 1.8 a 4.4 bares, el caudal de ingreso a las muestras fue de 18.60 litros por minuto en promedio, el diámetro promedio final del agujero después de la prueba de tubificación varía de 12.89 a 70.27 milímetros, el material de arrastre se midió en intervalos de 10 minutos (excepto en la muestra M-08) el cual varía de 1.573 a 22.811 g/l.

El tiempo de ensayo de las muestras SC (arena arcillosa) fue de 30 minutos, la presión aplicada a las muestras varía de 2.5 a 6.0 bares, el caudal de ingreso a las muestras fue de 16.48 litros por minuto en promedio, el diámetro promedio final del agujero después de la prueba de tubificación varía de 9.94 a 48.01 milímetros, el material de arrastre se midió en intervalos de 10 minutos el cual varía de 0.498 a 4.163 g/l.

Se realizó los ensayos de tubificación para dos muestras con clasificación SUCS ML (limo inorgánico) cuyo tiempo de ensayo para la muestra M-05 fue de 10 minutos, la presión aplicada fue de 2.0 bares, el caudal de ingreso a la muestra fue de 13.20 litros por minuto en promedio, el diámetro promedio final del agujero después de la prueba de tubificación fue 63.52 milímetros, el material de arrastre se midió en 10 minutos cuyo valor es 42.280 g/l. El tiempo de ensayo para la muestra M-06 fue de 15 minutos, la presión aplicada fue de 1.5 bares, el caudal de ingreso a la muestra fue de 20.28 litros por minuto, el diámetro promedio final del agujero después de la prueba de tubificación fue 83.89 milímetros, el material de arrastre se midió en 15 minutos cuyo valor es 48.008 g/l

Se realizó los ensayos de tubificación para dos muestras con clasificación SUCS MH (limo inorgánico) cuyo tiempo de ensayo para la muestra M-07 fue de 30 minutos, la presión aplicada fue de 2.2 bares, el caudal de ingreso a la muestra fue de 20.28 litros por minuto, el diámetro promedio final del agujero después de la prueba de tubificación fue 14.19 milímetros el material de arrastre se midió en 30 minutos cuyo valor es 2.047 g/l. El tiempo

de ensayo para la muestra M-09 fue de 15 minutos, la presión aplicada fue de 2.3 bares, el caudal de ingreso a la muestra fue de 20.28 litros por minuto, el diámetro promedio final del agujero después de la prueba de tubificación fue 100.48 milímetros, el material de arrastre se midió 15 minutos cuyo valor es 45.730 g/l

Se realizó el ensayo de tubificación para una muestras con clasificación SUCS SM (arena limosa) cuyo tiempo de ensayo fue de 10 minutos, la presión aplicada fue de 7.0 bares, el caudal de ingreso a la muestra fue de 20.28 litros por minuto, el diámetro promedio final del agujero después de la prueba de tubificación fue 82.90 milímetros, el material de arrastre se midió en 10 minutos cuyo valor es 41.805 g/l.

Cuadro 22. Resultados de los ensayos de tubificación.

Muestra	Tiempo de ensayo (min)	Presión		Caudal de ingreso (l/min)	Diámetro		Material de arrastre (g/l)		
		Máxima (Bar)	Mínima (Bar)		inicial (mm)	promedio final (mm)	10 min	20 min	30 min
<b>Grupo I (CH)</b>									
M-01	30	1.9	0.65	20.28	3	28.58	1.7053	1.3720	1.8850
M-14	30	1.5	0.60	22.80	3	43.91	0.9727	1.6465	1.3061
M-15	30	3.0	1.40	13.32	3	13.46	0.7800	0.6364	0.4796
M-19	30	2.0	0.80	20.28	3	13.19	0.4747	0.3700	0.3200
M-21	30	1.4	0.60	20.28	3	29.26	1.4100	0.9697	1.3239
<b>Grupo II (CL arenoso)</b>									
M-12	30	1.8	0.70	20.28	3	13.36	0.3500	0.7900	2.47273
M-16	30	1.9	1.20	20.28	3	11.10	0.2450	0.6580	0.7840
M-17	30	2.1	1.20	20.28	3	17.47	0.3560	0.6850	0.3120
M-22	30	1.6	0.65	20.28	3	19.36	0.9900	0.9500	1.0400
M-24	30	4.7	1.70	15.18	3	19.86	1.2823	1.0841	1.0329
M-26	30	4.0	0.90	20.28	3	21.27	2.7083	1.1200	2.8660
M-27	30	5.0	1.30	20.28	3	21.07	3.9560	4.1000	3.1546
M-28	30	2.1	0.80	20.28	3	28.00	6.200	2.7660	2.7604
<b>Grupo III (CL)</b>									
M-02	30	2.2	1.35	15.48	3	70.27	16.421	3.2000	3.1900
M-04	30	4.4	1.90	16.68	3	20.20	0.6767	0.3791	0.5178
M-08	15	4.3	1.70	16.98	3	66.82	8.2475*	10.050*	3.7466*
M-10	30	2.0	0.80	20.28	3	12.89	0.8438	0.920	0.9468
M-13	30	2.0	0.80	20.28	3	42.18	8.3900	7.170	4.790
M-18	30	1.8	0.70	20.28	3	30.61	3.2396	2.2424	1.505
M-20	30	2.0	0.80	20.28	3	24.30	1.5758	2.0918	1.8687
<b>Grupo IV (SC)</b>									
M-03	30	6.0	3.10	12.48	3	9.94	0.0798	0.1932	0.2251
M-23	30	2.5	0.80	20.28	3	48.01	1.1837	1.299	1.6804
M-11	30	4.0	1.90	16.98	3	24.09	2.3774	0.8801	0.5378
<b>Grupo V (ML)</b>									
M-05	10	2.0	0.70	13.20	3	63.52	13.885*	13.489*	14.905*
M-06	15	1.5	1.00	20.28	3	83.89	17.741*	15.000*	15.266*
<b>Grupo VI (MH)</b>									
M-07	30	2.2	0.80	20.28	3	14.19	0.7467	0.8067	0.4938
M-09	15	2.3	1.20	20.28	3	100.48	19.035*	19.425*	7.2700*
<b>Grupo VII (SM)</b>									
M-25	10	7.0	1.20	20.28	3	82.90	12.336*	18.863*	10.606*

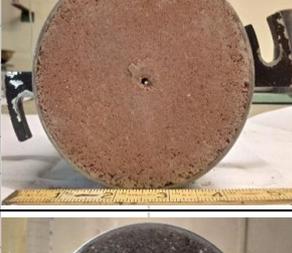
\* Variación del tiempo para la toma de muestras del material de arrastre.

En la Figura 47 se presenta las cinco muestras (M-01, M-14, M-15, M-19 y M-20) del grupo I cuya clasificación SUCS es CH (arcilla inorgánica de alta plasticidad). En el cual se aprecia las muestras compactadas a la densidad máxima obtenida de los ensayos proctor modificado (ASTM-D1557), el agujero inicial de tres milímetros y el efecto del arrastre de las partículas suelo al final del ensayo de tubificación.

MUESTRAS DE SUELOS GRUPO I - CH			
Características	Compactadas	Agujero inicial de 3 mm	Final de la prueba de tubificación
<b>M - 01</b> SUCS: CH % Arena: 0.00 % Limo: 56.48 % Arcilla: 43.52 L. liquido: 51.60 I. plasticidad 27.43			
<b>M - 14</b> SUCS: CH % Arena: 11.40 % Limo: 40.29 % Arcilla: 48.31 L. liquido: 60.32 I. plasticidad 33.10			
<b>M - 15</b> SUCS: CH % Arena: 0.00 % Limo: 39.80 % Arcilla: 60.20 L. liquido: 76.00 I. plasticidad 42.00			
<b>M - 19</b> SUCS: CH % Arena: 4.16 % Limo: 43.75 % Arcilla: 52.09 L. liquido: 68.77 I. plasticidad 41.38			
<b>M - 21</b> SUCS: CH % Arena: 9.15 % Limo: 37.87 % Arcilla: 52.98 L. liquido: 77.74 I. plasticidad 46.80			

Figura 47. Resultados de las pruebas de tubificación en muestras CH.

En la Figura 48 se presenta las ocho muestras (M-12, M-16, M-17, M-22, M-24, M-26, M-27 y M-28) del grupo II cuya clasificación SUCS es CL arenoso (arcilla arenosa de plasticidad media). En el cual se aprecia las muestras compactadas a la densidad máxima obtenida de los ensayos proctor modificado (ASTM-D1557), el agujero inicial de tres milímetros y el efecto del arrastre de las partículas suelo al final del ensayo de tubificación.

MUESTRAS DE SUELOS GRUPO II - CL arenoso			
Características	Compactadas	Agujero inicial de 3 mm	Final de la prueba de tubificación
<b>M - 12</b> SUCS: CL arenoso % Arena: 45.69 % Limo: 30.02 % Arcilla: 24.29 L. liquido: 40.76 I. plasticidad 17.75			
<b>M - 16</b> SUCS: CL arenoso % Arena: 49.24 % Limo: 32.88 % Arcilla: 17.88 L. liquido: 38.10 I. plasticidad 17.00			
<b>M - 17</b> SUCS: CL arenoso % Arena: 43.01 % Limo: 38.66 % Arcilla: 18.33 L. liquido: 36.20 I. plasticidad 15.90			
<b>M - 22</b> SUCS: CL arenoso % Arena: 17.08 % Limo: 47.75 % Arcilla: 35.17 L. liquido: 40.00 I. plasticidad 19.00			
<b>M - 24</b> SUCS: CL arenoso % Arena: 20.98 % Limo: 47.39 % Arcilla: 31.63 L. liquido: 44.00 I. plasticidad 18.00			

« Continuación »

<p><b>M - 26</b></p> <p>SUCS: CL arenoso</p> <p>% Arena: 39.54</p> <p>% Limo: 30.79</p> <p>% Arcilla: 29.67</p> <p>L. liquido: 40.59</p> <p>I. plasticidad 16.72</p>			
<p><b>M - 27</b></p> <p>SUCS: CL arenoso</p> <p>% Arena: 22.80</p> <p>% Limo: 54.10</p> <p>% Arcilla: 23.10</p> <p>L. liquido: 32.86</p> <p>I. plasticidad 10.50</p>			
<p><b>M - 28</b></p> <p>SUCS: CL arenoso</p> <p>% Arena: 29.55</p> <p>% Limo: 47.72</p> <p>% Arcilla: 22.73</p> <p>L. liquido: 29.76</p> <p>I. plasticidad 10.51</p>			

Figura 48. Resultados de las pruebas de tubificación en muestras CL arenoso.

En la Figura 49 se presenta las siete muestras (M-02, M-04, M-08, M-10, M-13, M-18 y M-20) del grupo III cuya clasificación SUCS es CL (arcilla inorgánica de plasticidad media). En el cual se aprecia las muestras compactadas a la densidad máxima obtenida de los ensayos proctor modificado (ASTM-D1557), el agujero inicial de tres milímetros y el efecto del arrastre de las partículas suelo al final del ensayo de tubificación.

MUESTRAS DE SUELOS GRUPO III - CL			
Características	Compactadas	Agujero inicial de 3 mm	Final de la prueba de tubificación
<b>M - 02</b> SUCS: CL % Arena: 0.00 % Limo: 62.36 % Arcilla: 37.64 L. liquido: 36.00 I. plasticidad 17.00			
<b>M - 04</b> SUCS: CL % Arena: 0.00 % Limo: 58.90 % Arcilla: 41.10 L. liquido: 42.00 I. plasticidad 22.00			
<b>M - 08</b> SUCS: CL % Arena: 0.47 % Limo: 68.77 % Arcilla: 30.76 L. liquido: 37.03 I. plasticidad 12.61			
<b>M - 10</b> SUCS: CL % Arena: 14.09 % Limo: 49.17 % Arcilla: 36.74 L. liquido: 43.59 I. plasticidad 19.38			
<b>M - 13</b> SUCS: CL % Arena: 6.43 % Limo: 57.48 % Arcilla: 36.09 L. liquido: 46.22 I. plasticidad 24.39			

« Continuación »

<b>M - 18</b>		
SUCS:	CL	
% Arena:	0.00	
% Limo:	66.72	
% Arcilla:	33.28	
L. liquido:	45.00	
I. plasticidad	22.00	
<b>M - 20</b>		
SUCS:	CL	
% Arena:	8.03	
% Limo:	50.96	
% Arcilla:	41.01	
L. liquido:	26.00	
I. plasticidad	8.00	

Figura 49. Resultados de las pruebas de tubificación en muestras CL.

En la Figura 50 se presenta las tres muestras (M-03, M-23 y M-11) del grupo IV cuya clasificación SUCS es SC (arena arcillosa). En el cual se aprecia las muestras compactadas a la densidad máxima obtenida de los ensayos proctor modificado (ASTM-D1557), el agujero inicial de tres milímetros y el efecto del arrastre de las partículas suelo al final del ensayo de tubificación.

MUESTRAS DE SUELOS GRUPO IV - SC			
Características	Compactadas	Agujero inicial de 3 mm	Final de la prueba de tubificación
<b>MUESTRA M - 03</b> SUCS: SC % Arena: 65.46 % Limo: 17.57 % Arcilla: 19.98 L. líquido: 34.00 I. plasticidad 12.00			
<b>MUESTRA M - 23</b> SUCS: SC % Arena: 50.88 % Limo: 29.50 % Arcilla: 19.62 L. líquido: 32.00 I. plasticidad 13.00			
<b>MUESTRA M - 11</b> SUCS: SC % Arena: 51.32 % Limo: 20.22 % Arcilla: 28.46 L. líquido: 34.00 I. plasticidad 17.00			

Figura 50. Resultados de las pruebas de tubificación en muestras SC.

En la Figura 51 se presenta las dos muestras (M-05 y M-06) del grupo V cuya clasificación SUCS es ML (limo inorgánico). En el cual se aprecia las muestras compactadas a la densidad máxima obtenida de los ensayos proctor modificado (ASTM-D1557), el agujero inicial de tres milímetros y el efecto del arrastre de las partículas suelo al final del ensayo de tubificación.

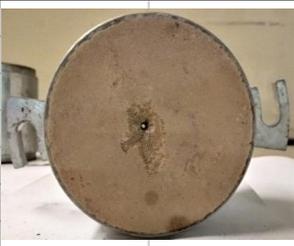
MUESTRAS DE SUELOS GRUPO V - ML			
Características	Compactadas	Agujero inicial de 3 mm	Final de la prueba de tubificación
<b>M - 05</b> SUCS: ML % Arena: 5.00 % Limo: 74.89 % Arcilla: 20.10 L. liquido: 34.07 I. plasticidad 8.00			
<b>M - 06</b> SUCS: ML % Arena: 0.00 % Limo: 74.76 % Arcilla: 25.24 L. liquido: 36.21 I. plasticidad 11.37			

Figura 51. Resultados de las pruebas de tubificación en muestras ML.

En la Figura 52 se presenta las dos muestras (M-07 y M-09) del grupo VI cuya clasificación SUCS es MH (limo inorgánico). En el cual se aprecia las muestras compactadas a la densidad máxima obtenida de los ensayos proctor modificado (ASTM-D1557), el agujero inicial de tres milímetros y el efecto del arrastre de las partículas suelo al final del ensayo de tubificación.

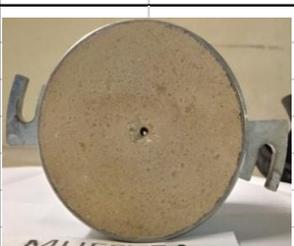
MUESTRAS DE SUELOS GRUPO VI - MH			
Características	Compactadas	Agujero inicial de 3 mm	Final de la prueba de tubificación
<b>M - 07</b> SUCS: MH % Arena: 2.72 % Limo: 43.06 % Arcilla: 54.22 L. liquido: 62.41 I. plasticidad 28.78			
<b>M - 09</b> SUCS: MH % Arena: 12.68 % Limo: 49.34 % Arcilla: 37.98 L. liquido: 56.00 I. plasticidad 25.00			

Figura 52. Resultados de las pruebas de tubificación en muestras MH.

En la Figura 53 se presenta la muestra M-25 del grupo VII cuya clasificación SUCS es SM (arena limosa). En el cual se aprecia la muestra compactada a la densidad máxima obtenida del ensayo proctor modificado (ASTM-D1557), el agujero inicial de tres milímetros y el efecto del arrastre de las partículas suelo al final del ensayo de tubificación.

MUESTRAS DE SUELOS GRUPO VII - SM			
Características	Compactadas	Agujero inicial de 3 mm	Final de la prueba de tubificación
<b>M - 25</b>			
SUCS:	SM		
% Arena:	65.77		
% Limo:	28.24		
% Arcilla:	5.99		
L. líquido:	25.00		
I. plasticidad	3.10		

Figura 53. Resultado de la prueba de tubificación en muestra SM

En la Figura 54 se muestra los tiempos de los ensayos, la presión máxima que soporta de cada muestra analizada, los puntos críticos del inicio de falla y el patrón de comportamiento del ensayo de tubificación, donde el agujero tiende a aumentar de diámetro.

En el Grupo I (CH), Grupo II (CL arenoso), Grupo IV (SC) el tiempo del flujo a través del orificio de las muestras fue de 30 minutos

En el Grupo III (CL) el tiempo del flujo a través del orificio de las muestras fue de 30 minutos excepto de la muestra M-08 cuyo tiempo del flujo a través del orificio es de 15 minutos.

En el Grupo V (ML) el tiempo del flujo a través del orificio de la muestra M-05 y la muestra M-06 fue de 10 y 15 minutos respectivamente.

En el Grupo VI (MH) el tiempo del flujo a través del orificio de la muestra M-07 y la muestra M-09 fue de 30 y 15 minutos respectivamente.

En el Grupo VII (SM) el tiempo del flujo a través del orificio de la muestra M-25 fue de 10 minutos.

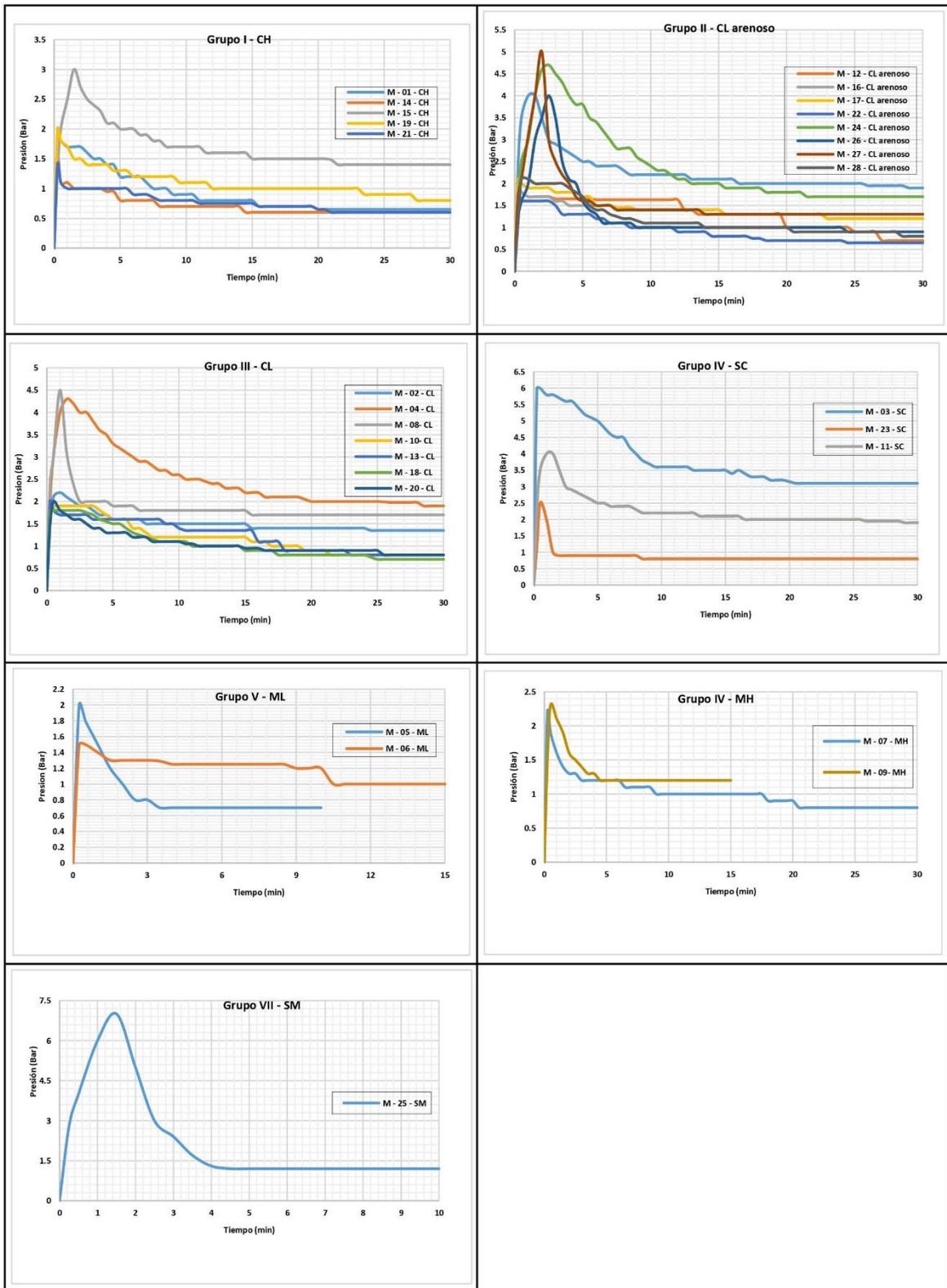


Figura 54. Presión versus tiempo.

#### 4.4 PARÁMETROS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS DE TUBIFICACIÓN

Para cuantificar la susceptibilidad de las muestras al proceso de tubificación se estimó el índice representativo tasa de erosión,  $\tilde{I}_{\text{HET}}$  (Santos *et al.* 2012) el cual depende del esfuerzo cortante crítico ( $\tau_c$ ) y el coeficiente de erosión del suelo ( $C_e$ ).

La estimación del esfuerzo cortante crítico ( $\tau_c$ ) se realizó de forma gráfica y el índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) se estimó con la ecuación 37.

En el Cuadro 23 se muestra los parámetros resultantes de los ensayos de tubificación donde para las muestras con clasificación SUCS CH (arcilla inorgánica de alta plasticidad) el coeficiente de erosión de suelo ( $C_e$ ) presenta una variación de 0.177 a 0.3843 Kg/(s.m<sup>2</sup>) y el índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) que varía de 0.4153 a 0.75129.

Para las muestras con clasificación SUCS CL arenoso (arcilla arenosa de plasticidad media) el coeficiente de erosión de suelo ( $C_e$ ) presenta una variación de 0.1472 a 0.4098 Kg/(s.m<sup>2</sup>) y el índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) que varía de 0.3874 a 0.8320.

Para las muestras con clasificación SUCS CL (arcilla inorgánica de plasticidad media) el coeficiente de erosión de suelo ( $C_e$ ) presenta una variación de 0.1387 a 0.3644 Kg/(s.m<sup>2</sup>) y el índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) que varía de 0.4384 a 0.8579.

Para las muestras con clasificación SUCS SC (arena arcillosa) el coeficiente de erosión de suelo ( $C_e$ ) presenta una variación de 0.1422 a 0.3139 Kg/(s.m<sup>2</sup>) y el índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) que varía de 0.5032 a 0.8471.

Se analizaron dos muestras cuya clasificación SUCS es ML (limo inorgánico), donde el coeficiente de erosión de suelo ( $C_e$ ) de la muestra M-05 presenta el valor de 0.4191 Kg/(s.m<sup>2</sup>) y un índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) de 0.3776 y la muestra M-06 presenta el valor del coeficiente de erosión de suelo ( $C_e$ ) de 0.5624 Kg/(s.m<sup>2</sup>) y el índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) de 0.2499.

Se analizaron dos muestras cuya clasificación SUCS es MH (limo inorgánico), donde el coeficiente de erosión de suelo ( $C_e$ ) de la muestra M-07 presenta el valor de 0.309 Kg/(s.m<sup>2</sup>) y un índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) de 0.5087 y la muestra M-06 presenta el valor del coeficiente de erosión de suelo ( $C_e$ ) de 0.3583 Kg/(s.m<sup>2</sup>) y un índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) de 0.44575.

La muestra SM (arena limosa) presenta el valor de 0.6937 Kg/(s.m<sup>2</sup>) y un índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) de 0.1588.

Cuadro 23. Estimación del índice representativo, tasa de erosión y cortante crítico.

Muestra	Ce	I	$\gamma_d$	Arena	Limo	Arcilla	LL	LP	IP	Diametro final (mm)	$\tau$ crítico (N/m <sup>2</sup> )
	Kg/(s.m <sup>2</sup> )		(gr/cm <sup>3</sup> )	%	%	%	%	%			
<b>Grupo I (CH)</b>											
M-01	0.3734	0.42783	1.841	0.00	56.48	43.52	51.60	24.17	27.43	28.58	235.35
M-14	0.3843	0.41533	1.782	11.40	40.29	48.31	60.32	27.22	33.10	43.91	217.25
M-15	0.1773	0.75129	1.739	0.00	39.80	60.2	76.00	34.00	42.00	13.46	506.91
M-19	0.225	0.64782	1.728	4.16	43.75	52.09	68.77	27.39	41.38	13.19	398.26
M-21	0.3275	0.48479	1.737	9.15	37.87	52.98	77.74	30.94	46.80	29.26	217.25
<b>Grupo II (CL arenoso)</b>											
M-12	0.3945	0.40395	1.932	45.69	30.02	24.29	40.76	23.02	17.74	13.36	253.46
M-16	0.2415	0.61708	1.958	49.24	32.88	17.88	38.10	21.10	17.00	11.10	434.50
M-17	0.2127	0.67223	1.852	43.01	38.66	18.33	36.20	20.30	15.90	17.47	434.50
M-22	0.4098	0.38743	1.918	17.08	47.75	35.17	40.00	21.00	19.00	19.36	235.35
M-24	0.1472	0.83209	1.951	20.98	47.39	31.63	44.00	26.00	18.00	19.86	615.54
M-26	0.2733	0.56336	1.821	39.54	30.79	29.67	40.59	23.87	16.72	21.27	325.87
M-27	0.1891	0.72331	1.818	22.80	54.10	23.10	32.86	22.36	10.50	21.07	470.71
M-28	0.328	0.48413	2.005	29.55	47.72	22.73	29.76	19.25	10.51	33.91	289.67
<b>Grupo III (CL)</b>											
M-02	0.2082	0.68152	1.958	0.00	62.36	37.64	36.00	19.00	17.00	70.27	434.50
M-04	0.1389	0.85730	1.944	0.00	58.90	41.10	42.00	20.00	22.00	20.20	687.96
M-08	0.1387	0.85792	1.846	0.47	68.77	30.76	37.03	24.42	12.61	66.82	615.54
M-10	0.3437	0.46382	1.912	14.09	49.17	36.74	43.59	24.21	19.38	12.89	289.67
M-13	0.3005	0.52216	1.855	6.43	57.48	36.09	46.22	21.83	24.39	42.18	289.67
M-18	0.3644	0.43842	1.938	0.00	66.72	33.28	45.00	23.00	22.00	30.61	253.46
M-20	0.3337	0.47664	1.998	8.03	50.96	41.01	26.00	18.00	8.00	24.30	289.67
<b>Grupo IV (SC)</b>											
M-03	0.152	0.81816	2.078	65.46	17.56	16.98	34.00	22.00	12.00	9.94	1086.20
M-23	0.3139	0.50321	1.947	50.88	29.50	19.62	32.00	19.00	13.00	48.01	289.67
M-11	0.1422	0.84710	2.025	51.32	20.22	28.46	34.00	17.00	17.00	24.90	687.96
<b>Grupo V (ML)</b>											
M-05	0.4191	0.37768	1.949	5.01	74.89	20.10	34.07	26.07	8.00	63.52	217.25
M-06	0.5624	0.24995	1.762	0.00	74.76	25.24	36.21	24.84	11.37	83.89	144.83
<b>Grupo VI (MH)</b>											
M-07	0.3099	0.50878	1.751	2.72	43.06	54.22	62.41	33.63	28.78	14.19	289.67
M-09	0.3583	0.44575	1.689	12.68	49.34	37.98	56.00	31.00	25.00	100.48	217.25
<b>Grupo VII (SM)</b>											
M-25	0.6937	0.15883	2.168	65.77	28.24	5.99	25.00	21.90	3.10	82.90	114.83

La estimación de los índices representativos la tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) y la tensión de corte crítico ( $\tau_c$ ) se realizaron para cada muestra de suelos el cual se muestra en la Figura 55.

La tensión de corte crítico para las muestras CH varía de 217.25 a 506.91 N/m<sup>2</sup>, en las muestras CL arenoso varía de 235.35 a 687.96 N/m<sup>2</sup>, en las muestras CL varía de 253.46 a 687.96 N/m<sup>2</sup>, en las muestras SC presentan valores de 286.67 a 1086.2 N/m<sup>2</sup>, en las dos muestras ML presentan valores de 217.25 y 114.83 N/m<sup>2</sup>, en las dos muestras MH presentan

valores de 217.25 y 289.67 N/m<sup>2</sup>, en la muestra SM el valor de la tensión al corte crítico es 114.83 N/m<sup>2</sup>.

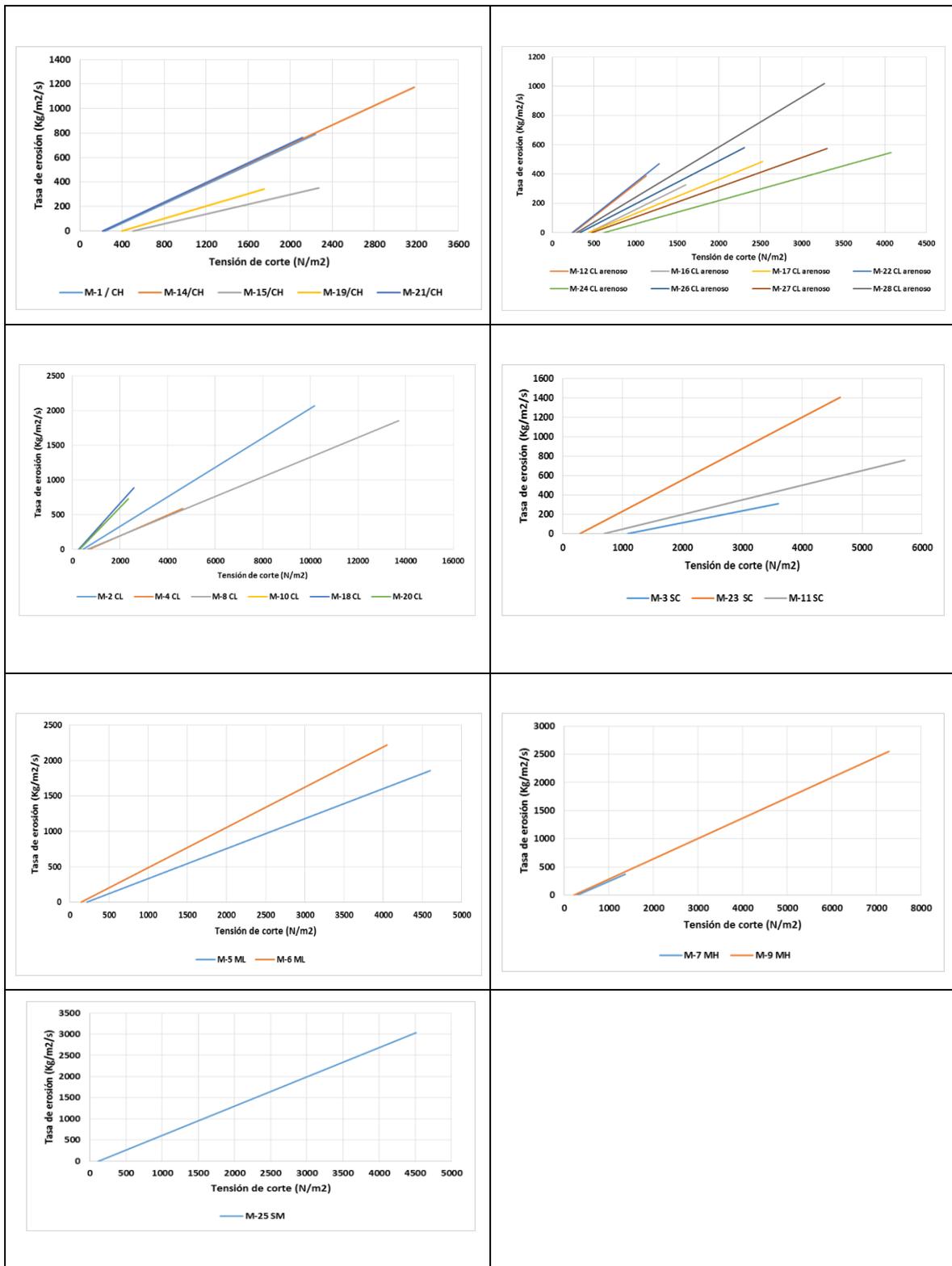


Figura 55. Estimación del índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) y la tensión de corte crítico ( $\tau_c$ ).

#### 4.5 DINÁMICA DEL PROCESO DE LA TUBIFICACION

Se obtuvo una serie de datos de los ensayos realizados a las 28 muestras, el cual se agruparon en siete tipos, Grupo I CH (arcilla inorgánica de alta plasticidad), Grupo II CL arenoso (arcilla arenosa de plasticidad media), Grupo III CL (arcilla inorgánica de plasticidad media), Grupo IV SC (arena arcillosa), Grupo V ML (limo inorgánico), Grupo VI MH (limo inorgánico) y Grupo VII SM (arena limosa).

Los resultados de los ensayos muestran que los siete grupos de suelos presentan distinta composición granulométrica cuya variación se aprecia en los porcentajes de arena, limo, arcilla e índice de plasticidad.

En la Figura 56 se muestra la dinámica del proceso de tubificación, el agujero inicial de todas las muestras fue de tres milímetros de diámetro, por donde ingresa un caudal. La tubificación se origina por el flujo turbulento y las partículas de suelo es arrastrado originando un incremento del diámetro del agujero. En el Anexo 6 se muestra los resultados de los 28 suelos analizados.

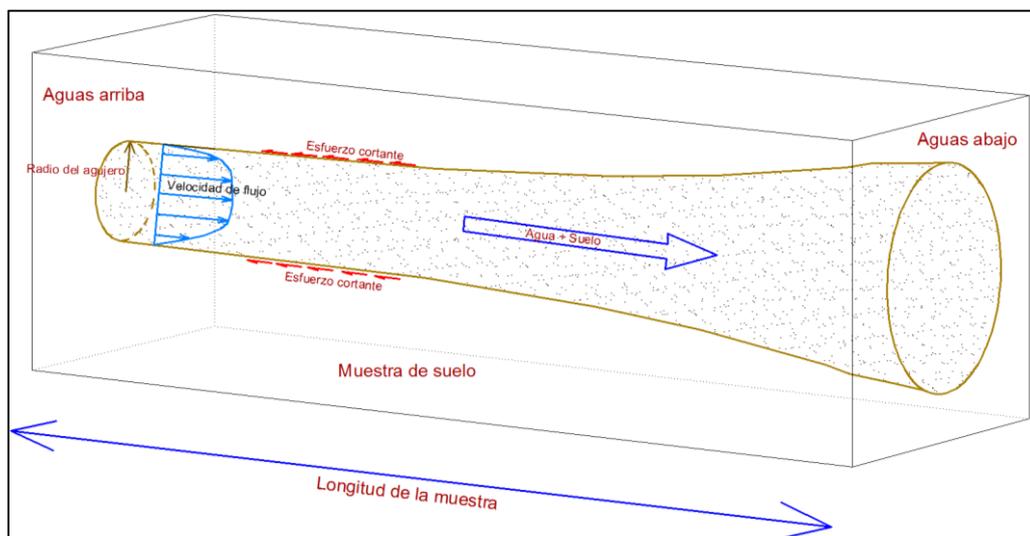


Figura 56. Dinámica del proceso de tubificación

Los suelos con mayor arrastre de partículas presentan más del 40 por ciento de limo en la composición granulométrica excepto la muestra M-25 cuya clasificación SUCS es SM (arena limosa) con 28.24 por ciento de limo y con un índice de plasticidad de 3.10 por ciento.

Los suelos más vulnerables al proceso de tubificación son los que presentan altos contenidos de limo. Esta tendencia está de acuerdo con los resultados de las pruebas de tubificación

realizadas, el cual se muestra en la Figura 47 para las muestras CH, en la Figura 48 para las muestras CL arenosos, en la Figura 49 para las muestras CL, en la Figura 50 para las muestras SC, en la Figura 51 para las muestras ML, en la Figura 52 para las muestras MH y en la Figura 53 para la muestra SM.

Los suelos que presentan arenas limpias, finas, uniformes (índice de plasticidad menor a seis por ciento) bien compactadas presentan baja resistencia a la tubificación y las arcillas muy plásticas (índice de plasticidad mayor a quince por ciento), bien compactadas presentan gran resistencia a la tubificación (Juárez y Rico 2011). Sin embargo las muestras arcillosas con índice de plasticidad mayor a 15 por ciento y con el porcentaje de limo mayor a 40 por ciento son más susceptibles a sufrir tubificación.

Los parámetros de densidad seca máxima obtenidos de los ensayos de compactación no tienen un comportamiento o tendencia para aumentar la resistencia a la erosión debido a que la tubificación está influenciado por las características granulométricas de los suelos (porcentajes limo) e índice de plasticidad.

Las pruebas de tubificación se realizaron en su mayoría en un tiempo de 30 minutos en el cual se considera que el esfuerzo cortante aplicado al comienzo de la prueba era inferior al esfuerzo cortante crítico para las condiciones de compactación de cada muestra. En el Cuadro 24 se detalla el tiempo de los ensayos de tubificación.

Cuadro 24. Duración de los ensayos de tubificación en cada muestra de suelo.

Grupo	Tipo de suelos	Tiempo de ensayo		
		10 min	15 min	30 min
		<b>Muestra</b>		
I	CH			M-01, M-14, M-15, M-19 y M-21
II	CL arenoso			M-12, M-16, M-17, M-22, M-24, M-26,
III	CL		M-15	M-02, M-04, M-10, M-13, M-18 y M-20
IV	SC			M-03, M-23 y M-11
V	ML	M-05	M-06	
VI	MH		M-09	M-07
VII	SM	M-25		

En la Figura 57 se muestra la correlación lineal entre los registros del diámetro promedio final de cada muestra y el material de arrastre.

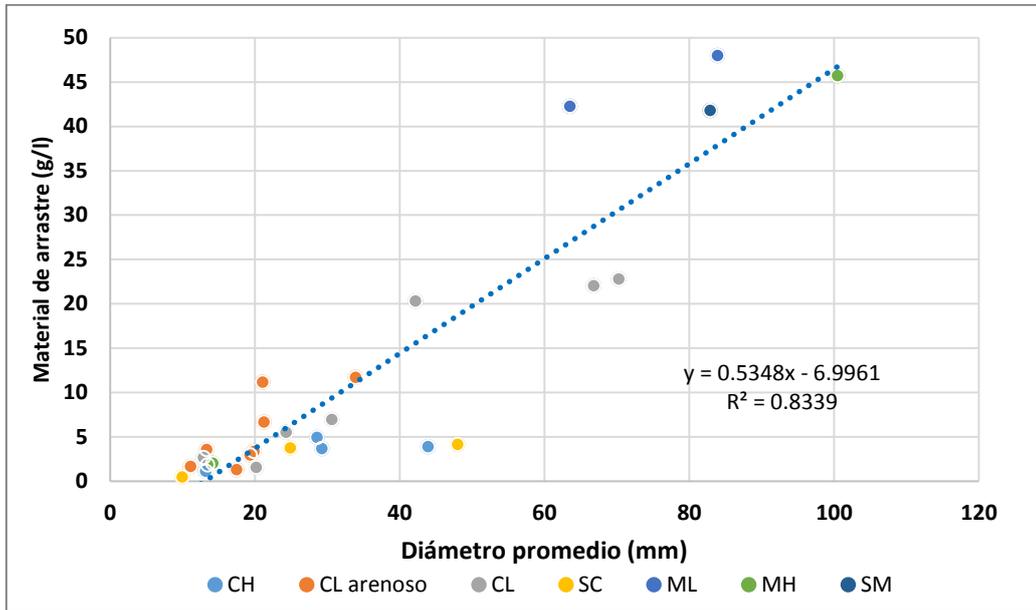


Figura 57. Relación del diámetro promedio final en función con el material de arrastre.

En la Figura 58 se muestra la variación del material de arrastre en cada tipo de suelo, donde se aprecia que las muestras con clasificación SUCS ML, MH y SM han registrado mayor material de arrastre ello indica que son más susceptibles a la tubificación.

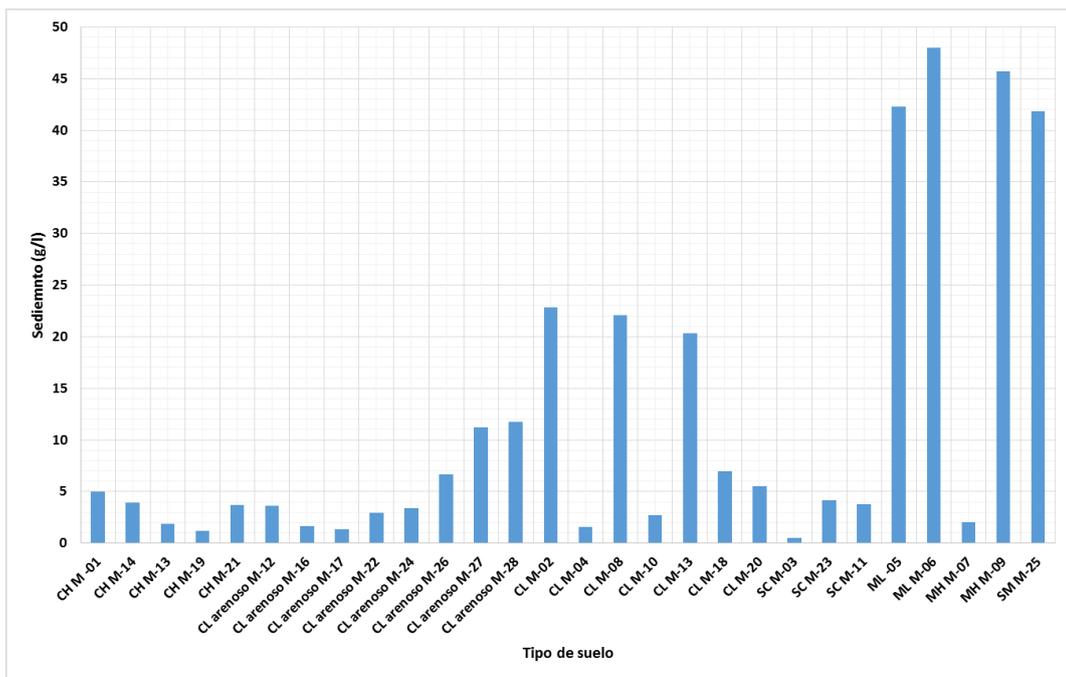


Figura 58. Relación del diámetro promedio final en función con el material de arrastre.

#### 4.6 COMPARACIÓN DEL PROCESO DE TUBIFICACIÓN ENTRE LOS 7 TIPOS DE SUELOS

De acuerdo a los parámetros obtenidos de los ensayos en laboratorio (granulometría por hidrómetro, límite líquido, límite de plástico, proctor modificado, gravedad específica de sólidos y pruebas de tubificación) y la estimación de parámetros (coeficiente de erosión de suelo, esfuerzo cortante crítico e índice de tasa de erosión) obtenidos con ecuaciones planteadas en la metodología. Estos resultados fueron comparados para entender la susceptibilidad a la tubificación de los suelos experimentados.

En Figura 59 se muestra la correlación del índice representativo de tasa de erosión ( $\tilde{I}$ ) y el cortante crítico ( $\tau_c$ ) donde la susceptibilidad a la tubificación está influenciada por el índice de tasa de erosión y el cortante crítico que es un parámetro relacionado con la densidad seca máxima obtenida de los ensayos de compactación.

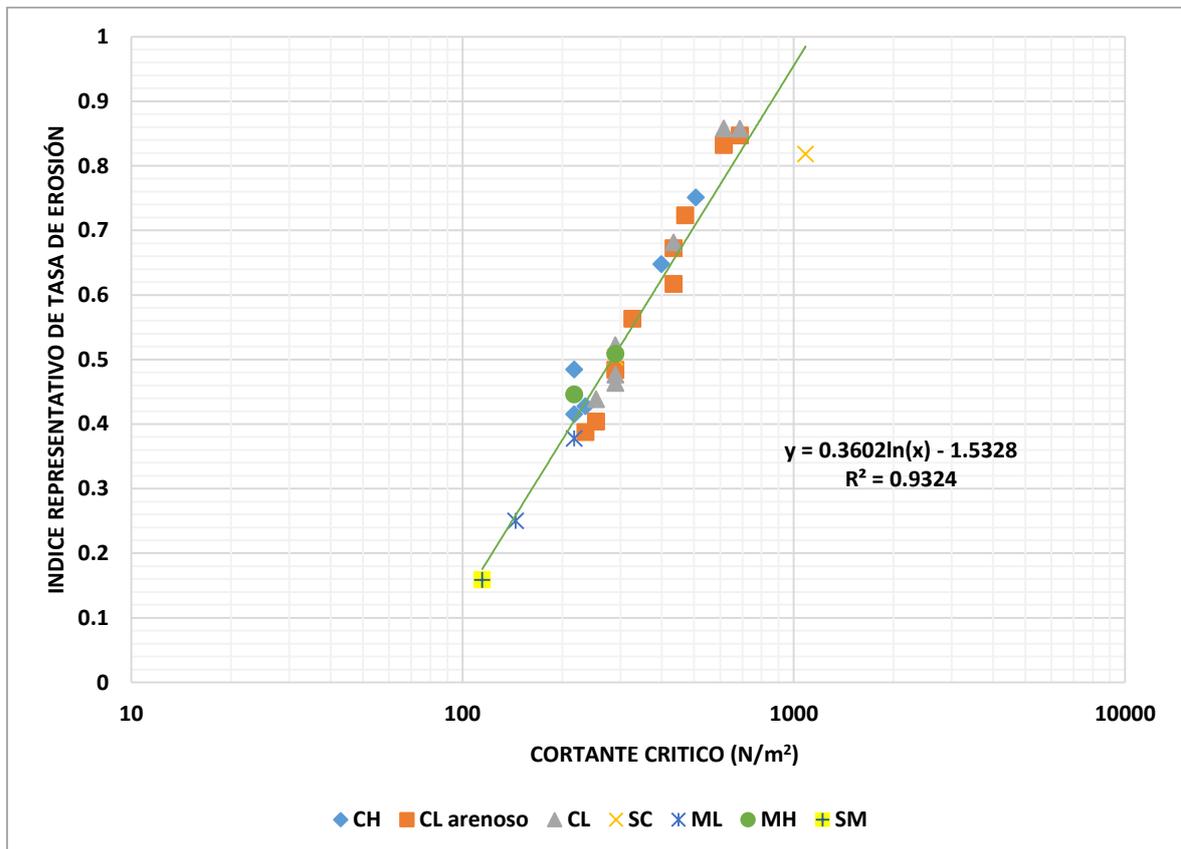


Figura 59. Relación del índice de tasa de erosión con el cortante crítico.

En el Cuadro 25 se muestra el promedio del índice representativo de tasa de erosión en base a los resultados obtenidos de los ensayos de tubificación de las 28 muestras (CH, CL arenoso,

CL, SC, ML, MH y SM) el promedio del índice representativo de tasa de erosión ( $\bar{I}$ ) presenta una tendencia, el cual permitió clasificar en siete grupos de susceptibilidad a la tubificación.

Cuadro 25. Promedio del Índice representativo de tasa de erosión de cada grupo analizado.

SUCS	Promedio del Índice representativo de tasa de erosión (I)
SM	0.1588
ML	0.3138
MH	0.4773
CH	0.5454
CL	0.6140
CL arenoso	0.6145
SC	0.6607

El comportamiento de los suelos analizados susceptibles a la tubificación se puede cuantificar con el promedio del índice representativo de tasa de erosión de cada grupo cuyos valores para las condiciones realizadas varían de 0.1588 a 0.6607 siendo este parámetro adimensional el cual se presenta en la Figura 60.

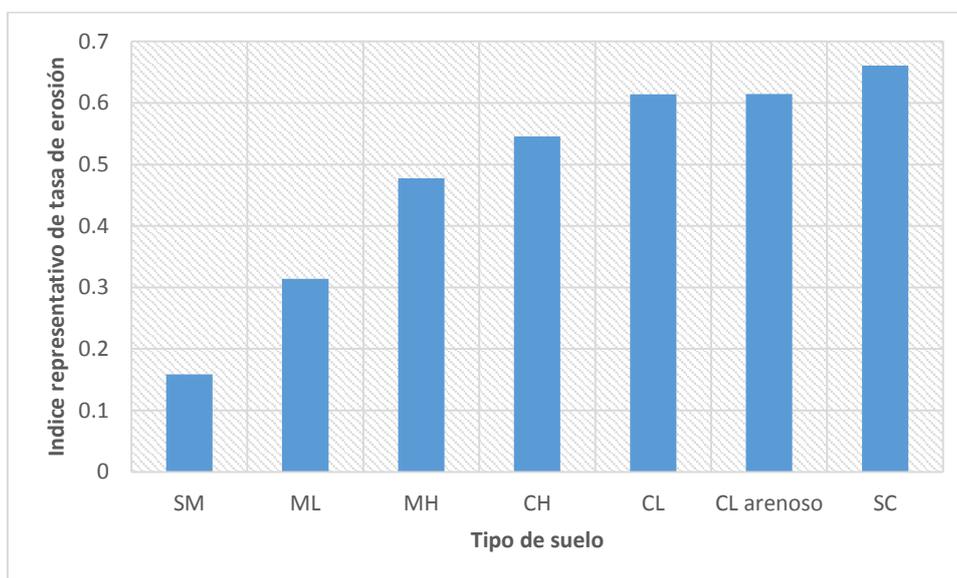


Figura 60. Índice representativo de tasa de erosión para cada tipo de suelo.

En el Cuadro 26 se muestra los valores promedio del índice representativo de tasa de erosión ( $\bar{I}$ ) de cada grupo cuyas características se puede describir (Luthi 2011) como extremadamente rápida para la muestra SM, muy rápida para las muestras ML, moderadamente rápida para las muestras MH y CH y modernamente lenta para las muestras CL, CL arenoso y SC.

Cuadro 26. Características del comportamiento de los suelos.

<b>GRUPO</b>	<b>SUCS</b>	<b>Promedio del Índice representativo de tasa de erosión (<math>\bar{I}</math>)</b>	<b>Descripción</b>
VII	SM	0.1588	extremadamente rápida
V	ML	0.3138	muy rápida
VI	MH	0.4773	moderadamente rápida
I	CH	0.5454	moderadamente rápida
III	CL	0.6140	moderadamente lenta
II	CL arenoso	0.6145	moderadamente lenta
IV	SC	0.6607	moderadamente lenta

## V. CONCLUSIONES

- Se logró diseñar un equipo para los ensayos de tubificación, en base a los métodos para evaluar la erosión en suelos cohesivos desarrollados por Wan y Fell (Santos *et al.* 2012) y en métodos estándar para identificación de suelos dispersivos (Norma ASTM – D4647), el cual permitió cuantificar parámetros como la presión máxima y mínima, el caudal de ingreso, el diámetro final del espécimen y el material de arrastre de los suelos cohesivos y granulares, y que a partir de ello ha sido posible establecer una metodología para el ensayo el cual combina la selección del material y el tiempo de ensayo, para posteriormente clasificarlos de acuerdo a la susceptibilidad a la tubificación. Siendo este equipo una alternativa para ensayar y seleccionar los suelos utilizados en la construcción de presas, siendo de operación sencilla y rápida.
- La tubificación ocurre en suelos sin cohesión (arena limosa) o de baja plasticidad (con índice de plasticidad menores a 6 por ciento) y en los suelos cohesivos con un índice de plasticidad mayor a 15 por ciento y con un porcentaje de limo mayor a 40 por ciento, compactadas con la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad obtenida de los ensayos de compactación.
- Los factores significativos que influyen en la tubificación son la máxima densidad seca obtenida con la energía de compactación del ensayo de proctor modificado, el porcentaje de limo que presenta la muestra en la composición granulométrica y el índice de plasticidad el cual se define con los valores del límite líquido y el límite plástico, estos dos últimos factores corresponden a la naturaleza del suelo.
- Los resultados experimentales obtenidos proporcionan evidencia de la dependencia de dichos factores en la determinación del esfuerzo cortante crítico e índice representativo de tasa de erosión el cual permite caracterizar la susceptibilidad de los suelos a la tubificación como extremadamente rápida para la muestra SM, muy rápida para las muestras ML, moderadamente rápida para las muestras MH y CH y modernamente lenta para las muestras CL, CL arenoso y SC cuyos valores para las condiciones realizadas varían de 0.15 a 0.66 siendo este parámetro adimensional.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Dado que la tubificación es una de las causas principales de falla en presas de tierra se recomienda utilizar el procedimiento planteado en análisis experimental de la presente investigación, ya que de esta manera sería una forma de conocer las características y el comportamiento de los suelos seleccionados para la construcción de presas.
- Continuar con los procedimientos expuestos en la presente investigación con un mayor número de muestras por cada tipo de suelos para determinar las características del comportamiento en el proceso de tubificación.
- Se recomienda extender la investigación realizando variaciones de los parámetros de compactación y la carga hidráulica en el proceso experimental.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM (American Society of Testing Materials). 2006. Test method for dispersive characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test. D6572. Sección 4. West Conshohocken, EE.UU., Prior. Abr. V 04.09, p. 795-799

ASTM (American Society of Testing Materials). 2005. Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer. D4221. Sección 4. West Conshohocken, EE.UU., Prior. Abr. V 04.08, p. 549-551

ASTM (American Society of Testing Materials). 2006. Standard Test method for Identification and Classification of dispersive of Clay Soils by the Pinhole Test. D4647. Sección 4. West Conshohocken, EE.UU., Prior. Abr. V 04.09, p. 832-842

ASTM (American Society of Testing Materials). 2005. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)). D1557. Sección 4. West Conshohocken, EE.UU., Prior. Abr. V 04.08.

ASTM (American Society of Testing Materials). 2005. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)) D698. Sección 4. West Conshohocken, EE.UU., Prior. Abr. V 04.08.

Autoridad Nacional del Agua. 2015. Inventarios de presas en el Perú. 1 ed. Lima, Perú. p. 23, 179-181.

Autoridad Nacional del Agua. 2017. Normas y reglamentos de seguridad de presas en el Perú. Lima. p. 12.

Berry, PL; Reid D. 1993. Mecánica de suelos. 1 ed. Santa Fé, Bogotá. McGraw Hill. p. 12, 42.

Bowles, JE. 1982. Propiedades geofísicas de los suelos. 1 ed. Bogotá. McGraw Hill. p. 41

Bowles, JE. 1981. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. 1 ed. Bogotá. McGraw Hill. p. 64.

Crespo, V. C. 2008. Mecánica de suelos y cimentaciones. 6 ed. México. Limusa. p. 21, 22.

- Das, BM. 2001. Fundamentos de ingeniería geotécnica. 4 ed. México, International Thomson.
- Fell, R. Fry, JJ. 2007. Internal erosion of dams and their foundations. 1 ed. Francia. CRC Press. p. 8, 10
- Fell, R. MacGregor, P. Stapledon, D. Bell, G. 2005. Geotechnical engineering of dams. 1 ed. London. CRC Press. p.550-554
- Gallegos, G. Escalera, ME; Romo, JM; Maldonado, E; Rojas, E. 2012. Problemas ocasionados por los suelos dispersivos en las estructuras de suelo. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. Consultado 10 de junio de 2018. Disponible en [http://www.smig.org.mx/admarticulos/eventos/19\\_xxvii\\_reunion\\_nacional\\_de\\_ingenieria\\_geotecnica/36\\_reunion\\_nacional/77\\_mejoramiento\\_del\\_terreno/a4gafg\\_1.doc](http://www.smig.org.mx/admarticulos/eventos/19_xxvii_reunion_nacional_de_ingenieria_geotecnica/36_reunion_nacional/77_mejoramiento_del_terreno/a4gafg_1.doc). p.3, 4
- Flores, B. R. 2000 Flujo de agua a través de suelos. 4 ed. México. Asociación Mexicana de Hidráulica – Instituto de Tecnología del Agua.
- González, L; Ferrer, M; Ortuño, L; Oteo, C. 2002. Ingeniería Geológica. 1 ed. Madrid. Pearson Educación. p. 110, 111.
- Jiménez, S. JA; De Justo, A. JL. 1975. Geotécnica y Cimientos I: propiedades de los suelos y de las rocas. 2 ed. Madrid, España. Rueda. p. 136-138.
- Juárez, B. E; Rico, R. A. 2011. Mecánica de suelos Tomo 2: teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos. 5 ed. México. Limusa. p. 606, 607.
- Juárez, B. E; Rico, R. A. 2012. Mecánica de suelos Tomo 3: Flujo de agua en suelos. 5 ed. México. Limusa. p. 4-7.
- Lachouette, D; Golay, F; Bonelli, S. 2008. One-dimensional modeling of piping flow erosion. Comptes Rendus Mécanique. 336: 731-736.
- Lambe, WT; Whitman, RV. 1976. Mecánica de suelos. 2 ed. México. Limusa. p. 279.
- Liapichev, Y. 1984. Presa de tierra y enrocado. Lima. Asociación Peruana de Graduados en la URSS. p. 90.
- Li, X; Arroyo, V. 2011. Impacto de fuerzas de filtración y tubificación retrógrada a la inestabilidad de talud y erosión hídrica. Consultado 29 de septiembre de 2018. Disponible en <http://www.revista.unam.mx/vol.12/num2/art14/index.html>.

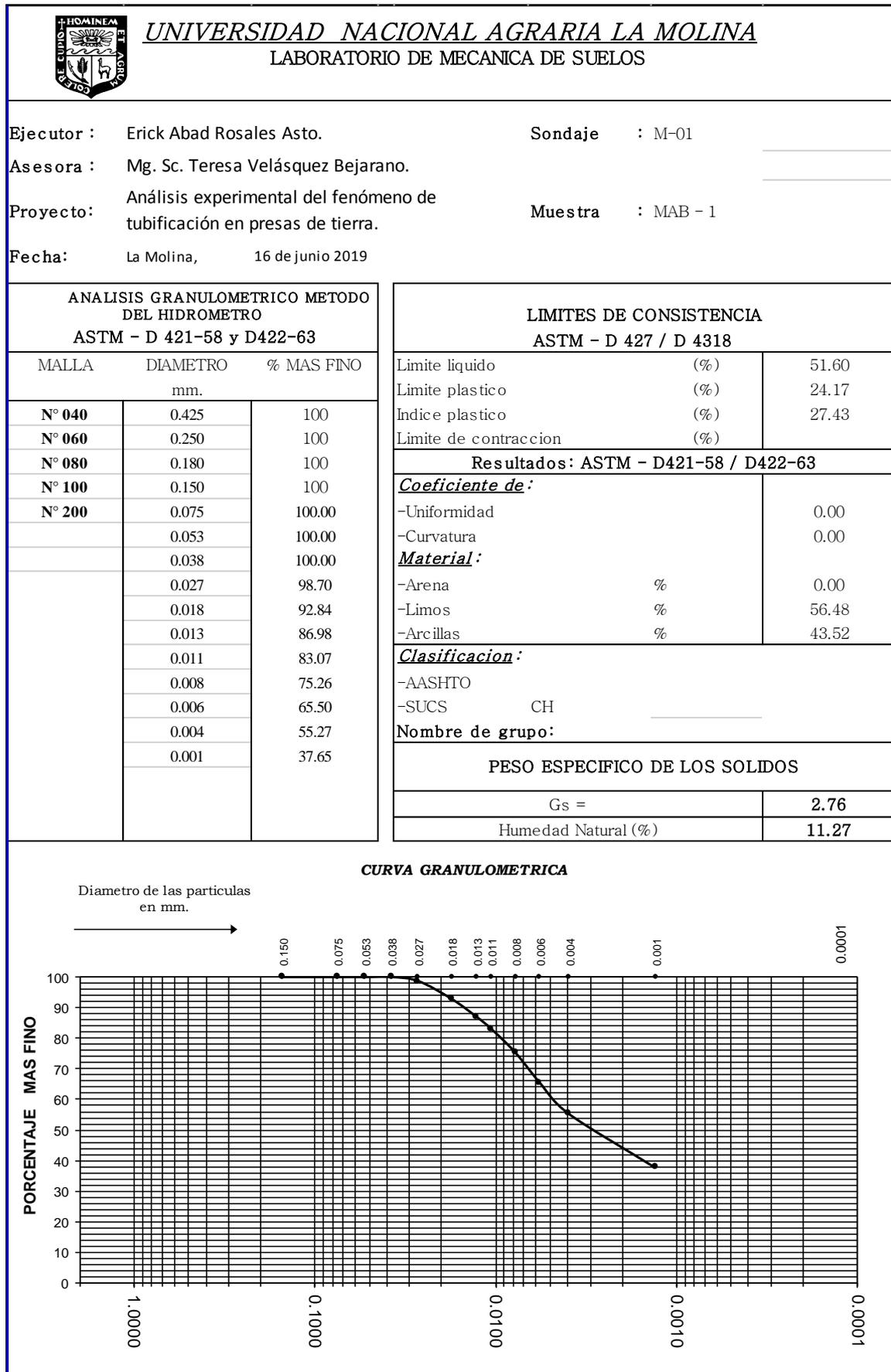
- Luthi, M. 2011. Tesis: “A modified hole erosion test (HET-P) to study erosion characteristics of soil” p. 5-11, 27.
- Marsal, RJ; Reséndiz, D. 1975. Presas de tierra y enrocado. 1 ed. México. Limusa. p. 89, 119.
- Miyazaki, T. 2006. Water flow in soils. 2 ed. London. CRC Press. p. 7.
- Nakano, R. 1991. Desing of fill type dams. Gifu University. p. 44.
- Novak, P; Moffat, AIB; Nalluri, C. 2001. Estructuras hidráulicas. 2 ed. Bogotá. McGraw Hill. p. 10, 11.
- Obilinovic, H. 1981 Reflexiones acerca del problema de arcillas dispersivas en el diseño de presas. Consultado el 7 de noviembre de 2018. Disponible en <https://revistas.uchile.cl/index.php/RIDIEM/article/view/38817/45399>
- Osorio, X. 2017 tesis: “Evaluación del fenómeno de erosión interna en presas de tierra: una revisión a las presas de Antioquia” p. 7, 11.
- Palomino, L. 2017 Tesis: Determinación de la energía de compactación en función de la maximización de la resistencia de una arcilla – caso núcleo presa Tintaypampa. p. 74.
- Rico, RA. Del Castillo, H. 2000. La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas volumen I. 1 ed. México. Limusa. p.297
- Sowers, GB. Sowers, GF. 1986. Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones. 1 ed. México. Limusa. p. 223, 224.
- Santos, R; Cladeira, L; Maranha; E. 2012. Influence of compaction in the erodability of a partially saturated soil due to a concentrated leak (125):5-40
- Terzaghi, K. Peck, BR. 1973. Mecánica de suelos en la ingeniería práctica. 2 ed. Barcelona. El Ateneo. p. 196.
- United States Department Of The Interior. Bureau Of Reclamation. 1966. Diseño de Pequeñas Presas. 1 ed. México. p 97-98.
- Urzúa, F. 2017. Tesis: “Escurrimiento de fluidos newtonianos y no newtonianos en medios porosos”

Velásquez, B. TO. 2014. Diseño de presas de tierra y enrocado en el Perú: Historia, perspectiva y tendencias. 1 ed. Lima. Unalm Fondo Editorial.

Villaseñor, C. J. 1978. Proyecto de obras hidráulicas. 1 ed. Chapingo, México. Universidad Autónoma Chapingo. p. 36.

## **VIII. ANEXO**

ANEXO 1.- Resultados de ensayos granulométricos – hidrómetro.





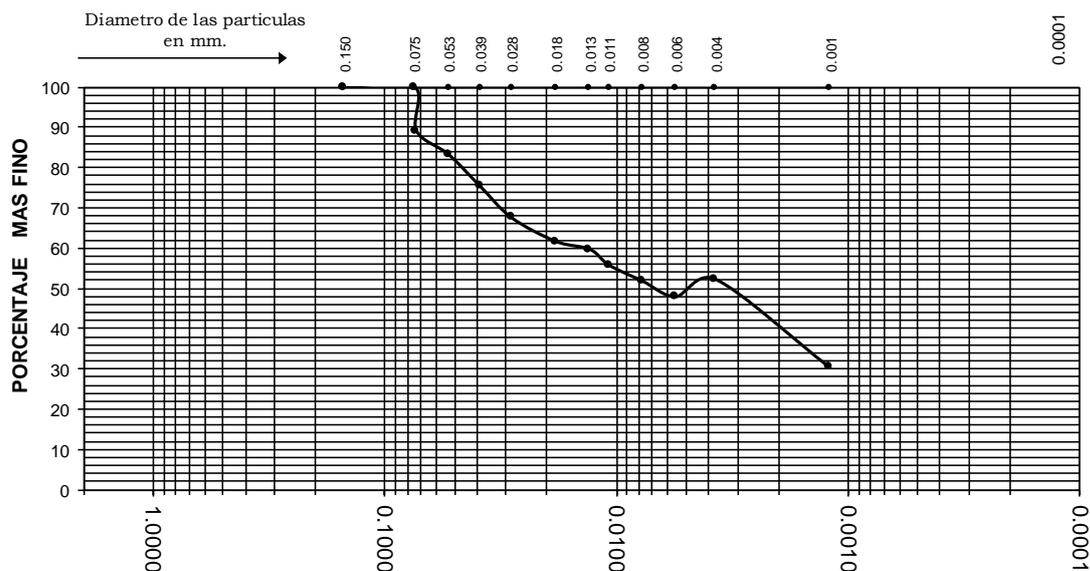
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

Ejecutor : Erick Abad Rosales Asto. Sondaje : M-02  
 Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano  
 Proyecto: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL FENÓMENO DE TUBIFICACIÓN EN PRESAS DE TIERRA. Muestra : MAB - 2  
 Fecha: La Molina, 15 de junio de 2019

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	100
	0.073	89.04
	0.053	83.17
	0.039	75.34
	0.028	67.51
	0.018	61.64
	0.013	59.68
	0.011	55.77
	0.008	51.86
	0.006	47.94
	0.004	52.25
	0.001	30.33

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite liquido (%)	36.00
Limite plastico (%)	19.00
Indice plastico (%)	17.00
Limite de contraccion (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	0.00
-Limos %	62.36
-Arcillas %	37.64
<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>	
Gs =	2.75
Humedad Natural (%)	10.66

**CURVA GRANULOMETRICA**





**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

Solicitante: Erick Abad Rosales Asto.

Sondaje : M-3

Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano

Proyecto: Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.

Muestra : MAB - 3

Fecha: La Molina, 12 de junio de 2019

**ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO  
ASTM - D 421-58 y D422-63**

MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	34.54
	0.070	30.60
	0.050	28.63
	0.036	26.66
	0.023	22.73
	0.016	22.73
	0.013	20.76
	0.009	20.76
	0.007	20.76
	0.004	18.31
	0.001	16.31

**LIMITES DE CONSISTENCIA  
ASTM - D 427 / D 4318**

Limite liquido (%)	34.00
Limite plastico (%)	22.00
Indice plastico (%)	12.00
Limite de contraccion (%)	

**Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63**

<b>Coeficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	65.46
-Limos %	17.56
-Arcillas %	16.98

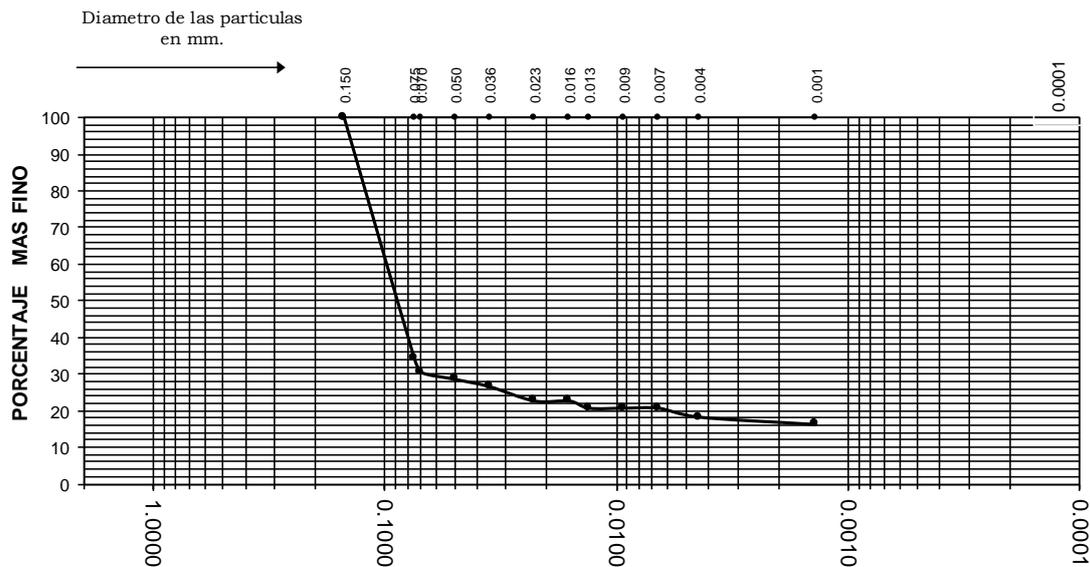
<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	SC

**Nombre de grupo:**

**PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS**

Gs =	2.72
Humedad Natural (%)	11.28

**CURVA GRANULOMETRICA**



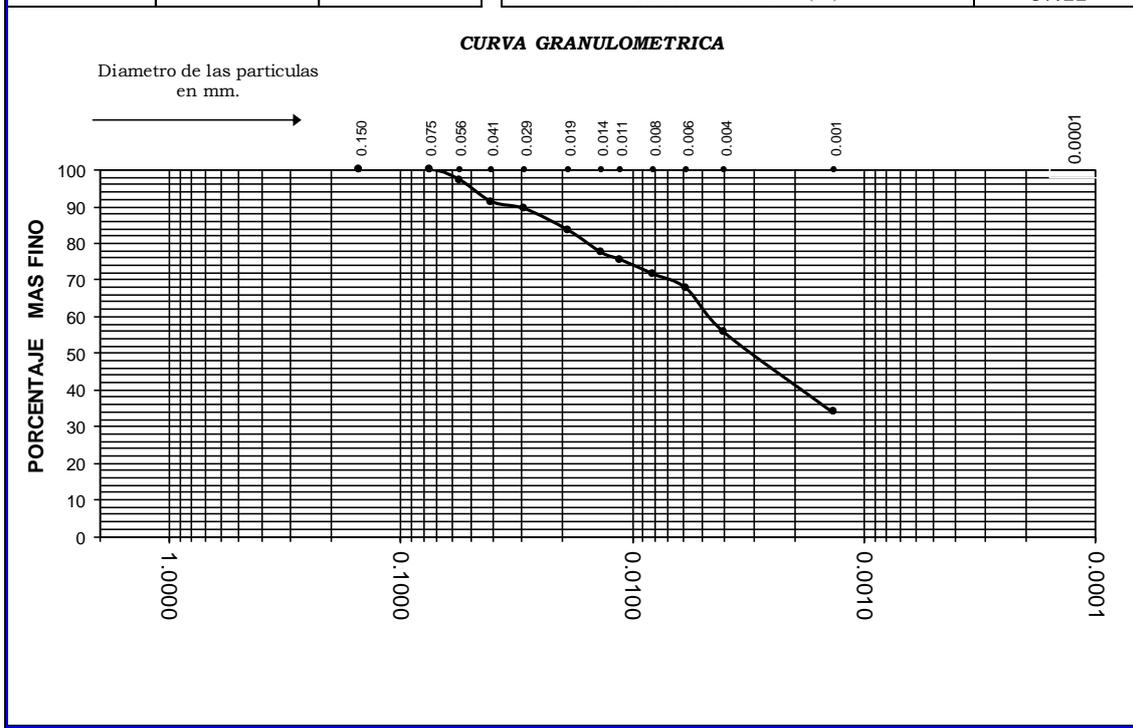


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

Solicitante: Erick Abad Rosales Asto. Sondaje : M-04  
 Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano  
 Proyecto: Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. Muestra : MAB - 4  
 Fecha: La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	100.00
	0.056	97.16
	0.041	91.26
	0.029	89.29
	0.019	83.38
	0.014	77.47
	0.011	75.50
	0.008	71.56
	0.006	67.63
	0.004	55.65
	0.001	33.83

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318		
Limite liquido (%)		42.00
Limite plastico (%)		20.00
Indice plastico (%)		22.00
Limite de contraccion (%)		
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>		
<b>Coefficiente de:</b>		
-Uniformidad		0.00
-Curvatura		0.00
<b>Material:</b>		
-Arena	%	0.00
-Limos	%	58.90
-Arcillas	%	41.10
<b>Clasificacion:</b>		
-AASHTO		
-SUCS	CL	
<b>Nombre de grupo:</b>		
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>		
Gs =		<b>2.72</b>
Humedad Natural (%)		<b>37.22</b>



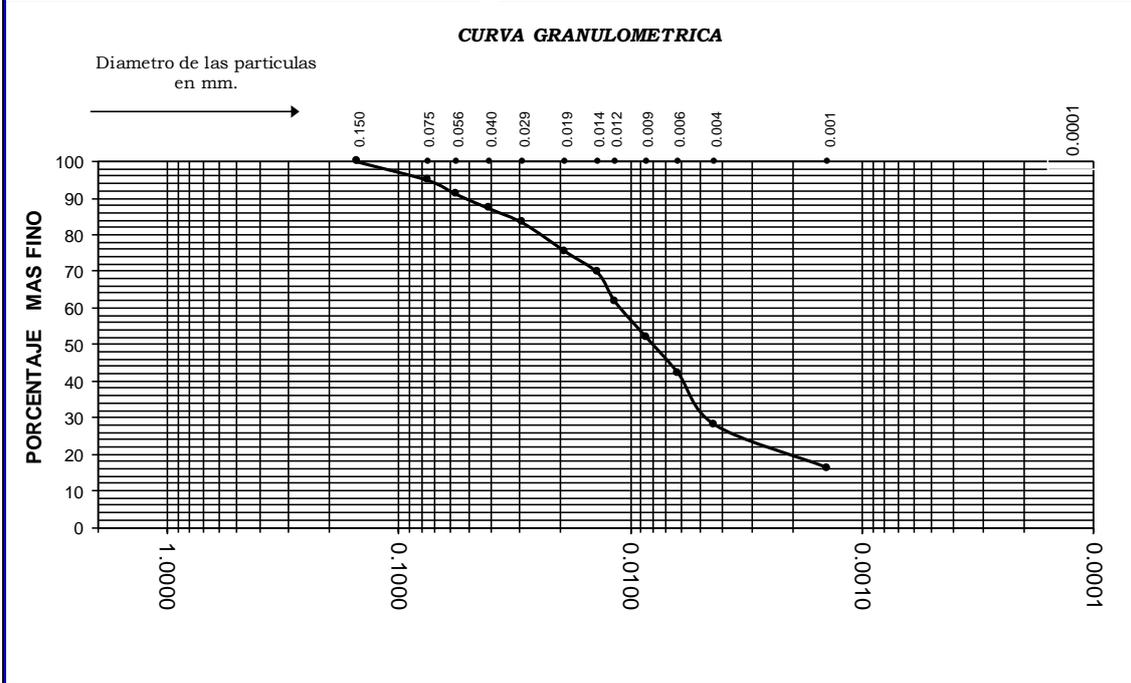


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

Solicitante: Erick Abad Rosales Asto. Sondaje : M-05  
 Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano  
 Proyecto: Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. Muestra : MAB - 5  
 Fecha: La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	94.99
	0.056	91.07
	0.040	87.16
	0.029	83.25
	0.019	75.42
	0.014	69.55
	0.012	61.72
	0.009	51.94
	0.006	42.15
	0.004	27.98
	0.001	16.16

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite liquido (%)	34.07
Limite plastico (%)	26.07
Indice plastico (%)	8.00
Limite de contraccion (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	5.01
-Limos %	74.89
-Arcillas %	20.10
<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	ML
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>	
Gs =	2.75
Humedad Natural (%)	11.62



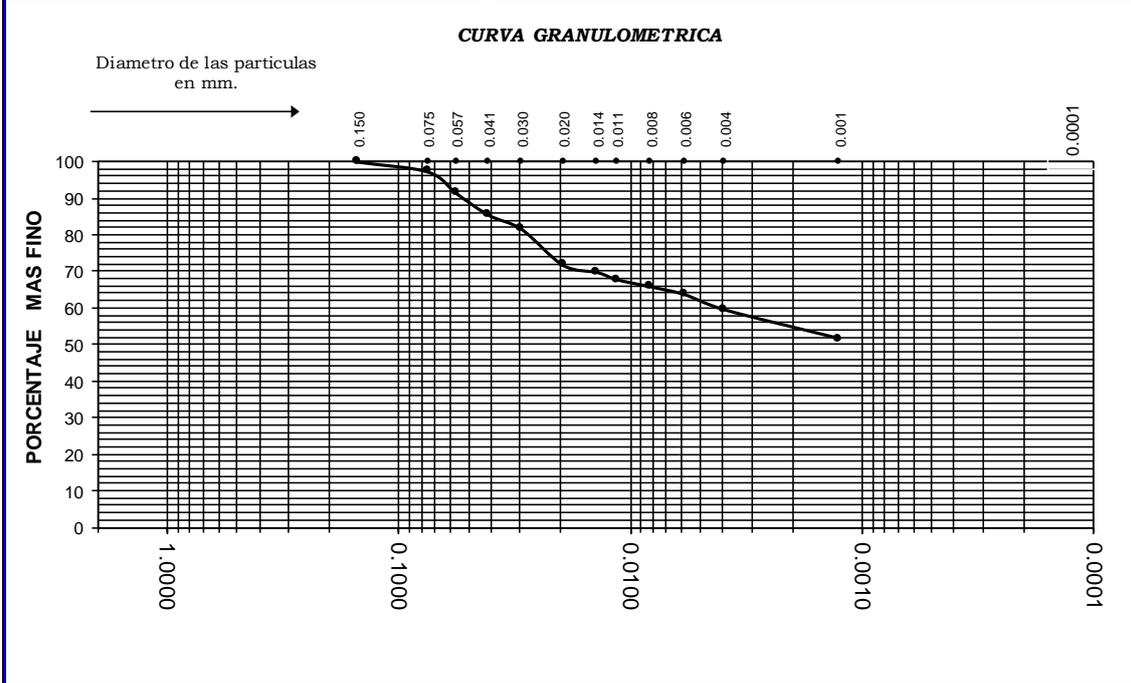




**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

Solicitante : Erick Abad Rosales Asto. Sondaje : M-07  
 Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano  
 Proyecto : Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. Muestra : MAB - 7  
 Fecha : La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO		
N° 040	0.425	100	Limite liquido (%)	62.41
N° 060	0.250	100	Limite plastico (%)	33.63
N° 080	0.180	100	Indice plastico (%)	28.78
N° 100	0.150	100	Limite de contraccion (%)	
N° 200	0.075	97.28	<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
	0.057	91.37	<b>Coefficiente de:</b>	
	0.041	85.47	-Uniformidad	0.00
	0.030	81.53	-Curvatura	0.00
	0.020	71.68	<b>Material:</b>	
	0.014	69.71	-Arena %	2.72
	0.011	67.74	-Limos %	43.06
	0.008	65.77	-Arcillas %	54.22
	0.006	63.65	<b>Clasificacion:</b>	
	0.004	59.47	-AASHTO	
	0.001	51.60	-SUCS	MH
			<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>				
Gs =				<b>2.72</b>
Humedad Natural (%)				<b>26.82</b>



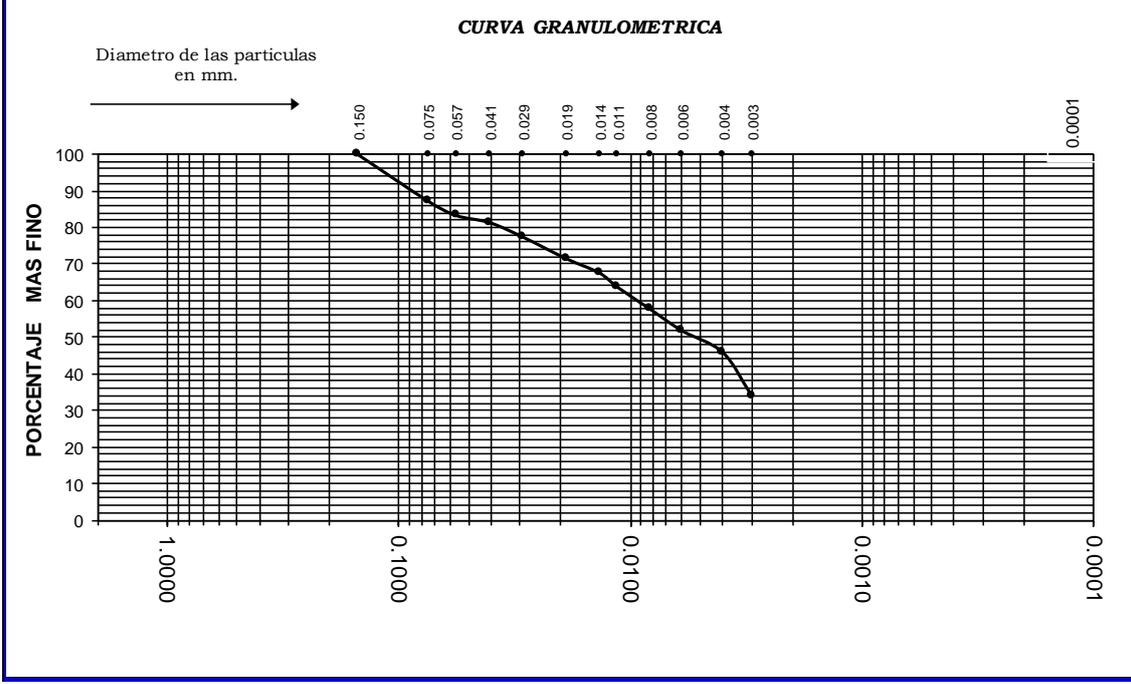




**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

Solicitante : Erick Abad Rosales Asto. Sondaje : M-09  
 Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano  
 Proyecto : Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. Muestra : MAB - 9  
 Fecha : La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO		
N° 040	0.425	100	Limite liquido (%)	53.00
N° 060	0.250	100	Limite plastico (%)	31.00
N° 080	0.180	100	Indice plastico (%)	22.00
N° 100	0.150	100	Limite de contraccion (%)	
N° 200	0.075	87.32	<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
	0.057	83.38	<b><u>Coefficiente de:</u></b>	
	0.041	81.41	-Uniformidad	0.00
	0.029	77.47	-Curvatura	0.00
	0.019	71.56	<b><u>Material:</u></b>	
	0.014	67.63	-Arena %	12.68
	0.011	63.69	-Limos %	49.34
	0.008	57.70	-Arcillas %	37.98
	0.006	51.79	<b><u>Clasificacion:</u></b>	
	0.004	45.81	-AASHTO	
	0.003	34.07	-SUCS	MH
			<b>Nombre de grupo:</b>	
			<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>	
			Gs =	2.72
			Humedad Natural (%)	22.64





**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

Solicitante : Erick Abad Rosales Asto.

Sondaje : M-10

Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano

Proyecto : Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.

Muestra : MAB - 10

Fecha : La Molina, 15 de junio de 2019

**ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO  
ASTM - D 421-58 y D422-63**

MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	85.91
	0.059	81.94
	0.042	79.96
	0.031	74.01
	0.020	70.05
	0.014	64.10
	0.012	62.12
	0.008	56.09
	0.006	52.13
	0.004	45.99
	0.001	32.11

**LIMITES DE CONSISTENCIA  
ASTM - D 427 / D 4318**

Limite liquido (%)	43.59
Limite plastico (%)	24.21
Indice plastico (%)	19.38
Limite de contraccion (%)	

**Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63**

**Coficiente de:**

-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00

**Material:**

-Arena (%)	14.09
-Limos (%)	49.17
-Arcillas (%)	36.74

**Clasificacion:**

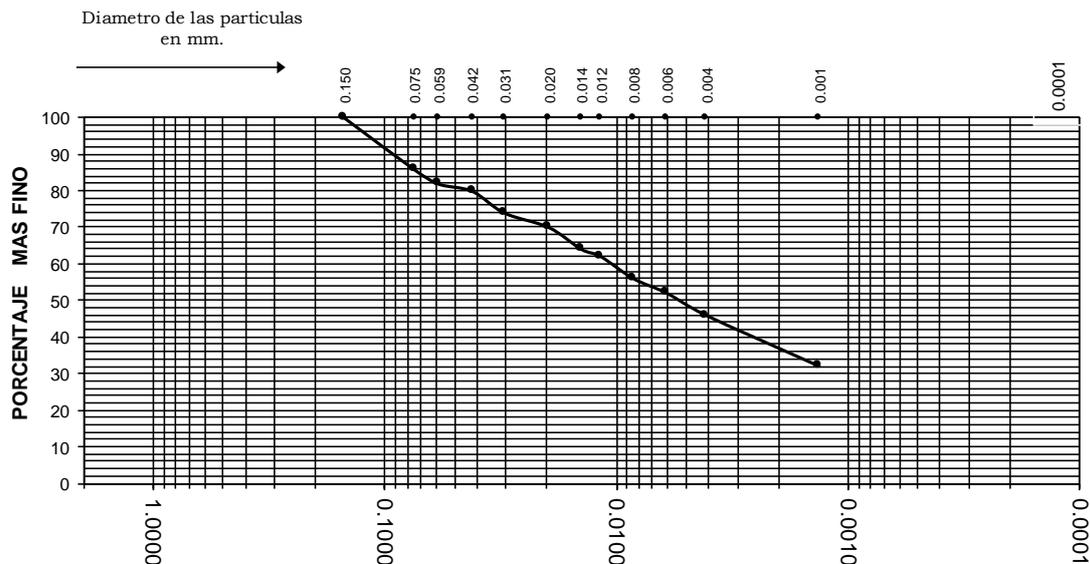
-AASHTO	
-SUCS	CL

Nombre de grupo: \_\_\_\_\_

**PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS**

Gs =	2.7
Humedad Natural (%)	32.53

**CURVA GRANULOMETRICA**



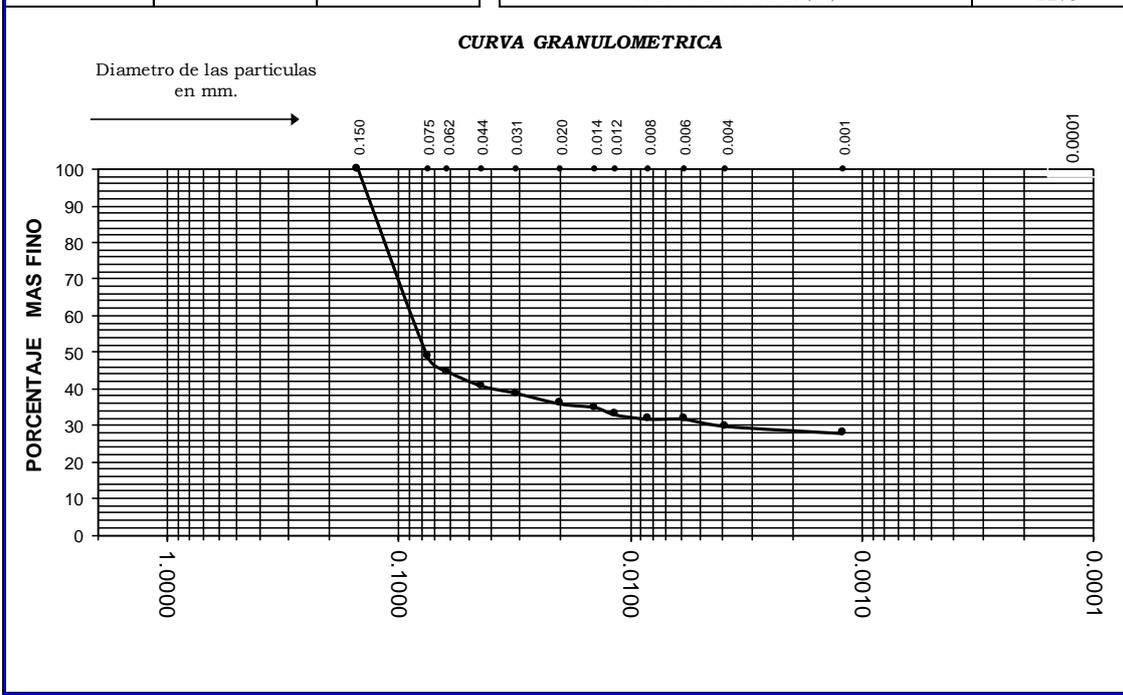


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

Solicitante: Erick Abad Rosales Asto. Sondaje : M-11  
 Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano  
 Proyecto: Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. Muestra : MAB - 11  
 Fecha: La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	48.68
	0.062	44.73
	0.044	40.78
	0.031	38.81
	0.020	35.85
	0.014	34.86
	0.012	32.89
	0.008	31.67
	0.006	31.67
	0.004	29.70
	0.001	27.76

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite liquido (%)	34.00
Limite plastico (%)	17.00
Indice plastico (%)	17.00
Limite de contraccion (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	51.32
-Limos %	20.22
-Arcillas %	28.46
<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CL arenoso
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>	
Gs =	2.71
Humedad Natural (%)	12.3



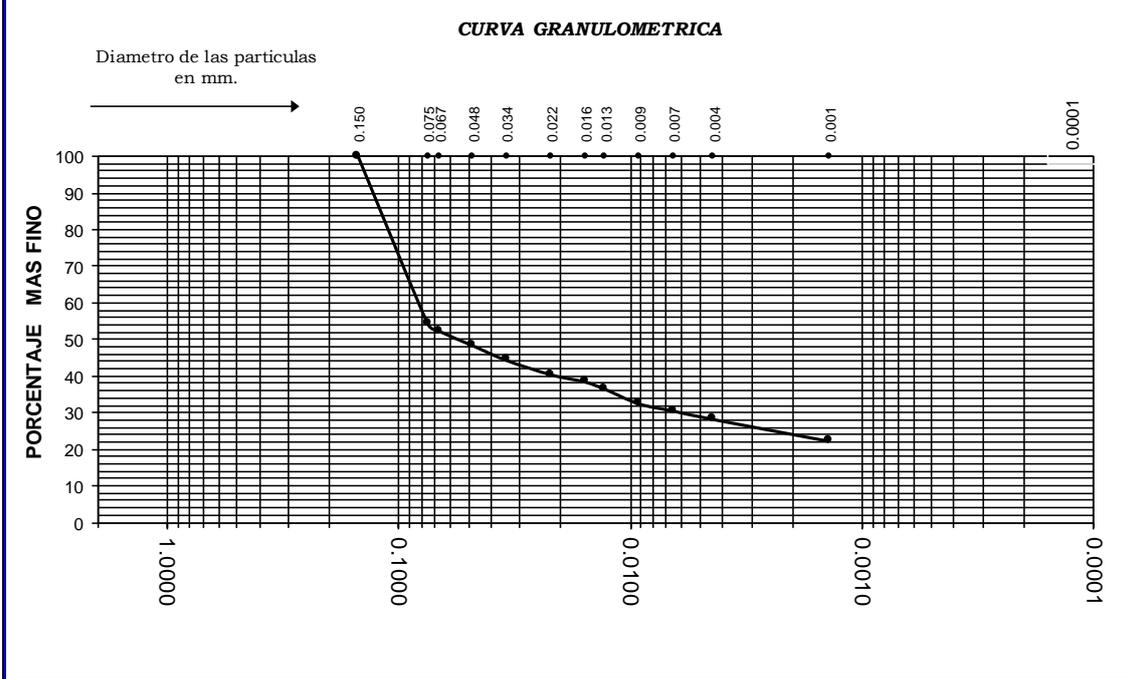


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
 DEPARTAMENTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONSTRUCCIÓN  
 LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

**Solicitante :** Erick Abad Rosales Asto. **Sondaje :** M-12  
**Asesora :** Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano  
**Proyecto :** Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. **Muestra :** MAB - 12  
**Fecha :** La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	54.31
	0.067	52.33
	0.048	48.38
	0.034	44.42
	0.022	40.47
	0.016	38.49
	0.013	36.51
	0.009	32.55
	0.007	30.58
	0.004	28.24
	0.001	22.31

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318		
Limite liquido (%)		40.76
Limite plastico (%)		23.02
Indice plastico (%)		17.74
Limite de contraccion (%)		
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>		
<b>Coefficiente de:</b>		
-Uniformidad		0.00
-Curvatura		0.00
<b>Material:</b>		
-Arena %		45.69
-Limos %		30.02
-Arcillas %		24.29
<b>Clasificacion:</b>		
-AASHTO		
-SUCS	CL arenoso	
<b>Nombre de grupo:</b>		
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>		
Gs =		2.73
Humedad Natural (%)		20.1



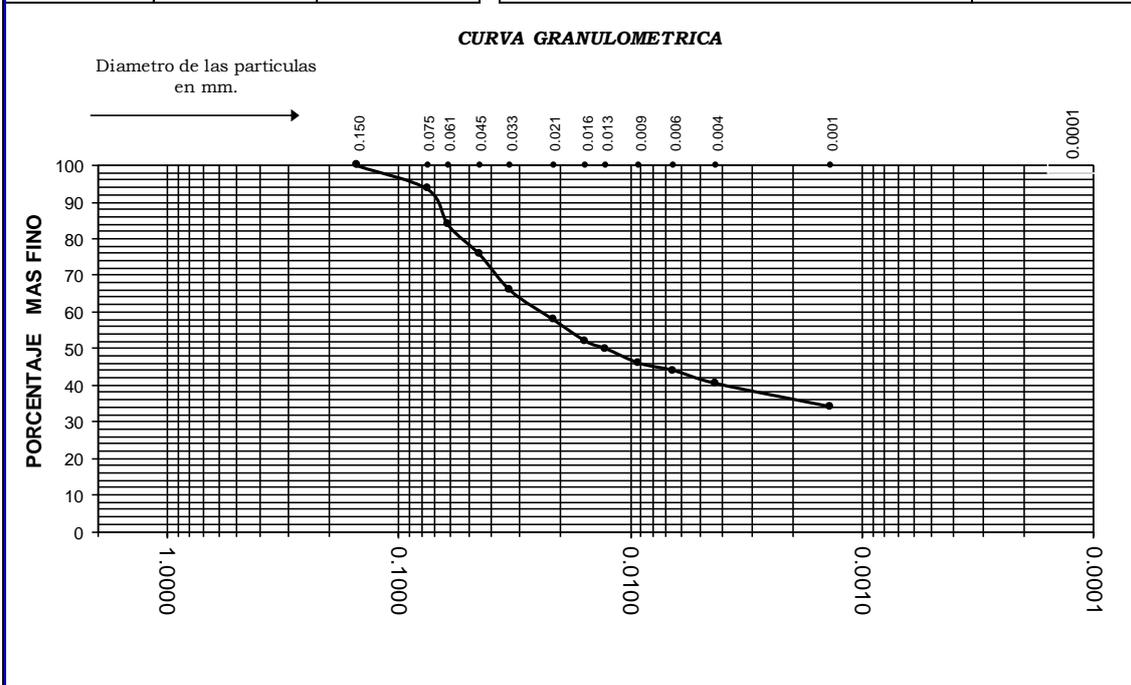


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

**Solicitante :** Erick Abad Rosales Asto. **Sondaje :** M-13  
**Asesora :** Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano  
**Proyecto :** Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. **Muestra :** MAB - 13  
**Fecha :** La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	93.57
	0.061	83.63
	0.045	75.69
	0.033	65.75
	0.021	57.81
	0.016	51.85
	0.013	49.86
	0.009	45.89
	0.006	43.90
	0.004	40.33
	0.001	33.97

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite liquido (%)	46.22
Limite plastico (%)	21.83
Indice plastico (%)	24.39
Limite de contraccion (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	6.43
-Limos %	57.48
-Arcillas %	36.09
<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CL
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>	
Gs =	2.70
Humedad Natural (%)	28.32





**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

**Solicitante :** Erick Abad Rosales Asto.

**Sondaje :** M-14

**Asesora :** Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano

**Proyecto :** Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.

**Muestra :** MAB - 14

**Fecha :** La Molina, 15 de junio de 2019

**ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO  
ASTM - D 421-58 y D422-63**

MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	88.60
	0.059	82.59
	0.043	78.58
	0.031	74.57
	0.020	68.56
	0.014	66.55
	0.012	64.55
	0.008	60.54
	0.006	56.53
	0.004	51.52
	0.001	46.71

**LIMITES DE CONSISTENCIA  
ASTM - D 427 / D 4318**

Limite liquido (%)	60.32
Limite plastico (%)	27.22
Indice plastico (%)	33.10
Limite de contraccion (%)	

**Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63**

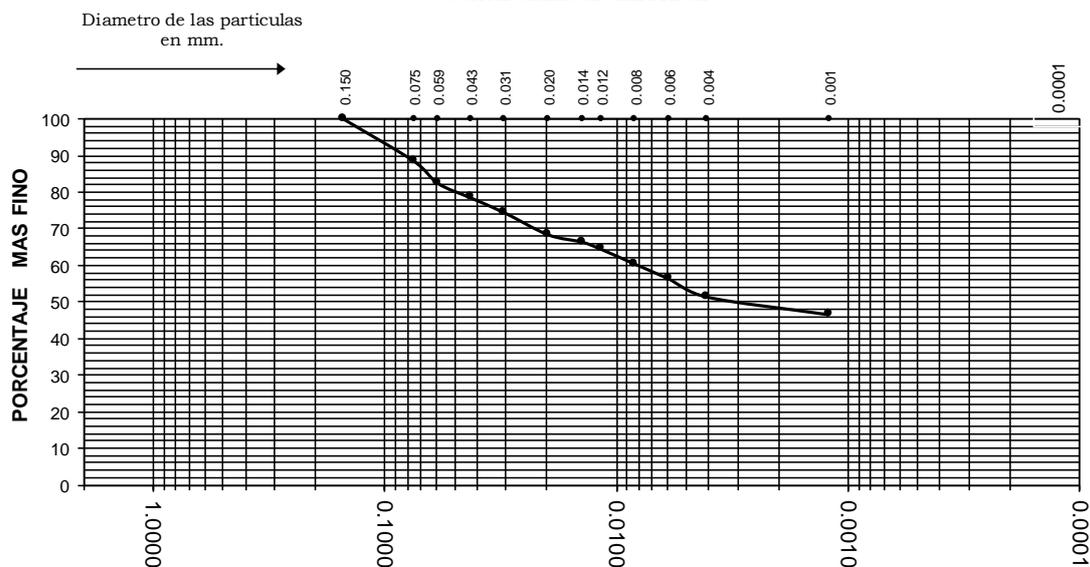
<b>Coeficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	11.40
-Limos %	40.29
-Arcillas %	48.31

<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CH
<b>Nombre de grupo:</b>	

**PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS**

Gs =	2.74
Humedad Natural (%)	25.4

**CURVA GRANULOMETRICA**



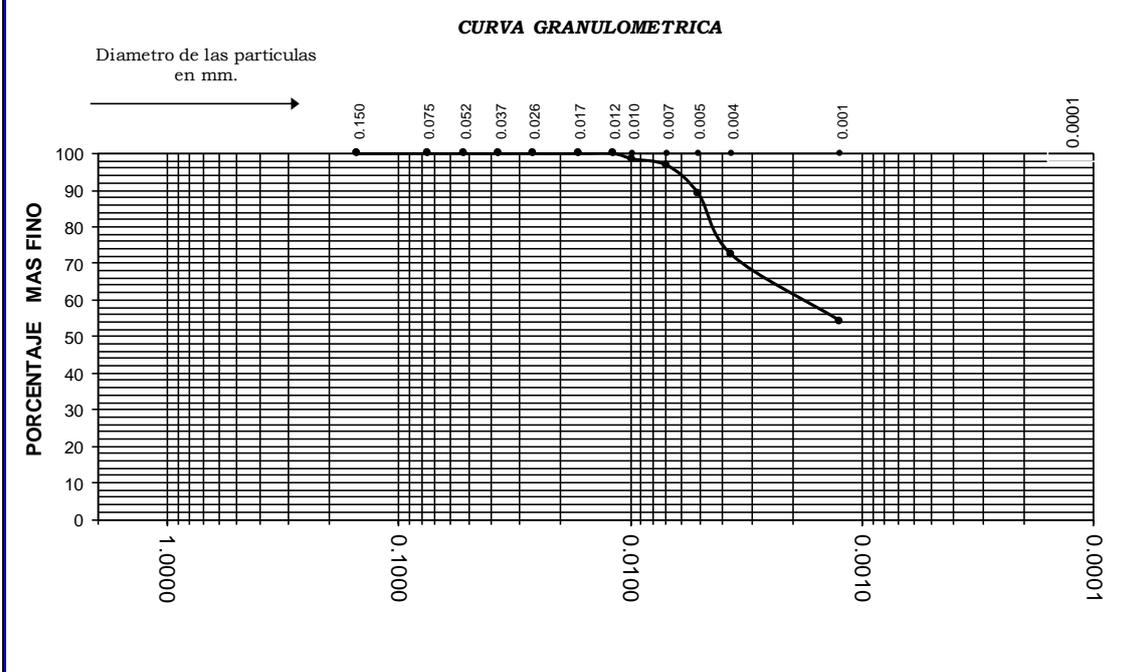


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

**Solicitante :** Erick Abad Rosales Asto. **Sondaje :** M-15  
**Asesora :** Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano  
**Proyecto :** Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. **Muestra :** MAB - 15  
**Fecha :** La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	100.00
	0.052	100.00
	0.037	100.00
	0.026	100.00
	0.017	100.00
	0.012	100.00
	0.010	98.54
	0.007	96.81
	0.005	89.01
	0.004	72.27
	0.001	54.16

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite liquido (%)	76.00
Limite plastico (%)	34.00
Indice plastico (%)	42.00
Limite de contraccion (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	0.00
-Limos %	39.80
-Arcillas %	60.20
<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CH
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>	
Gs =	2.72
Humedad Natural (%)	30.21



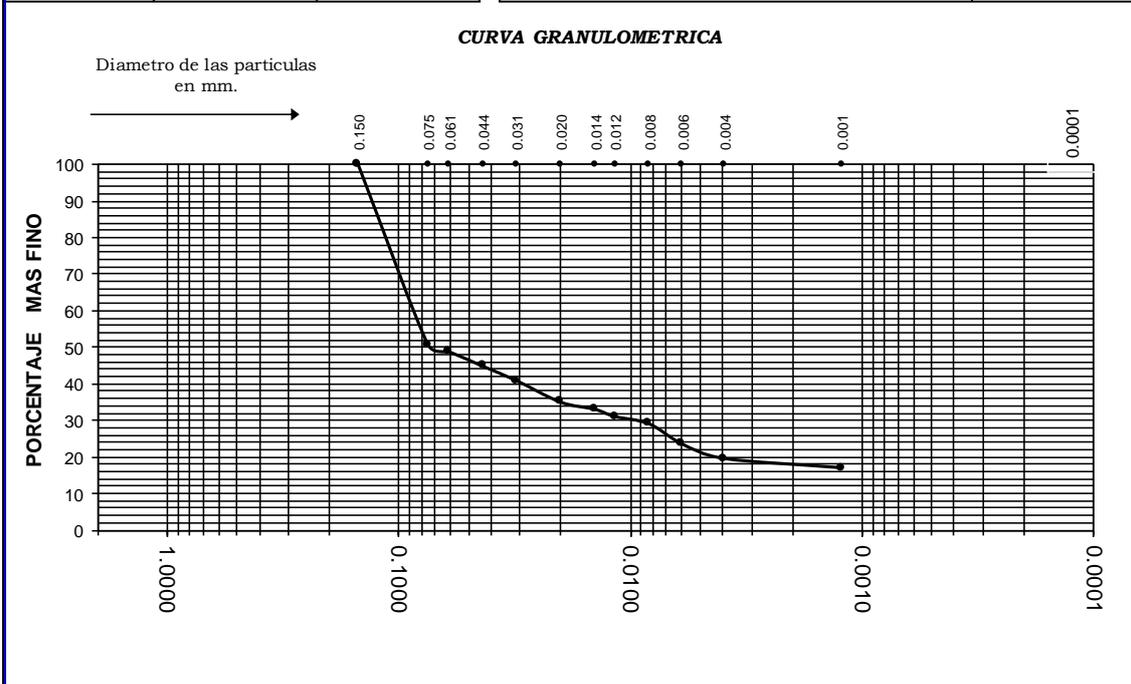


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

Solicitante: Erick Abad Rosales Asto. Sondaje : M-16  
 Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano.  
 Proyecto: Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. Muestra : MAB - 16  
 Fecha: La Molina, 15 de junio de 2019

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MÉTODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIÁMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	50.76
	0.061	48.79
	0.044	44.85
	0.031	40.91
	0.020	35.00
	0.014	33.03
	0.012	31.07
	0.008	29.10
	0.006	23.51
	0.004	19.57
	0.001	17.03

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite líquido (%)	38.10
Limite plástico (%)	21.1
Índice plástico (%)	17.00
Limite de contracción (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	49.24
-Limos %	32.88
-Arcillas %	17.88
<b>Clasificación:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CL arenoso
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECÍFICO DE LOS SÓLIDOS</b>	
G <sub>s</sub> =	2.72
Humedad Natural (%)	15.2



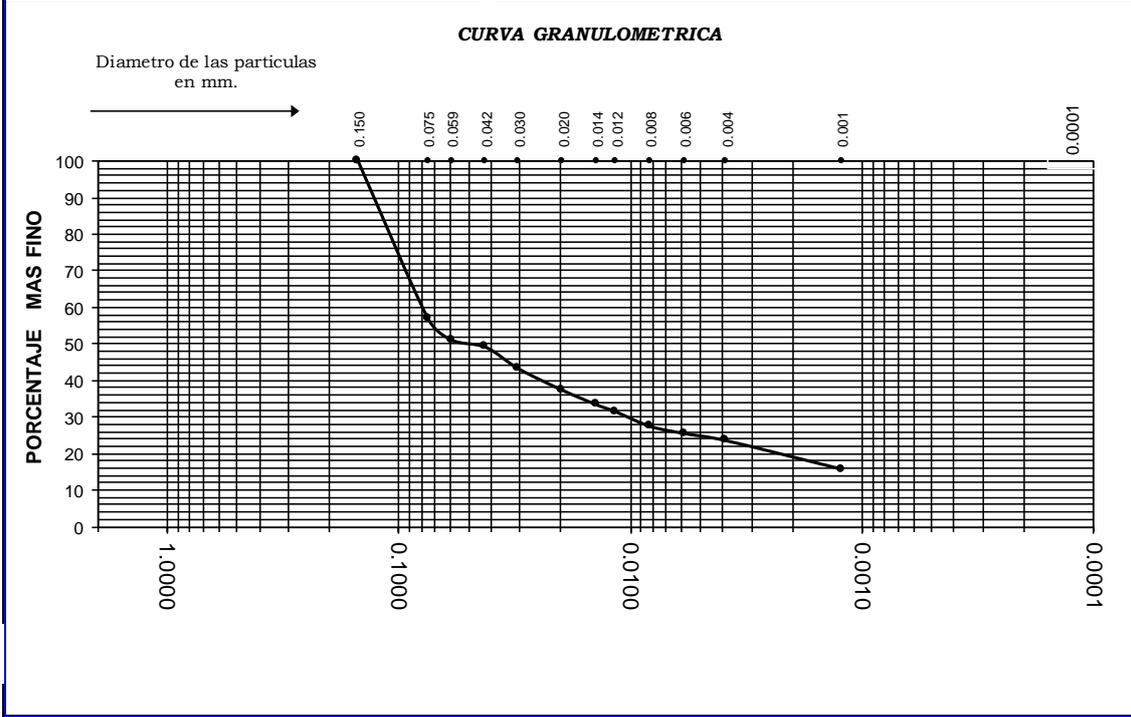


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

Solicitante: Erick Abad Rosales Asto. Sondaje : M-17  
 Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano.  
 Proyecto: Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. Muestra : MAB - 17  
 Fecha: La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	56.99
	0.059	51.08
	0.042	49.11
	0.030	43.21
	0.020	37.30
	0.014	33.36
	0.012	31.39
	0.008	27.45
	0.006	25.48
	0.004	23.51
	0.001	15.74

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite liquido (%)	36.20
Limite plastico (%)	20.3
Indice plastico (%)	15.90
Limite de contraccion (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coeficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	43.01
-Limos %	38.66
-Arcillas %	18.33
<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CL arenoso
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>	
Gs =	2.72
Humedad Natural (%)	12.5



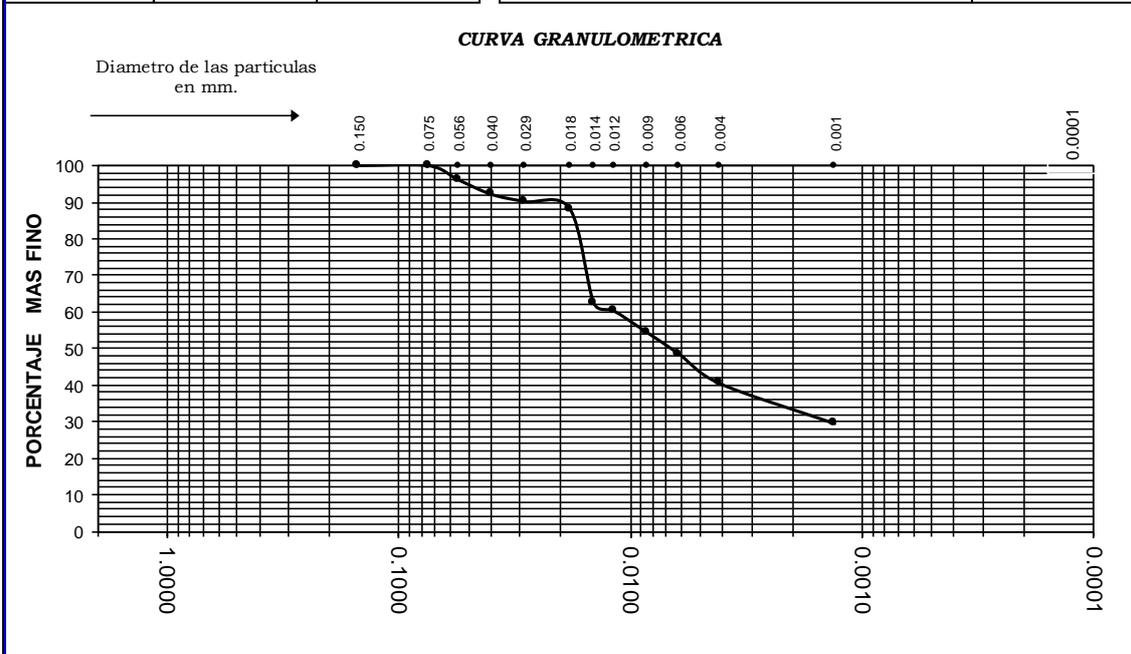


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

**Solicitante :** Erick Abad Rosales Asto. **Sondaje :** M-18  
**Asesora :** Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano.  
**Proyecto :** Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. **Muestra :** MAB - 18  
**Fecha :** La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	100.00
	0.056	96.13
	0.040	92.17
	0.029	90.19
	0.018	88.21
	0.014	62.44
	0.012	60.46
	0.009	54.55
	0.006	48.56
	0.004	40.63
	0.001	29.61

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite líquido (%)	45.00
Limite plástico (%)	23.00
Indice plástico (%)	22.00
Limite de contracción (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	0.00
-Limos %	66.72
-Arcillas %	33.28
<b>Clasificación:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CL
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>	
Gs =	2.7
Humedad Natural (%)	18.2



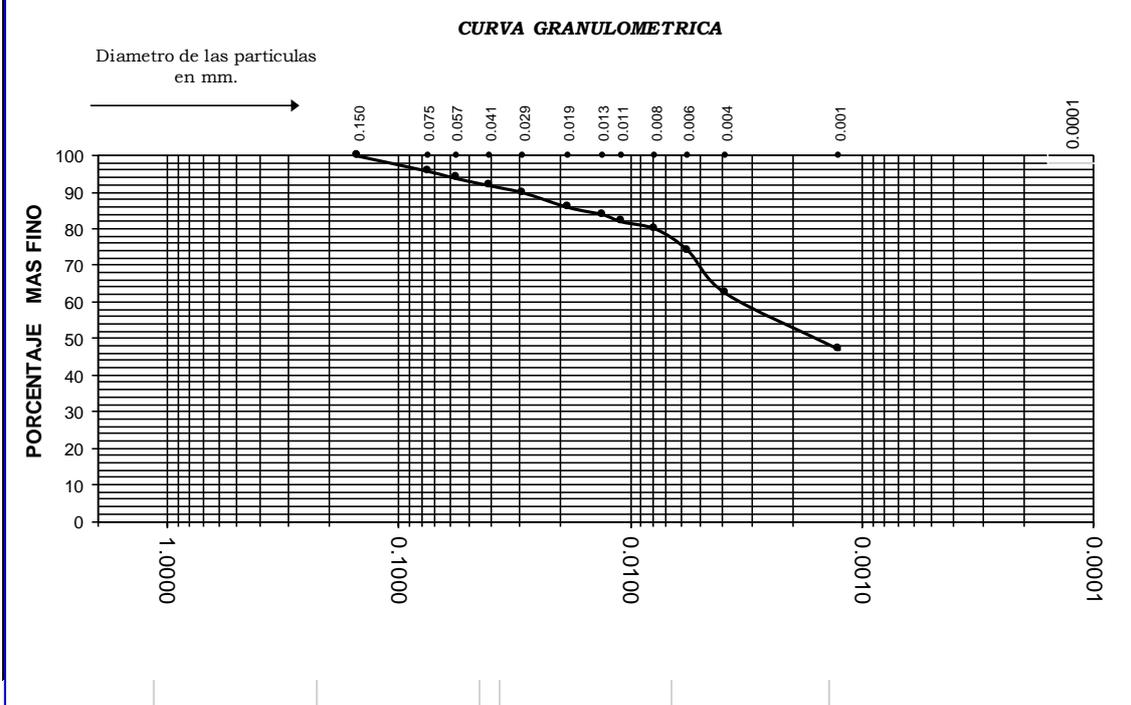


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

**Solicitante :** Erick Abad Rosales Asto. **Sondaje :** M-19  
**Asesora :** Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano.  
**Proyecto :** Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. **Muestra :** MAB - 19  
**Fecha :** La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	95.84
	0.057	93.87
	0.041	91.89
	0.029	89.91
	0.019	85.96
	0.013	83.98
	0.011	82.00
	0.008	80.02
	0.006	74.09
	0.004	62.30
	0.001	46.99

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite liquido (%)	68.77
Limite plastico (%)	27.39
Indice plastico (%)	41.38
Limite de contraccion (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	4.16
-Limos %	43.75
-Arcillas %	52.09
<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CH
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>	
Gs =	2.7
Humedad Natural (%)	15.63



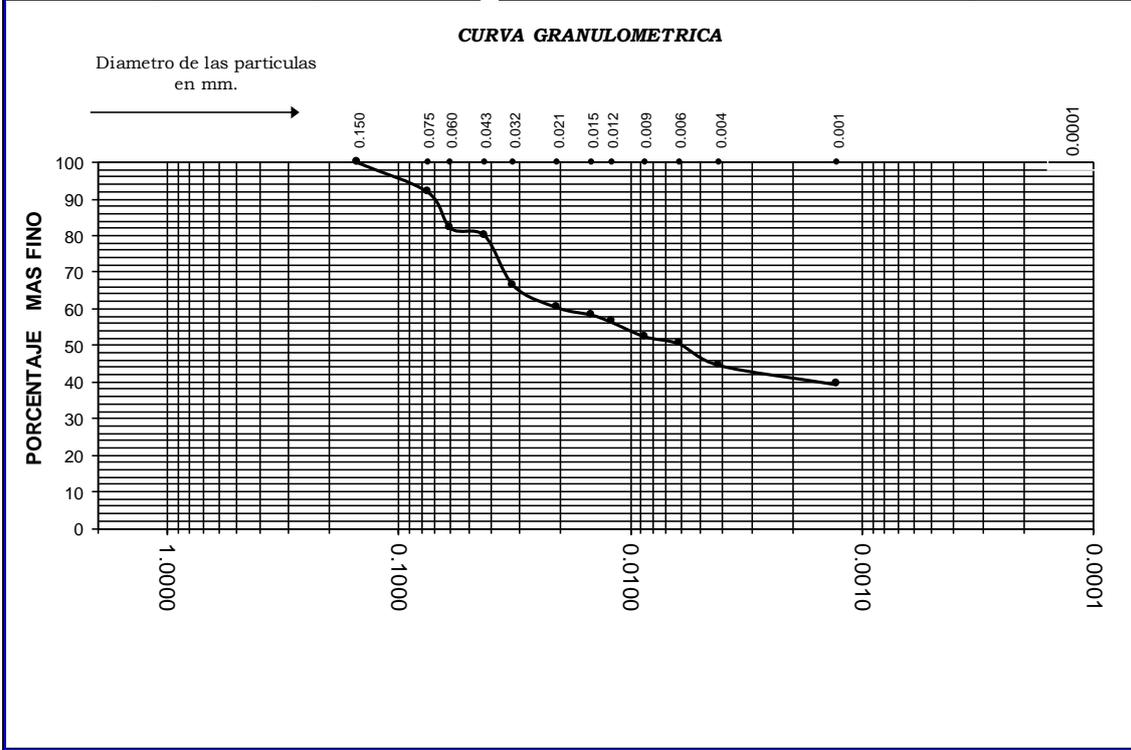


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

**Solicitante :** Erick Abad Rosales Asto. **Sondaje :** M-20  
**Asesora :** Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano.  
**Proyecto :** Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. **Muestra :** MAB - 20  
**Fecha :** La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	91.97
	0.060	82.08
	0.043	80.10
	0.032	66.26
	0.021	60.32
	0.015	58.35
	0.012	56.37
	0.009	52.41
	0.006	50.43
	0.004	44.50
	0.001	39.26

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite liquido (%)	26.00
Limite plastico (%)	18.00
Indice plastico (%)	8.00
Limite de contraccion (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	8.03
-Limos %	50.96
-Arcillas %	41.01
<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CL
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>	
Gs =	2.7
Humedad Natural (%)	15.23



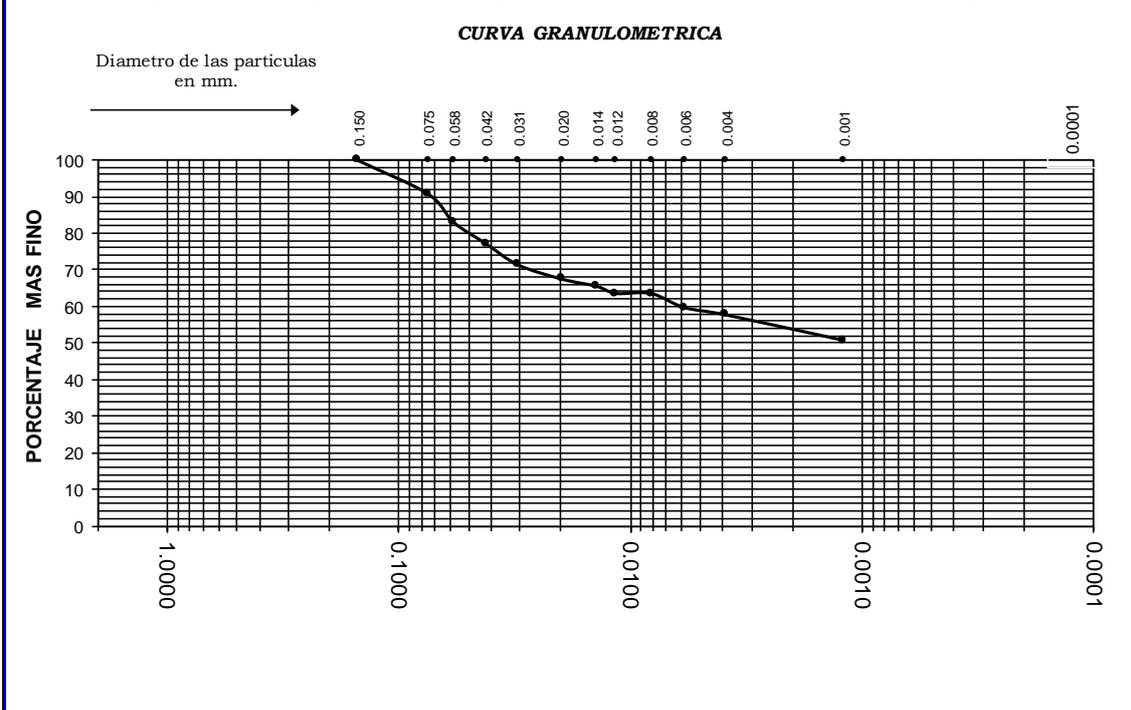


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

**Solicitante :** Erick Abad Rosales Asto. **Sondaje :** M-21  
**Asesora :** Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano.  
**Proyecto :** Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. **Muestra :** MAB - 21  
**Fecha :** La Molina, 15 de junio de 2019

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	90.85
	0.058	83.03
	0.042	77.18
	0.031	71.32
	0.020	67.41
	0.014	65.46
	0.012	63.51
	0.008	63.51
	0.006	59.60
	0.004	57.61
	0.001	50.66

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite liquido (%)	77.74
Limite plastico (%)	30.94
Indice plastico (%)	46.80
Limite de contraccion (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	9.15
-Limos %	37.87
-Arcillas %	52.98
<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CH
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>	
Gs =	2.7
Humedad Natural (%)	18.4



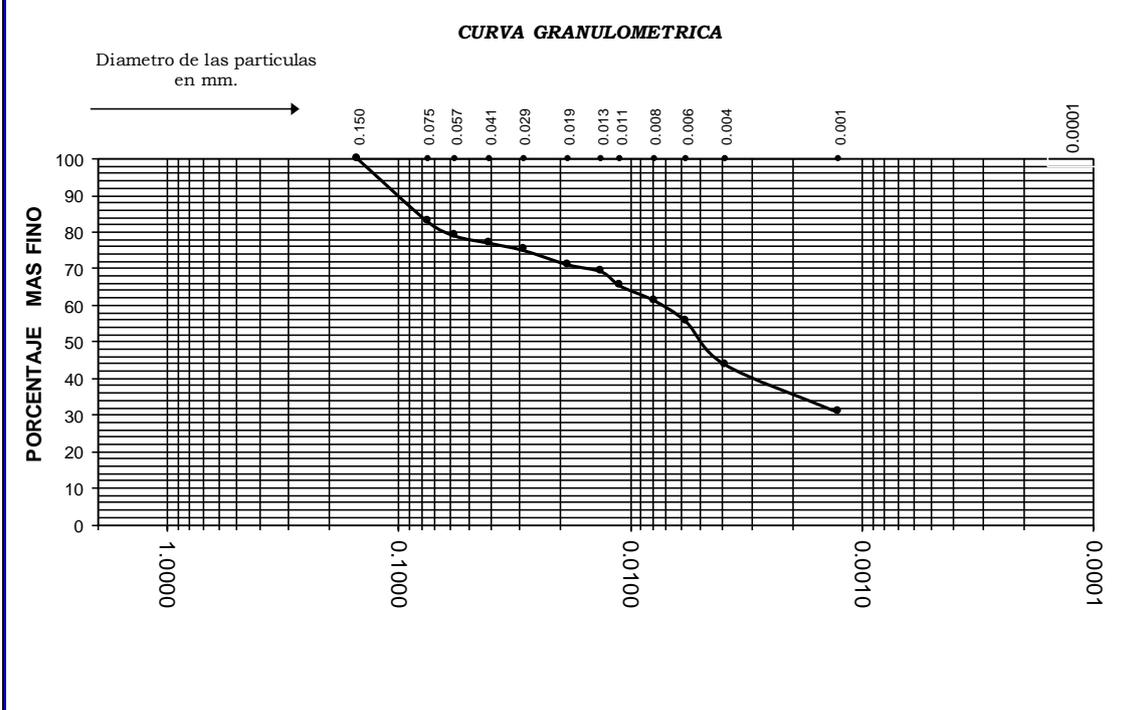


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

**Solicitante :** Erick Abad Rosales Asto. **Sondaje :** M-22  
**Asesora :** Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano  
**Proyecto :** Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. **Muestra :** MAB - 22  
**Fecha :** La Molina, 15 de junio de 2019

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	82.92
	0.057	79.01
	0.041	77.06
	0.029	75.11
	0.019	71.20
	0.013	69.25
	0.011	65.34
	0.008	61.44
	0.006	55.58
	0.004	43.94
	0.001	30.78

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite liquido (%)	40.00
Limite plastico (%)	21.00
Indice plastico (%)	19.00
Limite de contraccion (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	17.08
-Limos %	47.75
-Arcillas %	35.17
<b>Clasificación:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CL arenosa
<b>Nombre de grupo:</b>	
PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS	
Gs =	2.76
Humedad Natural (%)	16.5





**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

**Solicitante :** Erick Abad Rosales Asto.

**Sondaje :** M-23

**Asesora :** Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano.

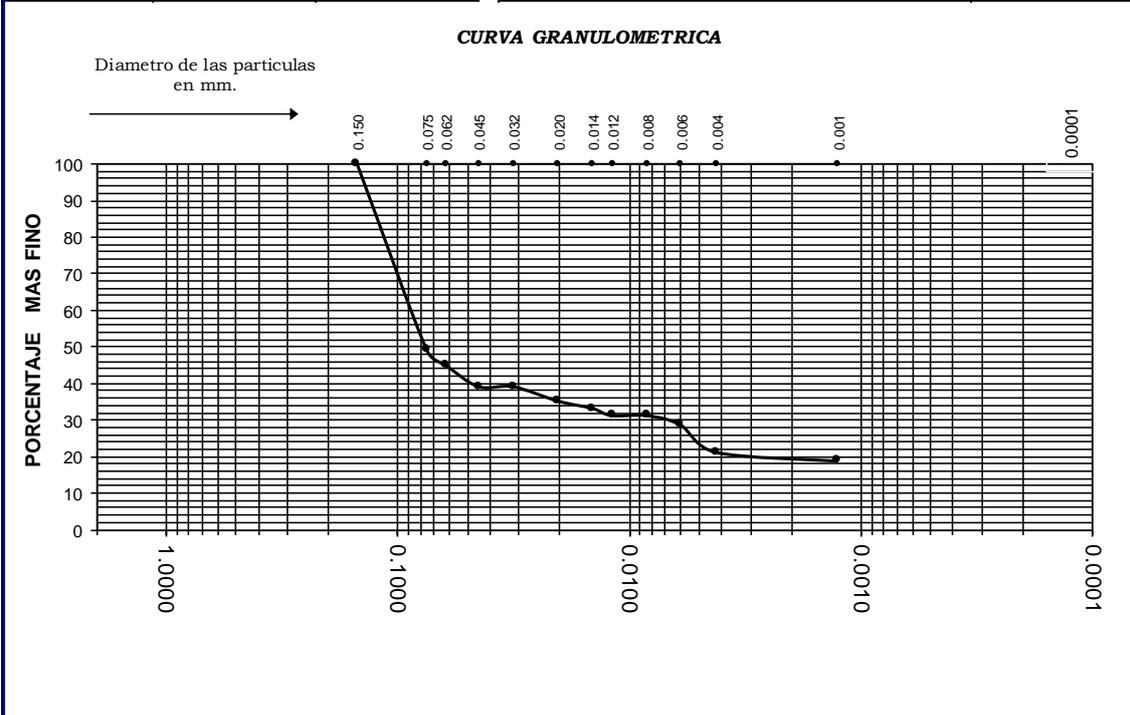
**Proyecto :** Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.

**Muestra :** MAB - 23

**Fecha :** La Molina, 15 de junio de 2019

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	49.12
	0.062	45.15
	0.045	39.21
	0.032	39.21
	0.020	35.24
	0.014	33.26
	0.012	31.28
	0.008	31.28
	0.006	28.74
	0.004	21.21
	0.001	18.83

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite líquido (%)	32.00
Limite plástico (%)	19.00
Indice plástico (%)	13.00
Limite de contracción (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	50.88
-Limos %	29.50
-Arcillas %	19.62
<b>Clasificación:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	SC
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SÓLIDOS</b>	
Gs =	2.69
Humedad Natural (%)	20.4



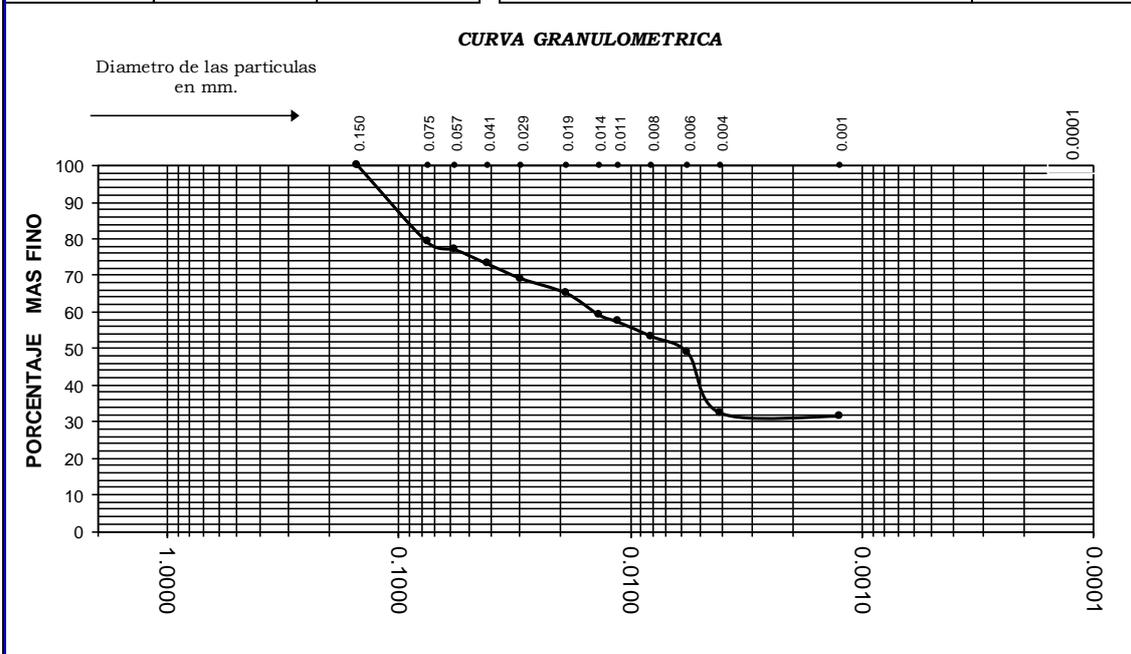


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

Solicitante : Erick Abad Rosales Asto. Sondaje : M-24  
 Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano.  
 Proyecto : Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. Muestra : MAB - 24  
 Fecha : La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	79.02
	0.057	77.04
	0.041	73.06
	0.029	69.09
	0.019	65.12
	0.014	59.16
	0.011	57.17
	0.008	53.20
	0.006	48.67
	0.004	32.18
	0.001	31.35

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite liquido (%)	44.00
Limite plastico (%)	26.00
Indice plastico (%)	18.00
Limite de contraccion (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	20.98
-Limos %	47.39
-Arcillas %	31.63
<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CL arenoso
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>	
Gs =	2.7
Humedad Natural (%)	23.21



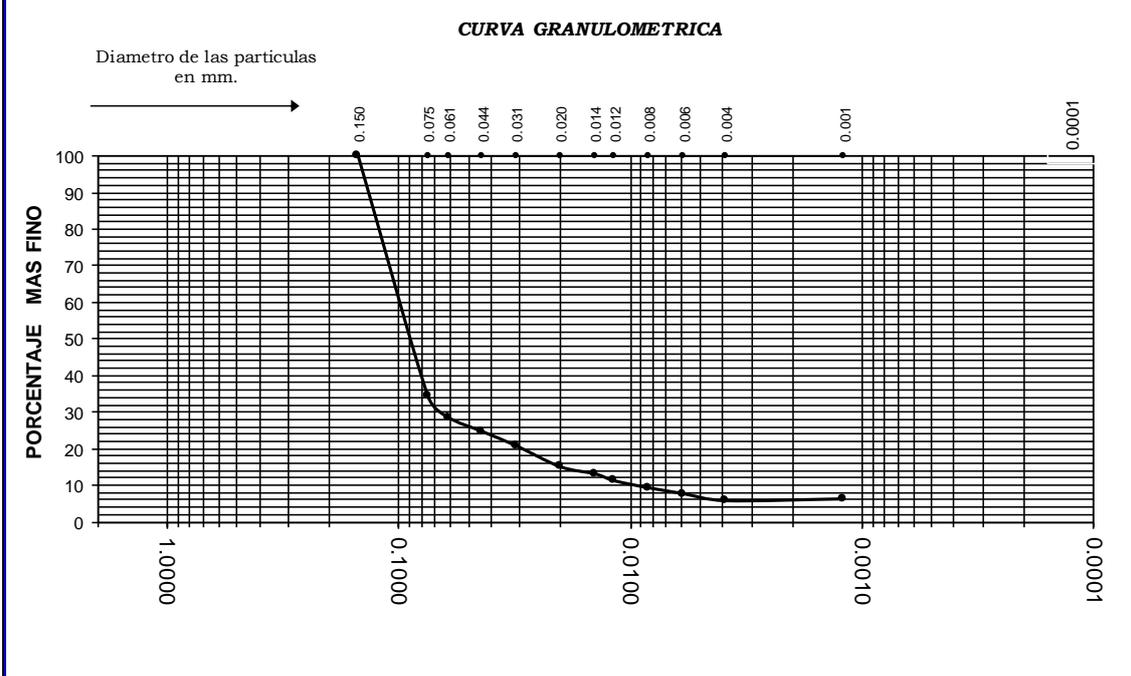


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

Solicitante: Erick Abad Rosales Asto. Sondaje : M-25  
 Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano  
 Proyecto: Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. Muestra : MAB - 25  
 Fecha: La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	34.23
	0.061	28.45
	0.044	24.60
	0.031	20.75
	0.020	14.97
	0.014	13.05
	0.012	11.12
	0.008	9.20
	0.006	7.59
	0.004	5.66
	0.001	6.16

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite liquido (%)	25.00
Limite plastico (%)	21.9
Indice plastico (%)	3.10
Limite de contraccion (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	65.77
-Limos %	28.24
-Arcillas %	5.99
<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	SM
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>	
Gs =	2.83
Humedad Natural (%)	4.5





**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

Solicitante: Erick Abad Rosales Asto.

Sondaje : M-26

Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano

Proyecto: Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.

Muestra : MAB - 26

Fecha: La Molina, 15 de junio de 2019

**ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO  
ASTM - D 421-58 y D422-63**

MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	60.46
	0.061	58.49
	0.043	55.53
	0.031	52.58
	0.020	48.64
	0.014	46.67
	0.012	43.72
	0.008	40.76
	0.006	37.12
	0.004	35.05
	0.001	26.98

**LIMITES DE CONSISTENCIA  
ASTM - D 427 / D 4318**

Limite liquido (%)	40.54
Limite plastico (%)	23.87
Indice plastico (%)	16.67
Limite de contraccion (%)	

**Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63**

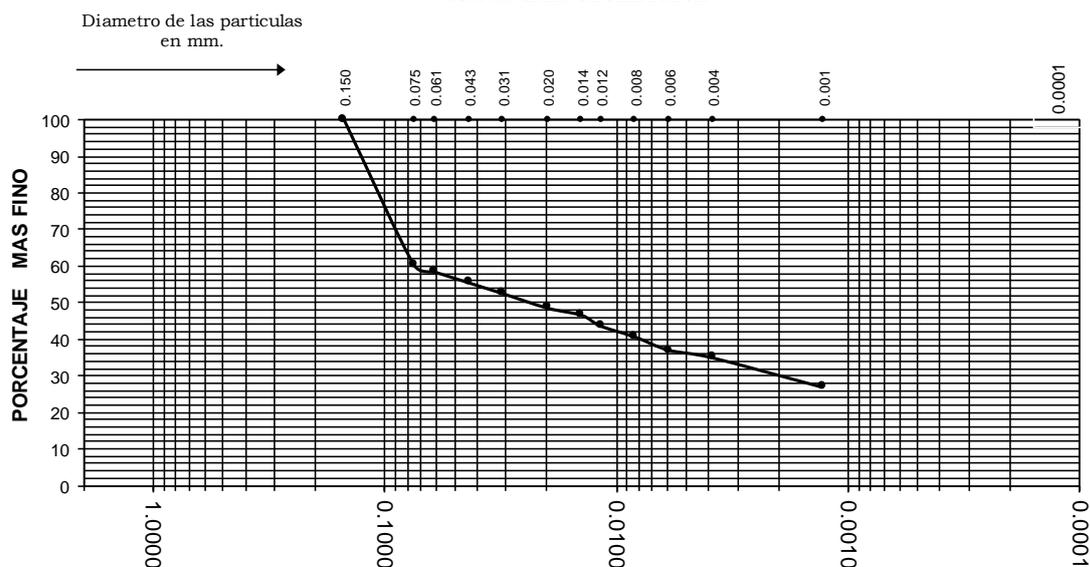
<b>Coeficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	39.54
-Limos %	30.79
-Arcillas %	29.67

<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CL arenoso
<b>Nombre de grupo:</b>	

**PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS**

Gs =	2.72
Humedad Natural (%)	23.71

**CURVA GRANULOMETRICA**



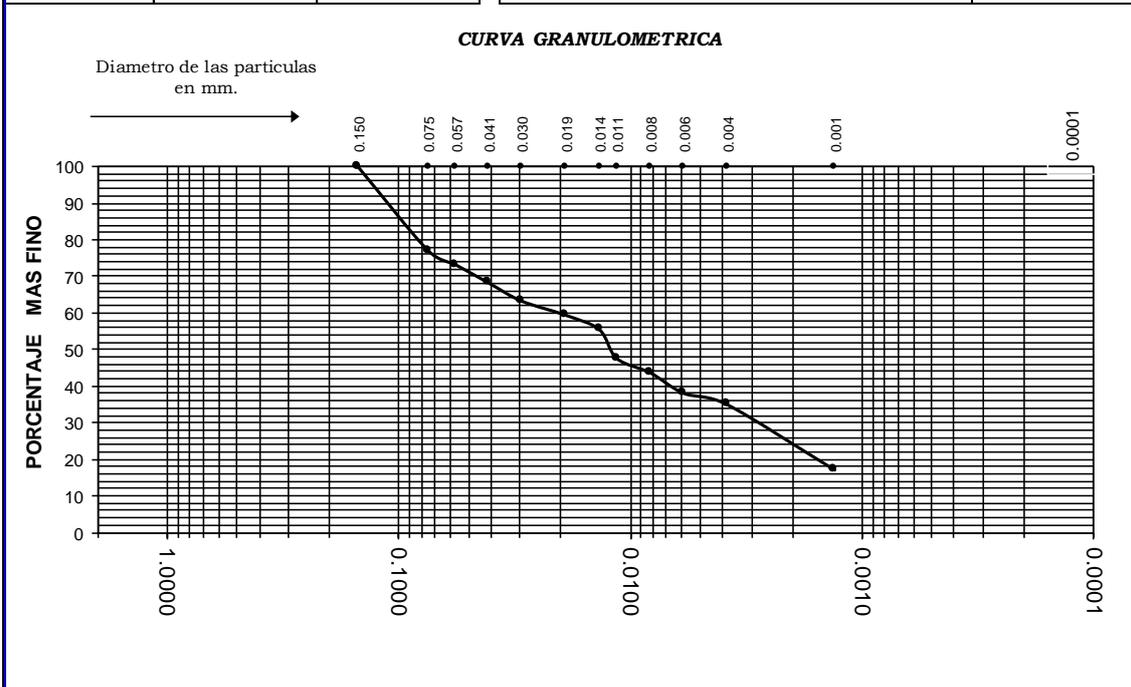


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

Solicitante: Erick Abad Rosales Asto. Sondaje : M-27  
 Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano  
 Proyecto: Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.. Muestra : MAB - 27  
 Fecha: La Molina, 15 de junio de 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	77.20
	0.057	73.26
	0.041	68.33
	0.030	63.41
	0.019	59.47
	0.014	55.53
	0.011	47.66
	0.008	43.72
	0.006	38.11
	0.004	35.05
	0.001	17.13

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite liquido (%)	32.86
Limite plastico (%)	22.36
Indice plastico (%)	10.50
Limite de contraccion (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coeficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	22.80
-Limos %	54.10
-Arcillas %	23.10
<b>Clasificacion:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CL arenoso
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLDOS</b>	
Gs =	2.72
Humedad Natural (%)	8.62



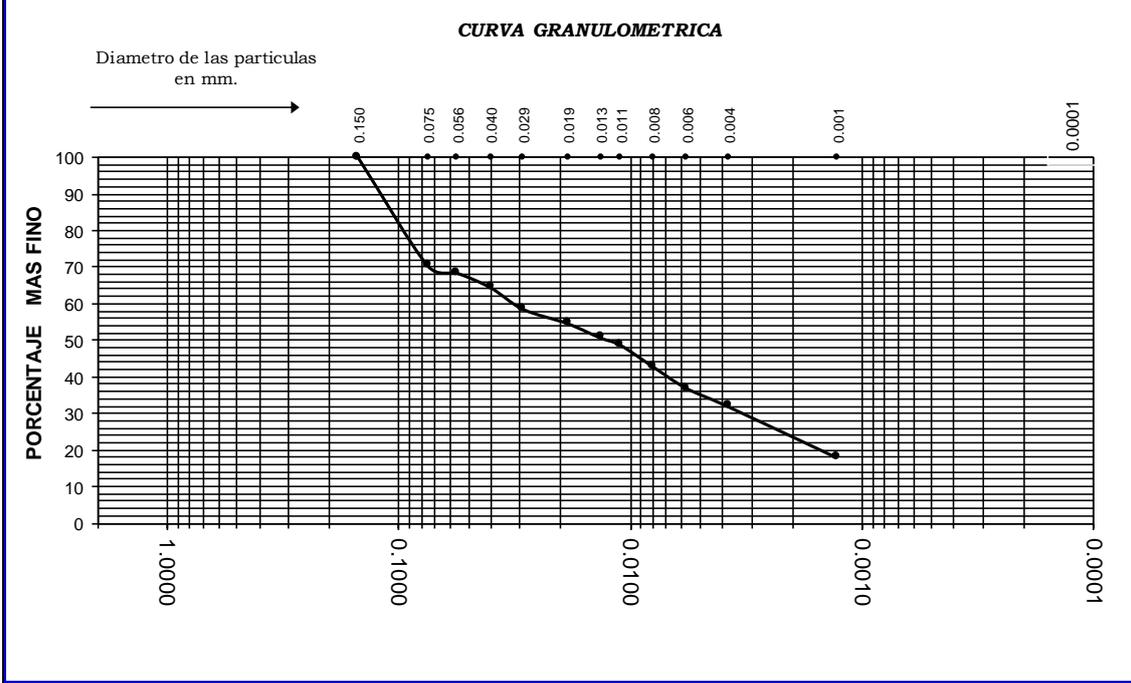


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

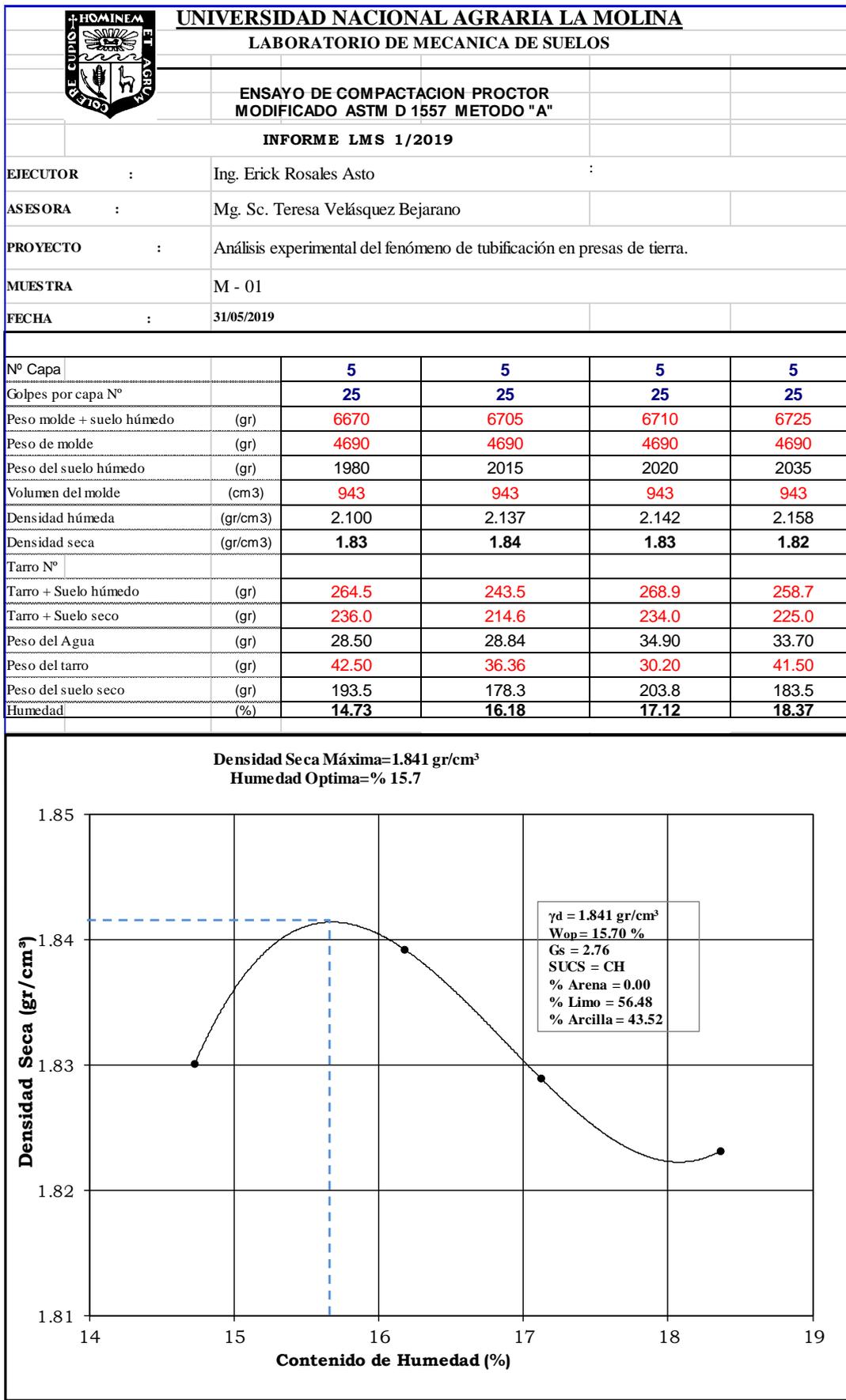
Solicitante: Erick Abad Rosales Asto. Sondaje : M-28  
 Asesora : Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano  
 Proyecto: Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra. Muestra : MAB - 28  
 Fecha: La Molina, 15 de junio de 2019

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO METODO DEL HIDROMETRO ASTM - D 421-58 y D422-63		
MALLA	DIAMETRO mm.	% MAS FINO
N° 040	0.425	100
N° 060	0.250	100
N° 080	0.180	100
N° 100	0.150	100
N° 200	0.075	70.45
	0.056	68.48
	0.040	64.55
	0.029	58.66
	0.019	54.73
	0.013	50.80
	0.011	48.83
	0.008	42.94
	0.006	37.04
	0.004	32.03
	0.001	18.08

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
Limite líquido (%)	29.76
Limite plástico (%)	19.25
Indice plástico (%)	10.51
Limite de contracción (%)	
<b>Resultados: ASTM - D421-58 / D422-63</b>	
<b>Coefficiente de:</b>	
-Uniformidad	0.00
-Curvatura	0.00
<b>Material:</b>	
-Arena %	29.55
-Limos %	47.72
-Arcillas %	22.73
<b>Clasificación:</b>	
-AASHTO	
-SUCS	CL arenoso
<b>Nombre de grupo:</b>	
<b>PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS</b>	
Gs =	2.73
Humedad Natural (%)	10.0



ANEXO 2.- Resultados de ensayos de compactación.





**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

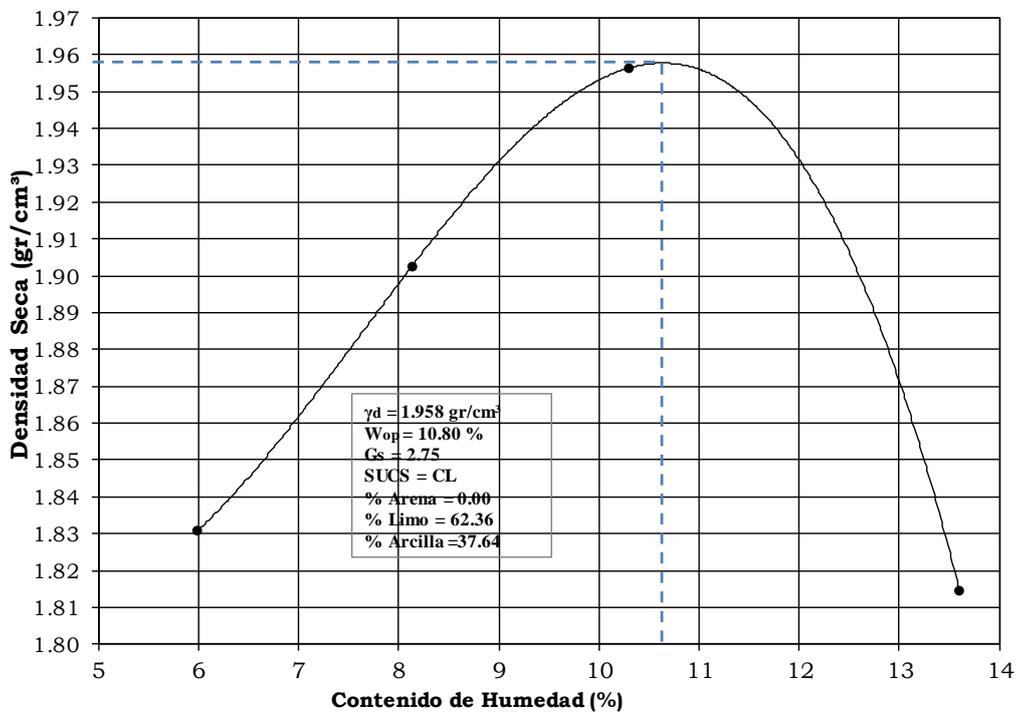
**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 2/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto	:
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano	
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.	
MUESTRA		M - 02	
FECHA	:	31/05/2019	

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	<b>6540</b>	<b>6650</b>	<b>6745</b>	<b>6654</b>
Peso de molde	(gr)	<b>4710</b>	<b>4710</b>	<b>4710</b>	<b>4710</b>
Peso del suelo húmedo	(gr)	1830	1940	2035	1944
Volumen del molde	(cm3)	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>
Densidad húmeda	(gr/cm3)	1.941	2.057	2.158	2.062
Densidad seca	(gr/cm3)	<b>1.83</b>	<b>1.90</b>	<b>1.96</b>	<b>1.81</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	<b>200.1</b>	<b>223.1</b>	<b>186.9</b>	<b>245.2</b>
Tarro + Suelo seco	(gr)	<b>190.0</b>	<b>208.0</b>	<b>171.5</b>	<b>219.3</b>
Peso del Agua	(gr)	10.10	15.10	15.44	25.90
Peso del tarro	(gr)	<b>21.50</b>	<b>22.30</b>	<b>21.65</b>	<b>28.90</b>
Peso del suelo seco	(gr)	168.5	185.7	149.9	190.4
Humedad	(%)	<b>5.99</b>	<b>8.13</b>	<b>10.30</b>	<b>13.60</b>

Densidad Seca Máxima=1.958 gr/cm<sup>3</sup>  
Humedad Óptima=% 10.8



OBSERVACIONES				
---------------	--	--	--	--



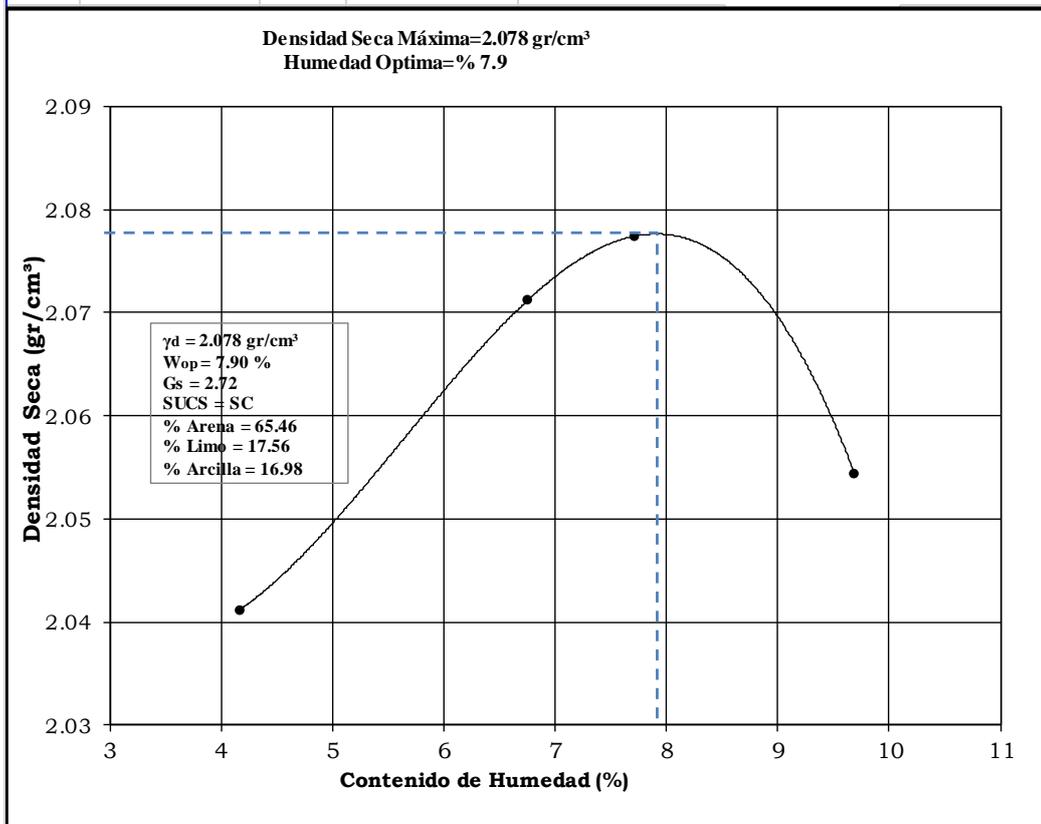
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 3/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 03
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	<b>6720</b>	<b>6800</b>	<b>6825</b>	<b>6840</b>
Peso de molde	(gr)	<b>4715</b>	<b>4715</b>	<b>4715</b>	<b>4715</b>
Peso del suelo húmedo	(gr)	2005	2085	2110	2125
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.126	2.211	2.238	2.253
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>2.04</b>	<b>2.07</b>	<b>2.08</b>	<b>2.05</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	<b>352.1</b>	<b>324.1</b>	<b>178.8</b>	<b>250.8</b>
Tarro + Suelo seco	(gr)	<b>339.0</b>	<b>305.0</b>	<b>167.4</b>	<b>230.0</b>
Peso del Agua	(gr)	13.10	19.10	11.43	20.80
Peso del tarro	(gr)	<b>24.50</b>	<b>22.10</b>	<b>19.10</b>	<b>15.30</b>
Peso del suelo seco	(gr)	314.5	282.9	148.3	214.7
Humedad	(%)	<b>4.17</b>	<b>6.75</b>	<b>7.71</b>	<b>9.69</b>



OBSERVACIONES					
---------------	--	--	--	--	--



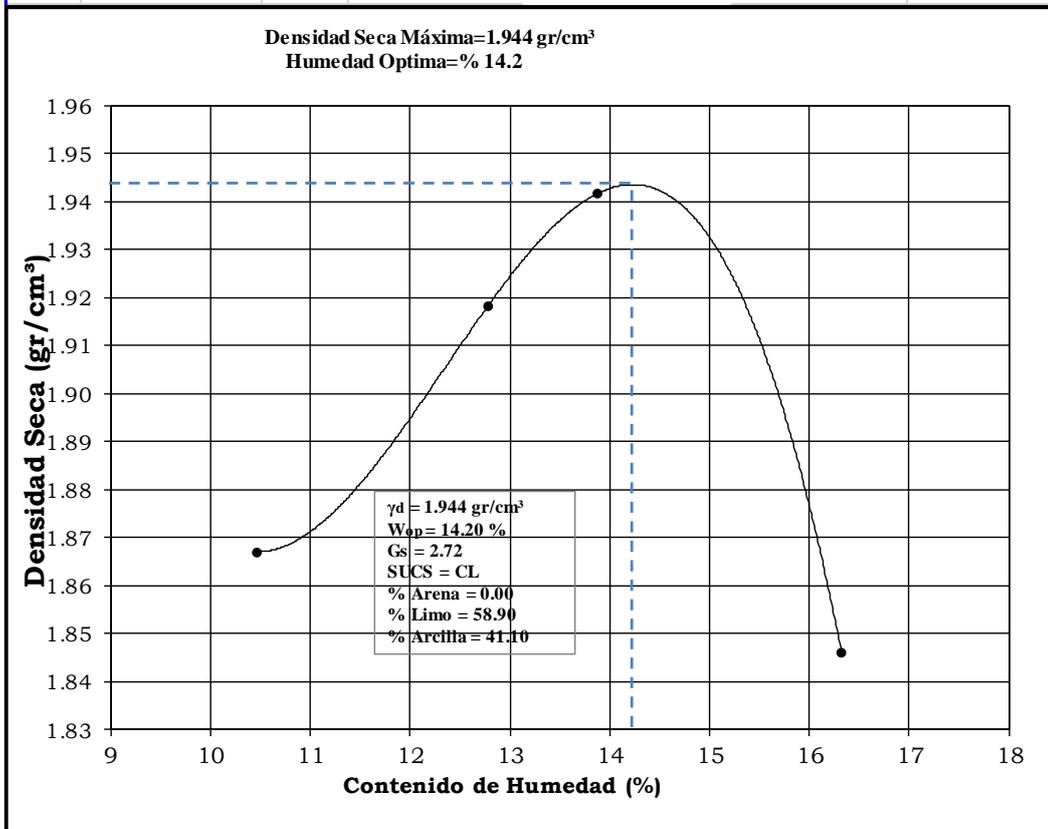
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 4/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 04
FECHA	:	20/06/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	<b>6660</b>	<b>6755</b>	<b>6800</b>	<b>6740</b>
Peso de molde	(gr)	<b>4715</b>	<b>4715</b>	<b>4715</b>	<b>4715</b>
Peso del suelo húmedo	(gr)	1945	2040	2085	2025
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.063	2.163	2.211	2.147
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.87</b>	<b>1.92</b>	<b>1.94</b>	<b>1.85</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	<b>160.2</b>	<b>155.2</b>	<b>159.9</b>	<b>165.4</b>
Tarro + Suelo seco	(gr)	<b>148.0</b>	<b>138.9</b>	<b>141.8</b>	<b>144.0</b>
Peso del Agua	(gr)	12.20	16.30	18.10	21.40
Peso del tarro	(gr)	<b>31.50</b>	<b>11.33</b>	<b>11.33</b>	<b>12.90</b>
Peso del suelo seco	(gr)	116.5	127.6	130.5	131.1
Humedad	(%)	<b>10.47</b>	<b>12.78</b>	<b>13.87</b>	<b>16.32</b>



OBSERVACIONES



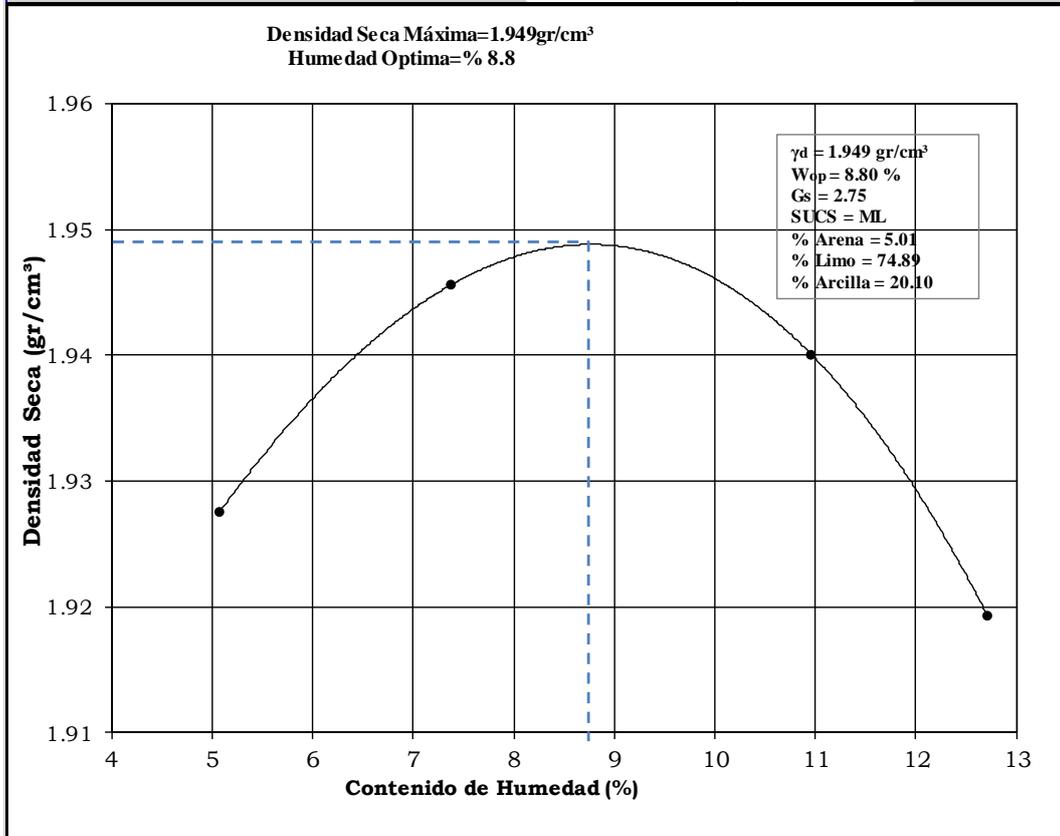
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 5/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 05
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	<b>6610</b>	<b>6670</b>	<b>6730</b>	<b>6740</b>
Peso de molde	(gr)	<b>4700</b>	<b>4700</b>	<b>4700</b>	<b>4700</b>
Peso del suelo húmedo	(gr)	1910	1970	2030	2040
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.025	2.089	2.153	2.163
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.93</b>	<b>1.95</b>	<b>1.94</b>	<b>1.92</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	<b>258.6</b>	<b>206.5</b>	<b>245.3</b>	<b>215.4</b>
Tarro + Suelo seco	(gr)	<b>247.5</b>	<b>194.8</b>	<b>225.0</b>	<b>195.1</b>
Peso del Agua	(gr)	11.10	11.74	20.30	20.30
Peso del tarro	(gr)	<b>28.90</b>	<b>35.57</b>	<b>39.80</b>	<b>35.40</b>
Peso del suelo seco	(gr)	218.6	159.2	185.2	159.7
Humedad	(%)	<b>5.08</b>	<b>7.38</b>	<b>10.96</b>	<b>12.71</b>



OBSERVACIONES



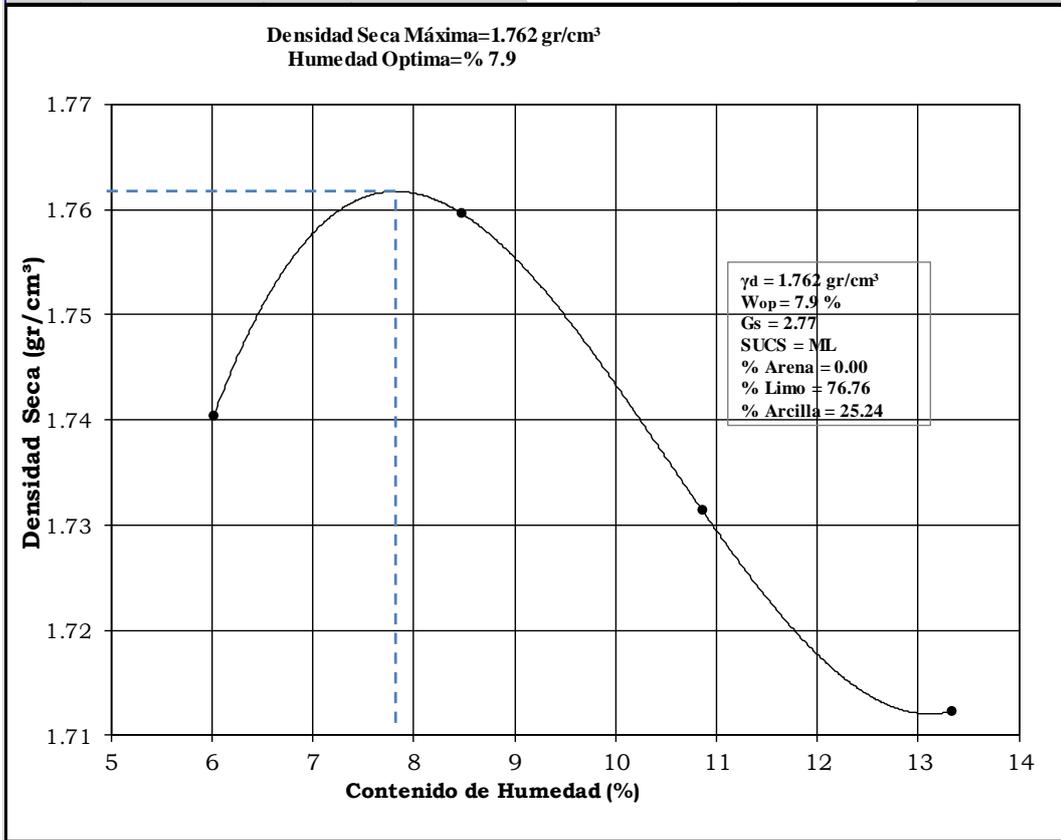
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 6/2019**

EJECUTOR :	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA :	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO :	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	M - 06
FECHA :	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	6440	6500	6510	6530
Peso de molde	(gr)	4700	4700	4700	4700
Peso del suelo húmedo	(gr)	1740	1800	1810	1830
Volumen del molde	(cm3)	943	943	943	943
Densidad húmeda	(gr/cm3)	1.845	1.909	1.919	1.941
Densidad seca	(gr/cm3)	<b>1.74</b>	<b>1.76</b>	<b>1.73</b>	<b>1.71</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	206.1	179.1	254.1	220.1
Tarro + Suelo seco	(gr)	196.5	167.0	231.2	198.5
Peso del Agua	(gr)	9.63	12.08	22.90	21.60
Peso del tarro	(gr)	36.50	24.50	20.31	36.50
Peso del suelo seco	(gr)	160.0	142.5	210.9	162.0
Humedad	(%)	<b>6.02</b>	<b>8.48</b>	<b>10.86</b>	<b>13.33</b>



OBSERVACIONES



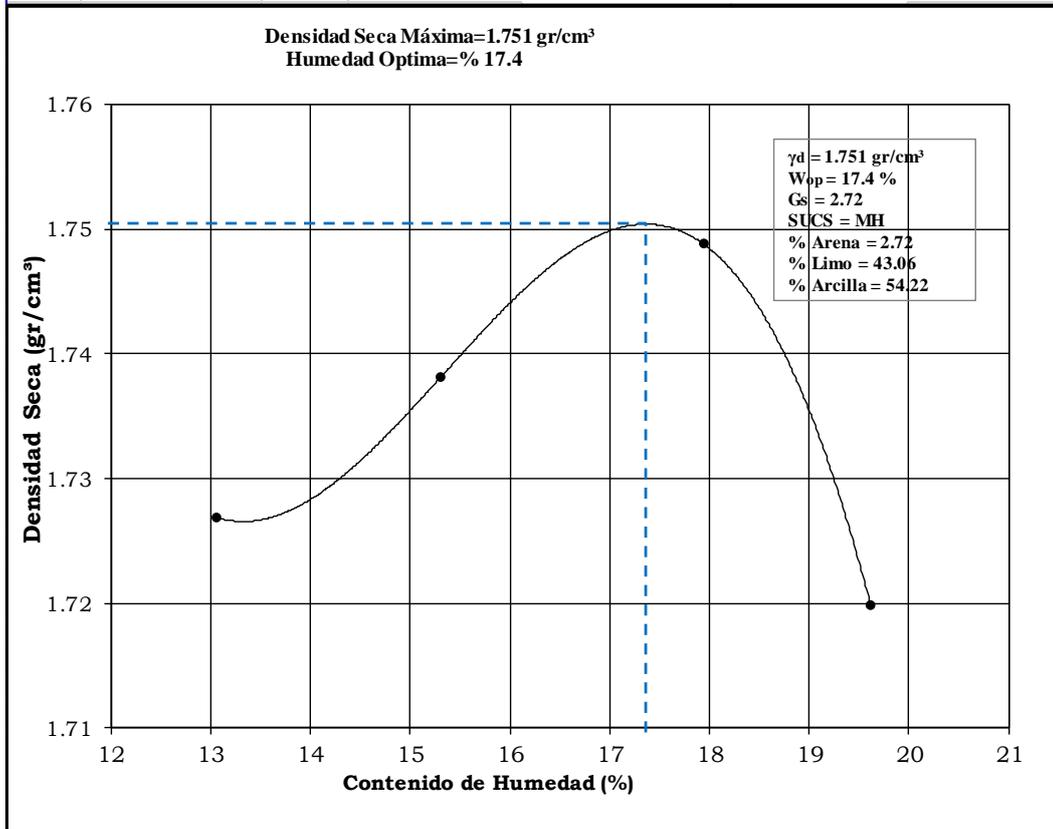
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 7/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 07
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	6541	6590	6645	6640
Peso de molde	(gr)	4700	4700	4700	4700
Peso del suelo húmedo	(gr)	1841	1890	1945	1940
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	943	943	943	943
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.952	2.004	2.063	2.057
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.73</b>	<b>1.74</b>	<b>1.75</b>	<b>1.72</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	289.6	295.6	237.5	256.2
Tarro + Suelo seco	(gr)	260.3	261.2	206.8	219.5
Peso del Agua	(gr)	29.30	34.40	30.70	36.70
Peso del tarro	(gr)	35.80	36.50	35.65	32.40
Peso del suelo seco	(gr)	224.5	224.7	171.1	187.1
Humedad	(%)	<b>13.05</b>	<b>15.31</b>	<b>17.94</b>	<b>19.62</b>



OBSERVACIONES					
---------------	--	--	--	--	--



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

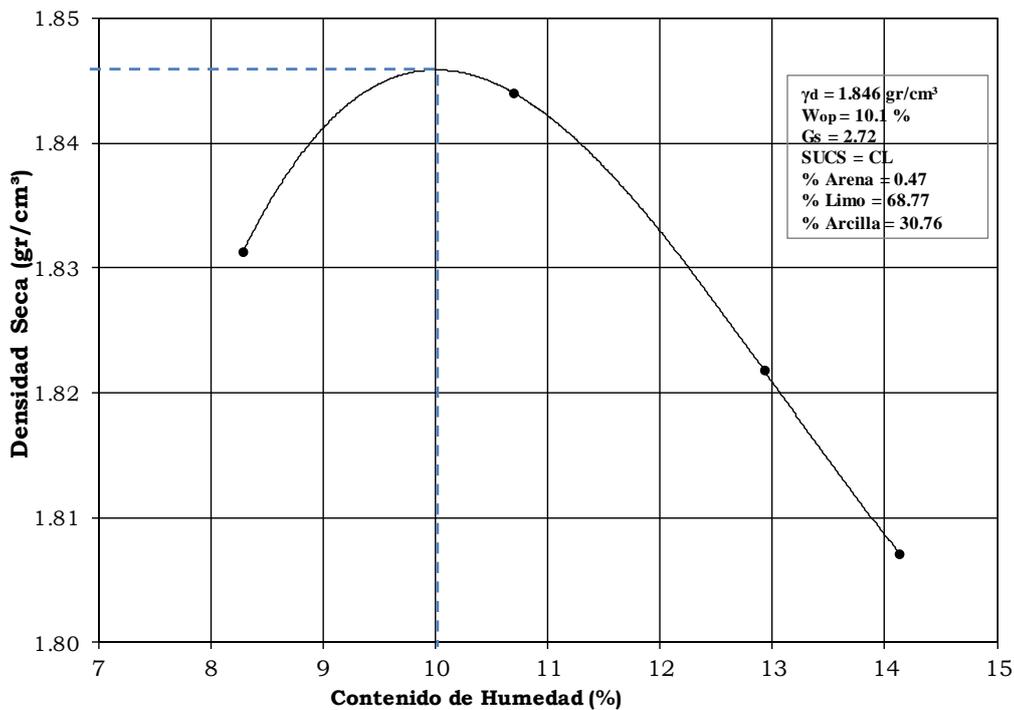
**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 8/2019**

SOLICITANTE	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 08
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		5	5	5	5
Golpes por capa Nº		25	25	25	25
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	6580	6635	6650	6655
Peso de molde	(gr)	4710	4710	4710	4710
Peso del suelo húmedo	(gr)	1870	1925	1940	1945
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	943	943	943	943
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.983	2.041	2.057	2.063
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.83	1.84	1.82	1.81
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	253.1	213.2	285.2	278.6
Tarro + Suelo seco	(gr)	235.4	196.1	255.0	247.5
Peso del Agua	(gr)	17.70	17.17	30.20	31.10
Peso del tarro	(gr)	21.80	35.66	21.40	27.50
Peso del suelo seco	(gr)	213.6	160.4	233.6	220.0
Humedad	(%)	8.29	10.70	12.93	14.14

Densidad Seca Máxima=1.846 gr/cm<sup>3</sup>  
 Humedad Optima=% 10.1



OBSERVACIONES



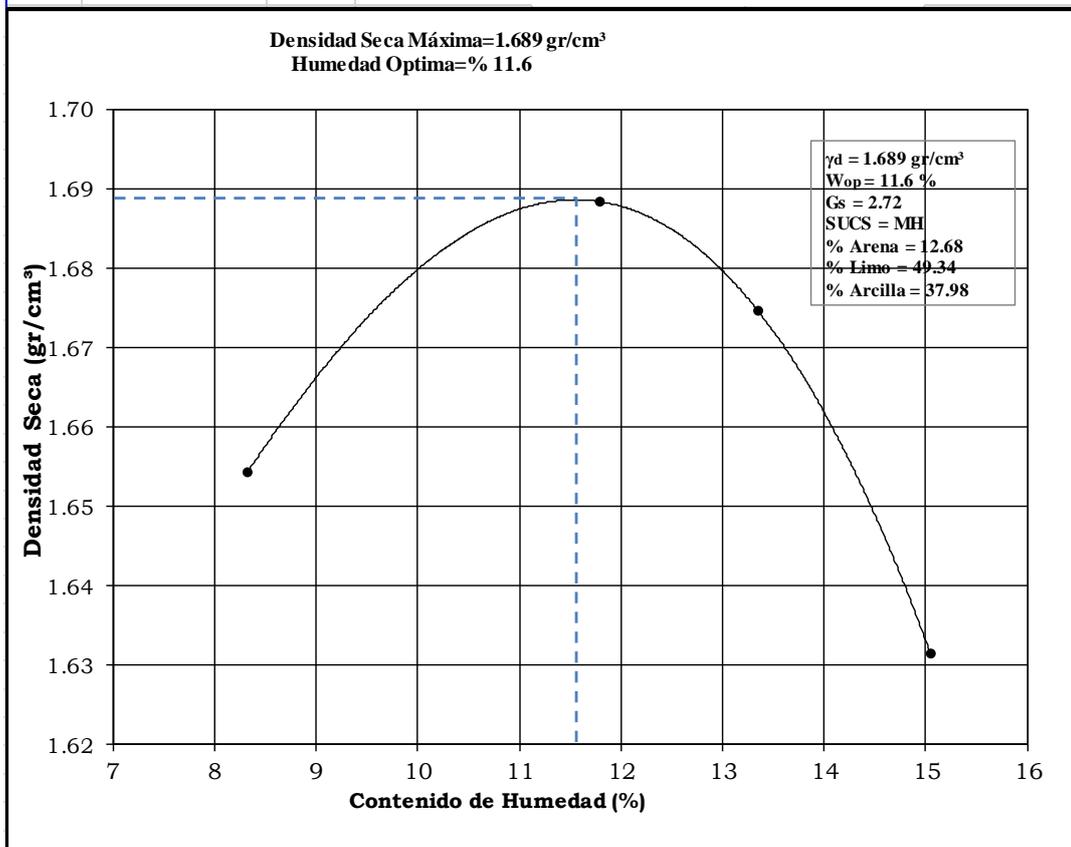
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 9/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 09
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		5	5	5	5
Golpes por capa Nº		25	25	25	25
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	6400	6490	6500	6480
Peso de molde	(gr)	4710	4710	4710	4710
Peso del suelo húmedo	(gr)	1690	1780	1790	1770
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	943	943	943	943
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.792	1.888	1.898	1.877
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.65	1.69	1.67	1.63
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	187.9	175.1	185.0	178.0
Tarro + Suelo seco	(gr)	175.0	159.0	166.2	159.1
Peso del Agua	(gr)	12.90	16.17	18.80	18.90
Peso del tarro	(gr)	20.10	21.91	25.40	33.50
Peso del suelo seco	(gr)	154.9	137.0	140.8	125.6
Humedad	(%)	8.33	11.80	13.35	15.05



OBSERVACIONES



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

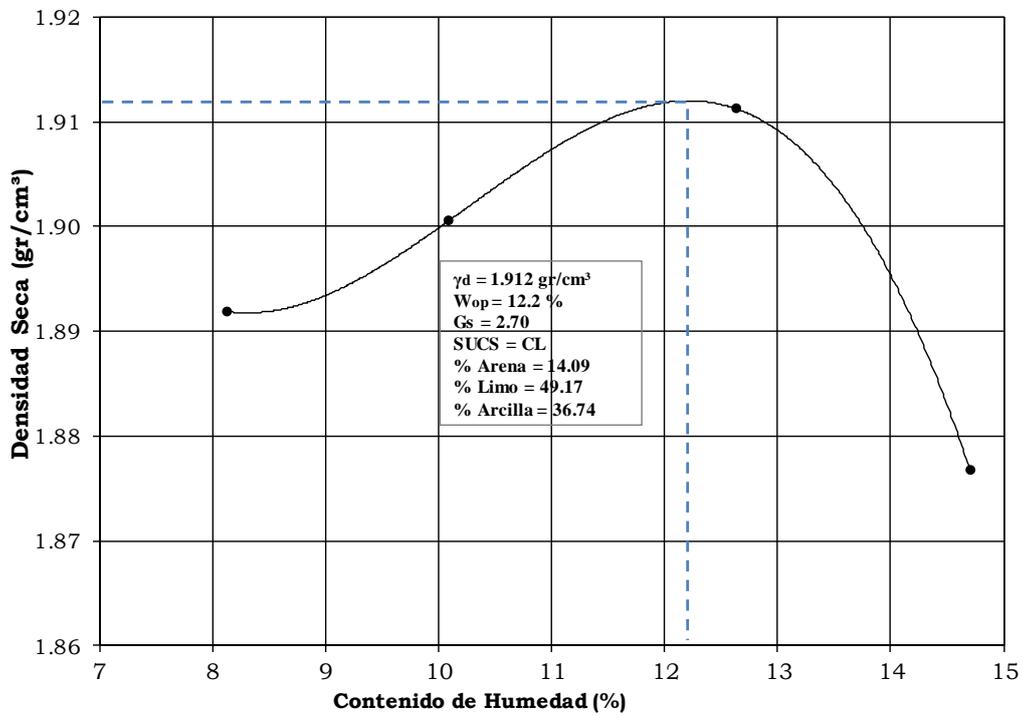
**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 10/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 10
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		5	5	5	5
Golpes por capa Nº		25	25	25	25
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	6544	6588	6645	6645
Peso de molde	(gr)	4615	4615	4615	4615
Peso del suelo húmedo	(gr)	1929	1973	2030	2030
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	943	943	943	943
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.046	2.092	2.153	2.153
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.89	1.90	1.91	1.88
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	251.2	222.2	274.3	216.8
Tarro + Suelo seco	(gr)	235.0	205.0	247.5	194.0
Peso del Agua	(gr)	16.20	17.20	26.76	22.80
Peso del tarro	(gr)	35.60	34.50	35.68	38.90
Peso del suelo seco	(gr)	199.4	170.5	211.8	155.1
Humedad	(%)	8.12	10.09	12.63	14.70

Densidad Seca Máxima=1.912gr/cm<sup>3</sup>  
 Humedad Optima=% 12.2



OBSERVACIONES					
---------------	--	--	--	--	--



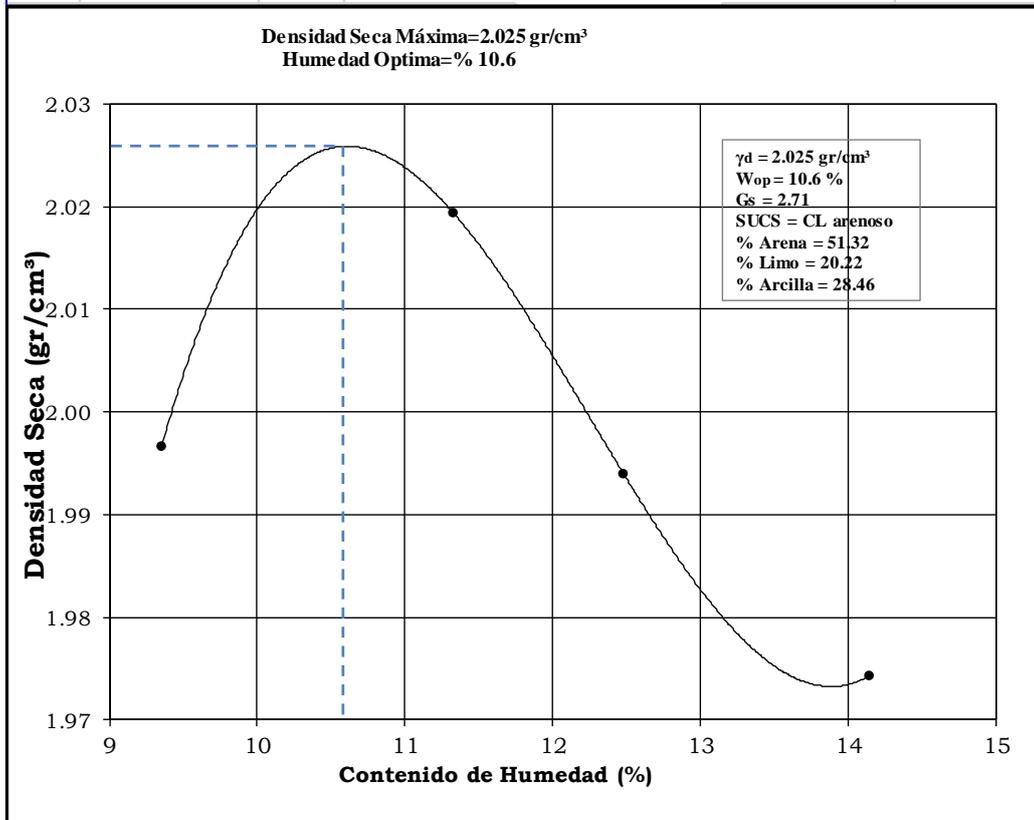
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 11/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 11
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	<b>6774</b>	<b>6835</b>	<b>6830</b>	<b>6840</b>
Peso de molde	(gr)	<b>4715</b>	<b>4715</b>	<b>4715</b>	<b>4715</b>
Peso del suelo húmedo	(gr)	2059	2120	2115	2125
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.183	2.248	2.243	2.253
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>2.00</b>	<b>2.02</b>	<b>1.99</b>	<b>1.97</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	<b>340.6</b>	<b>172.7</b>	<b>495.0</b>	<b>238.0</b>
Tarro + Suelo seco	(gr)	<b>315.0</b>	<b>157.6</b>	<b>468.0</b>	<b>210.0</b>
Peso del Agua	(gr)	25.61	15.10	27.01	28.00
Peso del tarro	(gr)	<b>41.18</b>	<b>24.27</b>	<b>251.58</b>	<b>12.00</b>
Peso del suelo seco	(gr)	273.8	133.3	216.4	198.0
Humedad	(%)	<b>9.35</b>	<b>11.33</b>	<b>12.48</b>	<b>14.14</b>



OBSERVACIONES					
---------------	--	--	--	--	--



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

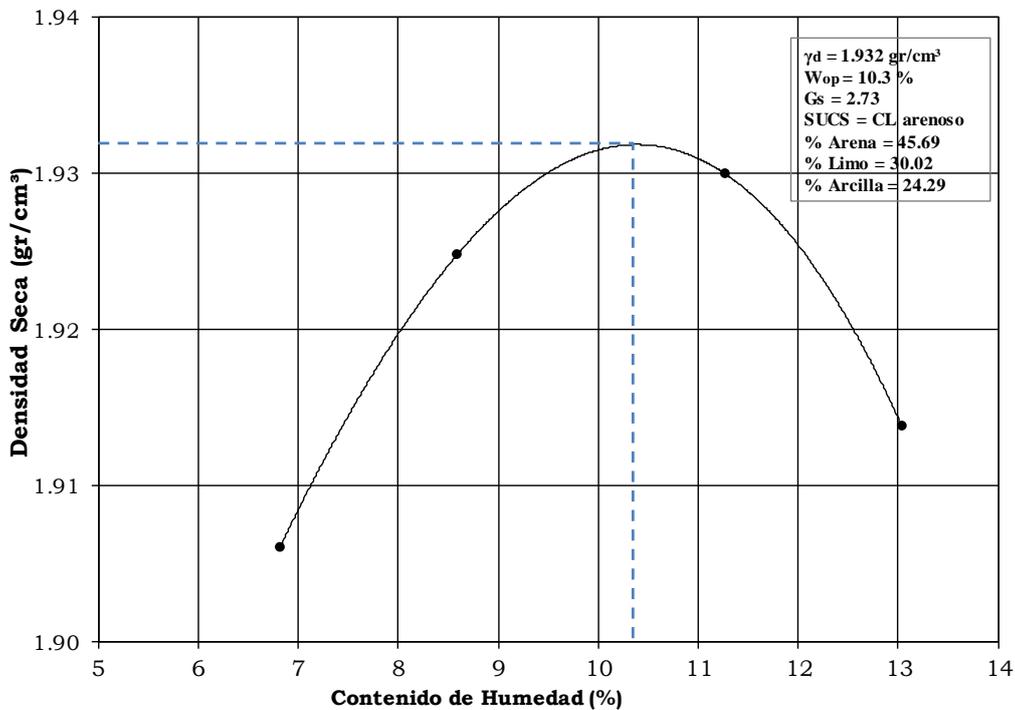
**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 12/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 12
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		5	5	5	5
Golpes por capa Nº		25	25	25	25
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	6620	6671	6725	6740
Peso de molde	(gr)	4700	4700	4700	4700
Peso del suelo húmedo	(gr)	1920	1971	2025	2040
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	943	943	943	943
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.036	2.090	2.147	2.163
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.91	1.92	1.93	1.91
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	254.5	246.2	246.7	289.5
Tarro + Suelo seco	(gr)	240.1	229.5	224.7	260.1
Peso del Agua	(gr)	14.40	16.70	22.02	29.40
Peso del tarro	(gr)	28.90	35.10	29.21	34.50
Peso del suelo seco	(gr)	211.2	194.4	195.5	225.6
Humedad	(%)	6.82	8.59	11.27	13.03

Densidad Seca Máxima=1.932 gr/cm<sup>3</sup>  
 Humedad Óptima=% 10.3



OBSERVACIONES					
---------------	--	--	--	--	--



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

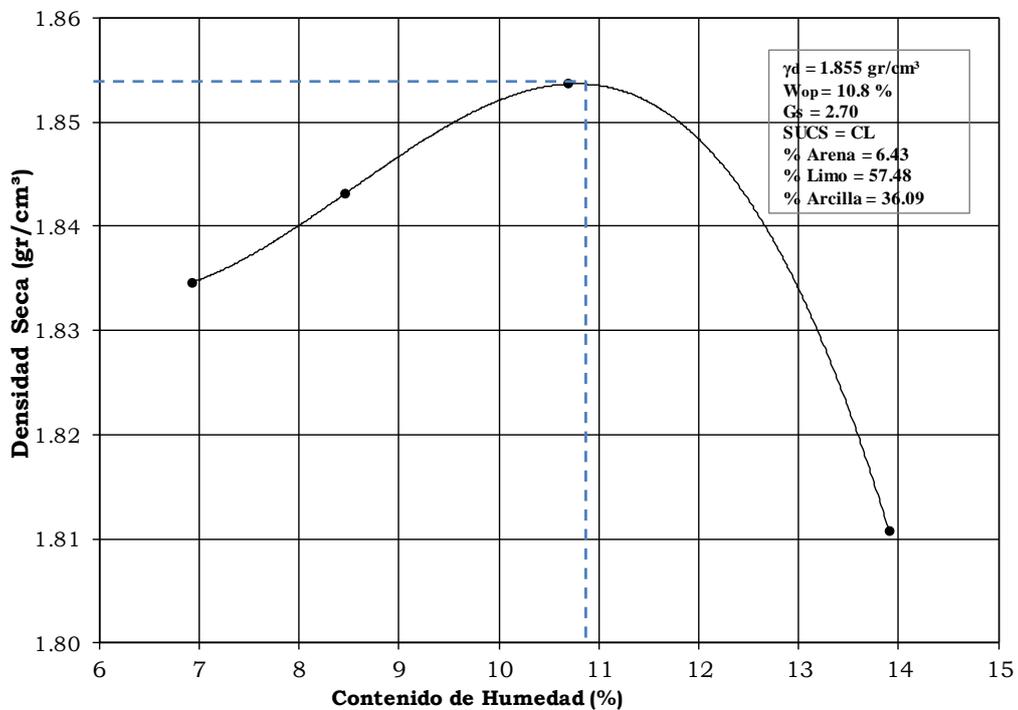
**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 13/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 13
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	<b>6525</b>	<b>6560</b>	<b>6610</b>	<b>6620</b>
Peso de molde	(gr)	<b>4675</b>	<b>4675</b>	<b>4675</b>	<b>4675</b>
Peso del suelo húmedo	(gr)	<b>1850</b>	<b>1885</b>	<b>1935</b>	<b>1945</b>
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.962</b>	<b>1.999</b>	<b>2.052</b>	<b>2.063</b>
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.83</b>	<b>1.84</b>	<b>1.85</b>	<b>1.81</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	<b>254.2</b>	<b>255.2</b>	<b>240.4</b>	<b>222.4</b>
Tarro + Suelo seco	(gr)	<b>240.0</b>	<b>238.0</b>	<b>220.9</b>	<b>200.0</b>
Peso del Agua	(gr)	<b>14.20</b>	<b>17.20</b>	<b>19.59</b>	<b>22.40</b>
Peso del tarro	(gr)	<b>35.20</b>	<b>34.60</b>	<b>37.74</b>	<b>38.90</b>
Peso del suelo seco	(gr)	<b>204.8</b>	<b>203.4</b>	<b>183.1</b>	<b>161.1</b>
Humedad	(%)	<b>6.93</b>	<b>8.46</b>	<b>10.70</b>	<b>13.90</b>

**Densidad Seca Máxima=1.855 gr/cm<sup>3</sup>**  
**Humedad Optima=% 10.8**



OBSERVACIONES



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

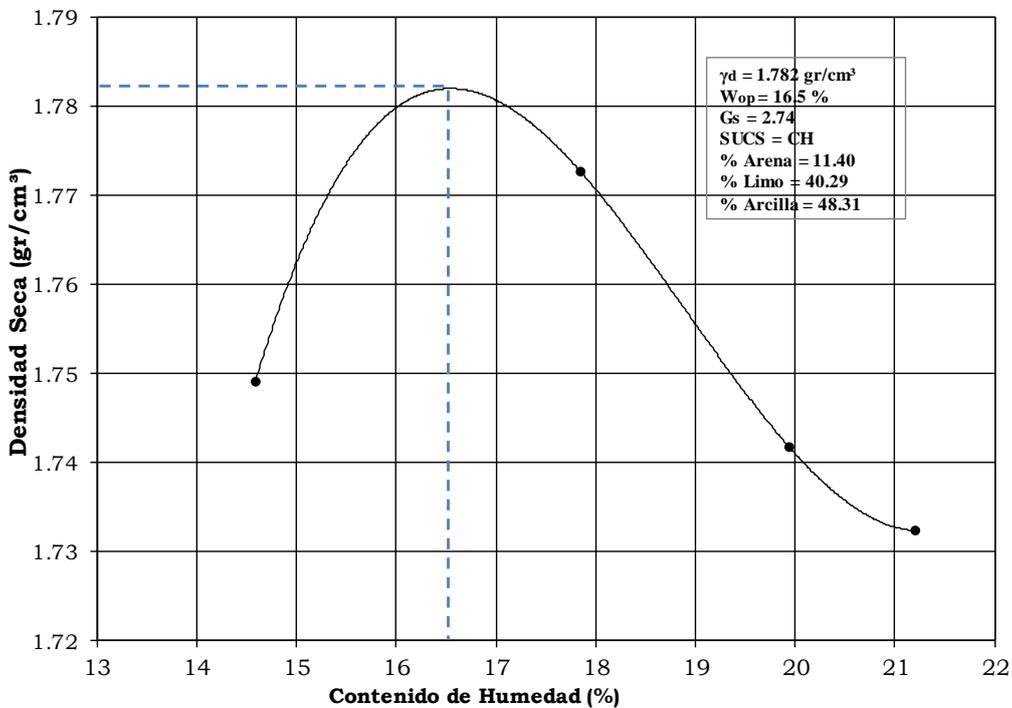
**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 14/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 14
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	6590	6670	6670	6680
Peso de molde	(gr)	4700	4700	4700	4700
Peso del suelo húmedo	(gr)	1890	1970	1970	1980
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	943	943	943	943
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.004	2.089	2.089	2.100
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.75	1.77	1.74	1.73
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	241.2	241.6	247.8	235.6
Tarro + Suelo seco	(gr)	215.0	210.7	213.0	200.0
Peso del Agua	(gr)	26.20	30.88	34.80	35.60
Peso del tarro	(gr)	35.40	37.74	38.50	32.10
Peso del suelo seco	(gr)	179.6	173.0	174.5	167.9
Humedad	(%)	14.59	17.85	19.94	21.20

**Densidad Seca Máxima=1.782 gr/cm<sup>3</sup>**  
**Humedad Óptima=% 16.5**



OBSERVACIONES					
---------------	--	--	--	--	--



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

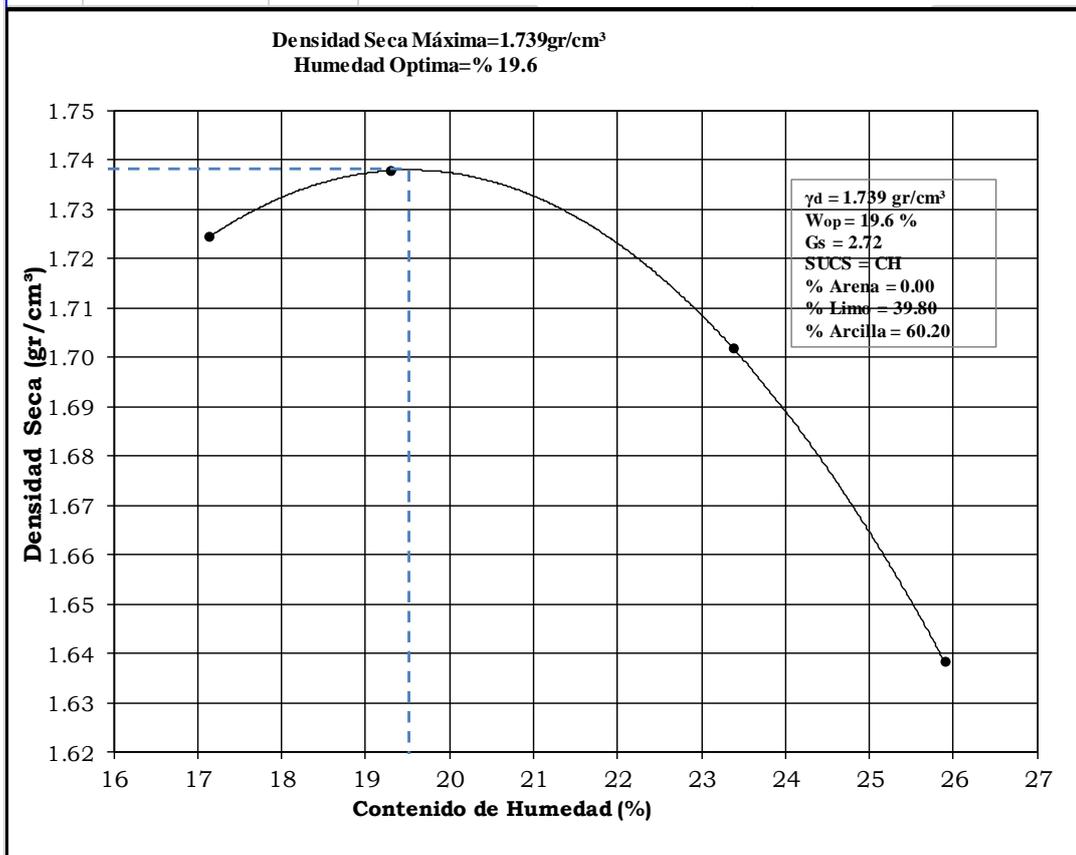
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 15/2019**

SOLICITANTE	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 15
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	<b>6605</b>	<b>6655</b>	<b>6680</b>	<b>6645</b>
Peso de molde	(gr)	<b>4700</b>	<b>4700</b>	<b>4700</b>	<b>4700</b>
Peso del suelo húmedo	(gr)	<b>1905</b>	<b>1955</b>	<b>1980</b>	<b>1945</b>
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>2.020</b>	<b>2.073</b>	<b>2.100</b>	<b>2.063</b>
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.72</b>	<b>1.74</b>	<b>1.70</b>	<b>1.64</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	<b>345.6</b>	<b>159.3</b>	<b>245.8</b>	<b>297.2</b>
Tarro + Suelo seco	(gr)	<b>303.0</b>	<b>135.6</b>	<b>206.0</b>	<b>242.0</b>
Peso del Agua	(gr)	<b>42.60</b>	<b>23.71</b>	<b>39.80</b>	<b>55.20</b>
Peso del tarro	(gr)	<b>54.50</b>	<b>12.69</b>	<b>35.80</b>	<b>28.90</b>
Peso del suelo seco	(gr)	<b>248.5</b>	<b>122.9</b>	<b>170.2</b>	<b>213.1</b>
Humedad	(%)	<b>17.14</b>	<b>19.29</b>	<b>23.38</b>	<b>25.90</b>



OBSERVACIONES					
---------------	--	--	--	--	--



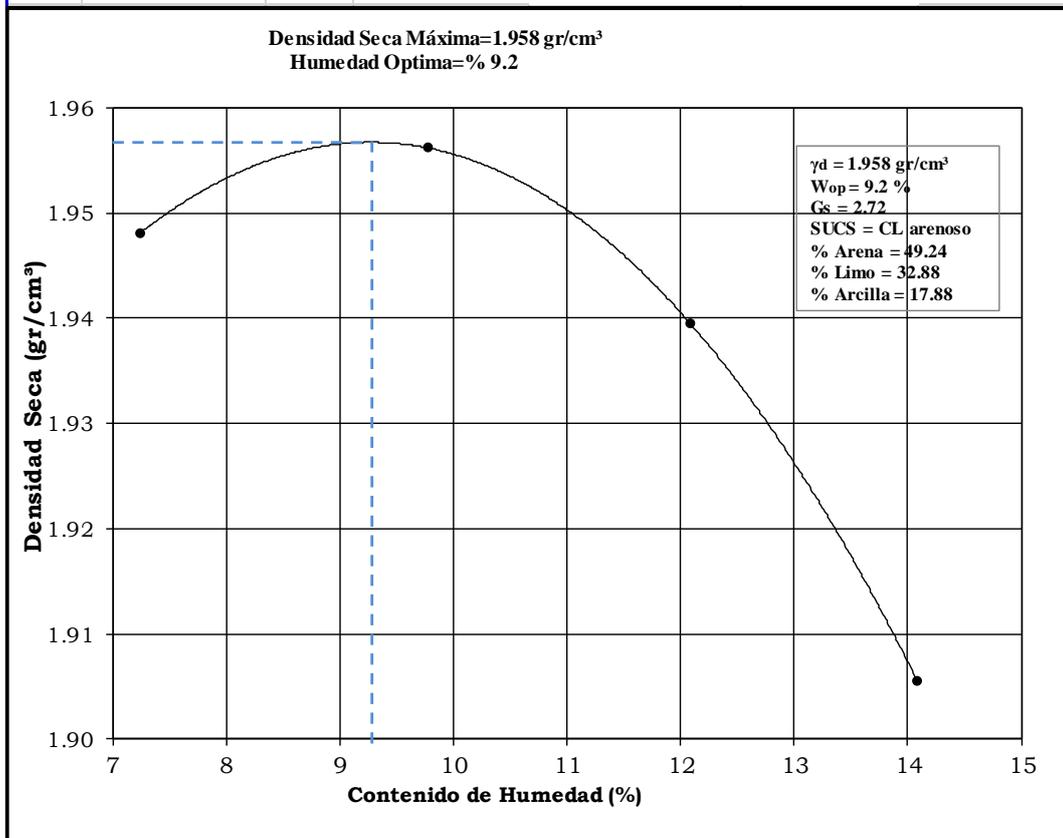
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 16/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 16
FECHA	:	01/06/2019

Nº Capa		5	5	5	5
Golpes por capa Nº		25	25	25	25
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	6670	6725	6750	6750
Peso de molde	(gr)	4700	4700	4700	4700
Peso del suelo húmedo	(gr)	1970	2025	2050	2050
Volumen del molde	(cm3)	943	943	943	943
Densidad húmeda	(gr/cm3)	2.089	2.147	2.174	2.174
Densidad seca	(gr/cm3)	1.95	1.96	1.94	1.91
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	241.5	367.0	235.9	255.5
Tarro + Suelo seco	(gr)	228.0	337.2	215.0	230.0
Peso del Agua	(gr)	13.50	29.79	20.90	25.50
Peso del tarro	(gr)	41.50	32.43	42.10	48.90
Peso del suelo seco	(gr)	186.5	304.8	172.9	181.1
Humedad	(%)	7.24	9.78	12.09	14.08



OBSERVACIONES					
---------------	--	--	--	--	--



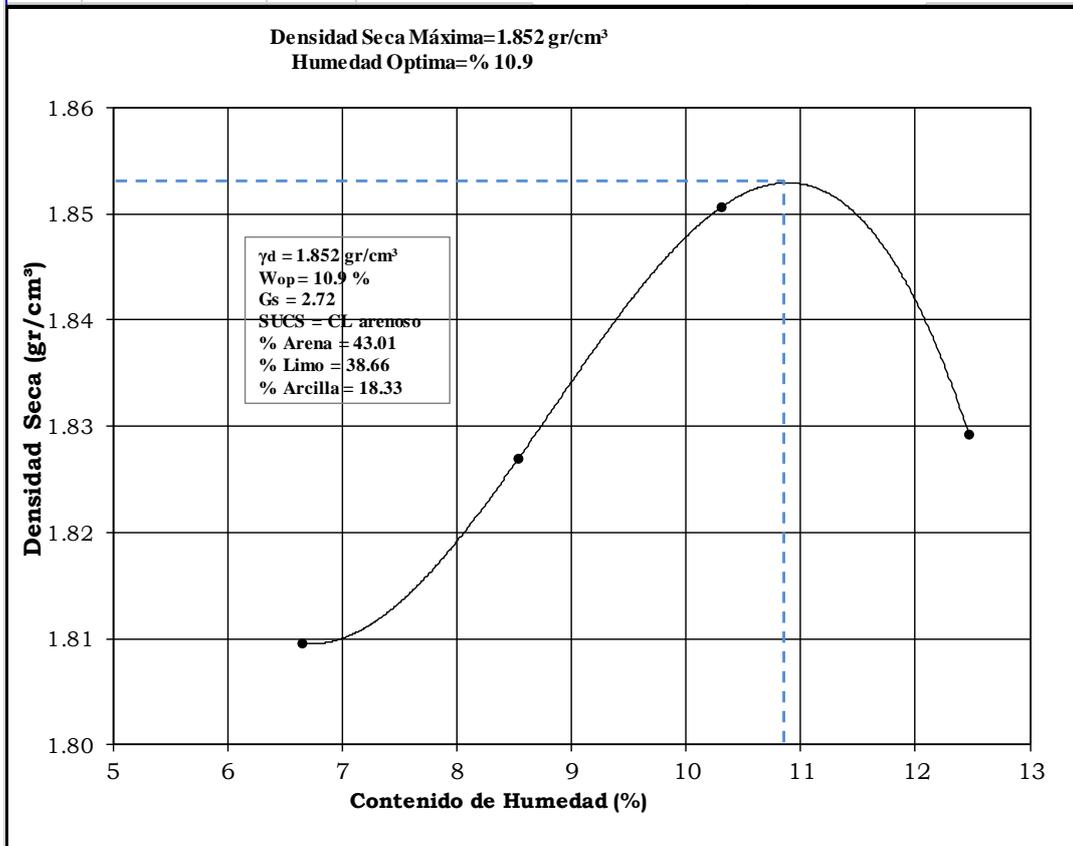
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 17/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 17
FECHA	:	01/06/2019

Nº Capa		5	5	5	5
Golpes por capa Nº		25	25	25	25
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	6520	6570	6625	6640
Peso de molde	(gr)	4700	4700	4700	4700
Peso del suelo húmedo	(gr)	1820	1870	1925	1940
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	943	943	943	943
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.930	1.983	2.041	2.057
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.81	1.83	1.85	1.83
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	241.5	235.5	263.5	265.3
Tarro + Suelo seco	(gr)	229.0	219.0	241.8	240.2
Peso del Agua	(gr)	12.50	16.50	21.68	25.10
Peso del tarro	(gr)	41.20	25.80	31.43	38.90
Peso del suelo seco	(gr)	187.8	193.2	210.4	201.3
Humedad	(%)	6.66	8.54	10.31	12.47



OBSERVACIONES				
---------------	--	--	--	--



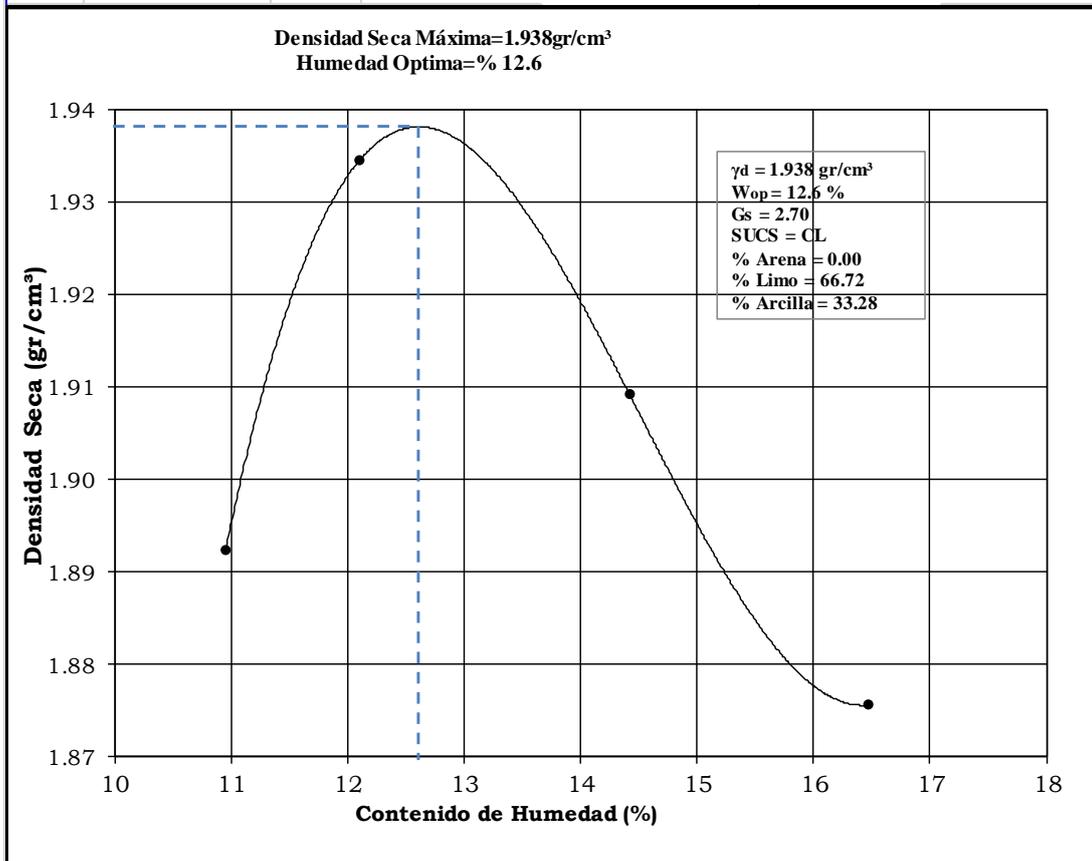
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 18/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 18
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	<b>6680</b>	<b>6745</b>	<b>6760</b>	<b>6760</b>
Peso de molde	(gr)	<b>4700</b>	<b>4700</b>	<b>4700</b>	<b>4700</b>
Peso del suelo húmedo	(gr)	1980	2045	2060	2060
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.100	2.169	2.185	2.185
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.89</b>	<b>1.93</b>	<b>1.91</b>	<b>1.88</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	<b>278.9</b>	<b>289.9</b>	<b>286.5</b>	<b>305.6</b>
Tarro + Suelo seco	(gr)	<b>255.0</b>	<b>263.4</b>	<b>255.3</b>	<b>268.0</b>
Peso del Agua	(gr)	23.90	26.47	31.20	37.60
Peso del tarro	(gr)	<b>36.80</b>	<b>44.71</b>	<b>38.90</b>	<b>39.70</b>
Peso del suelo seco	(gr)	218.2	218.7	216.4	228.3
Humedad	(%)	<b>10.95</b>	<b>12.10</b>	<b>14.42</b>	<b>16.47</b>



OBSERVACIONES					
---------------	--	--	--	--	--



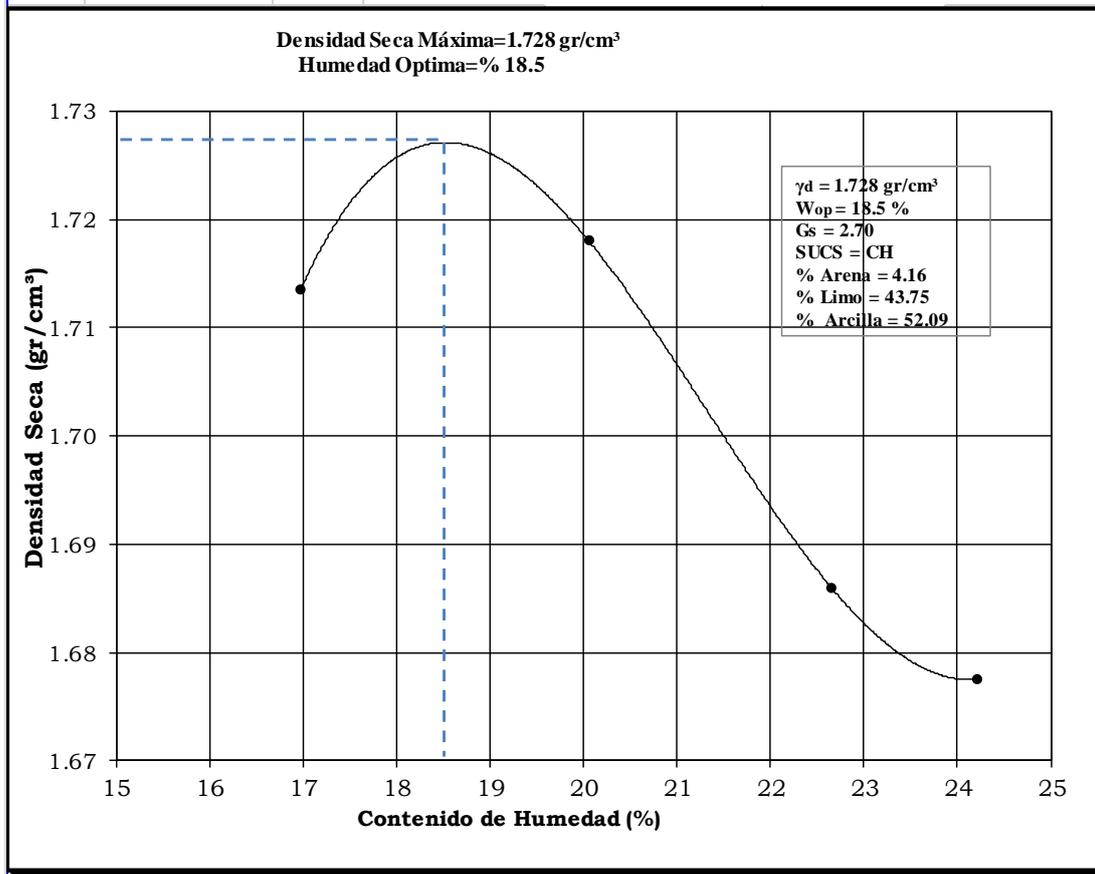
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 19/2019**

<b>EJECUTOR</b>	:	Ing. Erick Rosales Asto
<b>ASESORA</b>	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
<b>PROYECTO</b>	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
<b>MUESTRA</b>	:	M - 19
<b>FECHA</b>	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	<b>6580</b>	<b>6635</b>	<b>6640</b>	<b>6655</b>
Peso de molde	(gr)	<b>4690</b>	<b>4690</b>	<b>4690</b>	<b>4690</b>
Peso del suelo húmedo	(gr)	1890	1945	1950	1965
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.004	2.063	2.068	2.084
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.71</b>	<b>1.72</b>	<b>1.69</b>	<b>1.68</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	<b>265.5</b>	<b>225.6</b>	<b>255.4</b>	<b>241.5</b>
Tarro + Suelo seco	(gr)	<b>230.0</b>	<b>192.8</b>	<b>213.0</b>	<b>199.0</b>
Peso del Agua	(gr)	35.50	32.79	42.40	42.50
Peso del tarro	(gr)	<b>20.80</b>	<b>29.25</b>	<b>25.80</b>	<b>23.50</b>
Peso del suelo seco	(gr)	209.2	163.5	187.2	175.5
Humedad	(%)	<b>16.97</b>	<b>20.05</b>	<b>22.65</b>	<b>24.22</b>



**OBSERVACIONES**



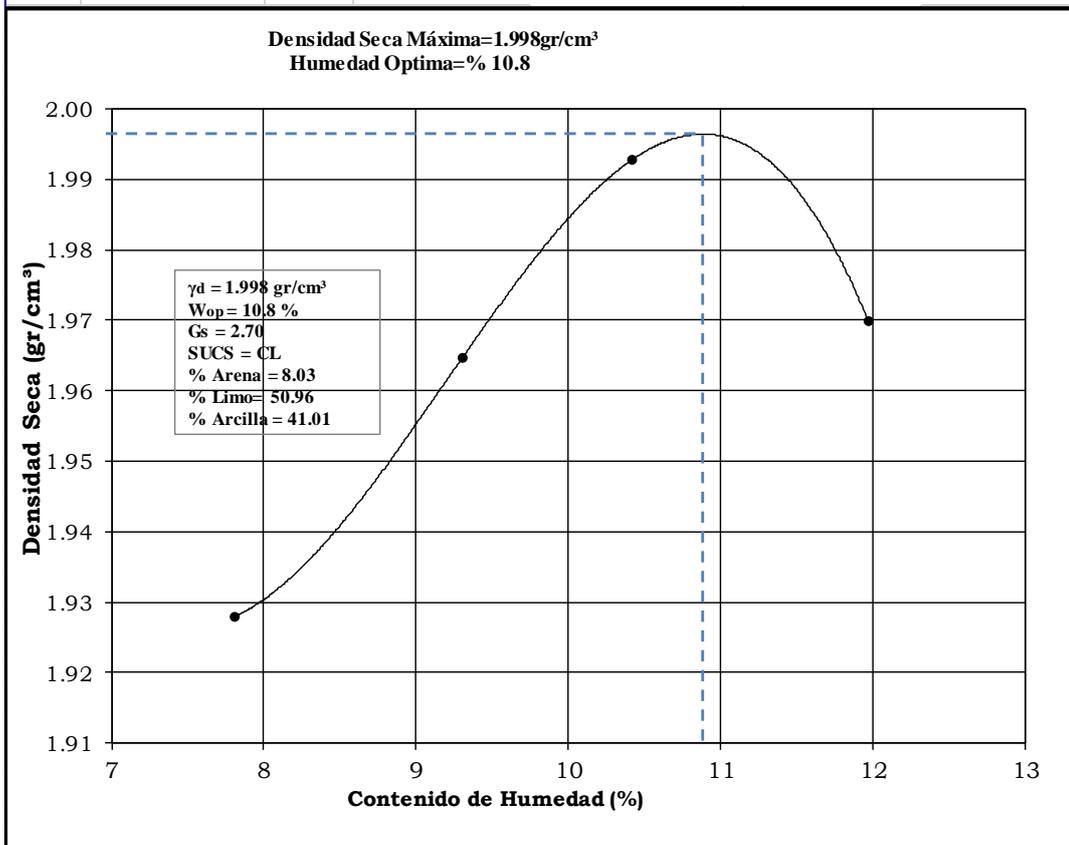
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 20/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 20
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	<b>6635</b>	<b>6700</b>	<b>6750</b>	<b>6755</b>
Peso de molde	(gr)	<b>4675</b>	<b>4675</b>	<b>4675</b>	<b>4675</b>
Peso del suelo húmedo	(gr)	1960	2025	2075	2080
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.078	2.147	2.200	2.206
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.93</b>	<b>1.96</b>	<b>1.99</b>	<b>1.97</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	<b>254.2</b>	<b>265.1</b>	<b>251.5</b>	<b>245.6</b>
Tarro + Suelo seco	(gr)	<b>238.0</b>	<b>245.0</b>	<b>231.4</b>	<b>223.0</b>
Peso del Agua	(gr)	16.20	20.10	20.17	22.60
Peso del tarro	(gr)	<b>30.50</b>	<b>28.95</b>	<b>37.79</b>	<b>34.22</b>
Peso del suelo seco	(gr)	207.5	216.1	193.6	188.8
Humedad	(%)	<b>7.81</b>	<b>9.30</b>	<b>10.42</b>	<b>11.97</b>



OBSERVACIONES					
---------------	--	--	--	--	--



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

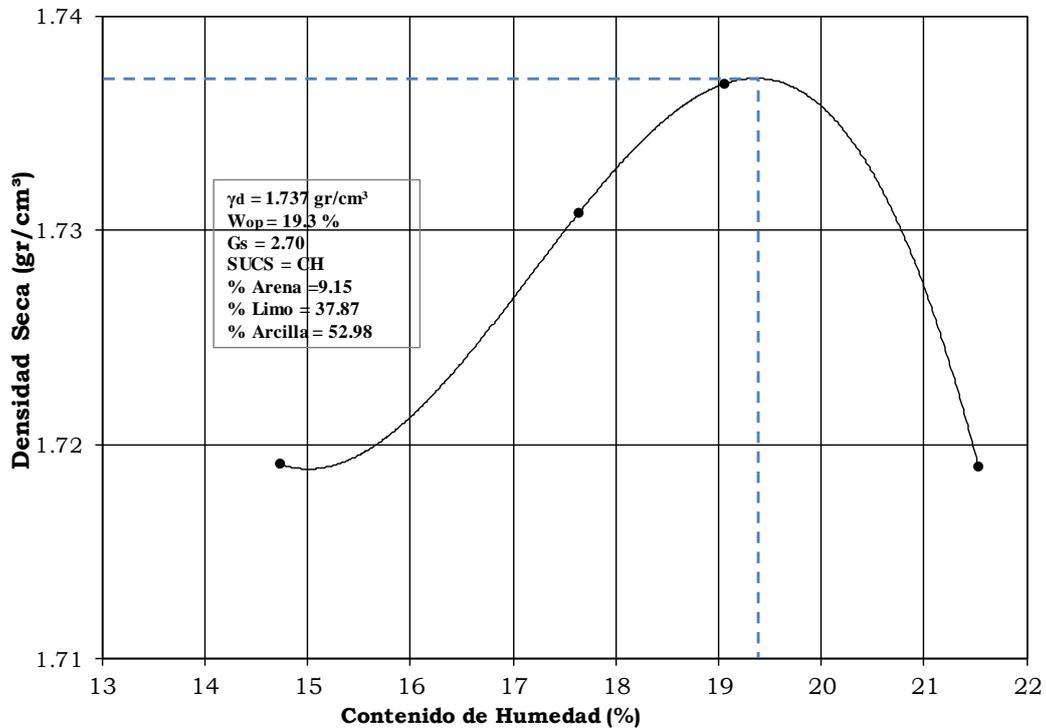
**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 21/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 21
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	6570	6630	6660	6680
Peso de molde	(gr)	4710	4710	4710	4710
Peso del suelo húmedo	(gr)	1860	1920	1950	1970
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	943	943	943	943
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.972	2.036	2.068	2.089
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.72</b>	<b>1.73</b>	<b>1.74</b>	<b>1.72</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	280.2	250.9	285.6	240.8
Tarro + Suelo seco	(gr)	248.0	220.0	247.1	204.5
Peso del Agua	(gr)	32.20	30.90	38.57	36.30
Peso del tarro	(gr)	29.50	44.80	44.68	35.90
Peso del suelo seco	(gr)	218.5	175.2	202.4	168.6
Humedad	(%)	<b>14.74</b>	<b>17.64</b>	<b>19.06</b>	<b>21.53</b>

Densidad Seca Máxima=1.737 gr/cm<sup>3</sup>  
Humedad Optima=% 19.3



OBSERVACIONES					
---------------	--	--	--	--	--



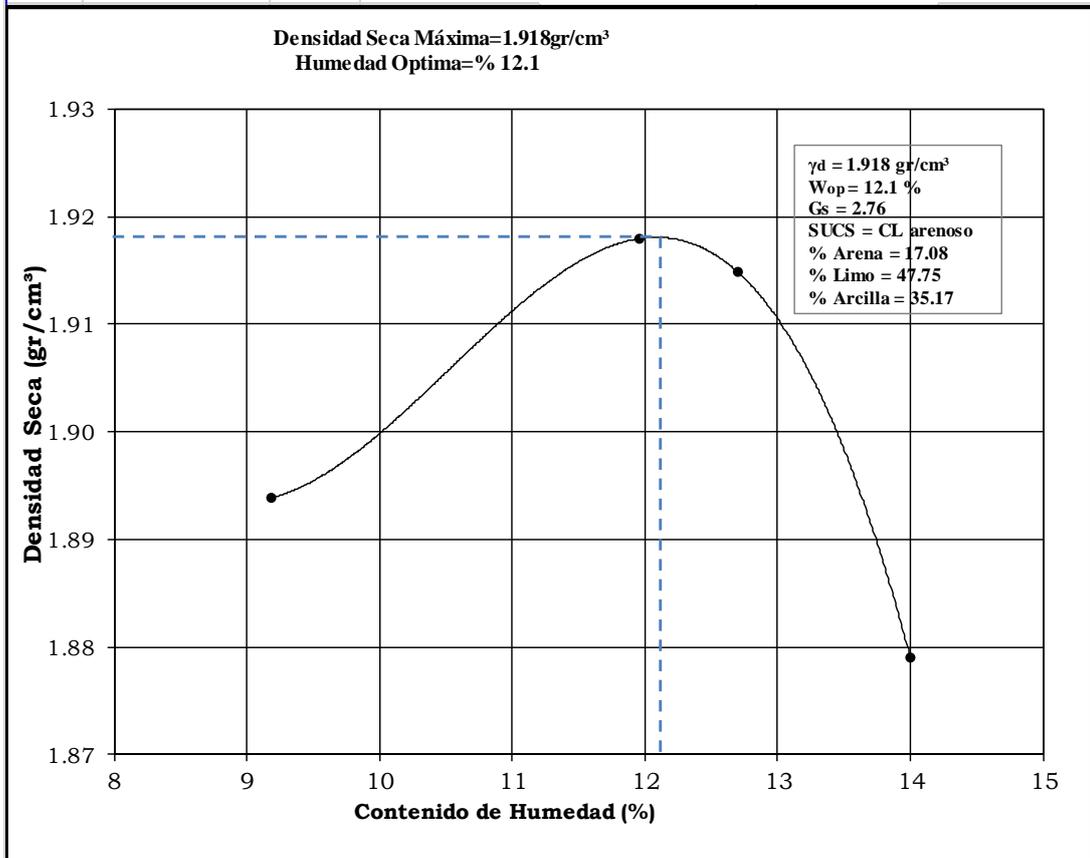
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 22/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 22
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	<b>6650</b>	<b>6725</b>	<b>6735</b>	<b>6720</b>
Peso de molde	(gr)	<b>4700</b>	<b>4700</b>	<b>4700</b>	<b>4700</b>
Peso del suelo húmedo	(gr)	1950	2025	2035	2020
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.068	2.147	2.158	2.142
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.89</b>	<b>1.92</b>	<b>1.91</b>	<b>1.88</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	<b>245.2</b>	<b>256.6</b>	<b>215.2</b>	<b>222.5</b>
Tarro + Suelo seco	(gr)	<b>227.0</b>	<b>233.0</b>	<b>195.0</b>	<b>199.5</b>
Peso del Agua	(gr)	18.20	23.61	20.20	23.00
Peso del tarro	(gr)	<b>28.90</b>	<b>35.60</b>	<b>35.90</b>	<b>35.20</b>
Peso del suelo seco	(gr)	198.1	197.4	159.1	164.3
Humedad	(%)	<b>9.19</b>	<b>11.96</b>	<b>12.70</b>	<b>14.00</b>



OBSERVACIONES



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

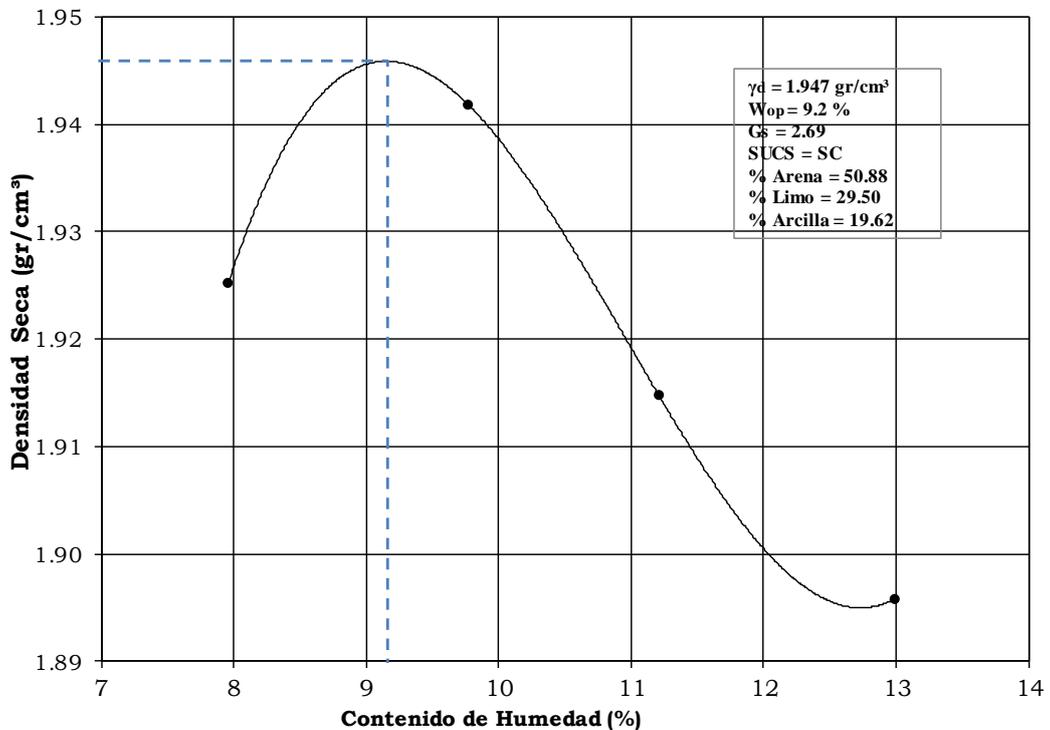
**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 23/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 23
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	<b>6640</b>	<b>6690</b>	<b>6688</b>	<b>6700</b>
Peso de molde	(gr)	<b>4680</b>	<b>4680</b>	<b>4680</b>	<b>4680</b>
Peso del suelo húmedo	(gr)	1960	2010	2008	2020
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.078	2.131	2.129	2.142
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.93</b>	<b>1.94</b>	<b>1.91</b>	<b>1.90</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	<b>256.3</b>	<b>271.4</b>	<b>245.3</b>	<b>215.8</b>
Tarro + Suelo seco	(gr)	<b>240.0</b>	<b>249.9</b>	<b>224.5</b>	<b>195.3</b>
Peso del Agua	(gr)	16.30	21.54	20.80	20.50
Peso del tarro	(gr)	<b>35.20</b>	<b>29.24</b>	<b>38.90</b>	<b>37.50</b>
Peso del suelo seco	(gr)	204.8	220.6	185.6	157.8
Humedad	(%)	<b>7.96</b>	<b>9.76</b>	<b>11.21</b>	<b>12.99</b>

**Densidad Seca Máxima=1.947gr/cm<sup>3</sup>**  
**Humedad Optima=% 9.2**



OBSERVACIONES



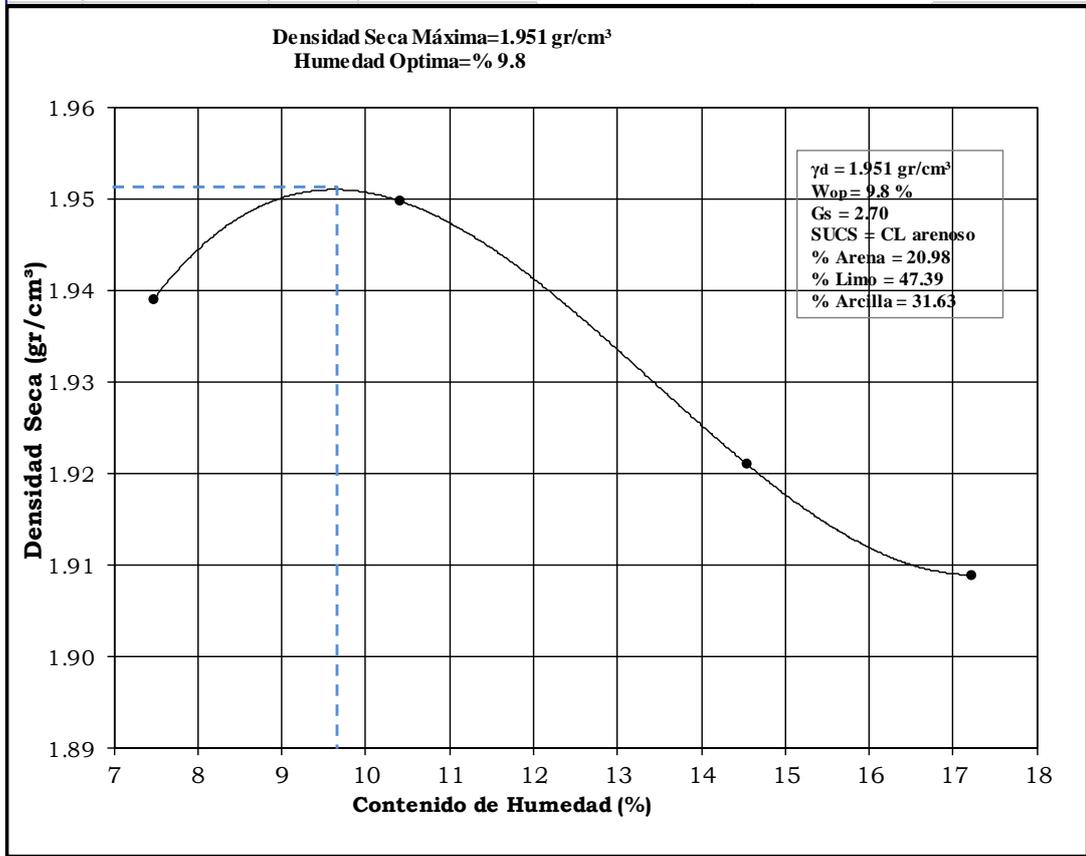
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 24/2019**

<b>EJECUTOR</b>	:	Ing. Erick Rosales Asto
<b>ASESORA</b>	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
<b>PROYECTO</b>	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
<b>MUESTRA</b>	:	M - 24
<b>FECHA</b>	:	01/06/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	6665	6730	6775	6810
Peso de molde	(gr)	4700	4700	4700	4700
Peso del suelo húmedo	(gr)	1965	2030	2075	2110
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	943	943	943	943
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.084	2.153	2.200	2.238
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.94</b>	<b>1.95</b>	<b>1.92</b>	<b>1.91</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	243.0	370.0	239.0	260.0
Tarro + Suelo seco	(gr)	229.0	338.2	214.0	229.0
Peso del Agua	(gr)	14.00	31.82	25.00	31.00
Peso del tarro	(gr)	41.50	32.43	42.10	48.90
Peso del suelo seco	(gr)	187.5	305.8	171.9	180.1
Humedad	(%)	<b>7.47</b>	<b>10.41</b>	<b>14.54</b>	<b>17.21</b>



**OBSERVACIONES**



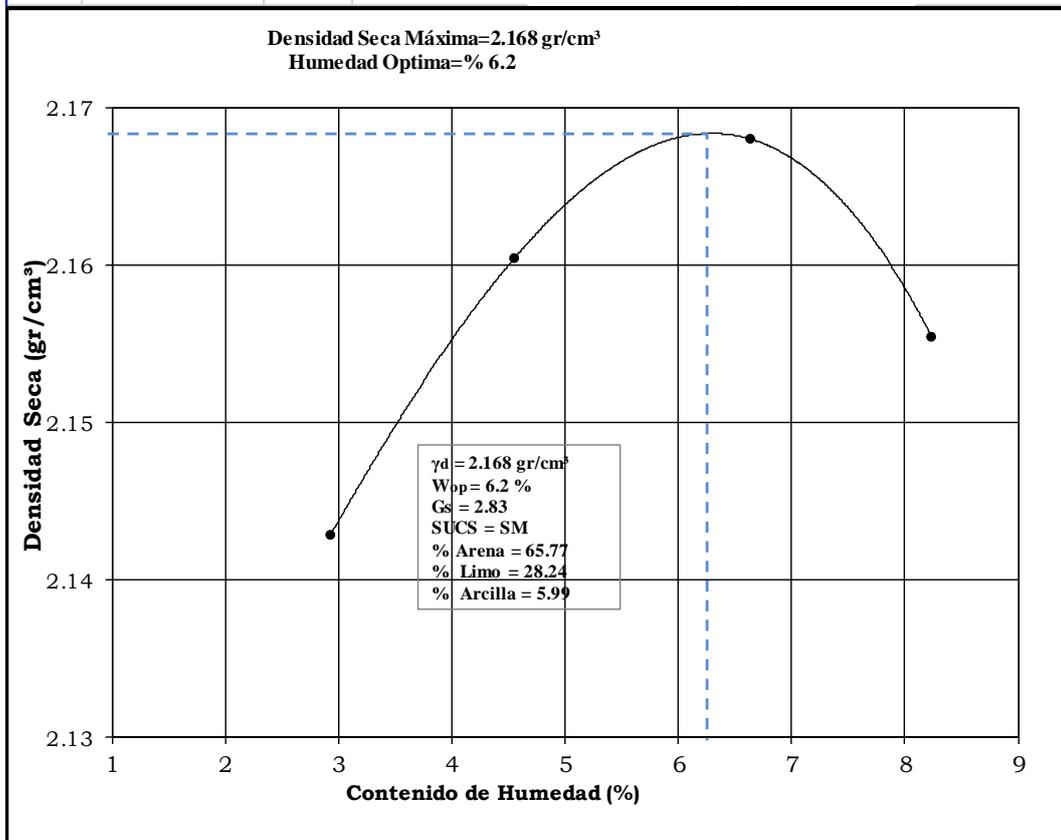
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 25/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA		M - 25
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		5	5	5	5
Golpes por capa Nº		25	25	25	25
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	6780	6830	6880	6900
Peso de molde	(gr)	4700	4700	4700	4700
Peso del suelo húmedo	(gr)	2080	2130	2180	2200
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	943	943	943	943
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.206	2.259	2.312	2.333
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.14	2.16	2.17	2.16
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	245.3	298.5	207.6	242.3
Tarro + Suelo seco	(gr)	239.6	287.3	197.6	227.5
Peso del Agua	(gr)	5.70	11.20	10.03	14.80
Peso del tarro	(gr)	45.20	41.18	46.30	47.80
Peso del suelo seco	(gr)	194.4	246.1	151.3	179.7
Humedad	(%)	2.93	4.55	6.63	8.24



OBSERVACIONES



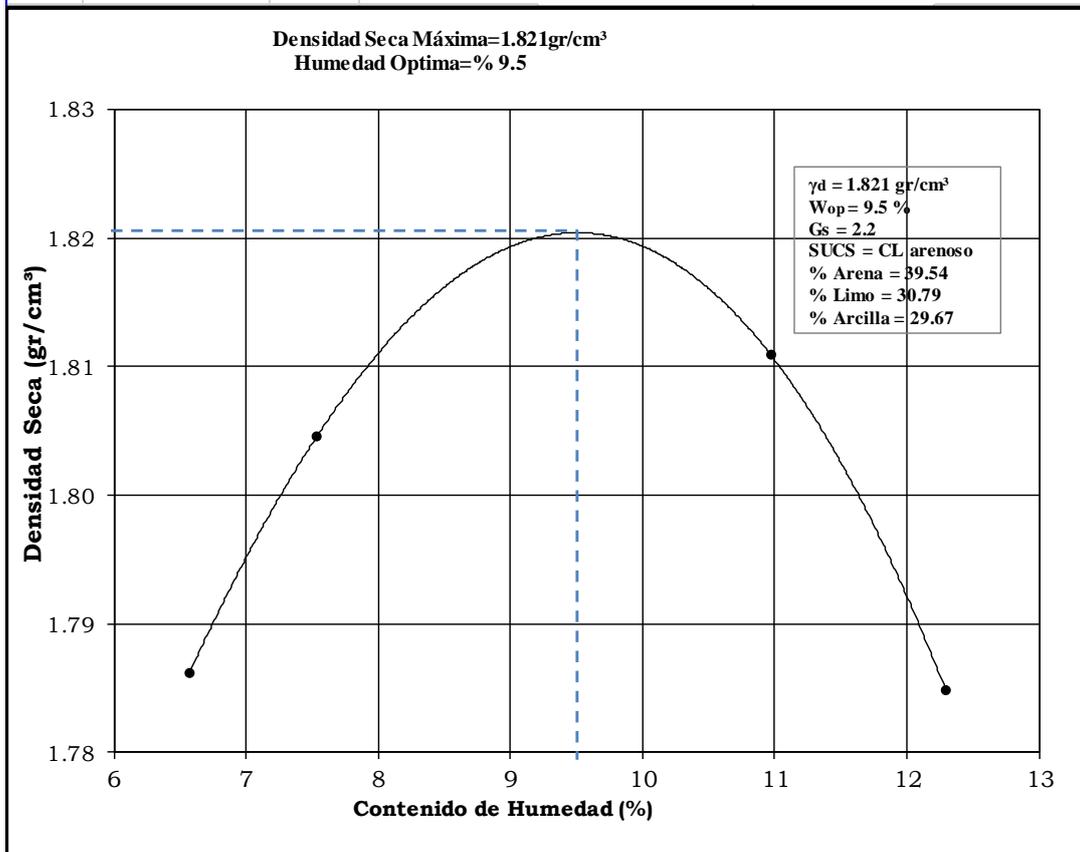
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 26/2019**

<b>EJECUTOR</b>	:	Ing. Erick Rosales Asto
<b>ASESORA</b>	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
<b>PROYECTO</b>	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
<b>MUESTRA</b>	:	M - 26
<b>FECHA</b>	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	6505	6540	6605	6600
Peso de molde	(gr)	4710	4710	4710	4710
Peso del suelo húmedo	(gr)	1795	1830	1895	1890
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	943	943	943	943
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.903	1.941	2.010	2.004
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.79</b>	<b>1.80</b>	<b>1.81</b>	<b>1.78</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	245.6	255.4	243.3	228.9
Tarro + Suelo seco	(gr)	232.0	240.0	222.2	207.0
Peso del Agua	(gr)	13.60	15.40	21.16	21.90
Peso del tarro	(gr)	25.00	35.67	29.25	28.90
Peso del suelo seco	(gr)	207.0	204.3	192.9	178.1
Humedad	(%)	<b>6.57</b>	<b>7.54</b>	<b>10.97</b>	<b>12.30</b>



OBSERVACIONES



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

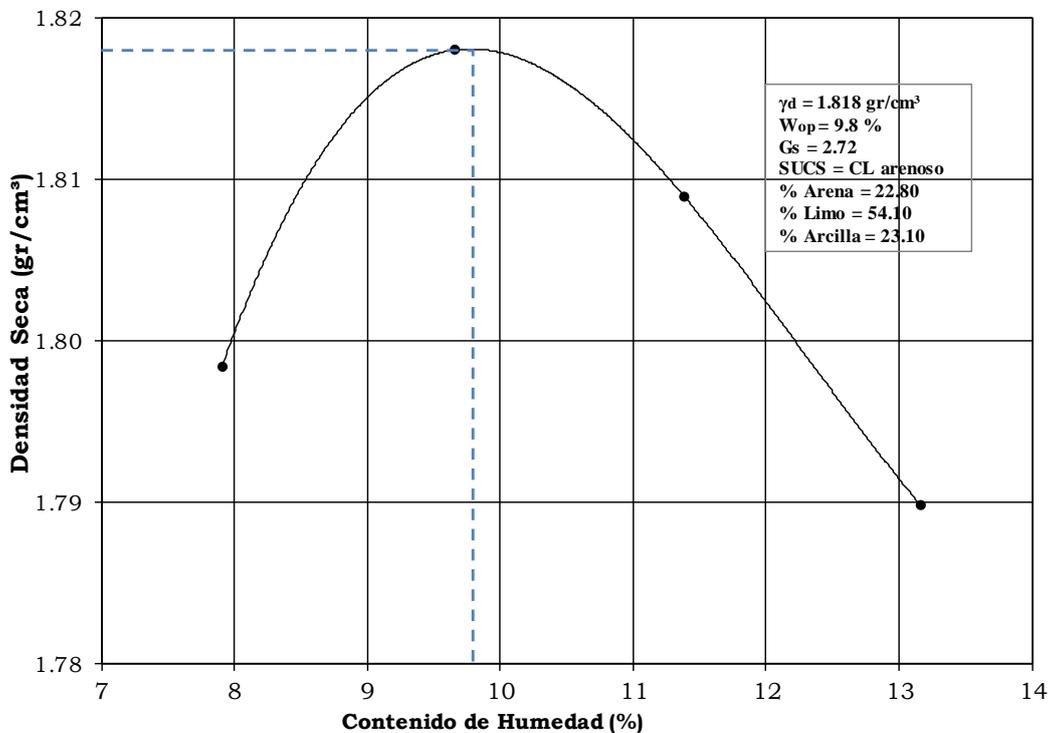
**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 27/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 27
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	<b>6540</b>	<b>6590</b>	<b>6610</b>	<b>6620</b>
Peso de molde	(gr)	<b>4710</b>	<b>4710</b>	<b>4710</b>	<b>4710</b>
Peso del suelo húmedo	(gr)	1830	1880	1900	1910
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.941	1.994	2.015	2.025
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.80</b>	<b>1.82</b>	<b>1.81</b>	<b>1.79</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	<b>241.2</b>	<b>262.0</b>	<b>259.5</b>	<b>254.1</b>
Tarro + Suelo seco	(gr)	<b>225.0</b>	<b>242.1</b>	<b>235.6</b>	<b>227.9</b>
Peso del Agua	(gr)	16.20	19.94	23.90	26.20
Peso del tarro	(gr)	<b>20.12</b>	<b>35.67</b>	<b>25.60</b>	<b>28.90</b>
Peso del suelo seco	(gr)	204.9	206.4	210.0	199.0
Humedad	(%)	<b>7.91</b>	<b>9.66</b>	<b>11.38</b>	<b>13.17</b>

**Densidad Seca Máxima=1.818gr/cm<sup>3</sup>**  
**Humedad Optima=% 9.8**



OBSERVACIONES					
---------------	--	--	--	--	--



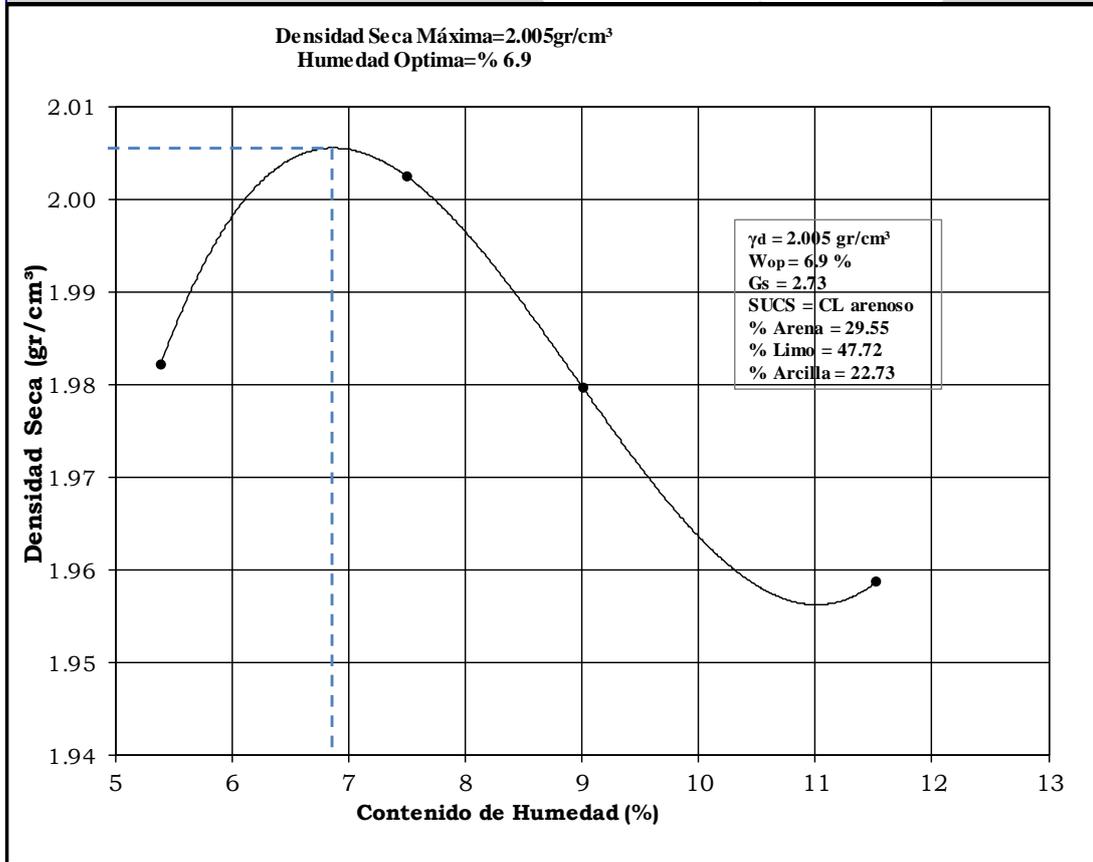
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS**

**ENSAYO DE COMPACTACION PROCTOR  
 MODIFICADO ASTM D 1557 METODO "A"**

**INFORME LMS 28/2019**

EJECUTOR	:	Ing. Erick Rosales Asto
ASESORA	:	Mg. Sc. Teresa Velásquez Bejarano
PROYECTO	:	Análisis experimental del fenómeno de tubificación en presas de tierra.
MUESTRA	:	M - 28
FECHA	:	31/05/2019

Nº Capa		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Golpes por capa Nº		<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
Peso molde + suelo húmedo	(gr)	<b>6680</b>	<b>6740</b>	<b>6745</b>	<b>6770</b>
Peso de molde	(gr)	<b>4710</b>	<b>4710</b>	<b>4710</b>	<b>4710</b>
Peso del suelo húmedo	(gr)	1970	2030	2035	2060
Volumen del molde	(cm <sup>3</sup> )	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>	<b>943</b>
Densidad húmeda	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.089	2.153	2.158	2.185
Densidad seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.98</b>	<b>2.00</b>	<b>1.98</b>	<b>1.96</b>
Tarro Nº					
Tarro + Suelo húmedo	(gr)	<b>248.9</b>	<b>274.6</b>	<b>256.2</b>	<b>291.6</b>
Tarro + Suelo seco	(gr)	<b>238.0</b>	<b>258.0</b>	<b>238.0</b>	<b>265.0</b>
Peso del Agua	(gr)	10.90	16.53	18.20	26.60
Peso del tarro	(gr)	<b>35.80</b>	<b>37.77</b>	<b>35.90</b>	<b>34.20</b>
Peso del suelo seco	(gr)	202.2	220.3	202.1	230.8
Humedad	(%)	<b>5.39</b>	<b>7.51</b>	<b>9.01</b>	<b>11.53</b>



OBSERVACIONES

ANEXO 3.- Resultados de ensayos de sólidos en suspensión.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

LMS 01/ 2019

**Concentración en peso de solidos**

<b>Muestra</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Concentración en peso de solidos (gr/l)</b>
<b>M-1</b>	10	1.7053
	20	1.3729
	30	1.8852
<b>M-2</b>	10	16.4211
	20	3.2000
	30	3.1909
<b>M-3</b>	10	0.0798
	20	0.1932
	30	0.2251
<b>M-4</b>	10	0.6767
	20	0.3791
	30	0.5178
<b>M-5</b>	2	13.8854
	5	13.4896
	10	14.9053
<b>M-6</b>	5	17.7416
	10	15.0000
	15	15.2667
<b>M-7</b>	10	0.7467
	20	0.8067
	30	0.4938
<b>M-8</b>	5	8.2475
	10	10.0557
	15	3.7466
<b>M-9</b>	5	19.0353
	10	19.4255
	15	7.2700
<b>M-10</b>	10	0.8438
	20	0.9200
	30	0.9468
<b>M-11</b>	10	2.3774
	20	0.8801
	30	0.5378
<b>M-12</b>	10	0.3500
	20	0.7900
	30	2.4727
<b>M-13</b>	10	8.3900
	20	7.1700
	30	4.7900



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS  
LMS 02/ 2019

Concentración en peso de solidos

Muestra	Tiempo (min)	Concentración en peso de solidos (gr/l)
M-14	10	0.9727
	20	1.6465
	30	1.3061
M-15	10	0.7800
	20	0.6364
	30	0.4796
M-16	10	0.2450
	20	0.6580
	30	0.7840
M-17	10	0.3560
	20	0.6850
	30	0.3120
M-18	10	3.2396
	20	2.2424
	30	1.5051
M-19	10	0.4747
	20	0.3700
	30	0.3200
M-20	10	1.5758
	20	2.0918
	30	1.8687
M-21	10	1.4100
	20	0.9697
	30	1.3239
M-22	10	0.9900
	20	0.9500
	30	1.0400
M-23	10	1.1837
	20	1.2990
	30	1.6804
M-24	10	1.2823
	20	1.0841
	30	1.0329
M-25	2	12.3367
	5	18.8632
	10	10.6061
M-26	10	2.7083
	20	1.1200
	30	2.8660



---

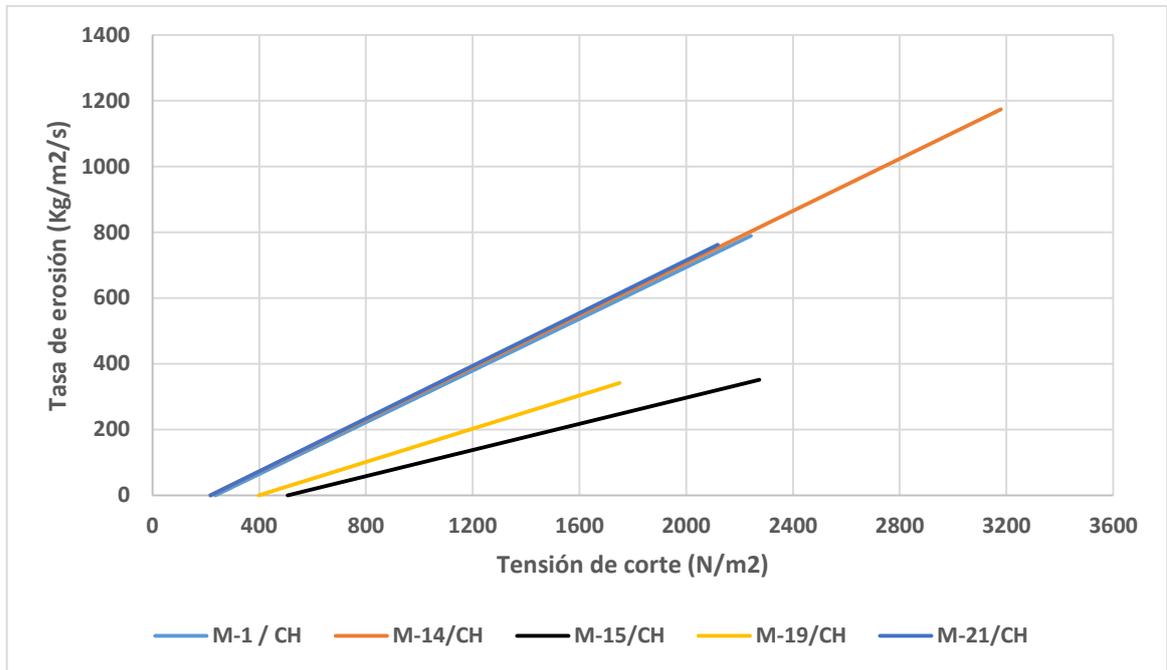
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
LMS 03/ 2019

---

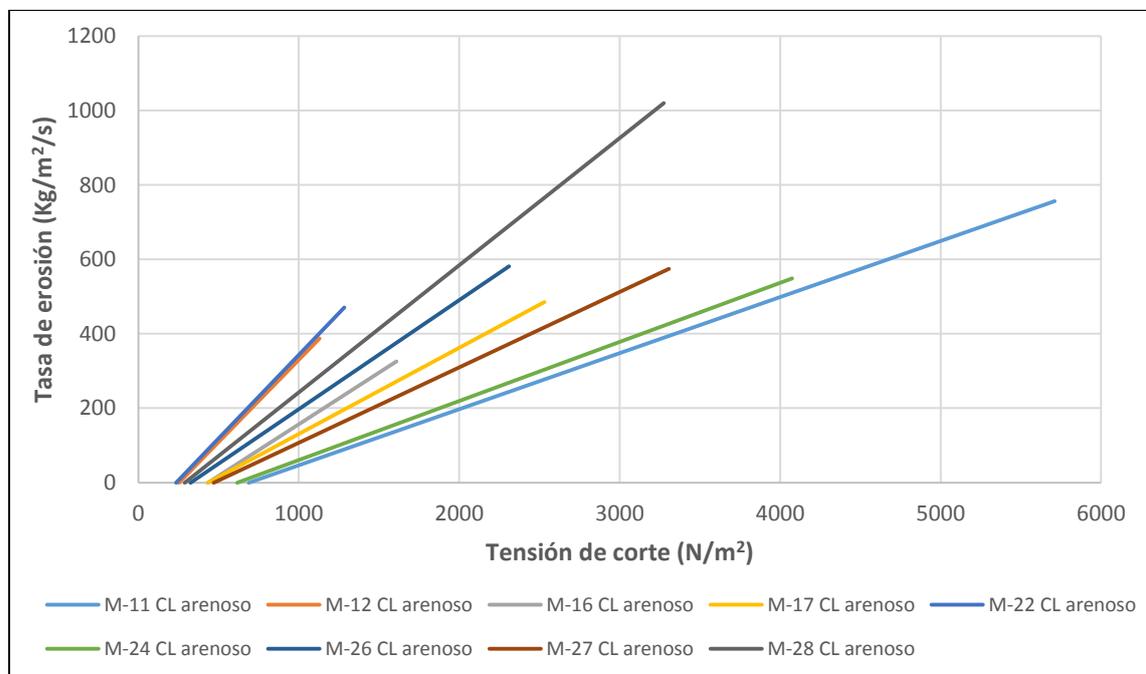
**Concentración en peso de solidos**

<b>Muestra</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Concentración en peso de solidos (gr/l)</b>
<b>M-27</b>	10	3.9560
	20	4.1000
	30	3.1546
<b>M-28</b>	10	6.2000
	20	2.7660
	30	2.7604

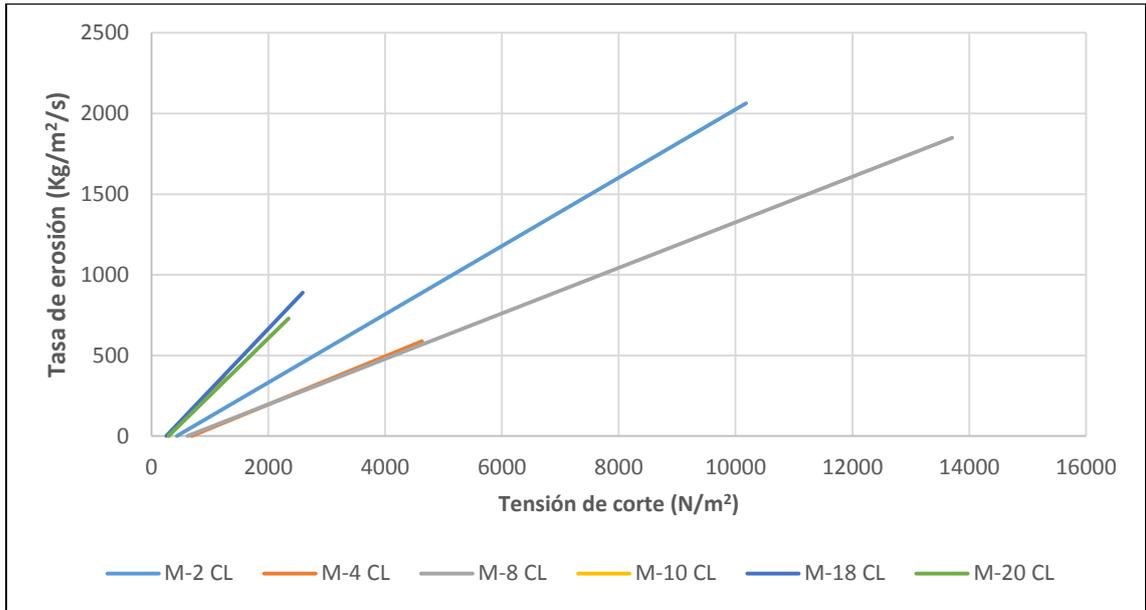
ANEXO 4.- Gráficos de estimación de la tasa de erosión y la tensión de corte crítico.



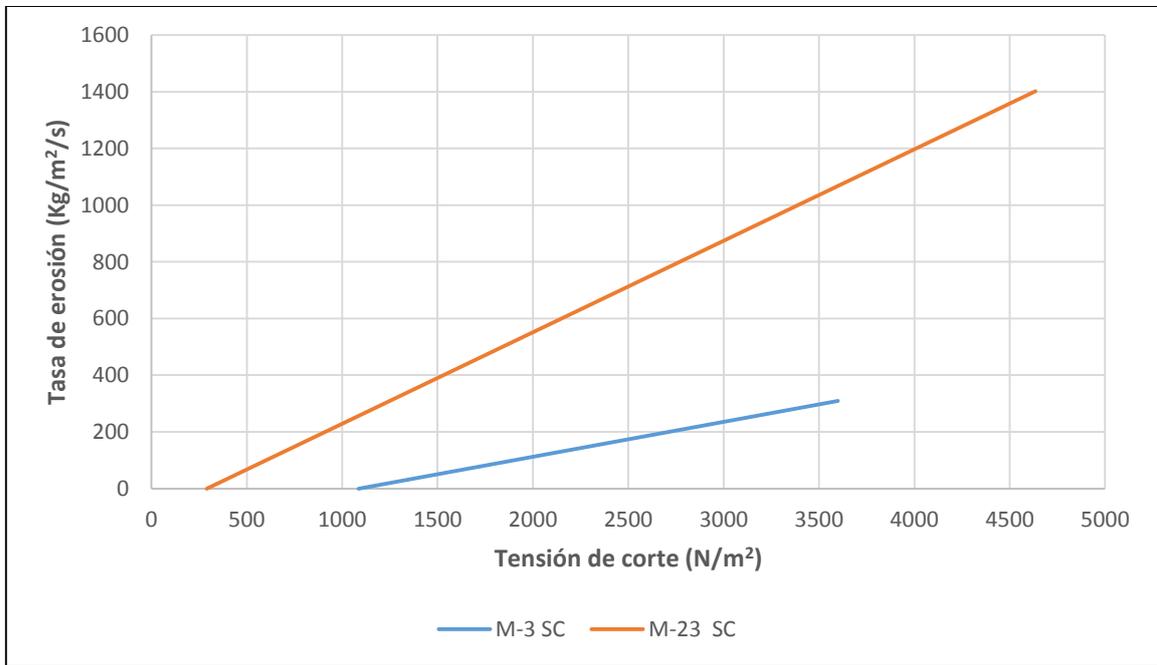
Estimación de la tasa de erosión y la tensión de corte crítico para las muestras CH



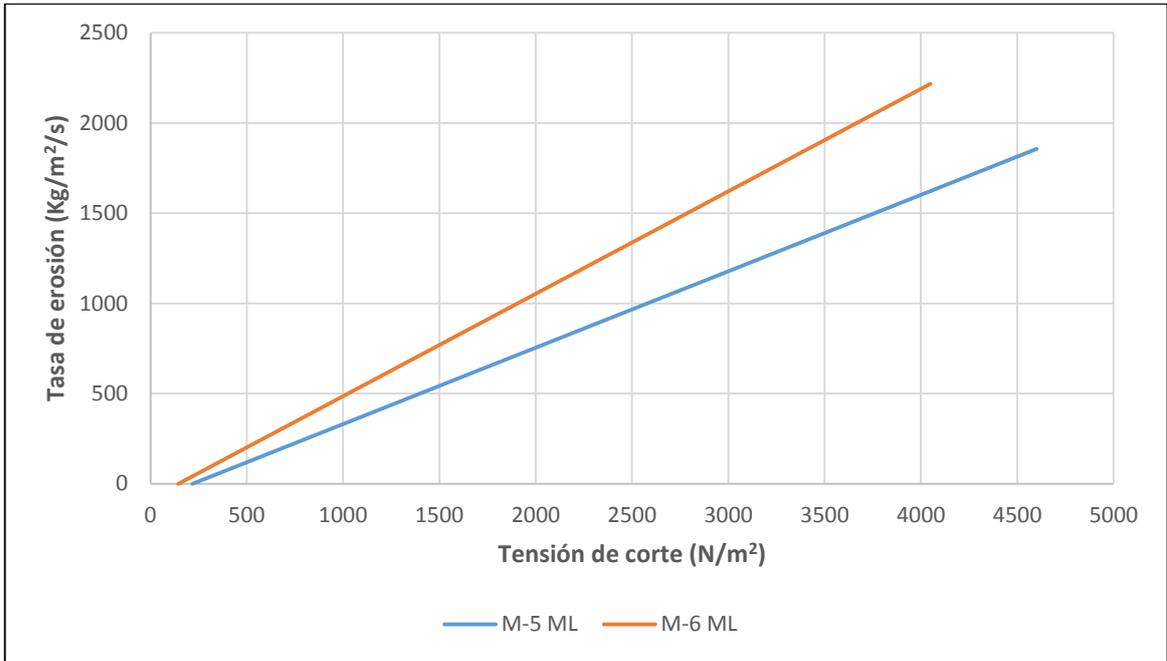
Estimación de la tasa de erosión y la tensión de corte crítico para las muestras CL arenoso.



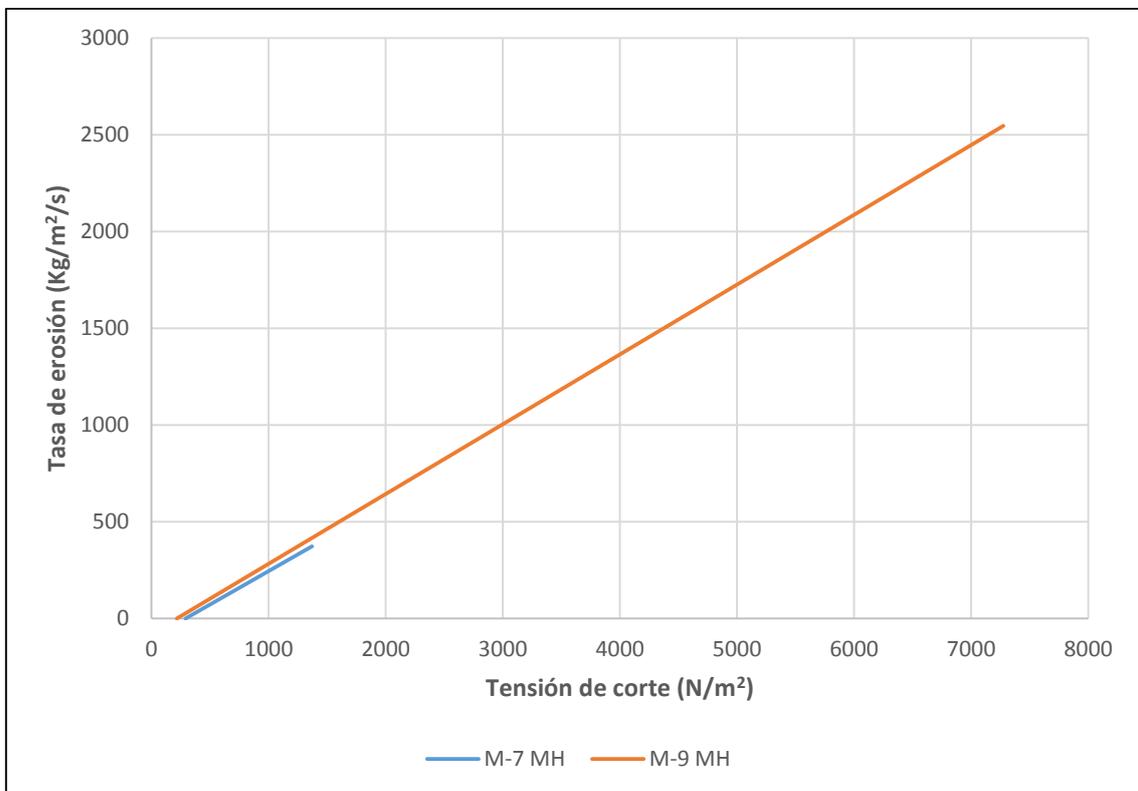
Estimación de la tasa de erosión y la tensión de corte crítico para las muestras CL.



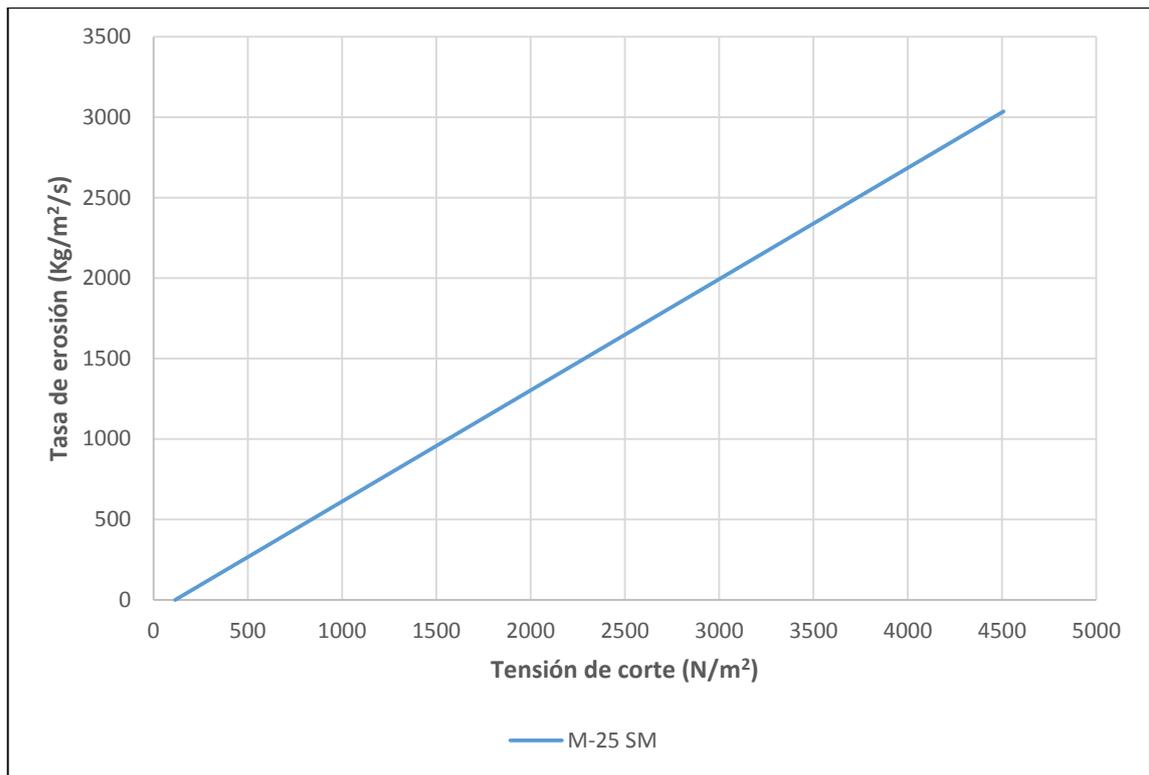
Estimación de la tasa de erosión y la tensión de corte crítico para las muestras SC.



Estimación de la tasa de erosión y la tensión de corte crítico para las muestras ML.



Estimación de la tasa de erosión y la tensión de corte crítico para las muestras MH.



Estimación de la tasa de erosión y la tensión de corte crítico para la muestra SM.

## ANEXO 5.- Resultados de los ensayos de tubificación.

### Muestras del grupo I (CH)

En las siguientes Figuras se presentan los resultados experimentales de las pruebas de tubificación.



Figura 61. M-15 arcilla inorgánica muy plástica (CH) después del ensayo de tubificación.

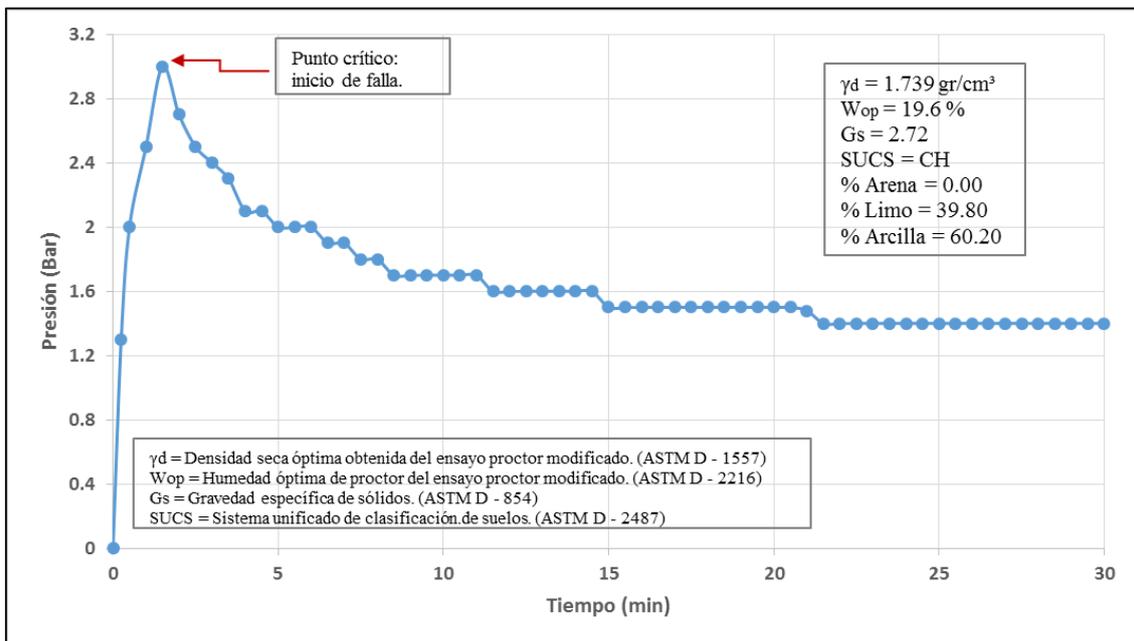


Figura 62. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica muy plástica (M-15) y el inicio de falla del suelo por tubificación.



Figura 63. M-01 arcilla inorgánica medianamente plástica (CH) después del ensayo de tubificación.

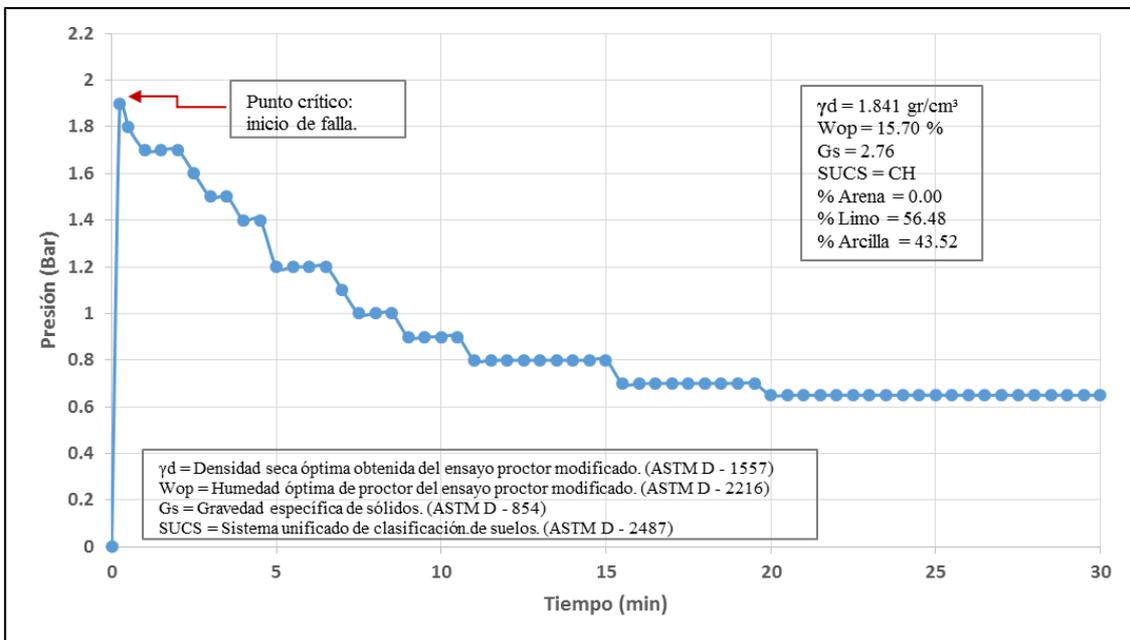


Figura 64. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástica (M-01) y el inicio de falla del suelo por tubificación.

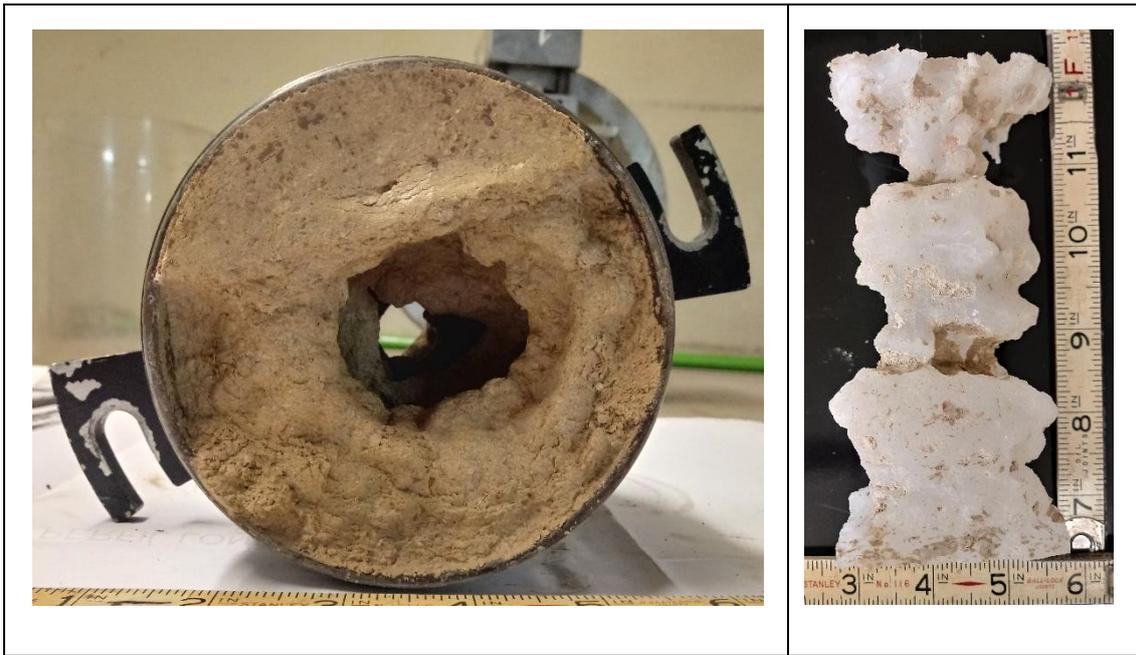


Figura 65. M-14 arcilla inorgánica muy plástico (CH) después del ensayo de tubificación.

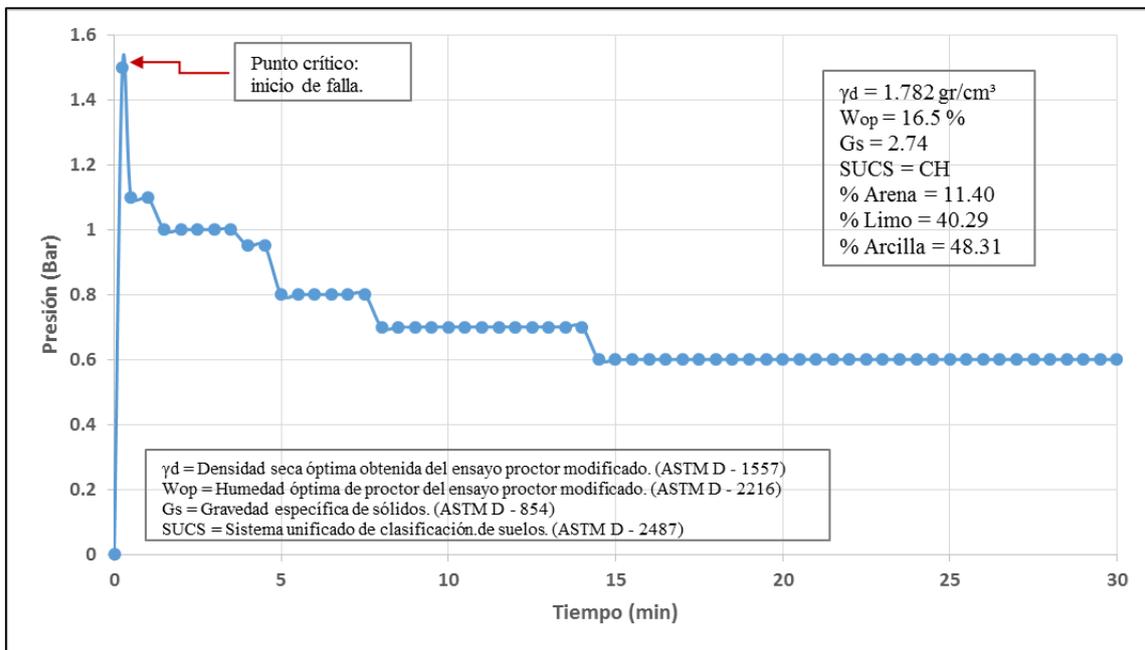


Figura 66. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica muy plástico (M-14) y el inicio de falla del suelo por tubificación.



Figura 67. M-19 arcilla inorgánica muy plástica (CH) después del ensayo de tubificación.

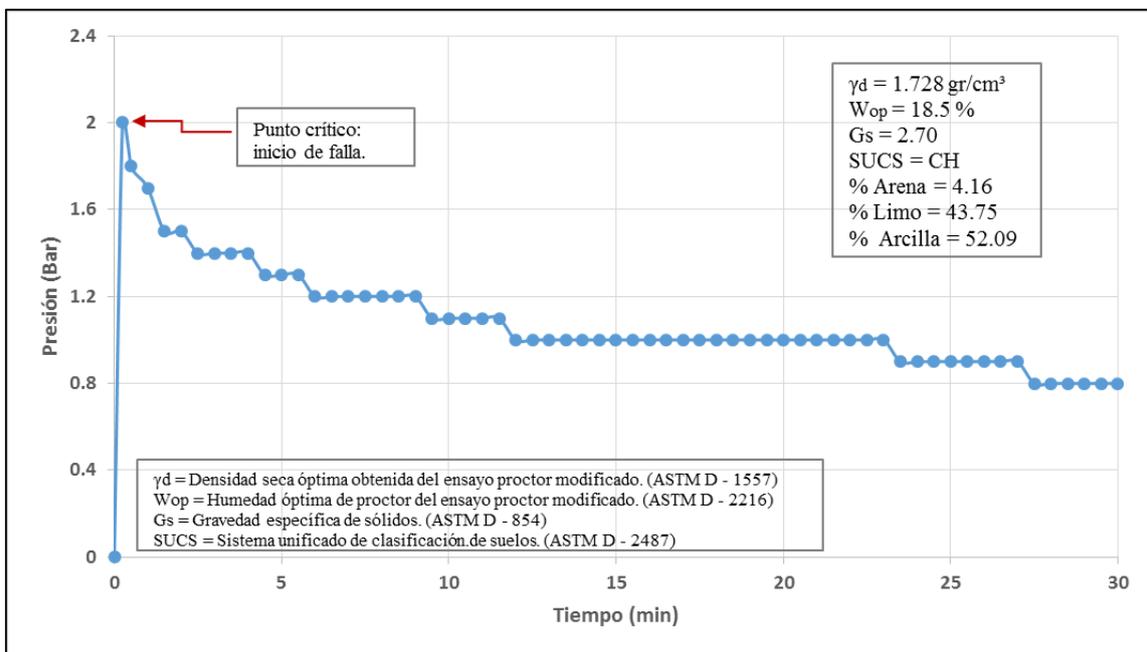


Figura 68. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica muy plástica (M-19) y el inicio de falla del suelo por tubificación.



Figura 69. M-21 arcilla inorgánica muy plástica (CH) después del ensayo de tubificación.

Fuente: Elaboración propia.

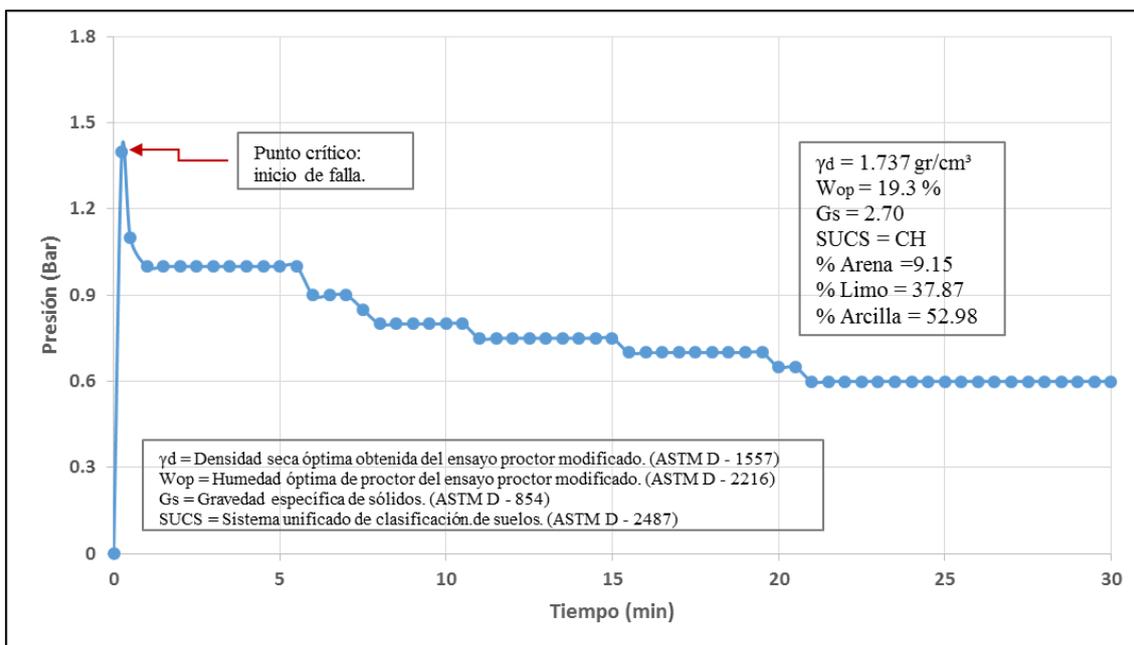


Figura 70. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica muy plástica (M-21) y el inicio de falla del suelo por tubificación.

## Muestras del grupo II (CL arenoso)

En las siguientes Figuras se presentan los resultados experimentales de las pruebas de tubificación.

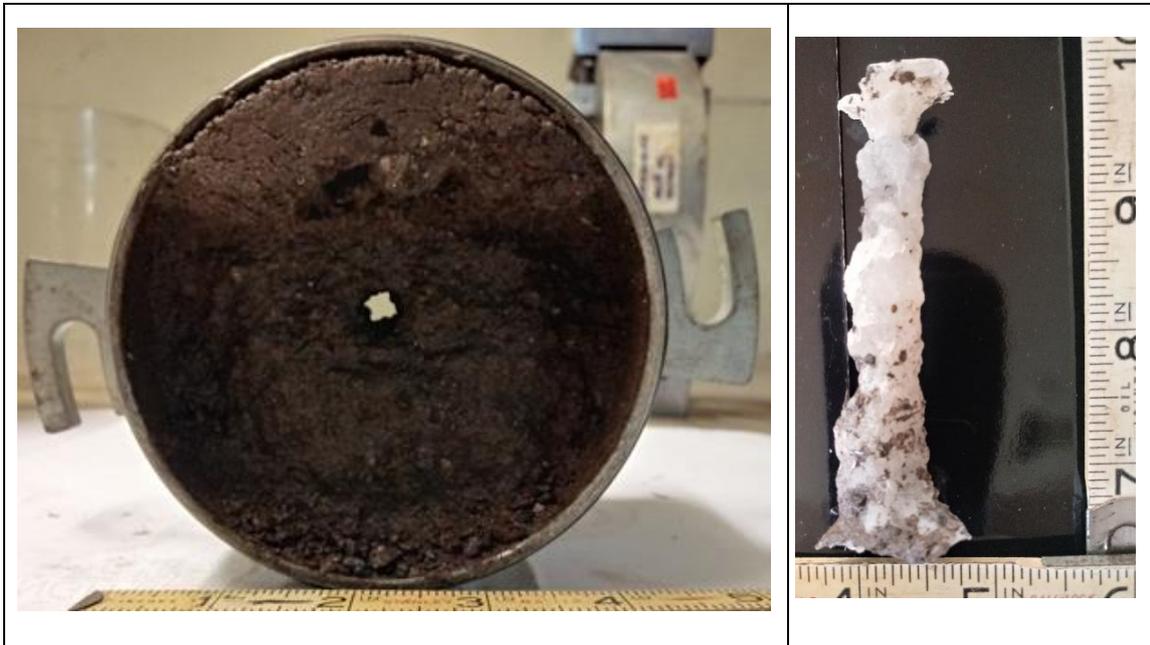


Figura 71. M-12 arcilla inorgánica medianamente plástica (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.

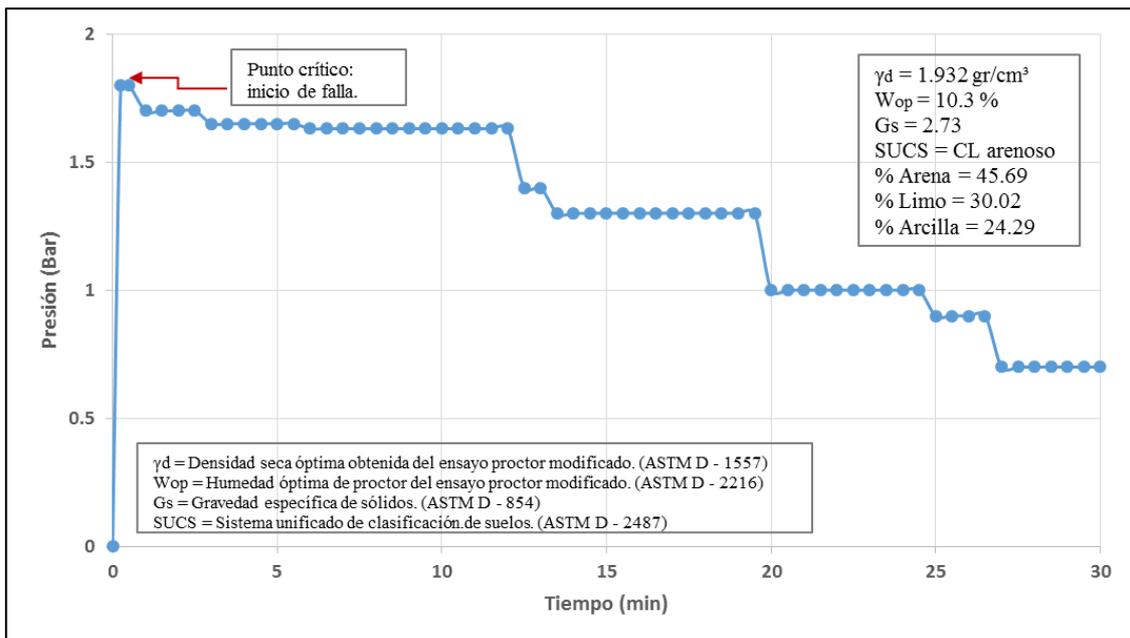


Figura 72. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástica (M-12) y el inicio de falla del suelo por tubificación.



Figura 73. M-16 arcilla inorgánica medianamente plástica (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.

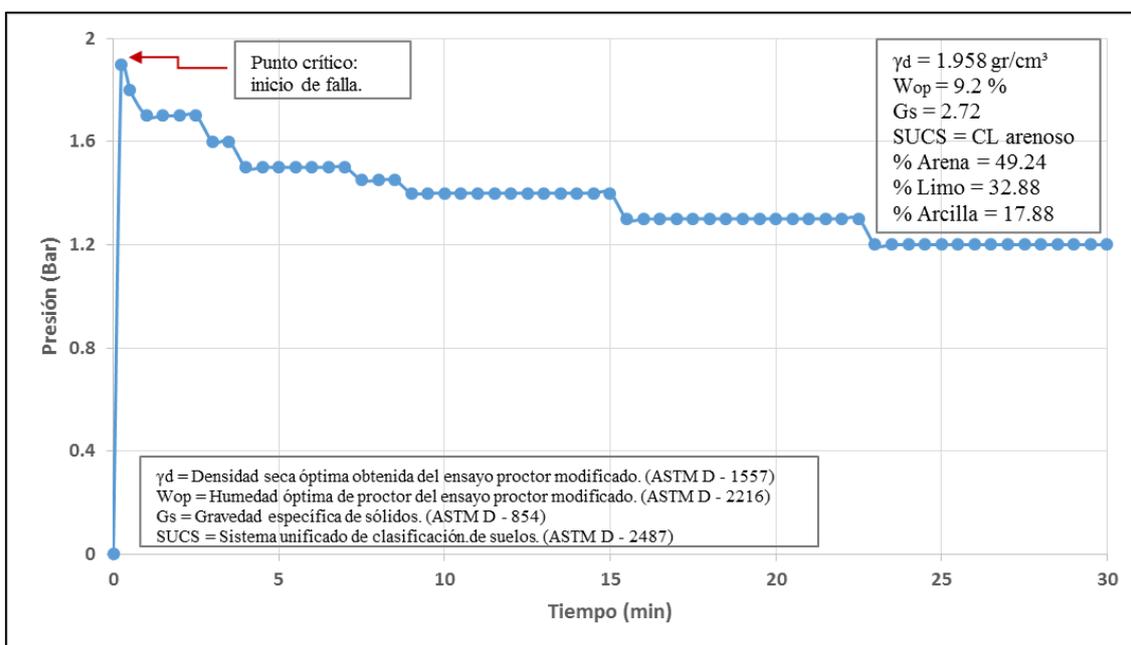


Figura 74. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástica (M-16) y el inicio de falla del suelo por tubificación.

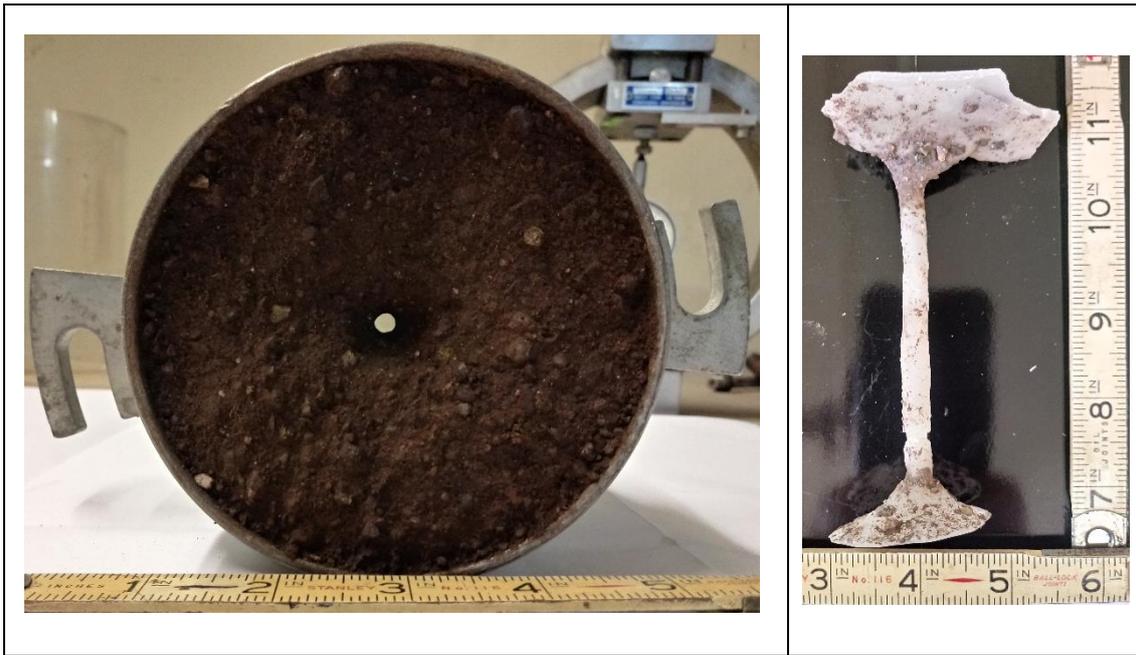


Figura 75. M-17 arcilla inorgánica medianamente plástica (CL arenoso) después del ensayo de tubificación

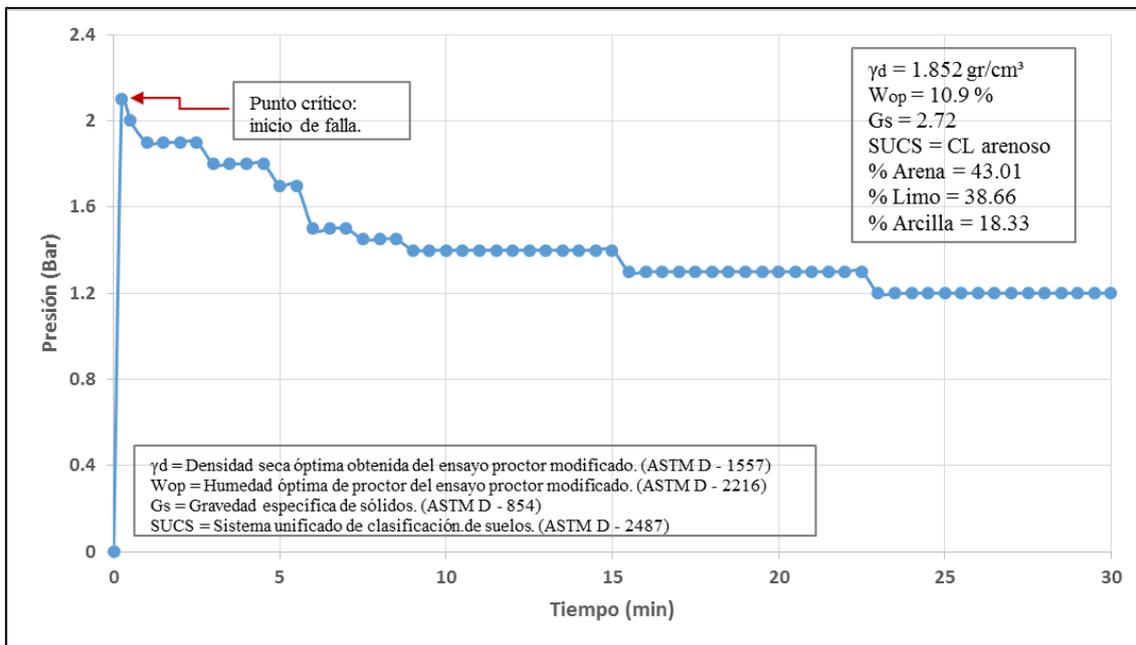


Figura 76. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástica (M-17) y el inicio de falla del suelo por tubificación.



Figura 77. M-22 arcilla inorgánica medianamente plástica (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.

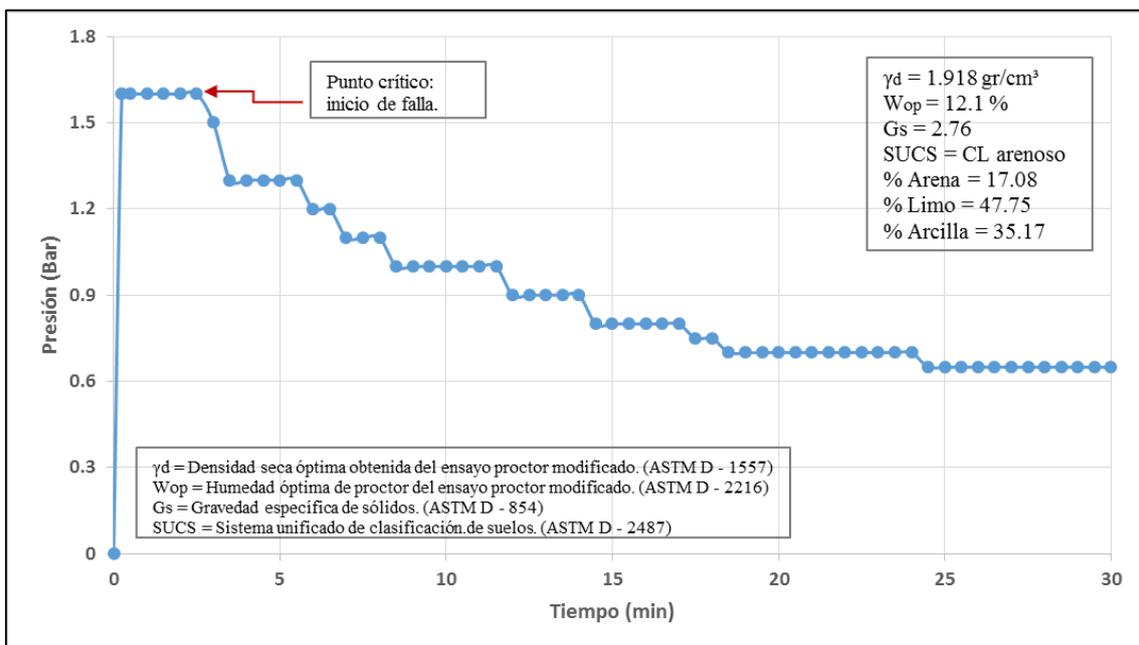


Figura 78. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástica (M-22) y el inicio de falla del suelo por tubificación.



Figura 79. M-24 arcilla inorgánica medianamente plástica (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.

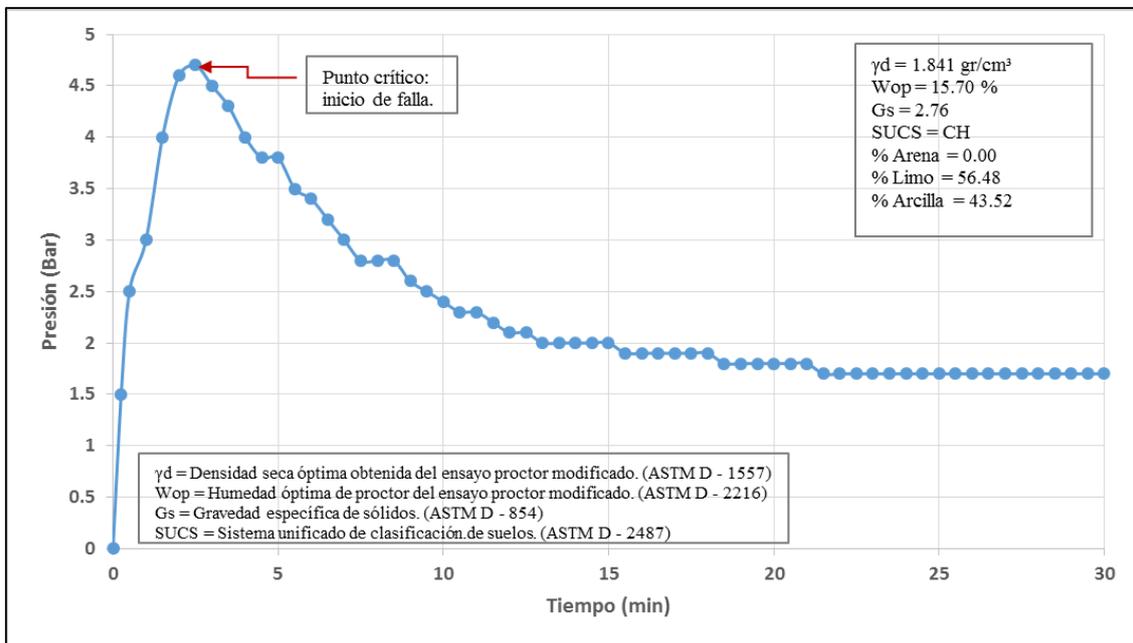


Figura 80. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástica (M-24) y el inicio de falla del suelo por tubificación.



Figura 81. M-26 arcilla inorgánica medianamente plástica (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.

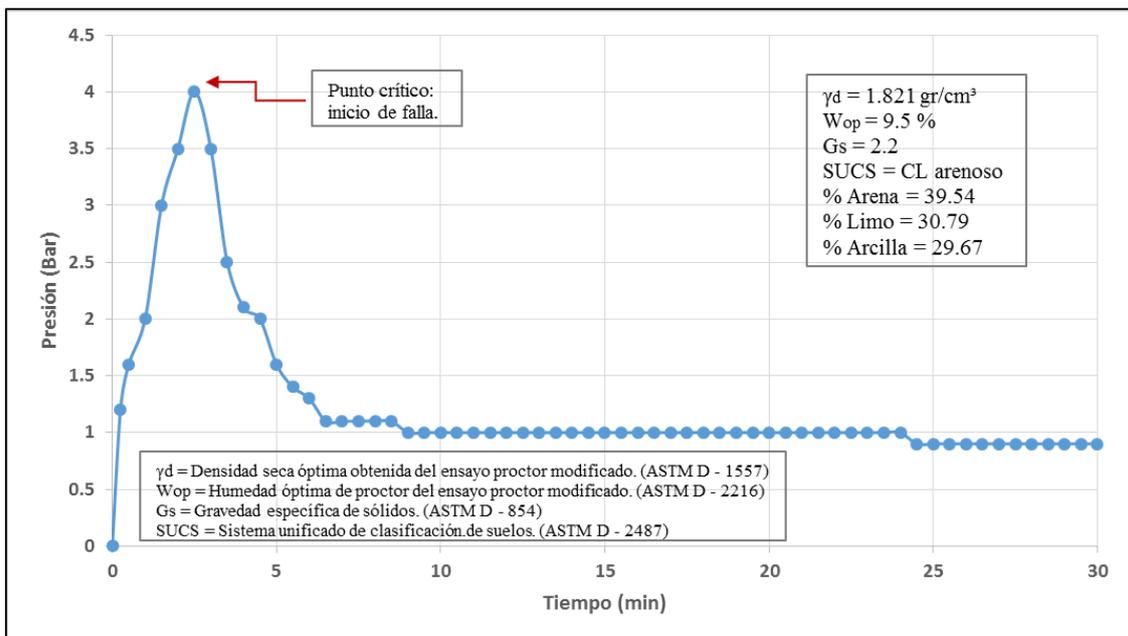


Figura 82. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástica (M-26) y el inicio de falla del suelo por tubificación.



Figura 83. M-27 arcilla inorgánica ligeramente plástica (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.

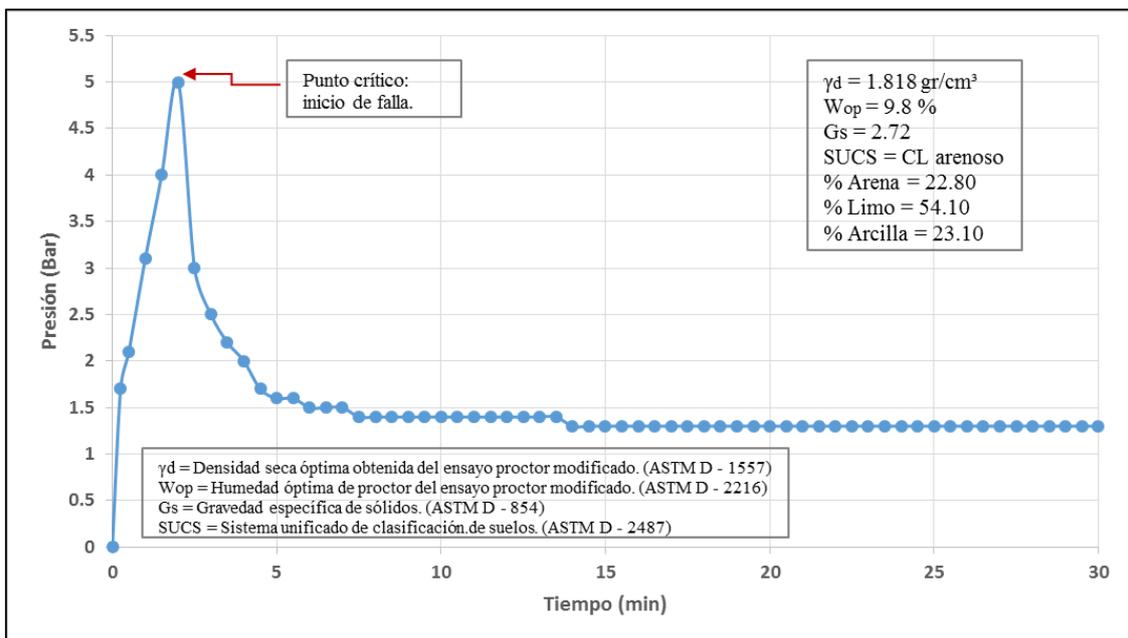


Figura 84. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica ligeramente plástica (M-27) y el inicio de falla del suelo por tubificación.



Figura 85. M-28 arcilla inorgánica ligeramente plástica (CL arenoso) después del ensayo de tubificación.

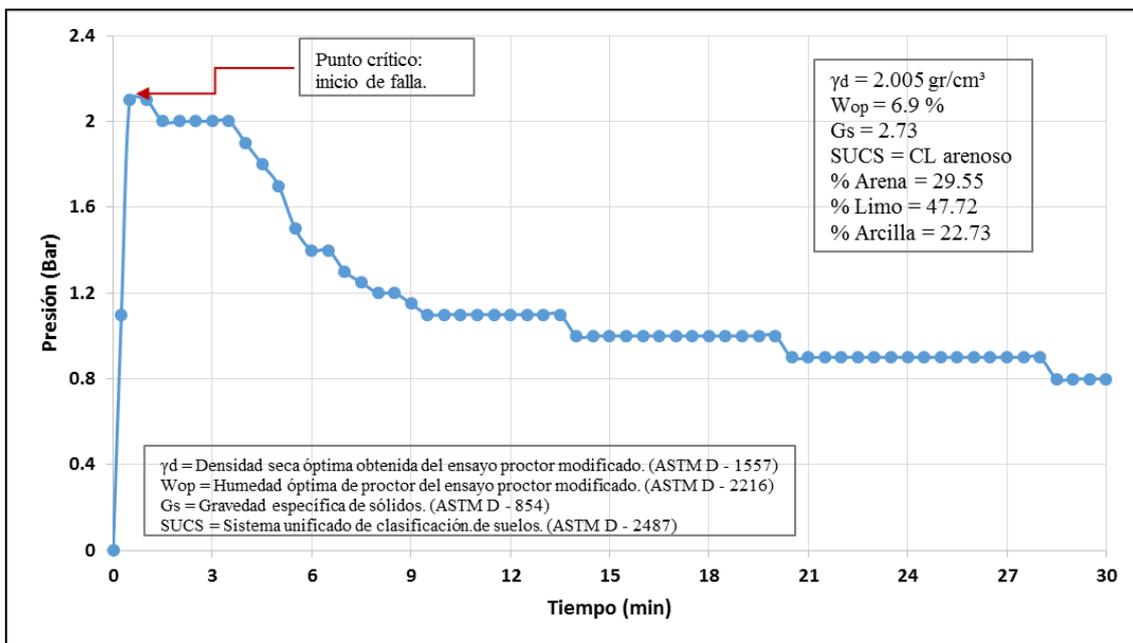


Figura 86. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica ligeramente plástica (M-28) y el inicio de falla del suelo por tubificación.

### Muestras del grupo III (CL)

En las siguientes Figuras se presentan los resultados experimentales de las pruebas de tubificación.



Figura 87. M-20 arcilla inorgánica ligeramente plástica (CL) después del ensayo de tubificación.

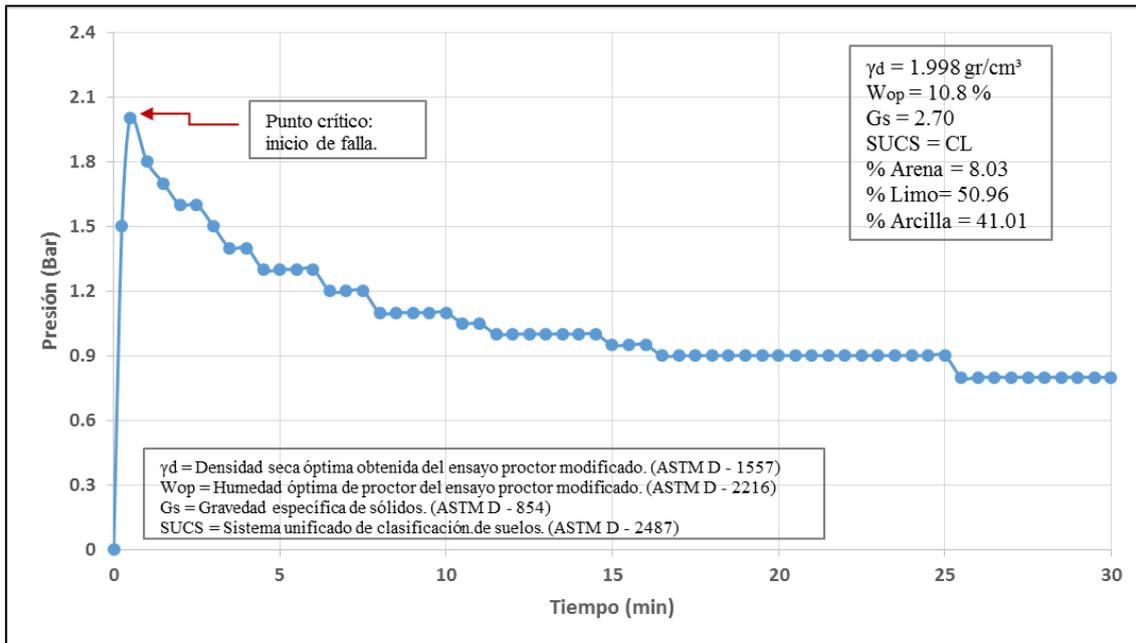


Figura 88. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica ligeramente plástica (M-20) y el inicio de falla del suelo por tubificación



Figura 89. M-02 arcilla inorgánica medianamente plástica (CL) después del ensayo de tubificación.

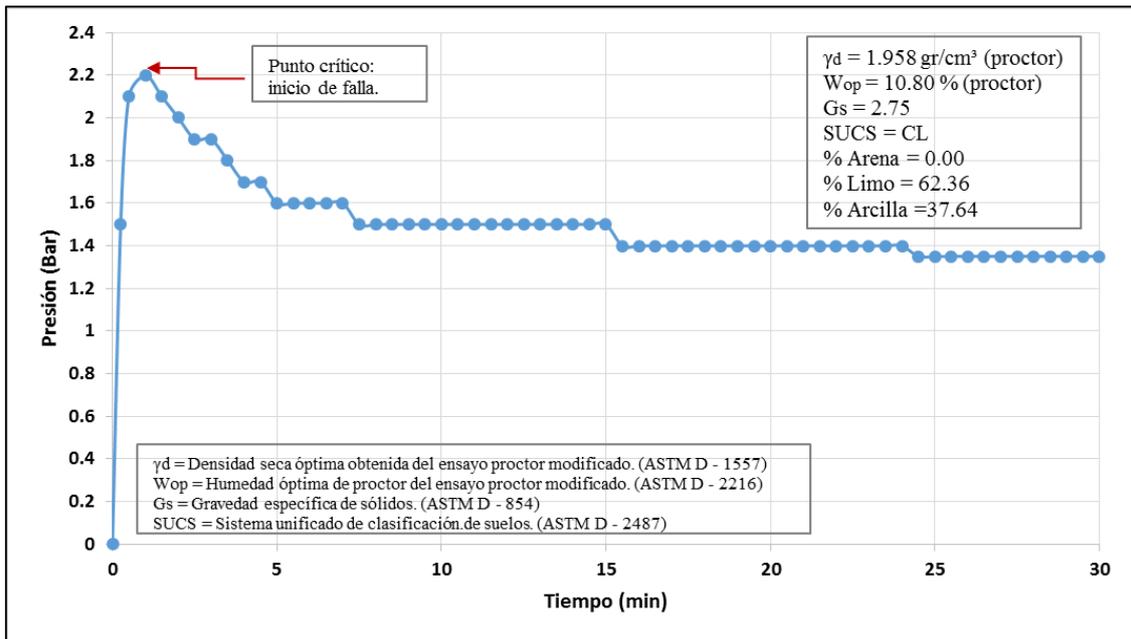


Figura 90. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástica (M-02) y el inicio de falla del suelo por tubificación.



Figura 91. M-04 arcilla inorgánica medianamente plástica (CL) después del ensayo de tubificación.

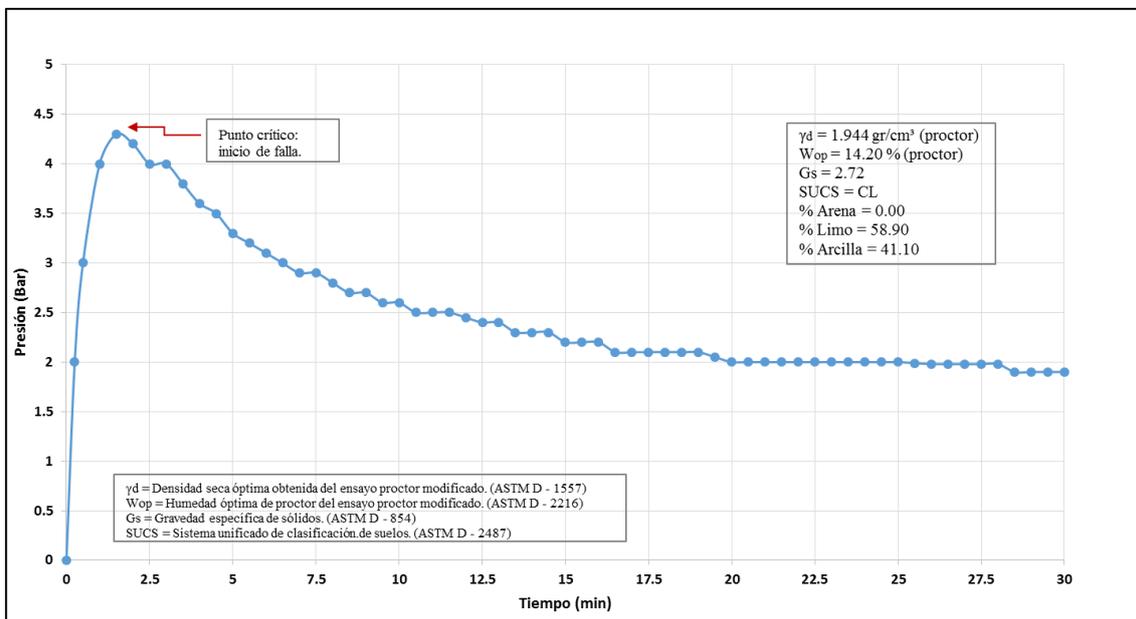


Figura 92. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástica (M-04) y el inicio de falla del suelo por tubificación.

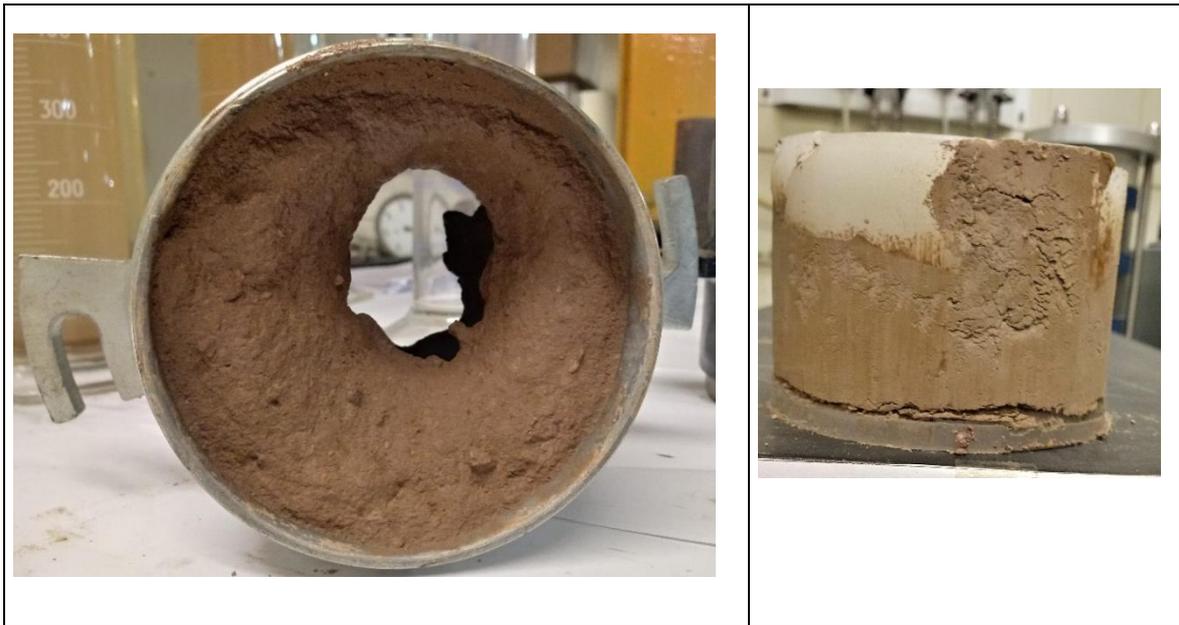


Figura 93. M-08 arcilla inorgánica ligeramente plástico (CL) después del ensayo de tubificación.

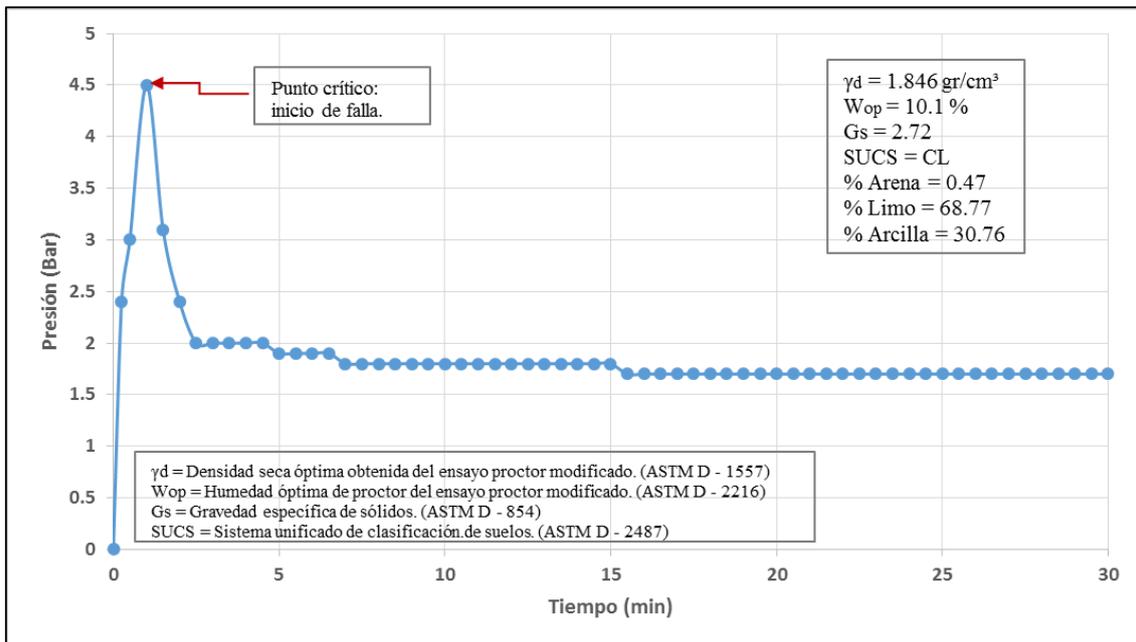


Figura 94. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica ligeramente plástico (M-08) y el inicio de falla del suelo por tubificación.



Figura 95. M-10 arcilla inorgánica medianamente plástica (CL) después del ensayo de tubificación.

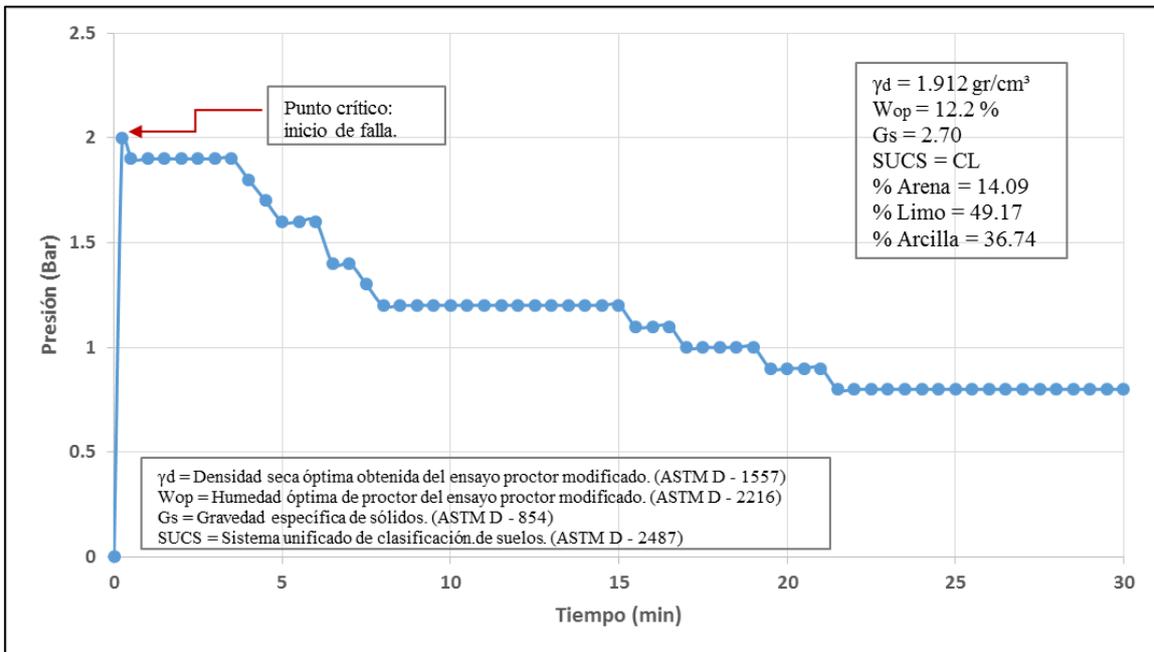


Figura 96. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástica (M-10) y el inicio de falla del suelo por tubificación.



Figura 97. M-13 arcilla inorgánica medianamente plástica (CL) después del ensayo de tubificación.

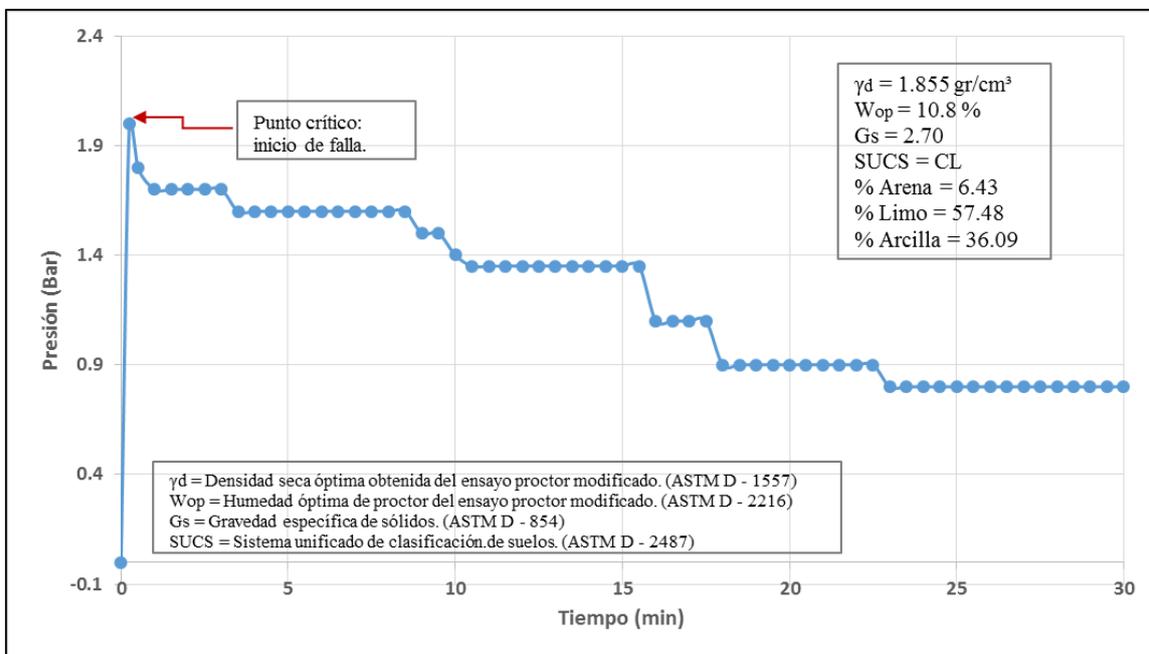


Figura 98. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástica (M-13) y el inicio de falla del suelo por tubificación.

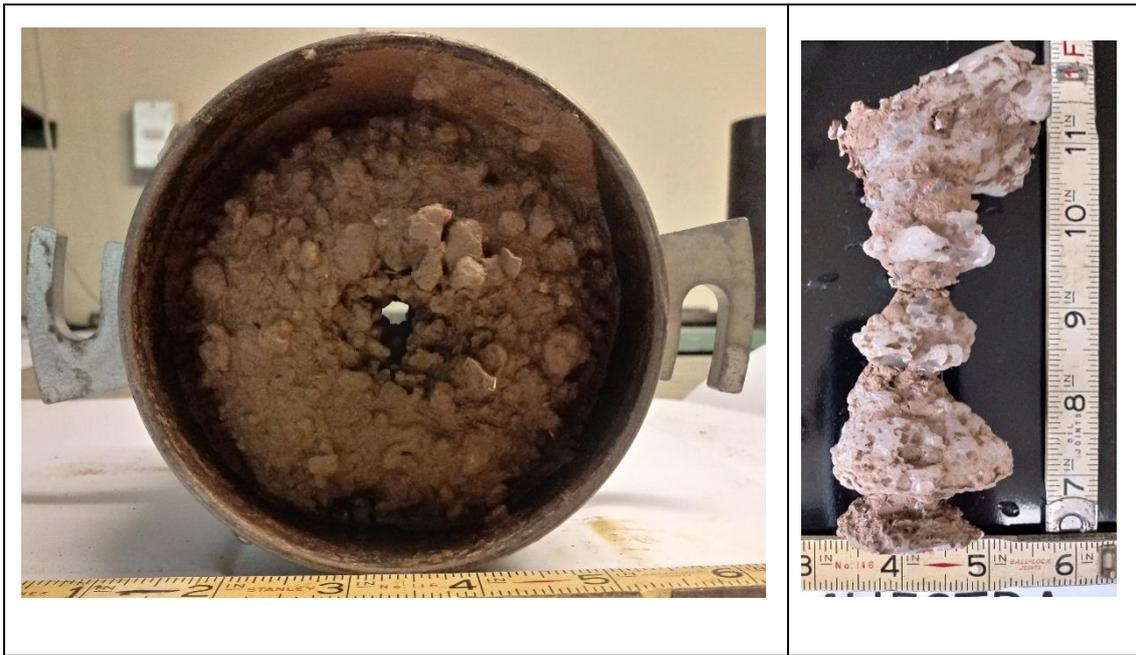


Figura 99. M-18 arcilla inorgánica medianamente plástica (CL) después del ensayo de tubificación.

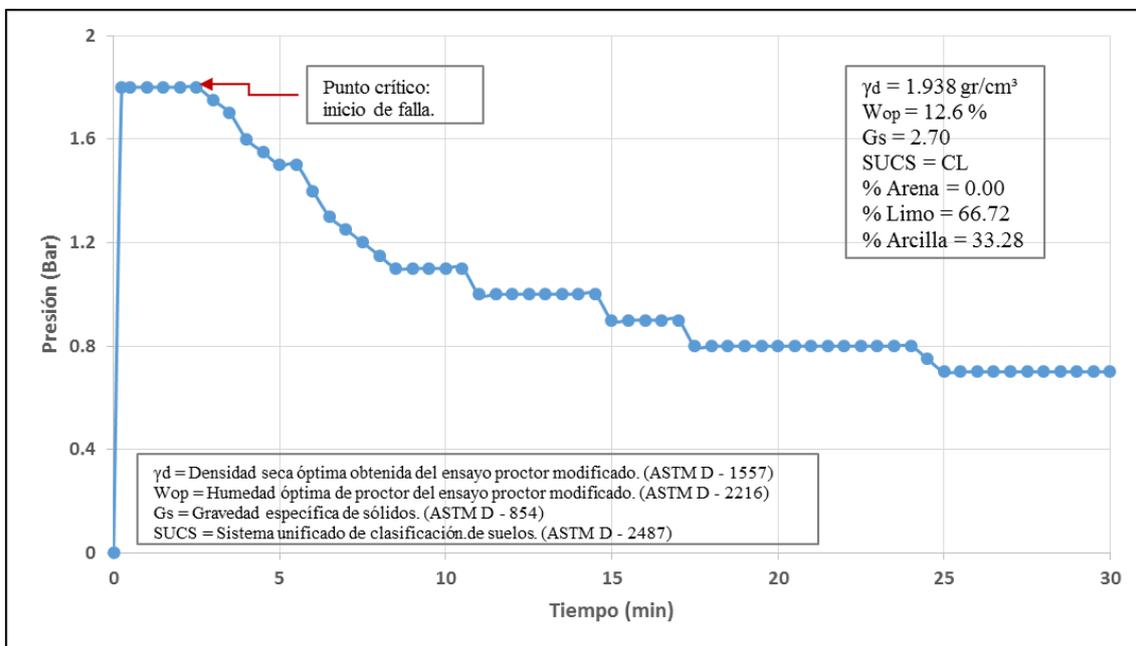


Figura 100. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arcilla inorgánica medianamente plástica (M-18) y el inicio de falla del suelo por tubificación.

## Muestras del grupo IV (SC)

En las siguientes Figuras se presentan los resultados experimentales de las pruebas de tubificación.

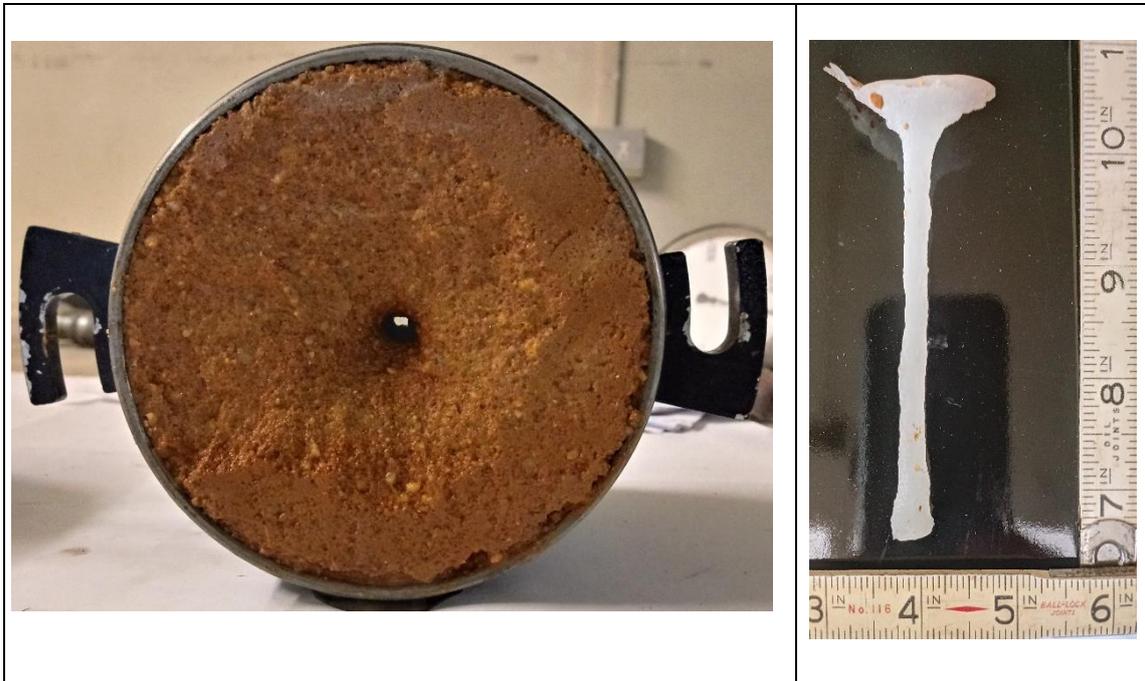


Figura 101. M-03 arena arcillosa ligeramente plástico (SC) después del ensayo de tubificación

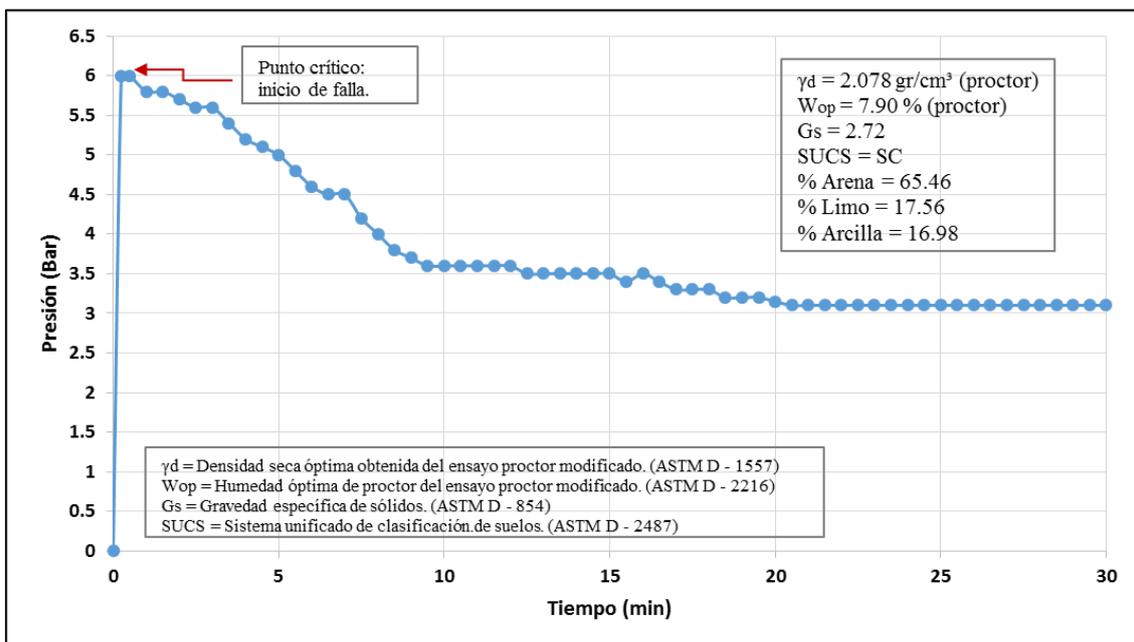


Figura 102. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arena arcillosa ligeramente plástico (M - 03) y el inicio de falla del suelo por tubificación.

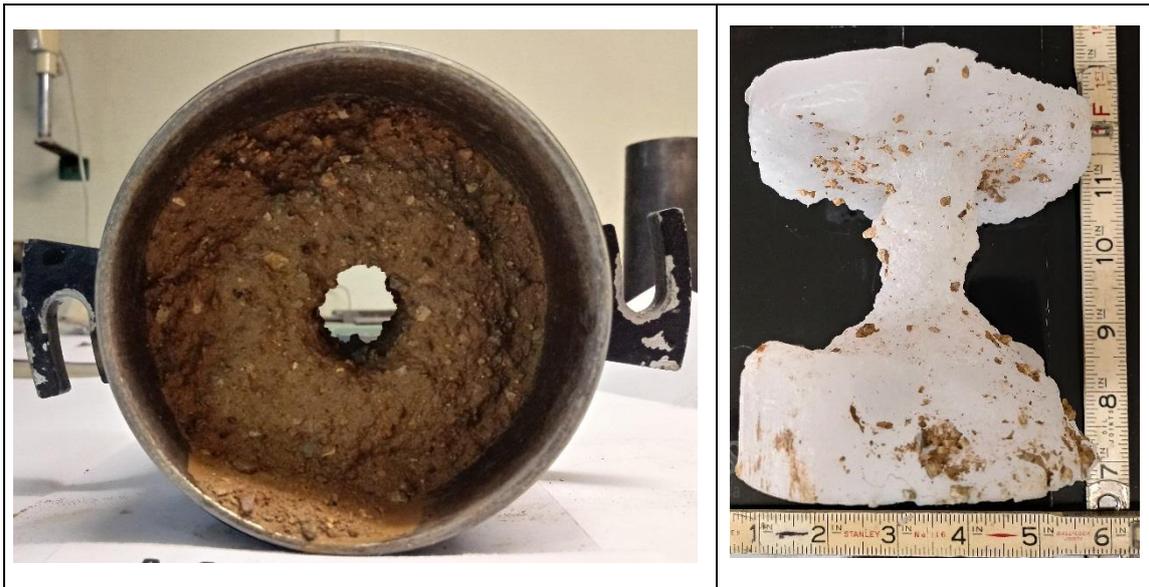


Figura 103. M-23 arena arcillosa ligeramente plástica (SC) después del ensayo de tubificación.

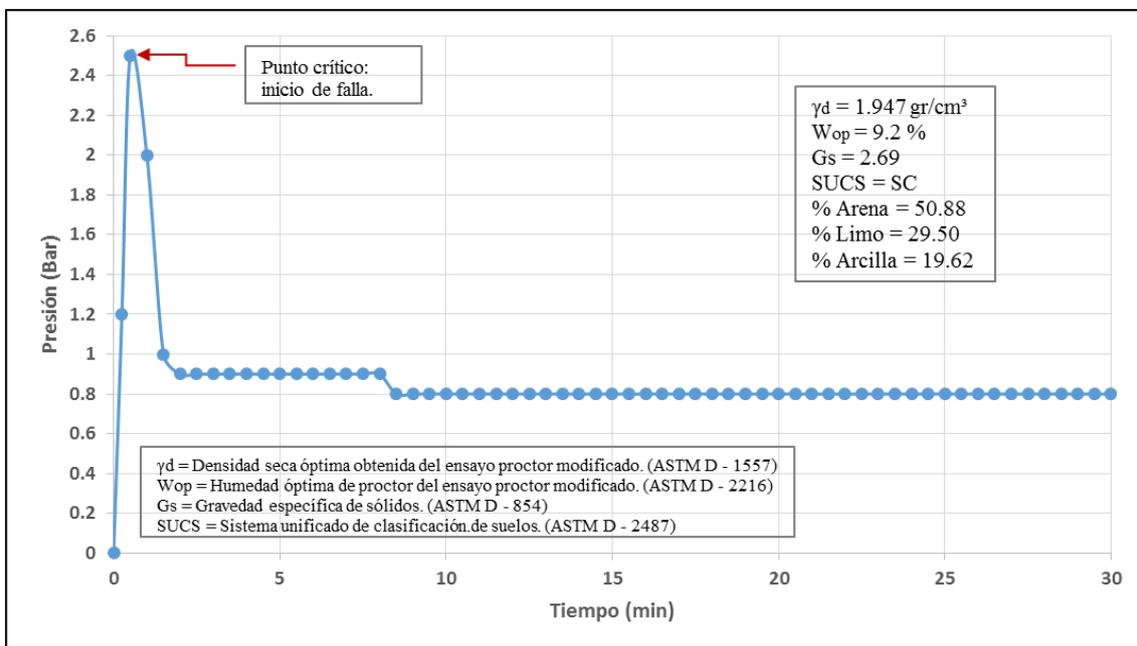


Figura 104. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arena arcillosa ligeramente plástica (M - 23) y el inicio de falla del suelo por tubificación.

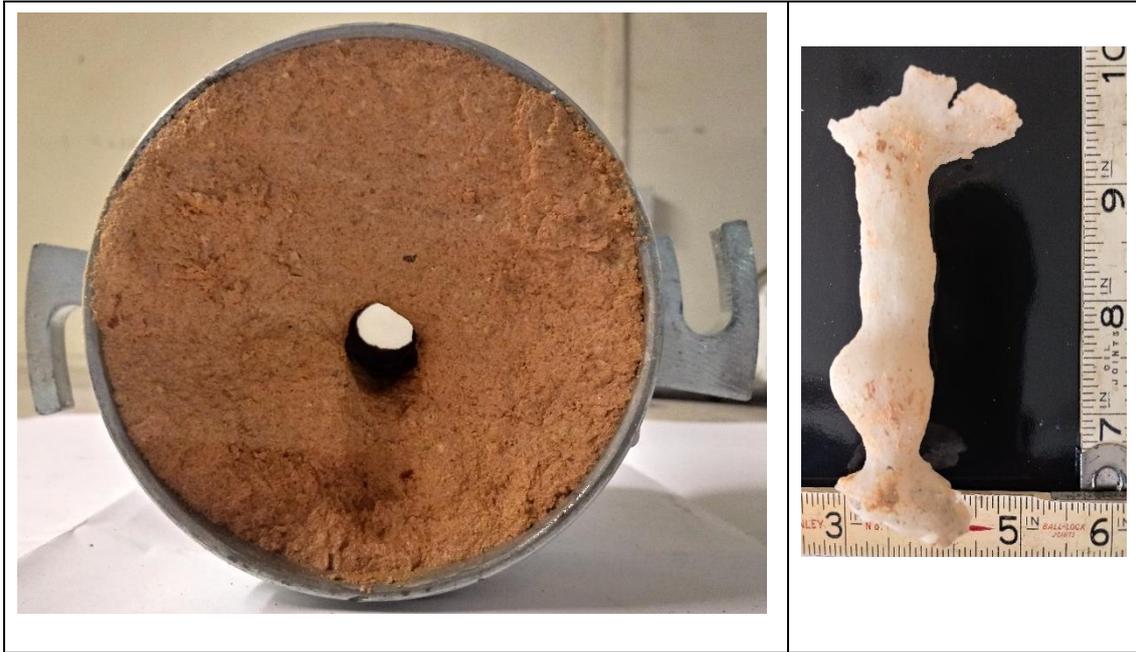


Figura 105. M-11 arena arcillosa medianamente plástica (SC) después del ensayo de tubificación.

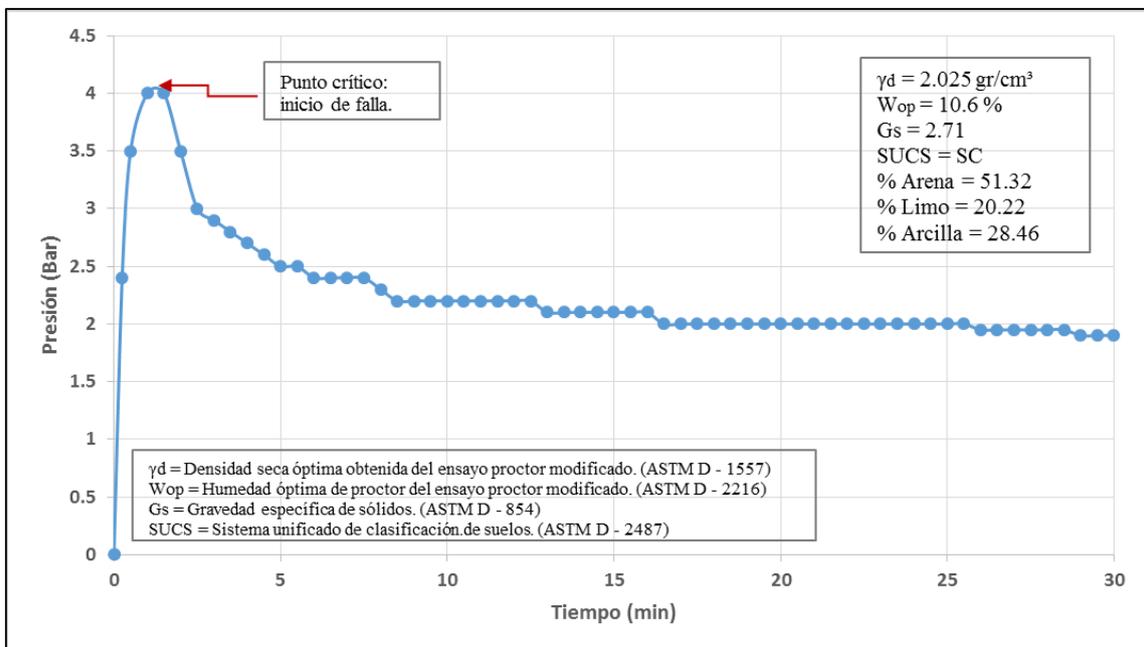


Figura 106. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arena arcillosa medianamente plástica (M - 11) y el inicio de falla del suelo por tubificación

### Muestras del grupo V (ML)

En las siguientes Figuras se presentan los resultados experimentales de las pruebas de tubificación.



Figura 107. M-05 limo inorgánico ligeramente plástico (ML) después del ensayo de tubificación.

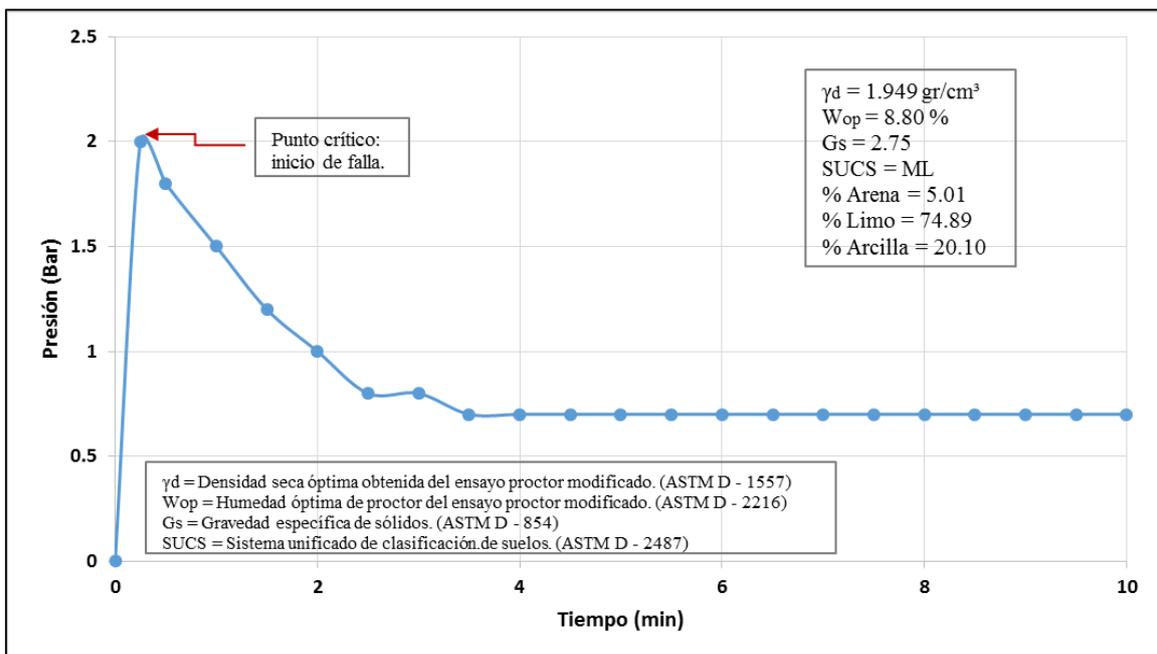


Figura 108. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta el limo inorgánico ligeramente plástico (M - 05) y el inicio de falla del suelo por tubificación.



Figura 109. M-06 limo inorgánico ligeramente plástico (ML) después del ensayo de tubificación.

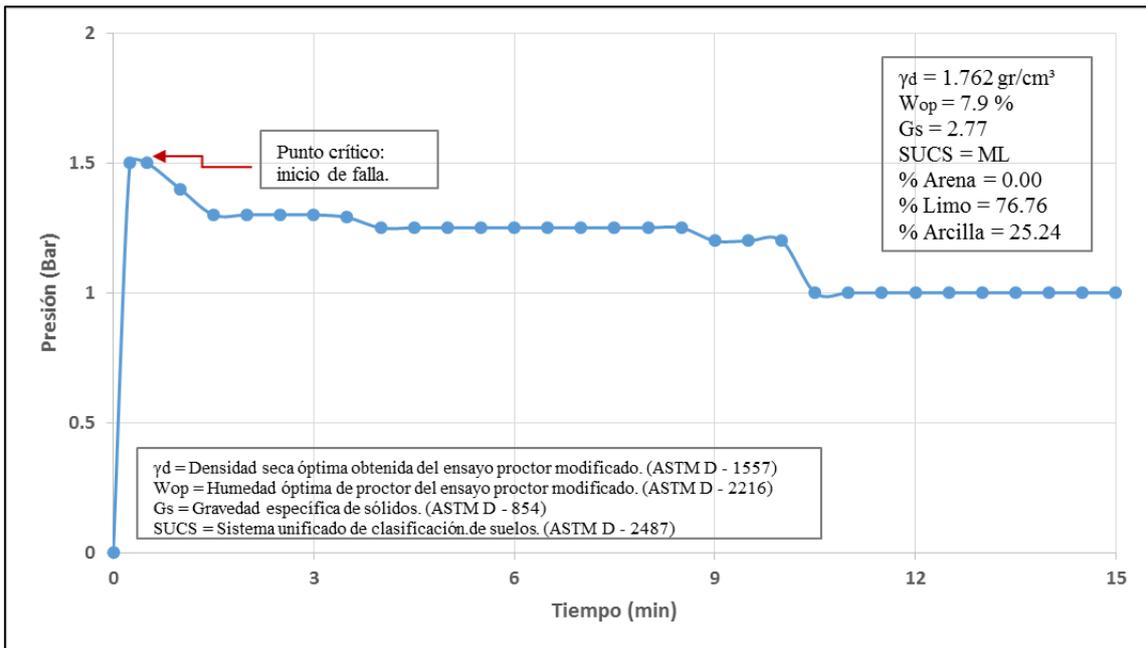


Figura 110. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta el limo inorgánico ligeramente plástico (M - 06) y el inicio de falla del suelo por tubificación.

### Muestras del grupo VI (MH)

En las siguientes Figuras se presentan los resultados experimentales de las pruebas de tubificación.



Figura 111. M-07 limo inorgánico medianamente plástico (ML) después del ensayo de tubificación.

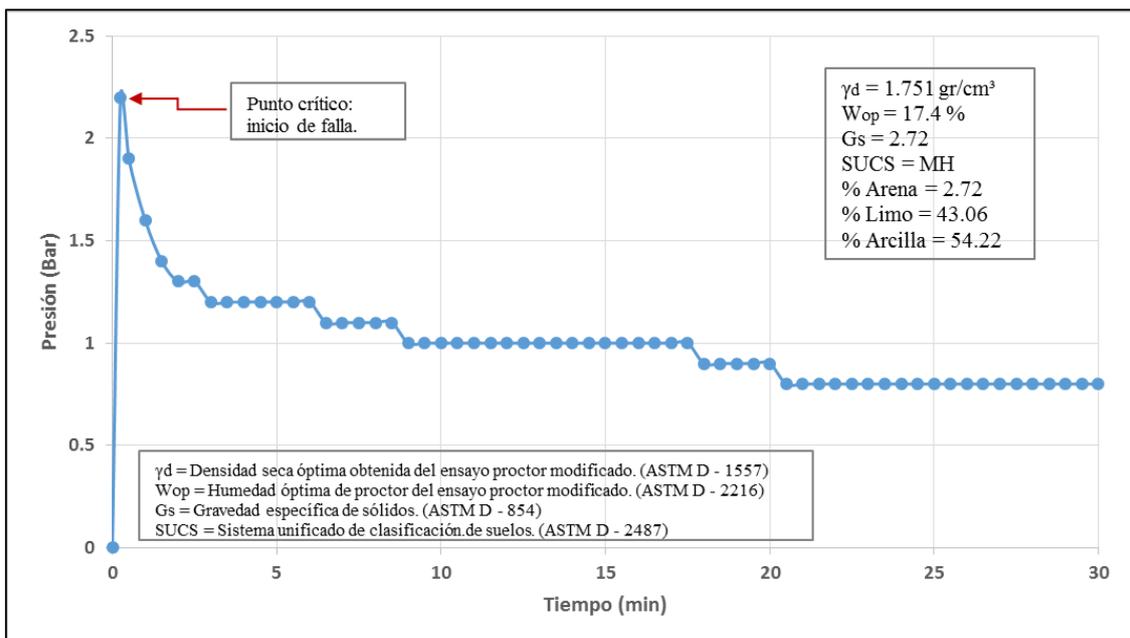


Figura 112. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta el limo inorgánico medianamente plástico (M - 07) y el inicio de falla del suelo por tubificación.



Figura 113. M-09 limo inorgánico medianamente plástico (ML) después del ensayo de tubificación.

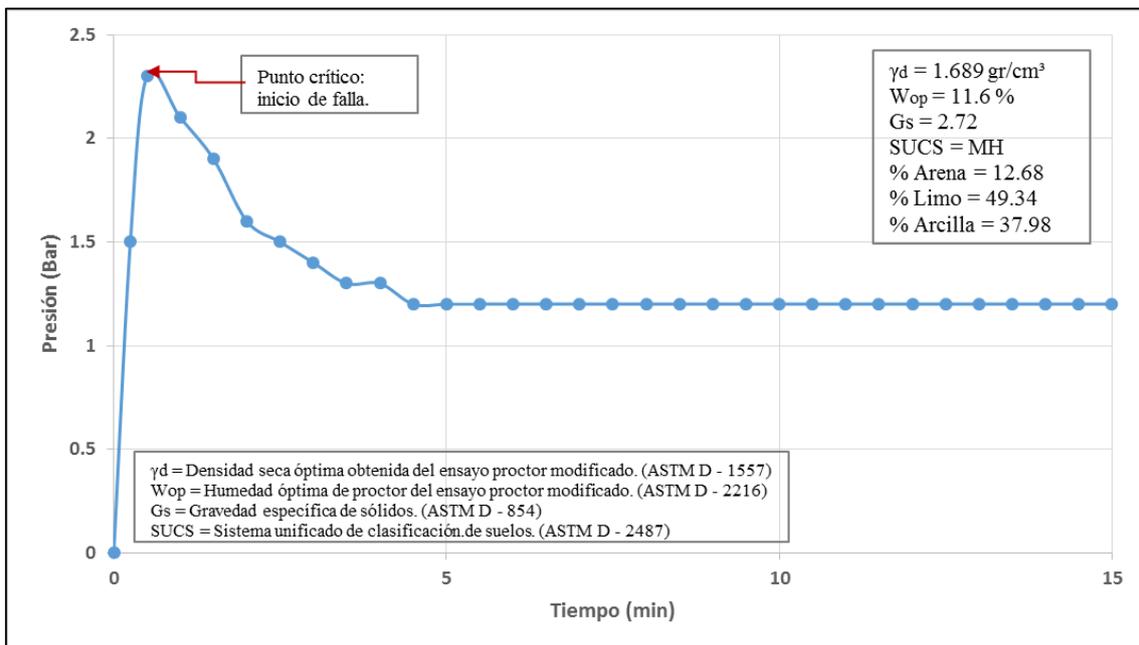


Figura 114. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta el limo inorgánico medianamente plástico (M - 09) y el inicio de falla del suelo por tubificación.

### Muestra del grupo VII (SM)

En las siguientes Figuras se presentan los resultados experimentales de las pruebas de tubificación.



Figura 115. M-025 arena limosa no plástica (SM) después del ensayo de tubificación.

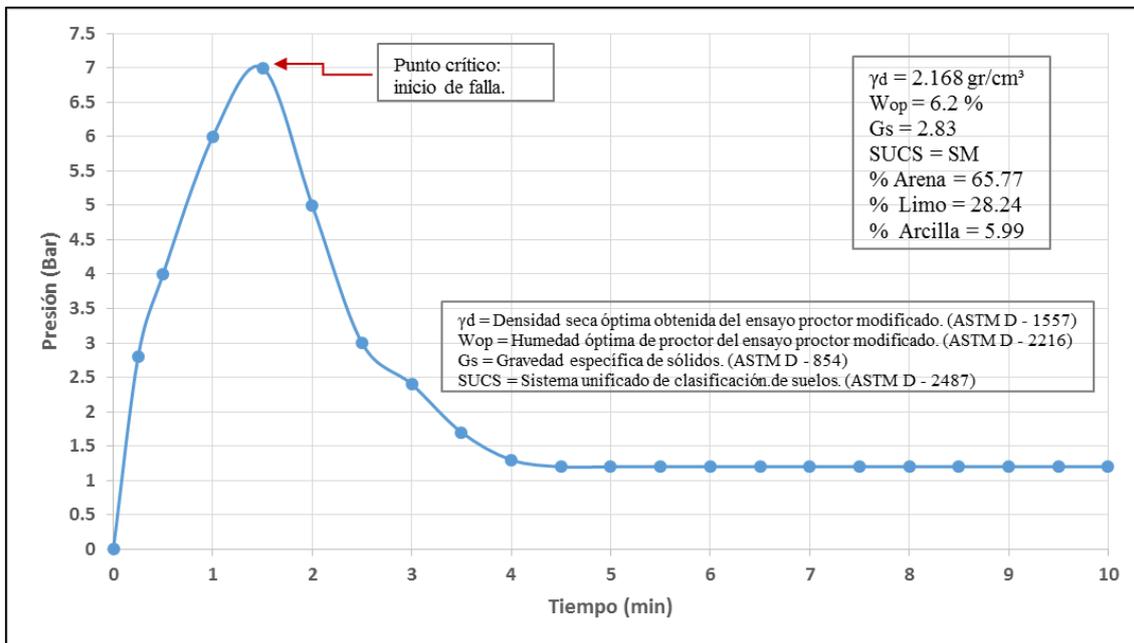


Figura 116. Presión versus tiempo – Presión máxima que soporta la arena limosa no plástica (M- 25) y el inicio de falla del suelo por tubificación.

ANEXO 6.- Cuadro de resumen de los resultados de laboratorio.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR HIDROMETRO ( % Arena, Limo, Arcilla)				LIMITES DE ATTERBERG		INDICE DE PLASTICIDAD	HUMEDAD NATURAL	CLASIFICACIÓN		GRAVEDAD ESPECÍFICA	PERMEABILIDAD	PROCTOR ESTANDAR	
MUESTRA	% Arena	% Limo	% Arcilla	L.L (%)	L.P (%)	I.P (%)	w (%)	SUCS	AASTHO	Gs	K (cm/seg)	HUMEDAD OPTIMA (%)	DENSIDAD MAXIMA SECA gr/cm3
M-1	0.00	56.48	43.52	51.60	24.17	27.43	11.27	CH	A-7-6	2.76	1.1363E-07	15.70	1.841
M-2	0.00	62.36	37.64	36.00	19.00	17.00	10.66	CL	A-7-6	2.75	2.7884E-06	10.80	1.958
M-3	65.46	17.56	16.98	34.00	22.00	12.00	11.28	SC	A-2-7	2.72	5.1330E-06	7.90	2.078
M-4	0.00	58.90	41.10	42.00	20.00	22.00	37.21	CL	A-7-6	2.72	5.0285E-07	14.20	1.944
M-5	5.01	74.89	20.10	34.07	26.07	8.00	11.62	ML	A-4	2.75	4.6742E-06	8.80	1.949
M-6	0.00	74.76	25.24	36.21	24.84	11.37	15.30	ML	A-5	2.77	1.6265E-06	7.90	1.762
M-7	2.72	43.06	54.22	62.41	33.63	28.78	26.82	MH	A-7-5	2.72	1.1538E-06	17.40	1.751
M-8	0.47	68.77	30.76	37.03	24.42	12.61	25.30	CL	A-7-6	2.72	9.6652E-07	10.10	1.846
M-9	12.68	49.34	37.98	56.00	31.00	25.00	22.64	MH	A-7-5	2.72	2.7147E-06	11.60	1.689
M-10	14.09	49.17	36.74	43.59	24.21	19.38	32.53	CL	A-7-6	2.70	1.9853E-06	12.20	1.912
M-11	51.32	20.22	28.46	34.00	17.00	17.00	12.30	CL arenoso	A-2-6	2.71	2.9613E-06	10.60	2.025
M-12	45.69	30.02	24.29	40.76	23.02	17.74	20.10	CL arenoso	A-2-7	2.73	1.0366E-06	10.30	1.932
M-13	6.43	57.48	36.09	46.22	21.83	24.39	28.32	CL	A-7-6	2.70	9.8987E-07	10.80	1.855
M-14	11.40	40.29	48.31	60.32	27.22	33.10	25.40	CH	A-7-6	2.74	7.3390E-07	16.50	1.782
M-15	0.00	39.80	60.20	76.00	34.00	42.00	30.21	CH	A-7-6	2.72	5.0285E-07	19.60	1.739
M-16	49.24	32.88	17.88	38.10	21.10	17.00	15.20	CL arenoso	A-2-7	2.72	3.6362E-06	9.21	1.958
M-17	43.01	38.66	18.33	36.20	20.30	15.90	12.50	CL arenoso	A-2-7	2.72	3.2097E-06	10.90	1.852
M-18	0.00	66.72	33.28	45.00	23.00	22.00	18.20	CL	A-7-6	2.70	7.1072E-07	12.60	1.938
M-19	4.16	43.75	52.09	68.77	27.39	41.38	15.63	CH	A-7-6	2.70	6.6442E-07	18.50	1.728
M-20	8.03	50.96	41.01	26.00	18.00	8.00	15.23	CL	A-2-7	2.70	5.8585E-07	10.80	1.998
M-21	9.15	37.87	52.98	77.74	30.94	46.80	18.40	CH	A-7-6	2.70	8.2676E-07	19.30	1.737
M-22	17.08	47.75	35.17	40.00	21.00	19.00	16.50	CL arenoso	A-2-7	2.76	4.4797E-06	12.10	1.918
M-23	50.88	29.50	19.62	32.00	19.00	13.00	20.40	SC	A-2-7	2.69	3.7373E-06	9.10	1.947
M-24	20.98	47.39	31.63	44.00	26.00	18.00	23.21	CL arenoso	A-2-7	2.70	2.9613E-06	9.80	1.951
M-25	65.77	28.24	5.99	25.00	21.90	3.10	4.50	SM	A-2-4	2.83	6.8756E-06	6.20	2.168
M-26	39.54	30.79	29.67	40.59	23.87	16.72	23.71	CL arenoso	A-2-7	2.72	2.9613E-06	9.50	1.821
M-27	22.80	54.10	23.10	32.86	22.36	10.50	8.62	CL arenoso	A-2-6	2.72	2.4844E-06	9.81	1.818
M-28	29.55	47.72	22.73	29.76	19.25	10.51	10.00	CL arenoso	A-2-7	2.73	3.1449E-06	6.90	2.005