

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**MÉTODO DE CORRECCIÓN DEL ESFUERZO DE FLUENCIA DE
RELAVES ESPESADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
PENDIENTE DE DISPOSICIÓN**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

FRANKLIN RICARDO OLAYA TRINIDAD

Lima- Perú

2015

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	XVI
CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1 GENERACIÓN DE RESIDUOS MINEROS.....	1
1.2 MANEJO Y CONTROL DE RELAVES.....	2
1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS RELAVES.....	3
1.3.1 Relaves convencionales.....	3
1.3.2 Relaves espesados.....	4
1.3.3 Relaves en pasta.....	4
1.3.4 Relaves en filtrados.....	5
1.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS RELAVES.....	6
1.4.1 Propiedades geotécnicas.....	6
1.4.2 Parámetros reológicos.....	8
1.5 DEPÓSITOS DE RELAVES.....	14
1.6 DESCARGA CENTRAL DE RELAVES.....	17
1.7 PENDIENTE DE DISPOSICIÓN.....	17
1.8 FORMACIÓN DE UN DEPÓSITO DE RELAVES ESPESADOS.....	18
1.9 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
1.10 ALCANCE DEL ESTUDIO.....	21
CAPÍTULO II. ESTUDIO DE LA PENDIENTE DE DISPOSICIÓN.....	22
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	22
2.2 ENFOQUE DE EQUILIBRIO LÍMITE.....	28
2.3 ENSAYO DE DISPOSICIÓN EN CANALETA.....	29
2.4 INTERPRETACIÓN DEL ESFUERZO DE FLUENCIA EN EL PROCESO DE DISPOSICIÓN.....	30
2.5 ESTABILIDAD POST-LICUACIÓN DE LA PENDIENTE DE DISPOSICIÓN.....	30

2.5.1	Relación de vacíos inicial.....	31
2.5.2	Comportamiento de los relaves y resistencia residual.....	32
2.5.3	Análisis de estabilidad.....	32
CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO.....		34
3.1	CONSIDERACIONES PARA EL MODELAMIENTO.....	34
3.2	ENTORNO DEL ENSAYO.....	35
3.3	ESTADO DE EQUILIBRIO.....	35
3.4	SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN GOBERNANTE.....	38
CAPÍTULO IV. TRABAJO EXPERIMENTAL.....		41
4.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	41
4.2	SISTEMA DE DISPOSICIÓN.....	41
4.2.1	Canaleta.....	41
4.2.2	Sistema de bombeo.....	42
4.3	MUESTRAS DE RELAVE.....	45
4.4	OBTENCIÓN DE MUESTRAS.....	45
4.5	CHARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....	51
4.5.1	Análisis granulométrico.....	51
4.5.2	Humedad y contenido de sólidos.....	55
4.5.3	Gravedad específica.....	56
4.5.4	Plasticidad y Clasificación SUCS.....	58
4.6	MEDICIÓN DEL ESFUERZO DE FLUENCIA.....	58
4.7	ENSAYOS DE DISPOSICIÓN EN CANALETA.....	59
4.7.1	Procedimiento del ensayo.....	59
4.7.2	Ensayo de Canaleta – Muestra CH01.....	60
4.7.3	Ensayo de Canaleta – Muestra MC01.....	65
4.7.4	Ensayo de Canaleta – Muestra MC02.....	70
4.7.5	Ensayo de Canaleta – Muestra MC03.....	75
4.7.6	Ensayo de Canaleta – Muestra MZ01.....	78
CAPÍTULO V. PROCESAMIENTO DE RESULTADOS.....		83
5.1	MODELAMIENTO DE LOS ENSAYOS DE CANALETA.....	83

5.1.1	Modelamiento del ensayo de disposición – Muestra CH01.	86
5.1.2	Modelamiento del ensayo de disposición – Muestra MC01.	90
5.1.3	Modelamiento del ensayo de disposición – Muestra MC02.	93
5.1.4	Modelamiento del ensayo de disposición – Muestra MC03.	96
5.1.5	Modelamiento del ensayo de disposición – Muestra MZ01.	99
5.2	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO.	100
5.3	CORRECCIÓN DEL ESFUERZO DE FLUENCIA.....	101
5.3.1	Corrección del esfuerzo de fluencia, muestra CH01.....	101
5.3.2	Corrección del esfuerzo de fluencia, muestra MC01.	104
5.3.3	Corrección del esfuerzo de fluencia, muestra MC02.	106
5.3.4	Corrección del esfuerzo de fluencia, muestra MC03.	107
5.3.5	Corrección del esfuerzo de fluencia, muestra MZ01.....	109
5.4	interpretación de la corrección del esfuerzo de fluencia.	111
	CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	115
6.1	CONCLUSIONES.....	115
6.2	RECOMENDACIONES.....	118
	BIBLIOGRAFÍA.....	120
	ANEXOS.....	123

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la salud y gracias brindadas durante todo este tiempo.

A mis padres Orlando y Rosa por el soporte brindado y enseñarme todo aquello que trasciende lo académico. A mi hermano Orlando, el mejor apoyo y ejemplo que he podido tener.

A mi profesor asesor el ingeniero César Atala por la orientación y discusiones llevadas a cabo durante este largo proceso. Por su tiempo y desinterés en la realización de este trabajo.

A los ingenieros José Luis Lara, Jorge Chávez, Rosa Moreano y Nilton Rivas por sus consejos, puntos de vista y sugerencias brindadas.

Al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil por las facilidades brindadas.

A mis profesores y compañeros de FIC-UNI.

A Golder Associates Perú por la inversión realizada para esta tesis sin la cual hubiese sido imposible llevar a cabo este trabajo.

A todas las personas que contribuyeron de alguna manera en el desarrollo de esta tesis.

RESUMEN

En el Perú la disposición superficial de relaves altamente espesados ha visto un considerable crecimiento durante la última década, esto debido principalmente a que es una gran alternativa ante las regulaciones sociales y ambientales que restringen el área de terreno impactado y permiten reducir el consumo de agua fresca en el proceso minero. La creciente aplicación de la tecnología de relaves espesados propició mejorar el entendimiento del comportamiento geotécnico y reológico de los relaves, para los cuales el aseguramiento de la estabilidad física luego del fenómeno de licuación es un requisito básico.

Estimar la pendiente de disposición es el punto de partida para el diseño de un depósito de relaves debido a que este parámetro incide sobre el diseño geométrico del depósito (necesidad de altura de presa, capacidad de almacenaje, etc.) y en el análisis de estabilidad luego del fenómeno de licuación de la masa de relave depositado. Numerosos enfoques teóricos han sido planteados con el fin de estimar la pendiente de disposición de relaves espesados siendo los de mayor aceptación los basados en un estado de equilibrio límite.

Sin embargo con el fin de que los modelos numéricos representen lo que en la realidad sucede se necesita de un proceso de calibración, principalmente del esfuerzo de fluencia, el cual gobierna el comportamiento de los relaves en el proceso de disposición. El trabajo de calibración es realizado generalmente por medio de ensayos de disposición de relaves en laboratorio o in situ los cuales son posteriormente modelados numéricamente para así obtener un valor de esfuerzo de fluencia corregido que debería ser usado para la estimación de la pendiente de disposición de relaves espesados a escala real.

Lamentablemente en el Perú la práctica usual de estimación de la pendiente de disposición recurre a métodos empíricos con poca o nula base teórica que redundan por lo general en pendientes sobrevaloradas que finalmente terminan por exigir rediseños sobre la marcha de proyectos en operación, traducéndose en costos no previstos y en el caso de no tomar las medidas correctivas en el rediseño se podría comprometer seriamente la seguridad de la presa y los relaves embalsados.

La presente tesis abarca el problema de la corrección del esfuerzo de fluencia considerando la aplicación de la metodología de equilibrio límite para disposición de relaves espesados. La metodología de trabajo considera la implementación y realización del ensayo de disposición en canaleta, medición directa del esfuerzo de fluencia usando un viscosímetro y también la elaboración de un modelo numérico basado en criterios de equilibrio límite para el momento en que el flujo de relaves se detiene en la canaleta. Por último se plantea la utilización del modelo numérico desarrollado para la simulación de los perfiles obtenidos en el ensayo y la posterior corrección del desfuerzo de fluencia.

Dentro del plan de trabajo se utilizaron muestras provenientes de minas peruanas en operaciones y también muestras generadas en laboratorio a partir de pruebas metalúrgicas de espesamiento.

Como resultados del presente trabajo se menciona primero la validación del modelo planteado para la simulación numérica del proceso de disposición de relaves espesados y segundo que a través del modelamiento de los ensayos y por comparación entre el esfuerzo de fluencia medido en viscosímetro y el obtenido del modelamiento numérico se obtiene la corrección necesaria de ser aplicada al esfuerzo de fluencia para modelamientos a escala real.

Finalmente esta tesis tiene por objeto aportar a la práctica del diseño de los depósitos de relaves mediante la estimación de la pendiente de disposición con la siguiente metodología:

1. Proveer de un modelo numérico que permite simular la disposición de relaves espesados.
2. Corrección del esfuerzo de fluencia mediante ensayos de laboratorio y modelamiento numérico para obtener una simulación correcta de la disposición de relaves espesados.
3. Flexibilidad del modelo numérico que al usar la corrección del esfuerzo de fluencia y la topografía del terreno permitiría estimar las pendientes de disposición en Campo.

LISTA DE CUADROS

Cuadro N° 4.1.	Resumen descriptivo de las muestras ensayadas.....	45
Cuadro N° 4.2.	Diámetro “d ₅₀ ” y porcentaje de finos de las muestras de relave	55
Cuadro N° 4.3.	Humedad y contenido de sólidos iniciales de las muestras..	56
Cuadro N° 4.4.	Gravedad específica de las muestras.....	57
Cuadro N° 4.5.	Esfuerzo de fluencia.....	58
Cuadro N° 4.6.	Resumen de los ensayos de canaleta realizados a la muestra CH01..	60
Cuadro N° 4.7.	Mediciones realizadas, ensayo 01 - CH01.....	61
Cuadro N° 4.8.	Mediciones realizadas, ensayo 02 – CH01.	63
Cuadro N° 4.9.	Mediciones realizadas, ensayo 03 – CH01. Fuente, Elaboración propia.....	64
Cuadro N° 4.10.	Mediciones realizadas, ensayo 03 – CH01.....	64
Cuadro N° 4.11.	Resumen de los ensayos realizados de canaleta realizados a la muestra MC01.	66
Cuadro N° 4.12.	Mediciones realizadas, ensayo 01 – MC01.	67
Cuadro N° 4.13.	Mediciones realizadas, ensayo 02 – MC01.. ..	68
Cuadro N° 4.14.	Mediciones realizadas, ensayo 03 – MC01.	69
Cuadro N° 4.15.	Resumen de los ensayos realizados de canaleta realizados a la muestra MC02.	71
Cuadro N° 4.16.	Mediciones realizadas, ensayo 01 – MC02.	72
Cuadro N° 4.17.	Mediciones realizadas, ensayo 02 – MC02.. ..	73
Cuadro N° 4.18.	Mediciones realizadas, ensayo 03 – MC02.	74
Cuadro N° 4.19.	Resumen de los ensayos realizados de canaleta realizados a la muestra MC03.	75
Cuadro N° 4.20.	Mediciones realizadas, ensayo 01 – MC03.	77
Cuadro N° 4.21.	Mediciones realizadas, ensayo 02 – MC03.	77
Cuadro N° 4.22.	Mediciones realizadas, ensayo 03 – MC03.	78
Cuadro N° 4.23.	Resumen de los ensayos realizados de canaleta realizados a la muestra CH01.	78
Cuadro N° 4.24.	Mediciones realizadas, ensayo 01 – MZ01.....	80
Cuadro N° 4.25.	Mediciones realizadas, ensayo 02 – MZ01.....	81
Cuadro N° 5.1.	Ensayo de Canaleta 01, modelamiento.	86

Cuadro N° 5.2. Ensayo de Canaleta 02, modelamiento.	87
Cuadro N° 5.3. Ensayo de Canaleta 02, modelamiento.	87
Cuadro N° 5.4. Ensayo de Canaleta 03, modelamiento.	88
Cuadro N° 5.5. Ensayo de Canaleta 03, modelamiento.	89
Cuadro N° 5.6. Ensayo de Canaleta 03, modelamiento.	89
Cuadro N° 5.7. Ensayo de Canaleta 01, modelamiento.	90
Cuadro N° 5.8. Ensayo de Canaleta 02, modelamiento.	91
Cuadro N° 5.9. Ensayo de Canaleta 03, modelamiento.	92
Cuadro N° 5.10. Ensayo de Canaleta 01 – MC02, modelamiento.	93
Cuadro N° 5.11. Ensayo de Canaleta 02 – MC02, modelamiento.	94
Cuadro N° 5.12. Ensayo de Canaleta 03 – MC02, modelamiento.	95
Cuadro N° 5.13. Ensayo de Canaleta 01 – MC03, modelamiento.	96
Cuadro N° 5.14. Ensayo de Canaleta 02 – MC03, modelamiento.	97
Cuadro N° 5.15. Ensayo de Canaleta 03 – MC03, modelamiento.	98
Cuadro N° 5.16. Ensayo de Canaleta 01 – MZ01, modelamiento.	99
Cuadro N° 5.17. Ensayo de Canaleta 02 – MZ01, modelamiento.	100
Cuadro N° 5.18. Ensayo de Canaleta 01, resumen del proceso de modelamiento.	102
Cuadro N° 5.19. Ensayo de Canaleta 02, resumen del proceso de modelamiento.	102
Cuadro N° 5.20. Ensayo de Canaleta 03, resumen del proceso de modelamiento.	102
Cuadro N° 5.21. Valores promedio del esfuerzo de fluencia, muestra CH01.	103
Cuadro N° 5.22. Ensayo de Canaleta 01, resumen del proceso de modelamiento.	104
Cuadro N° 5.23. Ensayo de Canaleta 02, resumen del proceso de modelamiento.	104
Cuadro N° 5.24. Ensayo de Canaleta 03, resumen del proceso de modelamiento.	104
Cuadro N° 5.25. Valores promedio del esfuerzo de fluencia, muestra MC01.	105
Cuadro N° 5.26. Ensayo de Canaleta 01, resumen del proceso de modelamiento.	106

Cuadro N° 5.27. Ensayo de Canaleta 02, resumen del proceso de modelamiento.....	106
Cuadro N° 5.28. Ensayo de Canaleta 03, resumen del proceso de modelamiento.....	106
Cuadro N° 5.29. Valores promedio del esfuerzo de fluencia, muestra MC02	106
Cuadro N° 5.30. Ensayo de Canaleta 01, resumen del proceso de modelamiento.....	108
Cuadro N° 5.31. Ensayo de Canaleta 02, resumen del proceso de modelamiento.....	108
Cuadro N° 5.32. Ensayo de Canaleta 03, resumen del proceso de modelamiento.....	108
Cuadro N° 5.33. Valores promedio del esfuerzo de fluencia, muestra MC03	108
Cuadro N° 5.34. Ensayo de Canaleta 01, resumen del proceso de modelamiento.....	109
Cuadro N° 5.35. Ensayo de Canaleta 02, resumen del proceso de modelamiento.....	110
Cuadro N° 5.36. Valores promedio del esfuerzo de fluencia, muestra MZ01	110
Cuadro N° 5.37. Consolidado de los esfuerzos de fluencia medidos y modelados.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.1	Diagrama esquemático proceso de extracción de mineral por flotación.....	1
Figura N° 1.2	Descarga de relaves convencionales (pulpa).....	3
Figura N° 1.3	Descarga de relaves espesados.....	4
Figura N° 1.4	Relaves en Pasta.....	5
Figura N° 1.5	Realves filtrados.....	5
Figura N° 1.6	Consolidómetro para pulpas de relave.....	6
Figura N° 1.7	Curva de contracción y su relación con los límites de Atterberg.....	8
Figura N° 1.8	Esquema de las fuerzas asociadas a la explicación de la Ley de Newton de la Viscosidad.....	9
Figura N° 1.9.	Reograma típico para materiales Newtoniano y No-Newtoniano.....	10
Figura N° 1.10.	Reograma típico para un material no Newtoniano.....	11
Figura N° 1.11.	Reograma ilustrando la divergencia entre el esfuerzo de fluencia real y el extrapolado.....	12
Figura N° 1.12.	Prueba de veleta para medición del esfuerzo de fluencia.....	13
Figura N° 1.13.	Depósito de relaves Highland Valley Cooper.....	14
Figura N° 1.14.	Descarga de relaves a través de un Spigot.....	15
Figura N° 1.15.	Remediación ambiental del depósito de relaves Tablachaca.....	16
Figura N° 1.16.	Rotura de presa Merriespruit Sudáfrica.....	16
Figura N° 1.17.	Esquema conceptual de un depósito de descarga central de relaves.....	17
Figura N° 1.18.	Esquema de la pendiente de disposición para un depósito de relaves espesados.....	18
Figura N° 1.19.	Proceso de disposición de relaves espesados en Bulyanhulu Tanzania.....	20
Figura N° 2.1.	Abaco pendiente de disposición vs Concentración en peso.....	23
Figura N° 2.2.	Pendiente de disposición vs Gravedad específica.....	24
Figura N° 2.3.	Ensayo de disposición en Canaleta.....	26
Figura N° 3.1.	Elemento diferencial de relave sobre un plano inclinado en estado de equilibrio.....	35

Figura N° 3.2. Elemento de control dentro de la masa de relave.	36
Figura N° 3.3. Estado de equilibrio para el elemento de control asumido.	36
Figura N° 4.1. Canaleta empleada para los ensayos de disposición.	42
Figura N° 4.2. Tanque de Almacenamiento de relaves.	43
Figura N° 4.3. Bomba peristáltica de impulsión.	43
Figura N° 4.4. Mangueras de alimentación y descarga.	44
Figura N° 4.5. Sistema integrado de alimentación y descarga incluida la canaleta.	44
Figura N° 4.6. Veinte bidones conteniendo la muestra CH01.	46
Figura N° 4.7. Homogenización de cada bidón de la muestra CH01 para generar la muestra representativa.	46
Figura N° 4.8. Bidón conteniendo la muestra representativa CH01 homogenizada.	47
Figura N° 4.9. Tara con muestra representativa CH01 previamente de ser ingresada al horno.	47
Figura N° 4.10. Relave MC01 a la salida del espesador.	48
Figura N° 4.11. Relave MC02 a la salida del espesador.	49
Figura N° 4.12. Relave MC03 a la salida del espesador.	50
Figura N° 4.13. Muestra MZ01.	51
Figura N° 4.14. Tamices utilizados en el ensayo de granulometría.	52
Figura N° 4.15. Ensayo de granulometría por hidrómetro.	52
Figura N° 4.16. Curva granulométrica muestra CH01.	53
Figura N° 4.17. Curva granulométrica muestra MC01.	53
Figura N° 4.18. Curva granulométrica muestra MC02.	54
Figura N° 4.19. Curva granulométrica muestra MC03.	54
Figura N° 4.20. Granulometría muestra MZ01.	55
Figura N° 4.21. Ingreso de muestras al horno para medición del contenido de humedad.	56
Figura N° 4.22. Fiola empleada para el ensayo de gravedad específica.	57
Figura N° 4.23. Bomba y sistema de vacíos empleada en el ensayo de gravedad específica.	57
Figura N° 4.24. Equipo para medición del esfuerzo de fluencia.	59
Figura N° 4.25. Vista lateral del relave depositado ensayo 01 – CH01.	62
Figura N° 4.26. Vista frontal del relave depositado, ensayo 01 – CH01.	62
Figura N° 4.27. Vista lateral del relave depositado, ensayo 02 – CH01.	63

Figura N° 4.28. Vista lateral del relave depositado, ensayo 03 – CH01.	65
Figura N° 4.29. Vista frontal del relave depositado, ensayo 03 – CH01.	65
Figura N° 4.30. Vista lateral del relave depositado, ensayo 01 – MC01.	67
Figura N° 4.31. Vista frontal del relave depositado, ensayo 01 – MC01.	68
Figura N° 4.32. Vista frontal del relave depositado, ensayo 02- MC01.	69
Figura N° 4.33. Vista lateral del relave depositado, ensayo 03 – MC01.	70
Figura N° 4.34. Vista frontal del relave depositado, ensayo 03 – MC01.	70
Figura N° 4.35. Vista en planta del relave depositado, ensayo 01 – MC02.	72
Figura N° 4.36. Vista frontal proceso de disposición, ensayo 01 – MC02.	73
Figura N° 4.37. Vista frontal proceso de disposición, ensayo 02 – MC02.	74
Figura N° 4.38. Vista frontal proceso de disposición, ensayo 03 – MC02.	75
Figura N° 4.39. Vista lateral del relave depositado, ensayo 01 – MZ01.	80
Figura N° 4.40. Vista frontal del relave depositado, ensayo 01 – MZ01.	81
Figura N° 4.41. Vista en planta del relave depositado, ensayo 02 – MZ01.	82
Figura N° 4.42. Vista frontal del relave depositado, ensayo 02 – MZ01.	82
Figura N° 5.1. Interfaz de usuario del modelo numérico desarrollado,	84
Figura N° 5.2. Ingreso de los parámetros en un modelamiento para una canaleta de 0.80 m de ancho.	84
Figura N° 5.3. Perfil de disposición obtenido del modelamiento numérico,	85
Figura N° 5.4. Código implementado en lenguaje MatLab	85
Figura N° 5.5. Perfiles medidos y modelados, ensayo 01.	86
Figura N° 5.6. Perfiles medidos y modelados, ensayo 02.	88
Figura N° 5.7. Perfiles medidos y modelados, ensayo 03.	89
Figura N° 5.8. Perfiles medidos y modelados, ensayo 01.	90
Figura N° 5.9. Perfiles medidos y modelados, ensayo 02.	91
Figura N° 5.10. Perfiles medidos y modelados, ensayo 03.	92
Figura N° 5.11. Perfiles medidos y modelados, ensayo 01 – MC02.	93
Figura N° 5.12. Perfiles medidos y modelados, ensayo 02 – MC02.	94
Figura N° 5.13. Perfiles medidos y modelados, ensayo 03 – MC02.	95
Figura N° 5.14. Perfiles medidos y modelados, ensayo 01 – MC03.	96
Figura N° 5.15. Perfiles medidos y modelados, ensayo 02 – MC03.	97
Figura N° 5.16. Perfiles medidos y modelados, ensayo 03 – MC03.	98
Figura N° 5.17. Perfiles medidos y modelados, ensayo 01 – MZ01.	99

Figura N° 5.18. Perfiles medidos y modelados, ensayo 02 – MZ01.	100
Figura N° 5.19. Comportamiento del esfuerzo de fluencia medido y modelado, variando el contenido de sólidos - muestra CH01.....	103
Figura N° 5.20. Comportamiento del esfuerzo de fluencia medido y modelado, variando el contenido de sólidos - muestra MC01.	105
Figura N° 5.21. Comportamiento del esfuerzo de fluencia medido y modelado, variando el contenido de sólidos muestra MC02. ...	107
Figura N° 5.22. Comportamiento del esfuerzo de fluencia medido y modelado, variando el contenido de sólidos muestra MC03. ...	109
Figura N° 5.23. Comportamiento del esfuerzo de fluencia medido y modelado, variando el contenido de sólidos muestra MC03.....	111
Figura N° 5.24. Consolidado de los esfuerzos de fluencia medidos y modelados.....	112
Figura N° 5.25. Comportamiento del esfuerzo de fluencia con el d_{50} y el porcentaje de Finos – Muestras CH01 y CH02.....	113
Figura N° 5.26. Comportamiento del esfuerzo de fluencia con el d_{50} y el porcentaje de Finos – Muestras MC01 y MC02.	113

LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS

W_w	:	Peso de agua.
W_s	:	Peso de sólidos.
C_s	:	Contenido de sólidos.
w	:	Contenido de humedad.
τ	:	Esfuerzo cortante.
F_H	:	Fuerza horizontal.
A	:	Área superficial.
γ	:	Deformación.
μ	:	Viscosidad cinemática.
$\dot{\gamma}$:	Razón de corte.
τ_B	:	Esfuerzo de fluencia Bingham.
τ_y	:	Esfuerzo de fluencia.
T_m	:	Torque de fluencia.
S'	:	Medida del slump.
ρ	:	Densidad.
g	:	Aceleración de la gravedad.
δ	:	Espesor de capa de relave.
i	:	Pendiente.
Q	:	Tasa de descarga.
P	:	Producción seca por día.
C_w	:	Concentración en peso de las partículas secas.
d_{50}	:	Tamaño medio de partícula.
ρ_s	:	Densidad de partículas sólidas.
ρ_l	:	Densidad del fluido.

h	:	Altura.
e	:	Relación de vacíos.
G_s	:	Gravedad específica.
e_c	:	Relación de vacíos en el estado crítico.
Γ	:	Relación de vacíos de referencia para una presión de 1 kPa.
λ	:	Pendiente de la línea de estado crítico.
σ'_m	:	Esfuerzo efectivo medio.
ψ	:	Parámetro de estado.
S_r	:	Resistencia residual.
M	:	Relación de esfuerzos en el estado crítico.
τ_s	:	Esfuerzo cortante.
γ_t	:	Peso específico total.
γ'	:	Peso específico sumergido.
θ	:	Pendiente de talud.
P_h	:	Presión hidrostática.
A_{corte}	:	Área de corte.
ω	:	Ancho de canaleta de ensayo.
W	:	Peso del relave.
N	:	Fuerza de reacción.
y	:	Altura del relave.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales motores de la economía peruana es la actividad minera, la cual en el año 2011 representó el 59% de las exportaciones del Perú, ésta a través de la explotación a gran escala de recursos minerales genera altas cantidades de residuos que deben ser almacenados de forma segura cubriendo requerimientos ambientales y de estabilidad física.

Justamente la pendiente con la cual los relaves se depositan define capacidades de almacenamiento, necesidad de altura de presas y otros aspectos de diseño geométrico para el depósito. Así también, la pendiente de disposición interviene en el análisis de estabilidad de la masa de relaves depositados, por lo cual generar herramientas que faciliten la estimación de este parámetro es de suma importancia, más aún cuando en el país no existen estudios previos referentes a este tema.

Como indica el título de la presente tesis, el objetivo de esta investigación es presentar una metodología de corrección para el esfuerzo de fluencia, el cual gobierna el comportamiento de la masa de relaves mientras son depositados. Lo anterior es realizado con el fin de generar diseños más precisos de los depósitos de relaves.

Esta tesis se desarrolla en seis capítulos, los cuales se describen a continuación:

Capítulo I: Se presenta el contexto en el cual se ha desarrollado la tesis, así también los objetivos que se buscan lograr y el alcance del estudio presentado. En este capítulo también se desarrollan los conceptos básicos que permitan al lector comprender la materia que desarrolla la tesis en su totalidad.

Capítulo II: Abarca una revisión de la literatura disponible en cuanto al estudio de la pendiente de disposición, metodologías de estimación y enfoques teóricos. La finalidad es presentar como las técnicas de estimación mejoraron en el tiempo y como el enfoque de un estado de equilibrio límite es adecuado para estimaciones de la pendiente de disposición a escala real.

Capítulo III: Se explican de forma detallada las asunciones teóricas en las cuales se basa el modelo numérico propuesto y se presenta el estado de equilibrio de fuerzas actuantes sobre el elemento examinado. Finalmente se

presenta la solución numérica que describirá el perfil de disposición de relave a obtenerse.

Capítulo IV: Se centra en presentar la etapa experimental de esta investigación, desde la descripción del equipo utilizado, la generación de las muestras, su caracterización geotécnica, medición del esfuerzo de fluencia y finalmente los ensayos de disposición en la canaleta.

Capítulo V: Aquí se presentan en forma de cuadros los resultados del modelamiento de los ensayos de disposición llevados a cabo, posteriormente se presenta la metodología de corrección del esfuerzo de fluencia para cada capa modelada en cada ensayo. Finalmente se presentan curvas que nos permitirían obtener la corrección necesaria para distintas condiciones del relave estudiado.

Capítulo VI: Presenta las conclusiones obtenidas de todo el trabajo desarrollado, tanto el teórico como el experimental y también se brindan recomendaciones orientadas a continuar los hallazgos obtenidos en este estudio.

CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES

1.1 GENERACIÓN DE RESIDUOS MINEROS.

Los residuos mineros son producidos al extraer de un cuerpo mineralizado los constituyentes de interés (por ejemplo oro, plata, cobre, aluminio, etc.) Para entender la naturaleza de estos residuos es útil conocer básicamente el proceso de remoción de tales minerales de interés a través del plan de minado de la operación.

El proceso de extracción del mineral, ver Figura N° 1.1, comienza con la trituración, ésta se desarrolla en dos etapas, la primaria donde se reduce las rocas a tamaños de medio metro aproximadamente y la secundaria donde se reduce estos fragmentos a partículas de tamaños en el orden de 1 a 2 mm. El objetivo de triturar las rocas es generar partículas de tamaños que puedan alimentar el proceso de molienda. En la molienda mediante el uso de molinos (de bolas, barras, etc.) los tamaños de las partículas se reducen aún más obteniendo gradaciones de 0.5 mm o menos.

Posteriormente a la trituración y molienda un proceso comúnmente usado para la extracción de minerales es el de concentración, el objetivo de la concentración es el de separar las partículas con alto valor mineral de aquellas con poco o nulo valor, este proceso se lleva a cabo generalmente por separación por gravedad, por magnetismo o por flotación por espuma.

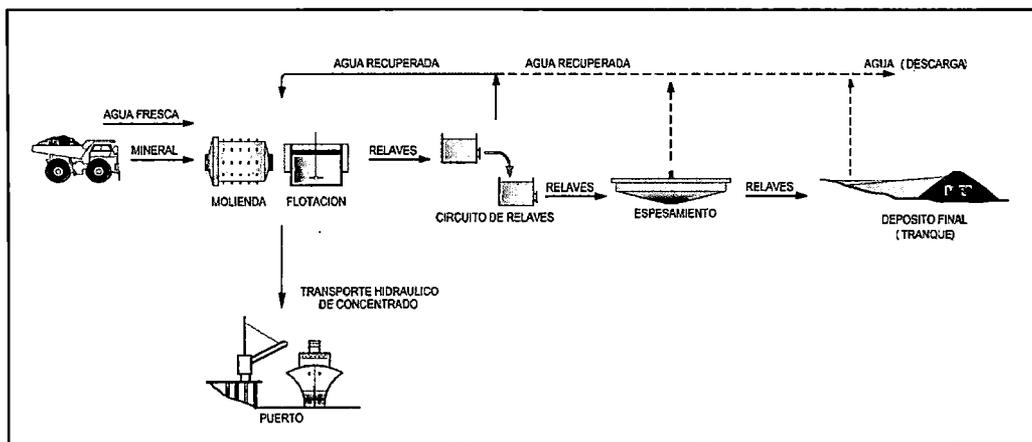


Figura N° 1.1 Diagrama esquemático proceso de extracción de mineral por flotación. Fuente, Luis Valenzuela P.

La separación por gravedad se basa en que los minerales y las rocas que los contienen poseen diferentes gravedades específicas y por tanto las partículas deseadas son separadas y colectadas, mientras que las partículas restantes son descargadas en forma de relave.

La separación por magnetismo es usualmente empleada para la extracción de hierro a través del uso de correas o tambores y la flotación por espuma es el método mayormente usado, éste método implica procesos físico-químicos muy complejos mediante los cuales las partículas que contienen los minerales se vuelven hidrófobas siendo capturadas por la espuma en la suspensión, finalmente los minerales son recogidos y las partículas restantes se eliminan en forma de relaves.

Los químicos usados como agentes de flotación pueden provocar daños al medio ambiente al ser eliminados junto a los relaves, por ejemplo el cianuro.

Otra forma de obtener los minerales desde los cuerpos rocosos es la lixiviación, la cual implica la remoción de minerales desde las partículas molidas mediante el uso de solventes, por lo general son usadas soluciones alcalinas o ácidos fuertes las cuales tienen el potencial de dañar el medio ambiente, la lixiviación ácida puede producir desechos con pH en el rango de 1 a 3.

La extracción de metales básicos como el cobre, plomo y zinc de la mano con los metales preciosos (oro y plata) dominan la industria minera peruana actualmente y en el futuro previsible, siendo el proceso de concentración uno de los más empleados para la obtención del mineral concentrado por tanto los relaves son uno de los principales desechos generados por la industria minera en el país. La tecnología de tratamiento de relaves ha mostrado grandes avances en las últimas décadas con el fin aumentar la rentabilidad de los proyectos mineros donde la forma de eliminar y almacenar los relaves representa un costo importante.

1.2 MANEJO Y CONTROL DE RELAVES.

Dependiendo de la composición de los minerales y del proceso usado para su extracción, los relaves pueden contener sustancias tóxicas como el cianuro o sustancias ácidas producto de oxidación de sulfuros contenidos en ellos. En el pasado la eliminación de estos relaves se hacía vertiéndolos en ríos o

depresiones cercanas con el único objetivo de deshacerse de ellos. Sin embargo hoy en día la legislación ambiental aplicada a nivel mundial, impulsada por la presión de organizaciones como las Naciones Unidas y el Banco Mundial, ha propiciado la mejora del tratamiento de residuos mineros, introduciendo el concepto de responsabilidad ambiental, esto a su vez ha impulsado el uso de nuevas tecnologías en el tratamiento de relaves y ha impuesto condiciones sobre su almacenamiento teniendo esto un impacto positivo sobre los criterios de diseño de los depósitos de relaves.

Otro aspecto igual de importante que el ambiental es el de aseguramiento de la estabilidad física de los depósitos de relaves que debe ser asegurada durante la operación, cierre y el periodo post-cierre. Debe preverse también que las medidas de mitigación ambiental no entren en conflicto con los requerimientos de estabilidad física.

Es en este punto donde reside la importancia del estudio del comportamiento de los relaves al ser depositados ya que de sus propiedades físicas y químicas va a depender su desempeño tanto ambiental como físico.

1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS RELAVES.

1.3.1 Relaves convencionales.

Generados directamente del proceso de flotación, estos relaves son mezclados con grandes cantidades de agua para facilitar su transporte y en el proceso de descarga las partículas gruesas sedimentan más rápido que las finas. Ver Figura N° 1.2.



Figura N° 1.2 Descarga de relaves convencionales (pulpa). Fuente, Golder Associates S.A.

1.3.2 Relaves espesados.

En el año 1975 el Dr. Eli Robinsky desarrolló el concepto de relave espesado (material auto soportante, no segregable y que exuda poca agua) con el fin de maximizar la capacidad de almacenamiento de los depósitos de relaves (Oportunidad de reducción de volumen y altura de presa). Ver Figura N° 1.3.

Se pueden definir a los relaves espesados como el producto de extraer agua por medios mecánicos y/o químicos de la matriz conformante de los relaves convencionales, como resultado se reduce su contenido de humedad (aumento en la concentración de sólidos). Sin embargo debe entenderse que la división entre un relave convencional y espesado no se mide en nivel de humedad o concentración de sólidos si no en su comportamiento no segregable.

Durante la última década en el Perú, la disposición a cielo abierto o subterránea de relaves espesados ha visto un avance considerable en cuanto a su tecnología de aplicación, principalmente a los beneficios económicos y ambientales que pueden ser obtenidos con su correcto uso



Figura N° 1.3 Descarga de relaves espesados. Fuente, Golder Associates S.A.

1.3.3 Relaves en pasta.

La definición de relaves en pasta no es clara y en muchos casos las definiciones de relaves espesados y en pasta pueden ser confundidas, lo claro es que un relave en pasta es creado por la remoción de una gran cantidad de agua. Por otro lado un relave en pasta presenta una menor cantidad de agua

exudada y según Paterson (2004) las pastas pueden ser transportadas a bajas velocidades sin segregación. Ver Figura N° 1.4.

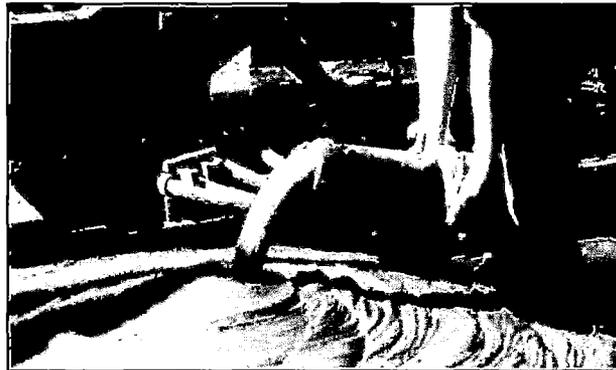


Figura N° 1.4 Relaves en Pasta. Fuente, Golder Associates S.A.

1.3.4 Relaves en filtrados.

Los relaves filtrados presentan un bajo contenido de agua comparados con los relaves espesados o en pasta, resultando en un material que no puede ser transportado por tuberías debido a su bajo contenido de agua, por lo cual es transportado generalmente por fajas transportadoras o camiones, tal y como puede verse en la Figura N° 1.5

Estos relaves usualmente son compactados para formar un depósito no saturado, este proceso obedece a los requerimientos geotécnicos del diseño del depósito. Un valor típico de contenido de humedad para estos relaves es de 20% aproximadamente logrado mediante el uso de procesos de correas, tambores, platos de presión y filtros al vacío.

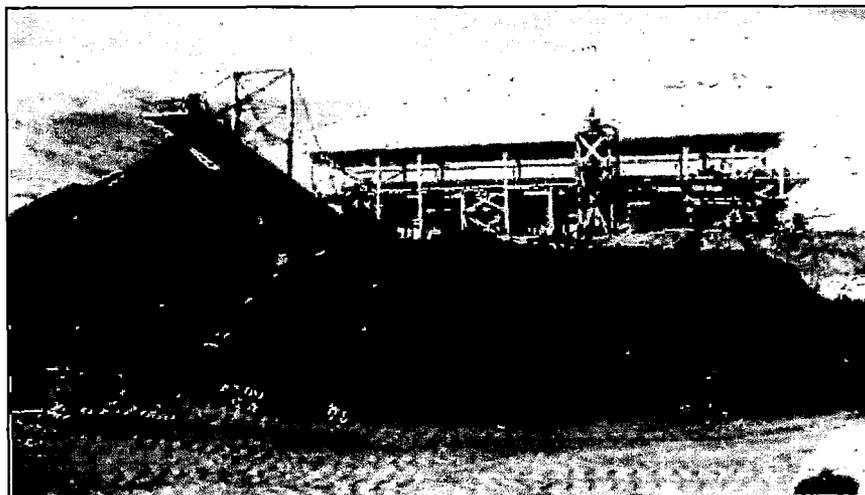


Figura N° 1.5 Relaves filtrados. Fuente Golder Associates S.A.

1.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS RELAVES.

1.4.1 Propiedades geotécnicas.

Las propiedades geotécnicas dictan el comportamiento de los relaves mineros al ser depositados, por ejemplo luego de descargados los relaves espesados comienzan a consolidarse por acción de su propio peso, el proceso de descarga incrementa el espesor del relave depositado mientras el agua drena hacia la superficie. Este proceso de consolidación libera por lo general grandes cantidades de agua (debido a la alta humedad del relave) la cual evapora dependiendo de las condiciones climáticas.

La consolidación y evaporación tienen efecto sobre la relación de vacíos que el relave depositado alcanza a lo largo del tiempo, a su vez la relación de vacíos mínima alcanzable para los relaves depositados es un importante parámetro para los análisis de estabilidad a largo plazo del relave depositado. Otro efecto del proceso de consolidación es el reacomodo de las partículas del relave depositado, lo que produce la disminución paulatina de la permeabilidad, Robinsky (1999) propone medir la permeabilidad durante el ensayo de consolidación utilizando una celda con diámetro interno de 100 mm y una altura de 150 mm. Otros investigadores como Krizek han presentado diseños propios de consolidómetros, ver Figura N° 1.6

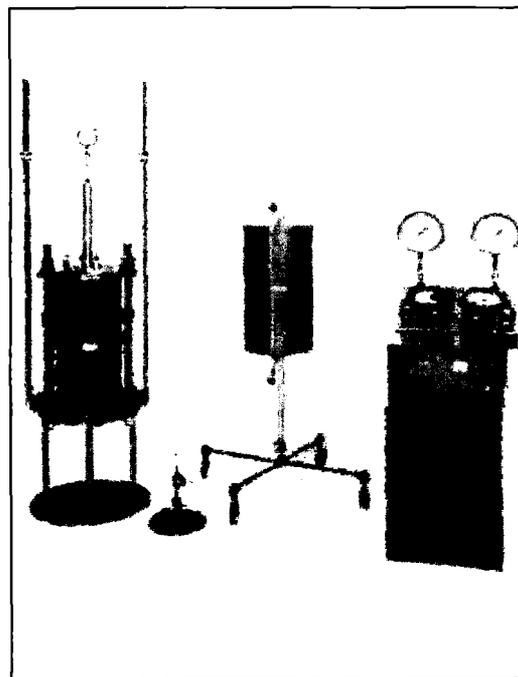


Figura N° 1.6 Consolidómetro para pulpas de relave. Fuente: Raymond J. Krizek

El punto de partida para el estudio de los relaves espesados depositados es su caracterización, comenzando con el análisis granulométrico (ASTM – D422), según Robinsky la cantidad de material entre los tamaños de partículas de 0.002 mm y 0.02 mm tienen la mayor influencia en el comportamiento del flujo de relaves, su pendiente de disposición y límite de contracción.

El contenido de humedad (ASTM – D2216) es una propiedad que debe ser medida desde el inicio de la descarga de los relaves en el depósito, la humedad junto con la relación de vacíos proveen información importantísima acerca del comportamiento del relave.

El contenido de sólidos representa el contenido de partículas sólidas contenidas en el relave en relación al peso total del mismo. Se calcula en peso y se relaciona con el contenido de humedad (w) según la ecuación 1.1:

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s}$$
$$C_s(\%) = \frac{1}{1 + w} \times 100 \quad (1.1)$$

Dónde:

W (%) : Contenido de humedad expresado en porcentaje.

W_w : Peso de agua.

W_s : Peso de sólidos.

C_s (%) : Contenido de sólidos expresado en porcentaje.

La plasticidad de los relaves espesados determinada a través de los límites de Atterberg (ASTM - D4318), el límite de contracción (ASTM - D427) y más aún la curva de contracción (Fredlund D. et. al. 2011), ver Figura N° 1.7, ayudan a estimar los probables cambios volumétricos que sufrirían los relaves depositados. Por otro lado la gravedad específica relativa de sólidos (ASTM – D854) es útil para estimar las relaciones masa – volumen de los relaves de forma indirecta.

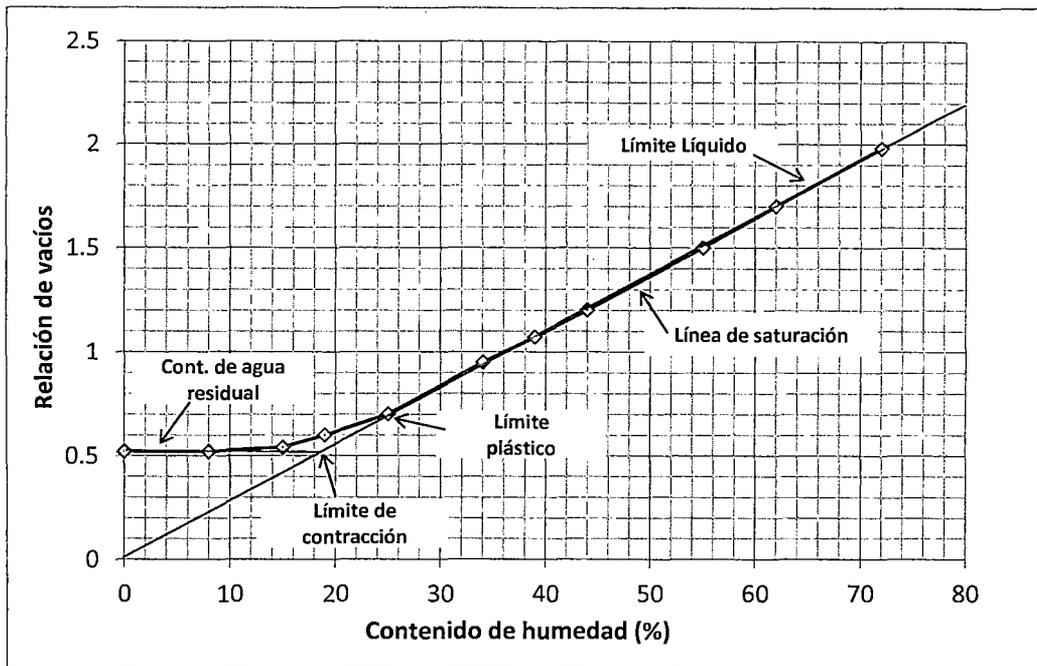


Figura N° 1.7 Curva de contracción y su relación con los límites de Atterberg. Fuente: Fredlund et. al. 2011

Para interpretar el comportamiento geotécnico del relave depositado es necesario determinar sus parámetros de resistencia, permeabilidad y consolidación, para esto se requiere realizar pruebas de laboratorio como las triaxiales (drenadas y no drenadas), de consolidación unidimensional y de medición de la permeabilidad entre otras.

1.4.2 Parámetros reológicos

La reología (del griego reos: fluir y logos: estudio) es la ciencia del flujo y la deformación de los materiales ante fuerzas externas. En concreto estudia la relación existente entre las variables de esfuerzo, deformación producida y la gradiente de velocidad. Caracterizar reológicamente un material nos permite estimar su comportamiento bajo distintas condiciones durante su producción, transporte y disposición. Específicamente para la geotecnia y el diseño del depósito de relaves nos importa saber cómo se comporta al ser depositado.

Dentro del estudio de los relaves espesados se aplica la reología para traducir las propiedades mineralógicas y las ganadas del espesamiento a parámetros medibles que sean de fácil aplicación a los modelos numéricos, estos parámetros son la viscosidad y el esfuerzo de fluencia.

1.4.2.1 Viscosidad

Podemos entender a la viscosidad como la medida de la resistencia a fluir de un material, no puede medirse de forma directa, pero podemos darnos una idea de cómo evaluarla con el siguiente procedimiento: imaginemos un plato fijo horizontal de dimensiones conocidas cubierto de una capa delgada de grasa, ahora coloquemos sobre esta capa de grasa otro plato de iguales dimensiones. Para deslizar el plato superior deberíamos aplicar una fuerza horizontal, una fuerza pequeña movería lentamente la placa pero una fuerza mayor le dará más velocidad. Por otro lado mientras la capa de grasa sea más delgada la placa superior será más difícil mover. La experiencia anterior indica que bajo ciertas condiciones puede ser más o menos difícil mover la placa, eso indica que existe “algo” que gobierna la capacidad de fluir.

Numéricamente las relaciones entre el esfuerzo, desplazamiento y velocidad han sido planteadas en la conocida “Ley de Newton de la Viscosidad” ver Figura N° 1.8

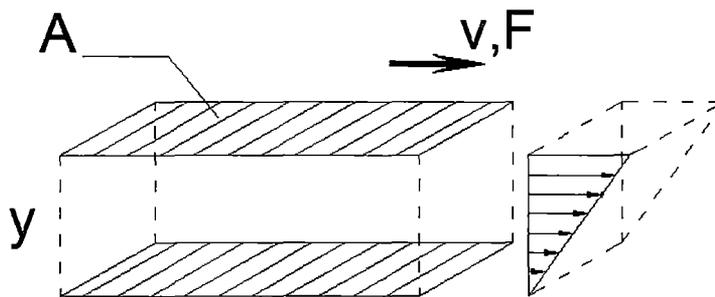


Figura N° 1.8 Esquema de las fuerzas asociadas a la explicación de la Ley de Newton de la Viscosidad. Fuente, Elaboración propia.

Se define el esfuerzo de corte τ como la razón entre la fuerza horizontal F_H y el área de la superficie, la razón de corte $\dot{\gamma}$ como el cambio de la velocidad dV a lo largo de la distancia y .

$$\tau = \frac{F_H}{A}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{dx}{dy}$$

La relación entre estas variables es la siguiente:

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dy} = \frac{d\gamma}{dt}$$

Dónde:

τ : Esfuerzo de corte

F_H : Fuerza horizontal aplicada

A : Área superficial

γ : Deformación

X : Desplazamiento en la dirección "x"

Y : Desplazamiento en la dirección "y"

La representación gráfica del esfuerzo de corte versus la razón de corte recibe el nombre de curva de flujo o reograma y describe el comportamiento del fluido a distintas tasas de corte, ver Figura N° 1.9.

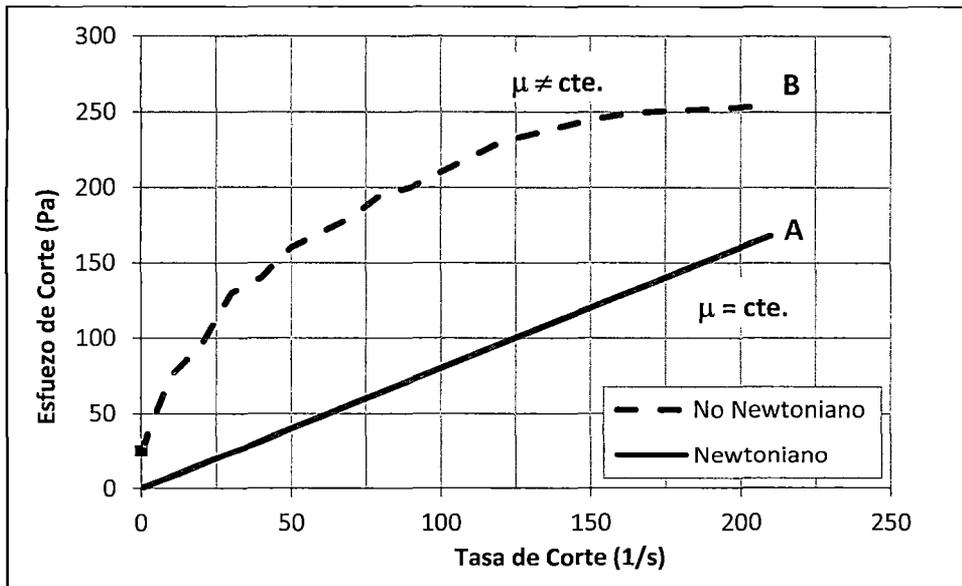


Figura N° 1.9. Reograma típico para materiales Newtoniano y No-Newtoniano. Fuente Paterson y Cooke.

En la Figura N° 1.9, la línea "A" representaría a un material con comportamiento newtoniano, en este caso la razón de corte y el esfuerzo de corte mantienen una relación constante, llamada viscosidad cinemática, entonces se plantea la siguiente ecuación:

$$\tau = \dot{\gamma} \cdot \mu$$

Dónde:

μ : Viscosidad cinemática.

τ : Esfuerzo de corte

$\dot{\gamma}$: Razón de corte.

La curva "B" muestra el comportamiento de un flujo no newtoniano, para éste la viscosidad no mantiene un valor constante, en este caso la relación entre el esfuerzo de corte y la razón de corte recibe el nombre de "función viscosidad" y viene dada por:

$$\tau = \dot{\gamma} \cdot \eta$$

Dónde:

η : Función viscosidad.

1.4.2.2 Esfuerzo de Fluencia

El esfuerzo de fluencia es el mínimo esfuerzo necesario para comenzar un estado de flujo sostenible (deformación) Los materiales newtonianos no presentan esfuerzo de fluencia motivo por el cual al representar sus reogramas estos resultan en una línea que pasa por el origen de coordenadas, por otro lado al graficar el reograma para materiales no-newtonianos es fácilmente distinguible el esfuerzo de fluencia en el eje de las ordenadas, ver Figura N° 1.10.

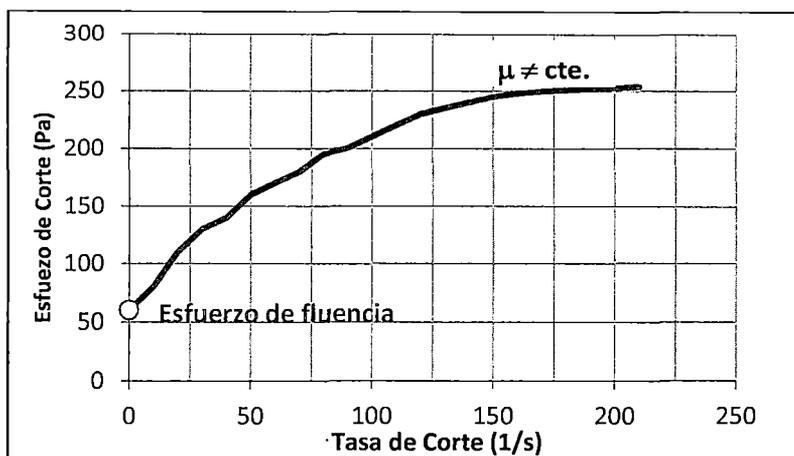


Figura N° 1.10. Reograma típico para un material no Newtoniano. Fuente Paterson y Cooke.

Los flujos de relaves espesados mientras son transportados y descargados muestran un comportamiento no newtoniano, por lo que poseen esfuerzo de fluencia (Boger, 2002), sin embargo existen muchos conceptos errados al momento de interpretar su fenómeno de fluencia y por ende al esfuerzo que origina esta condición.

Mucha data obtenida de ensayos a suspensiones no ha sido tomada a valores de razones de corte lo suficientemente bajas para poder obtener el valor del esfuerzo de fluencia por extrapolación, por lo general éste es extrapolado desde la región linear de altas razones de corte en el reograma. Este esfuerzo de fluencia recibe el nombre de esfuerzo de fluencia Bingham (τ_B) proveniente de un trabajo de ajuste y carece de aplicabilidad si se busca conocer el verdadero valor al cual el material empieza a fluir

Para determinar correctamente el valor del esfuerzo de fluencia en el reograma se debería medir los esfuerzos cortantes a razones de corte lo suficientemente bajas para lograr extrapolaciones razonables (Sofrà y Boger, 2011), ver Figura N° 1.11.

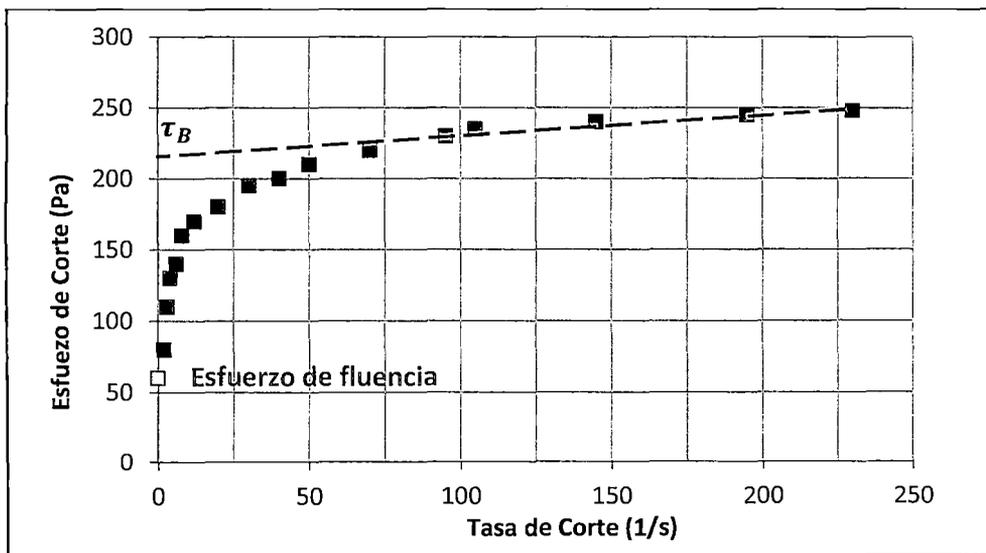


Figura N° 1.11. Reograma ilustrando la divergencia entre el esfuerzo de fluencia real y el extrapolado. Fuente, F. Sofrà y D.V. Boger.

1.4.2.3 Medición del Esfuerzo de Fluencia “Verdadero”

La medición del esfuerzo de fluencia “verdadero” (τ_y) se lleva a cabo con el **método de veleta** (Nguyen y Boger 1983, 1985), ver Figura N° 1.12. En este método se emplea una veleta que aplica fuerzas cortantes a la muestra hasta

generar en ella la condición de fluencia. Un breve resumen del método podría ser el siguiente:

La veleta es insertada en la muestra y rota a una velocidad bastante baja, usualmente 0.2 rpm, la fuerza cortante aplicada a la muestra es aumentada a medida que se desarrolla el ensayo (en el instrumento esto es registrado como valores de torque). El instante en que la muestra empieza a fluir en la muestra se reporta un torque máximo de valor T_m . Este valor de torque se relaciona con con el esfuerzo de fluencia por la ecuación (1.2) en la cual d es el diámetro de la veleta y l su altura, la ecuación (1.2) es válida si la relación l/d es lo suficientemente grande.

$$T_m = \frac{\pi}{2} d^3 \left(\frac{l}{d} + \frac{1}{3} \right) \tau_y \quad (1.2)$$



Figura N° 1.12. Prueba de veleta para medición del esfuerzo de fluencia. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.

La necesidad de un método simple de medida del esfuerzo de fluencia orientado a ser usado en campo, que no requiera de una fuente eléctrica o equipamiento sofisticado condujo la adaptación del ensayo de Slump usado para medir la consistencia de concreto. La adaptación consiste en llenar un cilindro hueco con muestra de relave, retirar verticalmente el cilindro y medir la

distancia que el relave cede usando como referencia el propio cilindro. El esfuerzo de fluencia está relacionado con el valor de slump con la siguiente ecuación:

$$\tau'_y = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{S'} \quad (1.3)$$

$$S' = 1 - 2\tau'_y(1 - \ln(\tau'_y)) \quad (1.4)$$

Donde τ'_y es el esfuerzo de fluencia adimensional ($\tau'_y = \tau_y / \rho g H$) y S' es el valor de slump adimensional se calcula como el slump dividido por el alto del cilindro H .

Existen comparaciones entre los valores de esfuerzo de fluencia medido con la técnica de veleta y por slump, notándose buena concordancia entre estas dos técnicas.

1.5 DEPÓSITOS DE RELAVES.

En este tipo de estructuras los relaves son almacenados en una cuenca que es creada por la construcción de presas, por lo general en terrenos montañosos la topografía ofrece barreras naturales para la mayor parte del depósito, necesitándose de una presa (estructura de contención) para almacenar grandes volúmenes de relave. En muchos casos estas presas son construidas con tierra y/o enrocado, sin embargo se han desarrollados métodos de construcción de presas de los mismos relaves o usando la parte gruesa de ellos (relaves cicloneados), ver Figura N° 1.13.



Figura N° 1.13. Depósito de relaves Highland Valley Cooper. Fuente, www.tailings.info

Los relaves son descargados al depósito a través de tuberías (*Spigot* en inglés), ver Figura N° 1.14, estas tuberías son dispuestas dependiendo del plan de disposición, por lo general alrededor del perímetro del depósito. Luego los ciclos continuos de descarga de relaves forman dentro del depósito la playa de relaves. Primero son pequeñas playas individuales por cada tubería y a medida que transcurre el tiempo estas playas crecen en longitud y altura formando una sola para todo el depósito. Por otro lado el agua liberada por los relaves una vez que son descargados se almacena formando un estanque (llamado "pond"), en muchas operaciones mineras el agua contenida en el pond es bombeada nuevamente hacia la planta de proceso para reutilizarla.



Figura N° 1.14. Descarga de relaves a través de un Spigot. Fuente, www.tailings.info

Este proceso de crecimiento de la playa de relaves, dicta los trabajos de recrecimiento de la presa, las presas se construyen incrementalmente, de esta manera el gran costo que implica su construcción se divide por etapas.

Al final de la vida de la mina, las regulaciones ambientales indican la rehabilitación del sitio donde se almacenan los relaves, lo cual indica un proceso de revegetación, ver Figura N° 1.15. A pesar de las considerables mejoras que los depósitos de relaves han supuesto, estos aún presentan riesgos medio-ambientales y de seguridad debido a que existe, en estas estructuras, un riesgo latente de filtración de agentes tóxicos al suelo subyacente lo que podría agravarse con filtraciones hacia los acuíferos.



Figura N° 1.15. Remediación ambiental del depósito de relaves Tablachaca. Fuente, www.activosmineros.com.pe

El peor escenario que se podría tener es el de falla estructural de la presa, ver Figura N° 1.16. Este tipo de fallas ha ocurrido en todo el mundo debido por lo general a eventos sísmicos, altas precipitaciones, malas prácticas constructivas o negligencia operacional. En muchos de estos casos la falla ha sido producida por el fenómeno de licuación en los relaves contenidos en el depósito.

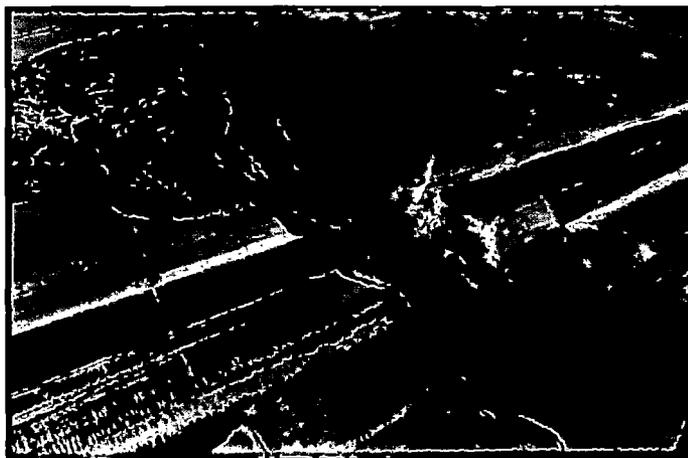


Figura N° 1.16. Rotura de presa Merriespruit Sudáfrica. Fuente, www.tailings.info

La baja permeabilidad que se requiere en el depósito con el fin de reducir el potencial de filtración tiene su contraparte al mantener al relave en una condición que lo hace propenso a licuar ante eventos sísmicos.

1.6 DESCARGA CENTRAL DE RELAVES.

Robinsky en 1975 plantea la alternativa de almacenar relaves en un esquema de descarga central, en el cual los relaves son vertidos desde un punto elevado sobre terreno plano con el fin de generar una estructura de forma cónica. En la superficie del cono el relave es dispuesto en capas, las cuales son expuestas a un proceso de secado con la intención de lograr un contenido de humedad bajo, esto le proporciona al cono la resistencia necesaria para soportar su peso propio y ser estable ante eventos sísmicos.

Si el terreno donde se descargará el relave es lo suficiente grande, la necesidad de presa se reduce fuertemente, sin embargo algún sistema de colección del agua de lluvia es requerido, de esta manera el agua almacenada puede ser reutilizada, ver Figura N° 1.17.

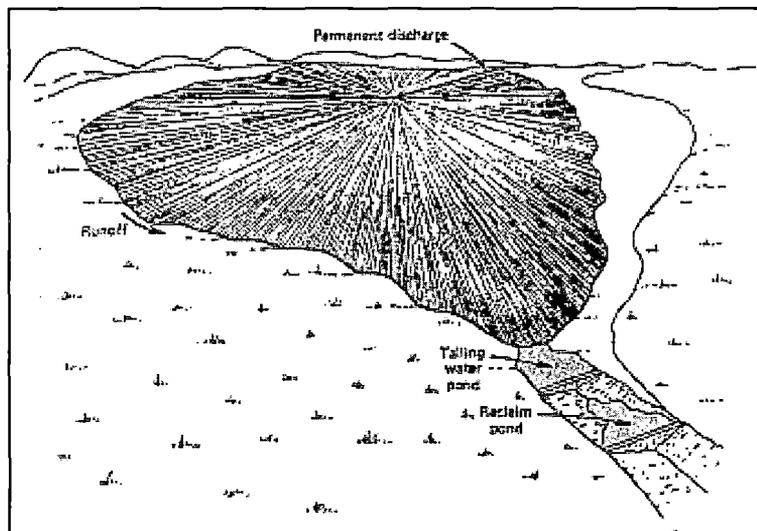


Figura N° 1.17. Esquema conceptual de un depósito de descarga central de relaves. Fuente, E. Robinsky.

1.7 PENDIENTE DE DISPOSICIÓN.

Por convención las pendientes de disposición se expresan en porcentaje, calculado como cien veces la diferencia entre el punto más alto y bajo de la playa de relaves dividido por la longitud horizontal alcanzada por la playa de relaves. Las pendientes de disposición en depósitos de relaves convencionales son por lo general menores de 1% (Morris y Williams, 1999), mientras que para

relaves espesados varía entre 1 y 5% (Williams y Seddon 1999). Ver Figura N° 1.18.

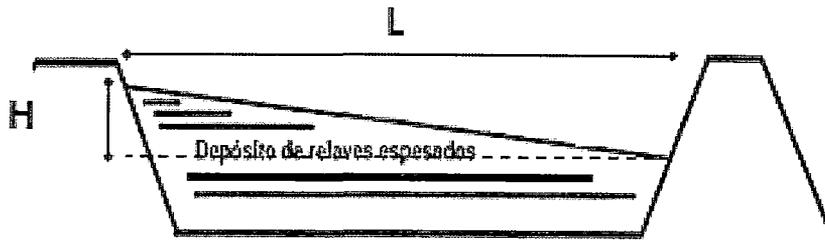


Figura N° 1.18. Esquema de la pendiente de disposición para un depósito de relaves espesados. Fuente, T.G. Fitton.

$$Pendiente = \frac{H}{L} \times 100$$

Para los grandes depósitos de relaves, las playas de relaves presentan cierto grado de concavidad, éste varía dependiendo del material depositado y de la dimensión del depósito, en algunos depósitos la concavidad es tan baja que la playa de relaves se considera prácticamente lineal. Por otro lado se ha observado que las playas de relaves convencionales presentan mayor concavidad que las formadas por relaves espesados (Robinsky 1978, Williams 2001)

Debido a la serie de beneficios económicos y ambientales que resultan de emplear relaves espesados, rápidamente comenzó su aplicación dentro de la industria minera. Con el estudio de los depósitos de relaves espesados se encuentra que la estimación de la pendiente de disposición que este material desarrolla es un parámetro clave para su diseño debido a que gobierna la capacidad de almacenaje, el área de terreno impactado y la estabilidad luego del fenómeno de licuación (Li et al. 2009). En síntesis es crucial poder estimar con cierto grado de certeza la pendiente de disposición ya que un ligero cambio en su valor puede traducirse en graves impactos económicos y/o ambientales.

1.8 FORMACIÓN DE UN DEPÓSITO DE RELAVES ESPESADOS

Observaciones realizadas por Crowder 2004, Pirouz et. al. 2005 y Fitton 2007 en campo indican que la formación de los depósitos de relaves espesados es de forma gradual en un proceso capa por capa, ver Figura N° 1.19.

Los relaves descargados inicialmente forman canales cerca del punto de descarga, luego estos se propagan subdividiéndose en flujos laminares que discurren hasta que se detienen a lo largo de la playa de relaves.

El proceso de formación de un depósito de relaves espesados es complejo debido a los constantes cambios en las condiciones a las que está sometido el relave. Con el fin de modelar matemáticamente el proceso de disposición de relaves espesados es necesario realizar algunas asunciones prácticas que aún permitan capturar el proceso de disposición de relaves espesados (Li 2011).

Las siguientes asunciones son planteadas por Allen Li en 2011 para el proceso de disposición de relaves espesados:

- ✓ Los relaves son descargados desde una tubería (Spigot) a una tasa de descarga dada.
- ✓ Los relaves descargados tienden a propagarse formando como consecuencia flujos con forma de capas delgadas.
- ✓ El flujo se detiene cuando los esfuerzos debidos a la gravedad son equilibrados con el esfuerzo de fluencia del material (condición de equilibrio).
- ✓ Las continuas descargas forman nuevas capas las cuales fluyen por encima de las capas previamente depositadas, después de una semana por lo general; este tiempo depende del plan de descarga y el tamaño del depósito.
- ✓ El esquema de disposición continúa hasta que un canal se desarrolla por erosión de un flujo de relaves.

En este proceso los relaves descargados discurren desde zonas topográficamente elevadas hasta zonas de menor cota. Una vez que la erosión toma lugar el proceso de disposición toma una secuencia reversa según:

- ✓ El flujo se dispersa desde el final del canal en forma de flujos laminares hasta que se detienen naturalmente o son detenidos por una estructura de contención.
- ✓ Con el incremento del espesor del relave al final del canal, comienza a depositarse relave en el fondo del canal hasta que el flujo de relaves encuentre otra ruta.

El flujo de relaves se detiene cuando la pérdida de energía entre el flujo y sus fronteras sumado a la resistencia por la cohesión interna del relave reducen la velocidad del flujo a cero. La fuerza cortante producida por la gravedad y las fuerzas resistentes, representadas por el esfuerzo de fluencia, debidas del material alcanzan una condición de equilibrio.

Finalmente el proceso de consolidación por peso propio comienza y la ganancia de resistencia toma lugar, en este estado cuando la siguiente capa se deposita encima de la primera.

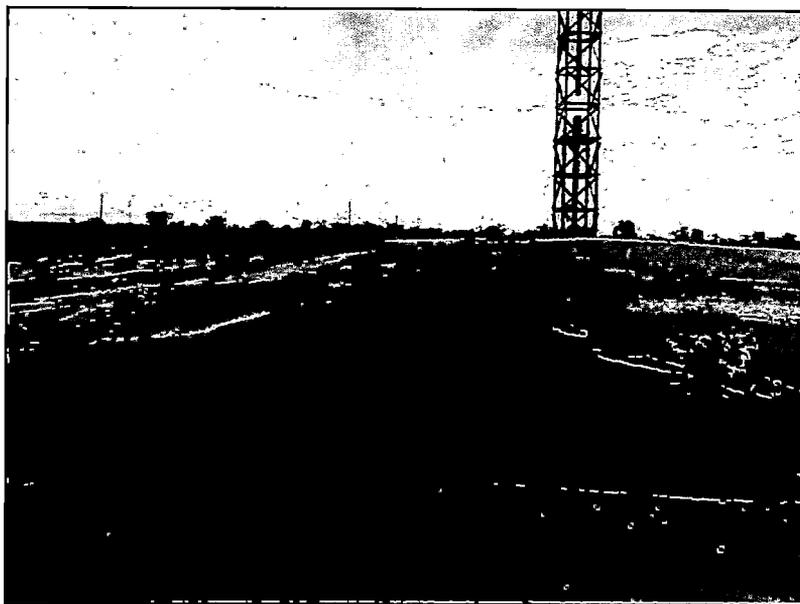


Figura N° 1.19. Proceso de disposición de relaves espesados en Bulyanhulu Tanzania. Fuente, Golder Associates.

1.9 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

La presente tesis se orienta a aportar al entendimiento de la disposición de relaves dentro de la ingeniería civil y la importancia que su estudio tiene dentro de la ingeniería geotécnica. Los objetivos de esta tesis se enuncian a continuación:

Objetivo principal:

Presentar una alternativa para la corrección del esfuerzo de fluencia de relaves espesados en la estimación de la pendiente de disposición, empleando un enfoque de equilibrio límite.

Objetivos específicos:

1. Implementación del equipo para la realización del ensayo de canaleta.
2. Realización de los ensayos de canaleta considerando un proceso de formación capa por capa.
3. Desarrollo de un modelo numérico, basado en un enfoque de equilibrio límite para simular los perfiles depositados durante el ensayo y mediante este proceso realizar la corrección del esfuerzo de fluencia.
4. Validación de la aplicación de la metodología presentada para su aplicación en campo.

1.10 ALCANCE DEL ESTUDIO

Actualmente la actividad minera significa un gran motor para la economía del país. Los residuos que esta actividad genera necesitan ser almacenados de forma segura, física y ambientalmente, por tanto han surgido tecnologías para su tratamiento; una de ellas es la llamada tecnología de relaves espesados.

La presente tesis se enmarca dentro del campo de aplicación de la ingeniería civil, específicamente en el área investigación de la especialidad de geotecnia con el estudio del comportamiento de los relaves espesados durante su proceso de disposición superficial en los depósitos de relaves.

Las otras tecnologías en el tratamiento de relaves y las demás formas de almacenamiento no son estudiadas en esta tesis y por tanto los resultados de esta tesis no deberían ser extrapolados.

CAPÍTULO II. ESTUDIO DE LA PENDIENTE DE DISPOSICIÓN

Para el diseño de depósitos de relaves espesados, estimar la pendiente de disposición es un parámetro clave para el cálculo de la capacidad de almacenaje del depósito y del área de terreno impactado, por otro lado la pendiente de disposición define también el grado de estabilidad post-licuación del relave depositado (Li et al. 2009; Li, 2011).

Para comprender las tendencias y metodologías actualmente utilizadas para la estimación y estudio de la pendiente de disposición es necesario revisar los enfoques y trabajos previamente realizados en este campo.

2.1 ESTADO DEL ARTE

Robinsky en 1975 presenta un artículo de referencia para la comunidad técnica donde introduce la idea de descarga central de relaves, en este artículo muestra la experiencia ganada en la mina Kidd Creek en Canadá, primer proyecto a nivel mundial en emplear relaves espesados. En este artículo a pesar de no presentar ninguna metodología de estimación para la pendiente de disposición plantea importantes ideas acerca del comportamiento de los relaves durante su disposición, las cuales a continuación se enuncian:

- ✓ La concentración de sólidos es un factor importante en la predicción de la pendiente de disposición.
- ✓ La gradación de las partículas sólidas es un parámetro importante.
- ✓ La tasa de descarga tiene efecto sobre la pendiente de disposición, con tasas de descarga bajas se pueden lograr pendientes de disposición más pronunciadas.

Finalmente Robinsky concluye su artículo recomendando el uso de ensayos de laboratorio en conjunto a ensayos en Campo para la estimación de la pendiente de disposición.

Robinsky (1978) publica información que reforzaba lo publicado en 1975, siendo relevante un gráfico que muestra el cambio de la pendiente de disposición con el incremento del contenido de sólidos, ver Figura N° 2.1.

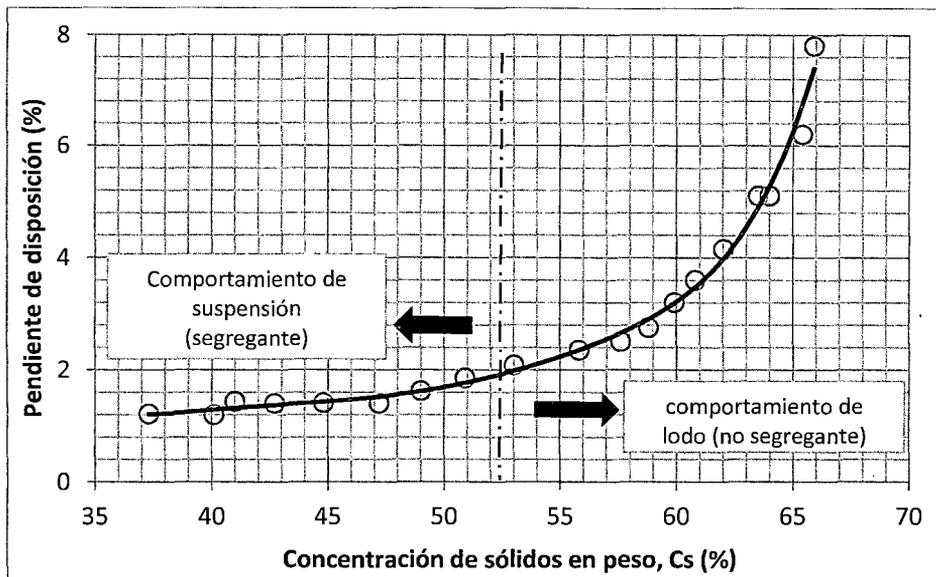


Figura N° 2.1. Abaco pendiente de disposición vs Concentración en peso. Fuente E. Robinsky

Blight y Bentel (1983) investigaron los ángulos de reposo adoptados en la descarga de relaves espesados, aplicando un enfoque geotécnico basado en un análisis de estabilidad para pendientes infinitas, estimando que el ángulo de reposo viene dado por la siguiente ecuación:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\tau_y}{\rho g \delta}\right)$$

Donde τ_y representa al esfuerzo de fluencia del relave, ρ la densidad del relave y δ el espesor de la capa de relave vertido.

Wates et. al. (1987) sostiene que la pendiente de disposición es influenciada por la gravedad específica y no por el tamaño de partícula, adicionalmente presentan un gráfico donde se aprecia el cambio en la pendiente de disposición al variar la gravedad específica, ver Figura N° 2.2.

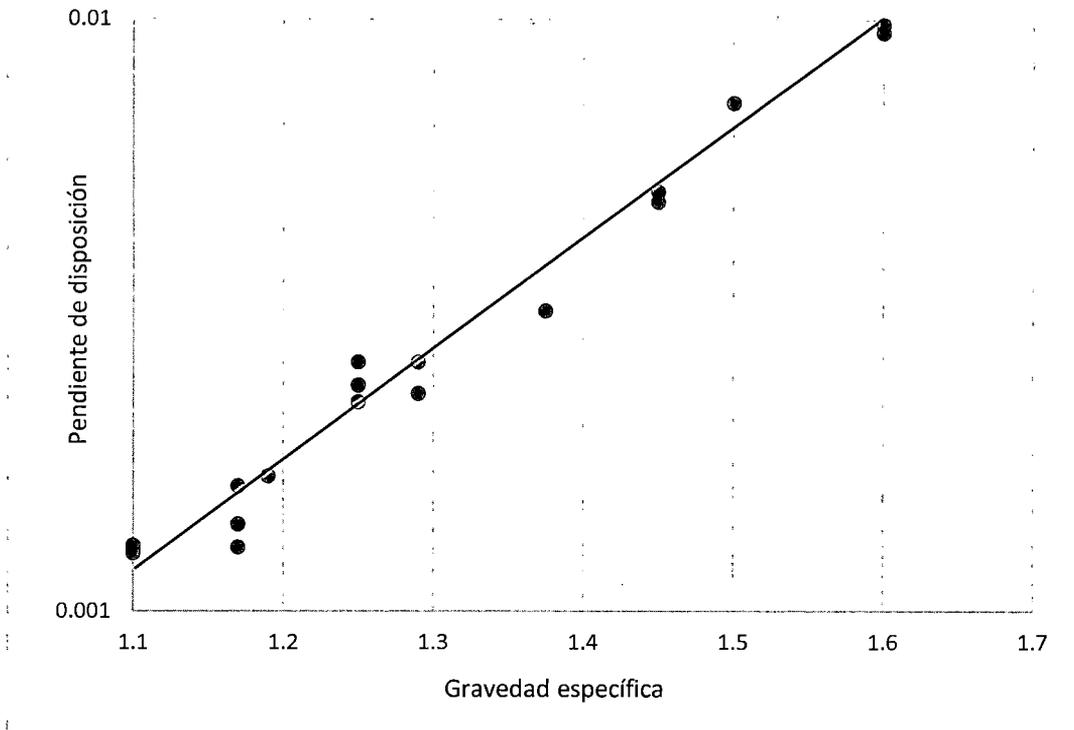


Figura N° 2.2. Pendiente de disposición vs Gravedad específica. Fuente Wates et. al (1987).

Palmer y Krizek(1987) desarrollan un modelo en dos dimensiones basado en un enfoque de equilibrio límite con el fin de describir los perfiles de “barro rojo” (relave de aluminio) depositado mediante ensayos de disposición in-situ, los principales parámetros estudiados en su trabajo son la resistencia del material y las tasas de descarga.

El departamento de minas de Estados Unidos llevó a cabo una investigación para estudiar las características de los relaves depositados, el propósito era mejorar las técnicas de diseño de presas, buscando asegurar su estabilidad. (Boldt, 1988). Esta investigación fue desarrollada en tres partes, la primera comprendió el estudio y monitoreo de 18 minas en Estados Unidos, la segunda en la realización de ensayos de disposición en canaleta y la tercera en ensayos de disposición in-situ a gran escala.

El trabajo presentado por Boldt es básicamente estadístico y entre las muchas correlaciones presentadas una de las más relevantes es la de pendiente de disposición y la tasa de descarga obtenida de los ensayos de disposición in-situ. La ecuación de ajuste es la que se presenta a continuación:

$$i = 1.98 - 0.0043Q$$

Donde i es la pendiente de disposición (%) y Q es la tasa de descarga expresada en galones estadounidenses por minuto.

Pinto & Barrera (2002) presentan una ecuación empírica para la predicción de la pendiente de disposición de relaves convencionales basados en los datos obtenidos de 6 minas de cobre ubicadas en Chile

$$i = 0.009(S - 1)^{15.6} \frac{C_w^{13.8}}{P^{0.86}}$$

Donde i es la pendiente de disposición promedio (%), s es la relación entre la gravedad específica de sólidos y la cantidad de agua en el relave, C_w es la concentración en peso de las partículas sólidas y P es la tasa de producción seca (Kt por día).

Fiton et. al. (2006) desarrollan un modelo semi-empírico basado en conceptos reológicos y ecuaciones de flujos turbulentos en canales, en su trabajo postulan que la pendiente de disposición está gobernada por la pendiente de equilibrio, la cual es una función de propiedades reológicas y los parámetros del flujo no newtoniano en régimen turbulento, finalmente postulan que la pendiente de equilibrio es alcanzada cuando no existe sedimentación ni erosión dentro del flujo.

McPhail (2008) basado en un enfoque energético desarrolla un modelo de predicción de la pendiente de disposición de relaves espesados, el cual logra buenos resultados al contrastarlos con ensayos de laboratorio, y ensayos en campo, sin embargo el método resulta muy complicado de aplicar a escala real debido a que algunos valores iniciales requeridos por el método deben de ser asumidos, incluso se necesita aproximar la pendiente de disposición inicial, lo cual genera un bucle de difícil solución.

Otro grupo de investigaciones referidas a la estimación de pendiente de disposición han sido desarrolladas en base al uso de ensayos de disposición en canaletas de laboratorio, ver Figura N° 2.3. La intención es modelar experimentalmente y extrapolar el comportamiento de los relaves espesados a escala real en los depósitos. En muchos de esos casos las paredes de esta canaleta son transparentes y permiten la observación del ensayo, mientras que el fondo de la canaleta es usualmente plana y horizontal.

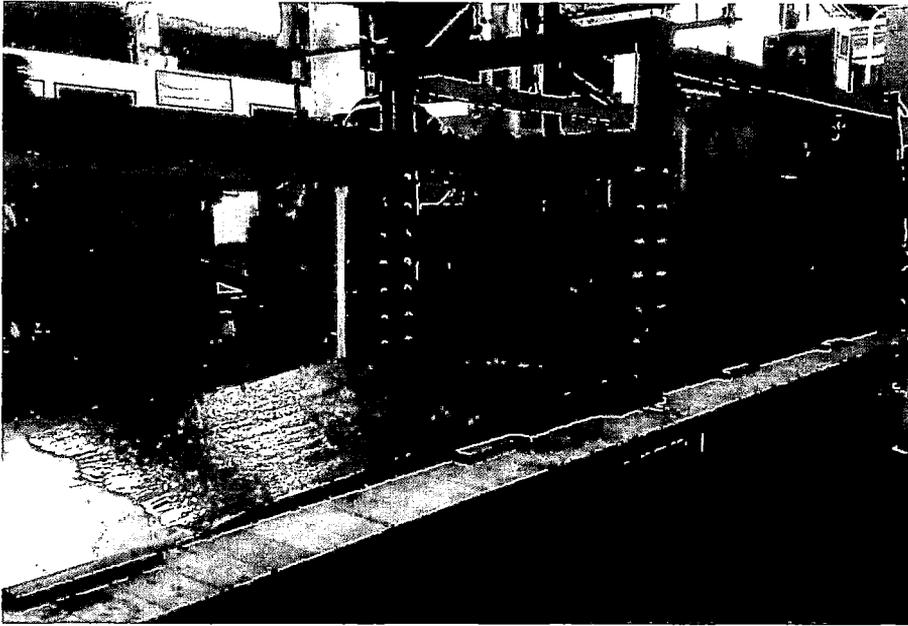


Figura N° 2.3. Ensayo de disposición en Canaleta. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.

Blight et. al. (1985) llevó a cabo ensayos en laboratorio usando para ello una canaleta de 1.82 m de largo, según los autores la pendiente promedio de disposición es afectada por tres factores: la concentración de partículas sólidas (concentraciones altas dan pendientes de disposición pronunciadas), el tamaño de las partículas sólidas (partículas alargadas producen pendientes pronunciadas) y el origen de los relaves (parámetro de difícil medida, ya que depende de la mineralogía, reología, agentes químicos, etc.). En 1987 Blight presenta resultados complementarios a su anterior investigación (1985), por ejemplo muestra que a una concentración de sólidos de 40% se alcanza una pendiente de disposición de hasta 5%.

Kupper (1991) llevó a cabo en una canaleta de 6.1m fabricada en plexiglás ensayos de disposición a tres diferentes arenas con el objetivo de estudiar los efectos de la concentración de partículas sólidas, la tasa de descarga y la distribución del tamaño de partícula sobre la pendiente de disposición. La concentración de sólidos en peso varió desde 1.5 hasta 40.5% y la tasa de descarga varió desde 5 hasta 20 litros por minuto.

Kupper presenta la siguiente fórmula empírica para la predicción de la pendiente de disposición promedio:

$$i_{av} = 5 \sqrt{\frac{A \sqrt{g \left(\frac{\rho_s}{\rho_l} - 1 \right) \sqrt{d_{50} C_w}}}{Q}}$$

Dónde: A es la sección transversal de la tubería de descarga (m²), C_w es la concentración de sólidos en peso (%), d₅₀ es el tamaño medio de partícula (m), g es la aceleración de la gravedad (m/s²), Q es la tasa de descarga en el punto de descarga (m³/s), ρ_s es la densidad de las partículas sólidas (kg/m³), ρ_l es la densidad del fluido (kg/m³).

Fourie (1998) presenta una investigación empleando ensayos de canaleta para estudiar la concavidad en la playa de relaves, para esto empleó tres muestras de relave distintas; bauxita, níquel y carbón. Fouire encontró que la concentración de sólidos afecta la pendiente promedio; sin embargo ninguna relación numérica fue presentada.

El ensayo de disposición ha sido ampliamente usado dando buenos resultados en la estimación de la pendiente de disposición para relaves convencionales, razón por la cual su uso se extendió rápidamente a relaves espesados (Robinsky 1999) Sin embargo como es discutido por Martin et. al. (2002) las pendientes desarrolladas en los depósitos reales son por lo general más planas que las medidas en la canaleta. Esto otorgó limitado valor y usabilidad a los ensayos de disposición dejando de lado la valiosa información que éstos proveen.

En recientes investigaciones orientadas a modelar matemáticamente los procesos de disposición de relaves espesados se ha determinado la gran utilidad que los ensayos de canaleta tienen en el proceso de calibración de tales modelos numéricos. A continuación se presentan los trabajos más relevantes y sus principales aportes en este campo.

Paul Simms (2007) emplea la teoría de lubricación para interpretar el comportamiento de muestras de relave durante ensayos de canaleta; Simms encuentra que la pendiente de disposición se encuentra afectada por la relación de escala entre la cantidad de material empleado en el ensayo y el depositado en la realidad, también encuentra que existe influencia de la topografía de las capas o base subyacente sobre la pendiente. Mediante el modelado numérico se encuentra que los altos valores de pendientes son

debidos a la cantidad de material depositado, sin embargo el ensayo de disposición puede ser usado para corroborar la validez del modelo numérico y también para calibrar sus parámetros de entrada.

$$h^2 - h_0^2 = \frac{2t_y}{\rho g} (x - x_0)$$

Dónde: h_0 es la altura a la distancia x_0

Henriquez et. al. (2009) emplean también la teoría de lubricación para estudiar el comportamiento de muestras de relave en ensayos de canaleta, su trabajo menciona al esfuerzo de fluencia del relave como un factor importante para explicar el comportamiento del relave durante el ensayo. En su estudio también encuentran que los valores reales de esfuerzo de fluencia no representan adecuadamente los perfiles y pendientes de disposición, necesitándose de una corrección para este valor. Finalmente sugieren la utilización del ensayo de disposición para la obtención del esfuerzo de fluencia a ser empleado en trabajos de modelamiento.

Fourie y Gawu (2010) realizan ensayos de canaleta considerando diferentes volúmenes de relave y secciones de canaleta, posteriormente estos resultados son modelados bajo un enfoque de equilibrio límite entre fuerzas movilizadoras y resistentes. Los resultados muestran la influencia de la geometría de la canaleta (paredes y fondo) y del esfuerzo de fluencia sobre los perfiles y pendientes desarrollados durante el ensayo. Fourie y Gawu proponen la evaluación, mediante el ensayo de canaleta, del correcto valor de esfuerzo de fluencia a ser utilizado (calibración – corrección) en el análisis para simular correctamente los perfiles de disposición.

2.2 ENFOQUE DE EQUILIBRIO LÍMITE.

Las metodologías de estimación basadas únicamente en modelos energéticos o en la mecánica de fluidos no pueden capturar la influencia de la topografía de las capas subyacentes sobre las nuevas capas de relave vertido y por ende sobre la pendiente de disposición, por otro lado estas metodologías no contemplan el proceso gradual de crecimiento capa por capa del depósito de relaves, tal y como se observa en Campo. (Allen Li, 2011)

Palmer y Krizek (1987) y Fourie y Gawu (2010) emplearon el enfoque de equilibrio límite con el fin de modelar ensayos de disposición in-situ y en

laboratorio respectivamente obteniendo resultados bastante razonables y a pesar de que solo se pudo modelar ensayos donde se depositó una sola capa de material, las asunciones teóricas tienen la capacidad de modelar también un escenario con disposición multicapa.

Con el objetivo implementar una herramienta para estimar la pendiente de disposición de relaves espesados, Allen Li en 2011 presentó un modelo numérico capaz de simular el proceso de disposición de relaves espesados considerando las propiedades físicas de estos materiales y las condiciones operativas en la descarga. Allen Li demuestra la validez de su modelo numérico en los depósitos de relaves Cerro de Maimón y Sunrise Dam, Li realiza la comparación de los perfiles reales de los depósitos y los perfiles simulados en su modelo numérico mostrando un alto grado de concordancia entre ambos.

Cabe resaltar que el modelo planteado por Allen Li está orientado a modelar la disposición de los relaves bajo condiciones topográficas y escala de Campo, por lo cual utilizar directamente este modelo a situaciones de laboratorio podría incurrir en errores.

2.3 ENSAYO DE DISPOSICIÓN EN CANALETA

Diferentes investigadores han estudiado mediante ensayos de disposición en canaleta el comportamiento de muestras de relave al ser depositadas. Los primeros trabajos como los de Blight (1985, 1987). Kupper (1991) y Fourie (1998) analizan cualitativamente los factores que afectan el valor de la pendiente de disposición, otorgando las primeras pautas que ayudaron a enfocar el estudio de la disposición de relaves espesados.

No es hasta el desarrollo de modelos numéricos como los de Paul Simms, Henriquez et. al. y Fourie y Gawu que el ensayo de canaleta cobra relevancia principalmente por su utilidad para validar modelos numéricos y calibrar los parámetros de entrada que estos necesitan.

A pesar de que el enfoque de equilibrio límite planteado y aplicado por Allen Li presenta resultados razonables al ser contrastado con la realidad, algo muy comentado por investigadores anteriores y no realizado por Allen Li es la utilización del ensayo de canaleta para corregir y definir el esfuerzo de fluencia

del relave espesado que debe ser usado en el trabajo de estimación de la pendiente de disposición.

Esta tesis plantea el uso del enfoque de equilibrio límite y del ensayo de disposición para realizar la corrección del esfuerzo de fluencia que debería ser empleado en el trabajo de modelado del proceso de disposición.

2.4 INTERPRETACIÓN DEL ESFUERZO DE FLUENCIA EN EL PROCESO DE DISPOSICIÓN.

La medición del esfuerzo de fluencia se puede realizar por medio de la prueba de veleta, por medio del ensayo de Slump u obtenerlo por extrapolación (Bingham). Sin embargo para este estudio se evaluará los resultados obtenidos de las pruebas Vane, por ser la prueba que da el valor más confiable del esfuerzo de fluencia real (Sofrà y Boger 2011).

Otro punto de discusión en la interpretación del esfuerzo de fluencia que se desarrolla durante el proceso de disposición es el de su obtención mediante el modelado numérico de ensayos de canaleta (Henriquez et. al). La idea es utilizar el esfuerzo de fluencia que represente correctamente lo sucedido en los ensayos para simulaciones de depósitos a escala real.

Siguiendo esa lógica, investigadores como Henriquez, Fourie y Gawu y Simms encontraron que el esfuerzo de fluencia medido a través de ensayo (Vane) es por lo general mayor al obtenido mediante la calibración en los modelos numéricos, sin embargo la recomendación lógica es priorizar estos esfuerzos calculados por modelamiento para simulaciones reales.

2.5 ESTABILIDAD POST-LICUACIÓN DE LA PENDIENTE DE DISPOSICIÓN.

El análisis de estabilidad de la masa de los relaves espesados ya depositados es un problema complejo debido a que las propiedades de los relaves depositados son en su mayoría estimadas y deben ser corroboradas durante la operación. El problema de estabilidad de los taludes de relaves ha sido estudiada previamente (Poulous et. al. 1985, McMahon et. al. 1996, Seddon et. al. 1999, Fouire 2006, Barrera y Riveros 2006, etc.) y de estos estudios se sabe que la estabilidad es más crítica cuando los relaves licúan bajo eventos sísmicos.

Sin embargo tanto las cargas estáticas como las dinámicas pueden causar aumento en la presión de poros y por tanto reducir el esfuerzo efectivo propiciando el fenómeno de licuación. En este caso la resistencia de los relaves se reduce desde su valor pico a su valor residual luego de ocurrida la licuación (Seed 1987).

Las pendientes de relaves espesados son estables bajo condiciones estáticas a largo plazo (condiciones drenadas) debido a que son menores que el ángulo de fricción interna de los propios relaves. Las pendientes de relaves espesados solo presentan riesgo de falla si es que este material licua generando un flujo deslizante, como anteriormente se mencionó la licuación puede ser causada por eventos sísmicos o por cargas estáticas producidas por descarga continua de más relaves. Se debe resaltar que un flujo post-licuación solo ocurrirá si la resistencia residual de los relaves licuados es menor que el esfuerzo de corte impuesto por la masa de relave considerada en el análisis.

El comportamiento de los relaves espesados puede describirse bajo el enfoque de estado crítico mediante el parámetro de estado, ψ , (Been & Jefferies, 1985) y la resistencia residual de los relaves licuados (S_r). Ésta última se puede estimar usando una correlación entre el parámetro de estado y el valor de resistencia (Jefferies & Been, 2006).

La resistencia residual (S_r) puede expresarse en función de la relación de vacíos, y para el caso particular de relaves donde la relación de vacíos no es un valor singular (debido al proceso de consolidación) Es necesario considerar dentro del análisis este comportamiento variable.

2.5.1 Relación de vacíos inicial

La suposición crítica en el análisis de consolidación es la relación de vacíos inicial (e_0) de los relaves antes de ser cubiertos por descargas posteriores de relave. Los ciclos de descarga y la disposición en capas delgadas deberá ser optimizadas a fin de obtener un valor lo suficientemente bajo de e_0 que asegure la estabilidad.

Para el análisis de consolidación se considera también que los relaves presentan una condición de resistencia residual (post-licuación) para toda la profundidad del depósito debido a un sismo o un carguío rápido durante la disposición. El nivel piezométrico debería asumirse conservadoramente en la

superficie del depósito considerando que los relaves presentan baja permeabilidad y dependiendo del uso de geosintéticos el fondo del depósito puede considerarse impermeable.

2.5.2 Comportamiento de los relaves y resistencia residual

El comportamiento de materiales arenosos bajo condiciones no drenadas puede ser descrito con la teoría de estado crítico (Casagrande 1975, Castro y Poulos 1977, Been et. al. 1991, Jefferies y Been 2006). El estado crítico es un estado último que el suelo alcanza si es sometido a corte y es representado usando la línea de estado crítico (CSL, por sus siglas en inglés) en un gráfico semi-logarítmico de relación de vacíos – esfuerzo efectivo medio ($e - \ln(p'_m)$).

$$e_c = \Gamma - \lambda \ln(p'_m)$$

Donde e_c es la relación de vacíos en el estado crítico, Γ es la relación de vacíos de referencia en la CSL a un esfuerzo efectivo de 1 kPa; λ es la pendiente de la línea de estado crítico y p'_m es el esfuerzo efectivo medio $(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3})$.

El parámetro de estado, ψ , es definido como la diferencia entre la relación de vacíos e y la relación de vacíos crítica e_c para el mismo esfuerzo efectivo.

$$\psi = e - e_c$$

La relación de resistencia residual de los relaves licuados puede ser estimada mediante la siguiente ecuación (Jefferies y Been, 2006).

$$\frac{S_r}{\sigma_{v'}} = \left(\frac{1 + 2K_o}{3} \right) \frac{M}{2} e^{-\frac{\psi}{\lambda}}$$

2.5.3 Análisis de estabilidad

Considerando las largas playas de relaves que se desarrollan en el depósito de relaves espesados, puede asumirse un mecanismo de falla de talud infinito, en donde existe una simple relación entre el esfuerzo cortante y la pendiente del talud.

$$\frac{\tau_s}{\sigma_{v'}} = \frac{\gamma_t}{\gamma'} \sin \theta \cos \theta \quad (2.1)$$

Donde τ_s representa el esfuerzo cortante, σ_v representa el esfuerzo efectivo inicial; γ_t el peso específico total; γ' peso específico sumergido y θ pendiente del talud en grados.

La resistencia residual de los relaves espesados es una función de la profundidad, por lo cual, el factor de seguridad ante la falla de la superficie de deslizamiento también dependerá de la profundidad (Li et. al., 2009)

Los mismos autores presentan la siguiente ecuación (derivada de la ecuación 2.1) para definir un factor de seguridad ante la falla a diferentes profundidades.

$$FOS = \frac{S_r}{h \cdot \gamma \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta} \quad (2.2)$$

Donde h es la profundidad de la superficie de deslizamiento; γ es el peso unitario de los relaves depositados y θ la pendiente de disposición.

Con la ecuación (2.2) es posible definir un factor de seguridad para la masa de relave depositado a un determinado valor de pendiente, considerando la pérdida de resistencia debida a la licuación.

CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO.

Simms (2007), Henriquez et. al. (2009) y Fourie y Gawu (2010), emplean el modelamiento de los ensayos de canaleta para la obtención del esfuerzo de fluencia que debe ser empleado en los procesos de modelamiento de la disposición de relaves espesados.

De los enfoques teóricos disponibles para estudiar el proceso de disposición, es el de equilibrio límite el que mejores resultados ha mostrado para modelar depósitos de relaves reales siendo capaz de capturar el proceso de formación capa por capa del depósito.

La metodología basada en un enfoque de equilibrio límite ha mostrado grandes avances desde la propuesta de Palmer y Krizek (1987), siendo el análisis del estado de equilibrio planteado por Allen Li (2011) el más razonable y completo a la fecha. Lamentablemente al estar el trabajo desarrollado por Li orientado a condiciones de Campo, es necesario generar un nuevo modelo numérico que esté basado en las mismas asunciones teóricas y que sea aplicable al entorno del ensayo de canaleta.

Este nuevo modelo numérico es el que será usado en la presente investigación para el estudio y corrección del esfuerzo de fluencia bajo el enfoque de equilibrio límite.

3.1 CONSIDERACIONES PARA EL MODELAMIENTO

Antes que el flujo de relaves se detenga en el depósito éste se comporta bajo un régimen laminar y es gobernado por los principios de conservación de energía, luego que el flujo se detiene los relaves están en un estado cuasi-sólido donde el perfil final será gobernado por un estado de equilibrio límite y redistribución de esfuerzos.

Es posible analizar las fuerzas actuando sobre un elemento infinitesimal de relave que está siendo depositado sobre un plano inclinado de ángulo θ , ver Figura N° 3.1, Al no existir velocidad en la dirección perpendicular al flujo entonces se puede asumir una distribución hidrostática de presiones, por otro lado se asume también que en la dirección perpendicular al plano del elemento no existen fuerzas.

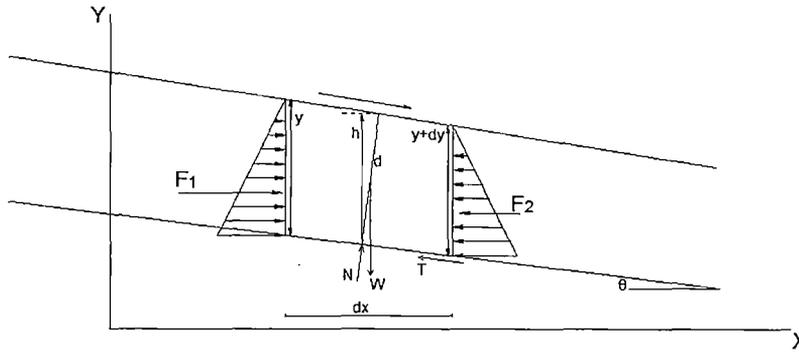


Figura N° 3.1. Elemento diferencial de relave sobre un plano inclinado en estado de equilibrio.

Fuente, Elaboración propia.

Las asunciones anteriores permiten establecer sobre el elemento infinitesimal definido un estado de equilibrio que involucra el desarrollo del perfil de disposición para ese elemento. Entonces si una capa depositada se discretiza y se soluciona cada uno de los elementos generados se podría obtener de forma matemática el perfil final de disposición para la capa vertida.

3.2 ENTORNO DEL ENSAYO

En el ensayo de disposición en canaleta el flujo de relaves se encuentra confinado principalmente por las paredes del canal, este hecho impone un estado de fuerzas distinto del que se desarrolla en campo, donde la única superficie de contacto es el suelo o capa subyacente.

Debido a que la realización del ensayo se da en un entorno controlado, la tasa de descarga es por lo general baja, esto implica considerar el flujo del material en un estado laminar antes de que se detenga.

El objetivo del modelo numérico planteado es simular los perfiles de disposición que son desarrollados en los ensayos de canaleta, considerado tanto esquemas multicapa como unicapa.

Existirán dos condiciones de frontera para el modelo, la primera será la altura inicial de los relaves depositados y la segunda será la longitud recorrida por cada capa de relave.

3.3 ESTADO DE EQUILIBRIO

El relave descargado fluye uniformemente hasta que un estado de equilibrio de fuerzas se desarrolla. Las fuerzas de corte debidas al rozamiento entre las

paredes y el fondo resisten el flujo originado por las fuerzas gravitatorias llegando a detenerse cuando el esfuerzo cortante máximo desarrollado entre el relave y la canaleta sea menor al esfuerzo de fluencia (esfuerzo de corte mínimo necesario para iniciar el flujo)

Bajo las asunciones anteriores podemos plantear el siguiente diagrama de cuerpo libre, ver Figura N° 3.2 y Figura N° 3.3:

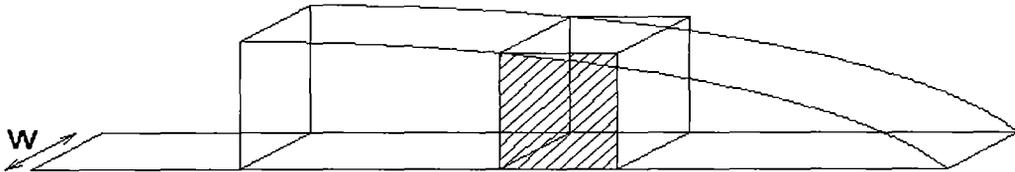


Figura N° 3.2. Elemento de control dentro de la masa de relave. Fuente, Fourie y Gawu (2010).

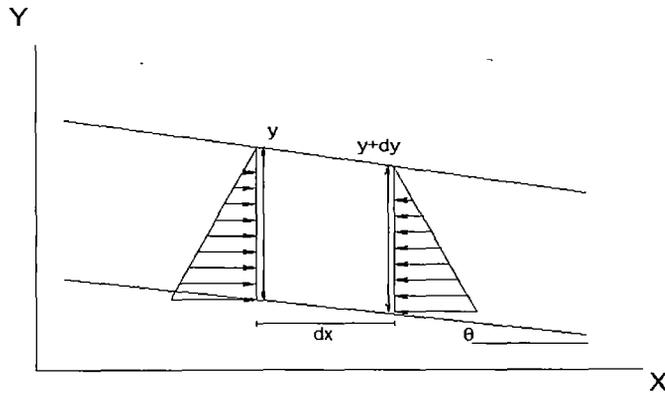


Figura N° 3.3. Estado de equilibrio para el elemento de control asumido. Fuente, Fourie y Gawu (2010).

En base a los diagramas anteriores podemos plantear:

Fuerzas originadas por la presión hidrostática:

$$F = P_h \cdot A$$

P_h : Presión hidrostática.

A: Área de la sección.

$$P_h = \frac{1}{2} \gamma \cdot y^2 \cdot \cos^2 \theta$$

$$P_h = \frac{1}{2} \gamma \cdot y \cdot \cos^2 \theta$$

$$A = y \cdot \omega$$

Entonces:

$$F_1 = \frac{1}{2} \gamma \cdot \omega \cdot y^2 \cdot \cos^2 \theta$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \gamma \cdot \omega \cdot (y + dy)^2 \cdot \cos^2 \theta$$

La fuerza hidrostática resultante será:

$$F_{Hz} = \frac{1}{2} \gamma \cdot \omega \cdot \cos^2 \theta \cdot [-(y + dy)^2 + y^2]$$

Fuerzas cortantes resistencias debidas al esfuerzo de fluencia:

$$T = A_{corte} \cdot \tau_y$$

$$A_{corte} = \left[\left(\frac{2y + dy}{2} \right) \cdot 2 + \omega \right] \cdot \frac{dx}{\cos \theta}$$

$$A_{corte} = [2y + dy + \omega] \cdot \frac{dx}{\cos \theta}$$

$$T = [2y + dy + \omega] \cdot \frac{dx}{\cos \theta} \cdot \tau_y$$

Componentes vertical y horizontal:

$$T_x = [2y + dy + \omega] \cdot dx \cdot \tau_y$$

$$T_y = [2y + dy + \omega] \cdot \tan \theta \cdot \tau_y \cdot dx$$

Fuerza debido al peso del relave:

$$W = \text{Volumen} \cdot \gamma$$

$$W = \frac{2y + dy}{2} \cdot dx \cdot \omega \cdot \gamma$$

Reacción de la capa subyacente:

$$N_x = N \cdot \sin \theta$$

$$N_y = N \cdot \cos \theta$$

Si despreciamos los elementos diferenciales de orden superior:

$$N_y = dx \cdot dy = d_y^2 = 0$$

Las ecuaciones anteriormente desarrolladas podrían escribirse de la siguiente manera:

$$F_{Hz} = \gamma \cdot \omega \cdot \text{Cos}^2\theta \cdot y \cdot dy$$

$$T_x = [2y + \omega] \cdot dx \cdot \tau_y$$

$$T_y = [2y + \omega] \cdot \text{tan}\theta \cdot dx \cdot \tau_y$$

$$W = \omega \cdot \gamma \cdot y \cdot dx$$

Equilibrio de fuerzas en la dirección horizontal:

$$\gamma \cdot \omega \cdot \text{Cos}^2\theta \cdot y \cdot dy + (2y + \omega) \cdot \tau_y \cdot dx = N \cdot \text{sen}\theta \dots (1)$$

Equilibrio de fuerzas en la dirección vertical:

$$\omega \cdot \gamma \cdot y \cdot dx = N \cdot \text{cos}\theta + (2y + \omega) \cdot \text{tan}\theta \cdot \tau_y \cdot dx$$

$$\frac{\omega \cdot \gamma \cdot y - (2y + \omega) \cdot \text{tan}\theta \cdot \tau_y}{\text{cos}\theta} \cdot dx = N \dots (2)$$

Reemplazando la ecuación (2) en (1)

$$\gamma \cdot \omega \cdot \text{Cos}^2\theta \cdot y \cdot dy + (2y + \omega) \cdot \tau_y \cdot dx = (\omega \cdot \gamma \cdot y \cdot \text{tan}\theta - (2y + \omega) \cdot \text{tan}^2\theta \cdot \tau_y) \cdot dx$$

$$\gamma \cdot \omega \cdot \text{Cos}^2\theta \cdot y \cdot dy = [\omega \cdot \gamma \cdot y \cdot \text{tan}\theta - (1 + \text{tan}^2\theta) \cdot \tau_y \cdot (2y + \omega)] \cdot dx$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\omega \cdot \gamma \cdot y \cdot \text{tan}\theta - (1 + \text{tan}^2\theta) \cdot \tau_y \cdot (2y + \omega)}{y \cdot \gamma \cdot \omega \cdot \text{Cos}^2\theta} \quad (3.1)$$

La ecuación diferencial (3.1) plantea el estado de equilibrio para el elemento diferencial mostrado en la Figura N° 3.2. En el primer término se relaciona el cambio del tirante a medida que el flujo avanza, por lo tanto la solución de esta ecuación a partir de un tirante de partida conocido resultaría en el perfil asumido por el relave cuando es depositado.

3.4 SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN GOBERNANTE

Agrupación de términos:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\omega \cdot \gamma \cdot y \cdot \text{tan}\theta - (1 + \text{tan}^2\theta) \cdot \tau_y \cdot (2y + \omega)}{y \cdot \gamma \cdot \omega \cdot \text{Cos}^2\theta}$$

$$\frac{dx}{\gamma \cdot \omega \cdot \text{Cos}^2\theta} = \frac{y \cdot dy}{\omega \cdot \gamma \cdot y \cdot \tan\theta - (1 + \tan^2\theta) \cdot \tau_y \cdot (2y + \omega)}$$

$$\frac{dx}{\gamma \cdot \omega \cdot \text{Cos}^2\theta} = \frac{y \cdot dy}{\omega \cdot \gamma \cdot y \cdot \tan\theta - 2(1 + \tan^2\theta) \cdot \tau_y \cdot y - (1 + \tan^2\theta) \cdot \tau_y \cdot \omega}$$

$$\frac{dx}{\gamma \cdot \omega \cdot \text{Cos}^2\theta} = \frac{y \cdot dy}{(\omega \cdot \gamma \cdot \tan\theta - 2(1 + \tan^2\theta) \cdot \tau_y) \cdot y - (1 + \tan^2\theta) \cdot \tau_y \cdot \omega}$$

Ahora el primer miembro está en función solo de "x" y el segundo solo en función de "y". Entonces podemos integrar:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\gamma \cdot \omega \cdot \text{Cos}^2\theta} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{y \cdot dy}{(\omega \cdot \gamma \cdot \tan\theta - 2(1 + \tan^2\theta) \cdot \tau_y) \cdot y - (1 + \tan^2\theta) \cdot \tau_y \cdot \omega}$$

Con el fin de reducir las expresiones en la resolución de la integral podemos hacer lo siguiente:

$$a = \omega \cdot \gamma \cdot \tan\theta - 2(1 + \tan^2\theta) \cdot \tau_y$$

$$b = -(1 + \tan^2\theta) \cdot \tau_y \cdot \omega$$

$$c = \gamma \cdot \omega \cdot \text{Cos}^2\theta$$

Donde los parámetros ω , γ , θ y τ_y tienen valores constantes.

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{c} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{y \cdot dy}{a \cdot y + b}$$

$$\frac{x_2 - x_1}{c} = \frac{y}{a} - \frac{b}{a^2} \ln|a \cdot y + b|_{y_1}^{y_2} + C$$

Entonces:

$$\frac{x_2 - x_1}{c} = \left[\frac{y_2}{a} - \frac{b}{a^2} \ln|a \cdot y_2 + b| \right] - \left[\frac{y_1}{a} - \frac{b}{a^2} \ln|a \cdot y_1 + b| \right]$$

$$\frac{x_2 - x_1}{c} = \frac{y_2 - y_1}{a} + \frac{b}{a^2} [\ln|a \cdot y_1 + b| - \ln|a \cdot y_2 + b|]$$

Finalmente:

$$\frac{x_2 - x_1}{c} = \frac{y_2 - y_1}{a} + \frac{b}{a^2} \left[\ln \frac{a \cdot y_1 + b}{a \cdot y_2 + b} \right] \quad (3.2)$$

La ecuación (3.2) es la ecuación solución de la ecuación diferencial (3), y representa el modelo numérico propuesto definido en el espacio $x = \{x_1; x_2\}$ e $y = \{y_1; y_2\}$.

Según lo observado en los ensayos realizados y los trabajos de modelamiento en la literatura, el valor de $x_2 - x_1$ podría estar en el orden de los 5 - 20 cm dependiendo de la longitud máxima recorrida por los relaves.

CAPÍTULO IV. TRABAJO EXPERIMENTAL.

4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

El objetivo principal de la etapa experimental es realizar una serie de ensayos de disposición en canaleta a condiciones controladas sobre muestras de relaves previamente caracterizadas físicamente. Por tanto en el presente capítulo se describe el desarrollo de las actividades realizadas a nivel de laboratorio partiendo desde la descripción del equipo utilizado, etapa de caracterización, realización del ensayo de disposición y por último la recolección de datos de las pruebas de canaleta.

Todos los ensayos sin excepción han sido realizados en el Laboratorio de Golder Associates Perú S.A. dentro del marco del convenio IIFIC – Golder. Los procedimientos de ensayos de caracterización índice están basados en la normativa ASTM y el ensayo de disposición de canaleta basado en los procedimientos descritos en los artículos técnicos y tesis disponibles en la literatura.

A continuación se presentan las actividades previstas en el trabajo experimental.

- i. Identificación de muestras.
- ii. Caracterización geotécnica.
- iii. Medición del esfuerzo de fluencia.
- iv. Ensayos de disposición.

Las etapas anteriores mencionadas serán descritas dentro del desarrollo de este capítulo.

4.2 SISTEMA DE DISPOSICIÓN

4.2.1 Canaleta

El diseño de la canaleta, ver Figura N° 4.1, donde se depositan los relaves espesados está basado en los hallazgos y resultados presentados por Fourie y Gawu en 2010. A continuación se presentan sus características:

- ✓ Paredes y base construidos en plexiglás, madera para las vigas y la base.

- ✓ Sellos de silicona adhesiva para todas las juntas
- ✓ Dimensiones de la canaleta: Altura máxima de 1 m, intermedia de 0.7 m y mínima de 0.5 m. Ancho constante 0.8 m y longitud total de 6 m.



Figura N° 4.1. Canaleta empleada para los ensayos de disposición. Fuente Laboratorio Golder Associates Perú.

4.2.2 Sistema de bombeo

Los relaves previstos para el ensayo son almacenados en un tanque construido en acero inoxidable de 60 litros de capacidad, este tanque presenta una salida en la parte inferior de 2" que se conectará a una bomba peristáltica que impulsará los relaves hacia la canaleta a una tasa de descarga definida, para esto se empleará una manguera flexible de PVC de 6 m de longitud y diámetro de 2". El sistema se describe en las siguientes figuras: Figura N° 4.2, Figura N° 4.3, Figura N° 4.4 y Figura N° 4.5.

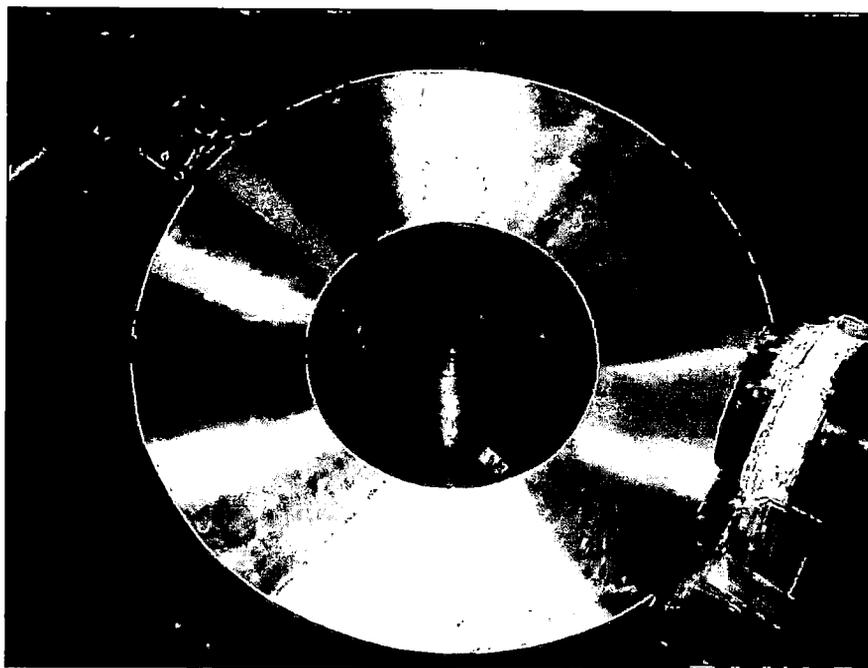


Figura N° 4.2. Tanque de Almacenamiento de relaves. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.

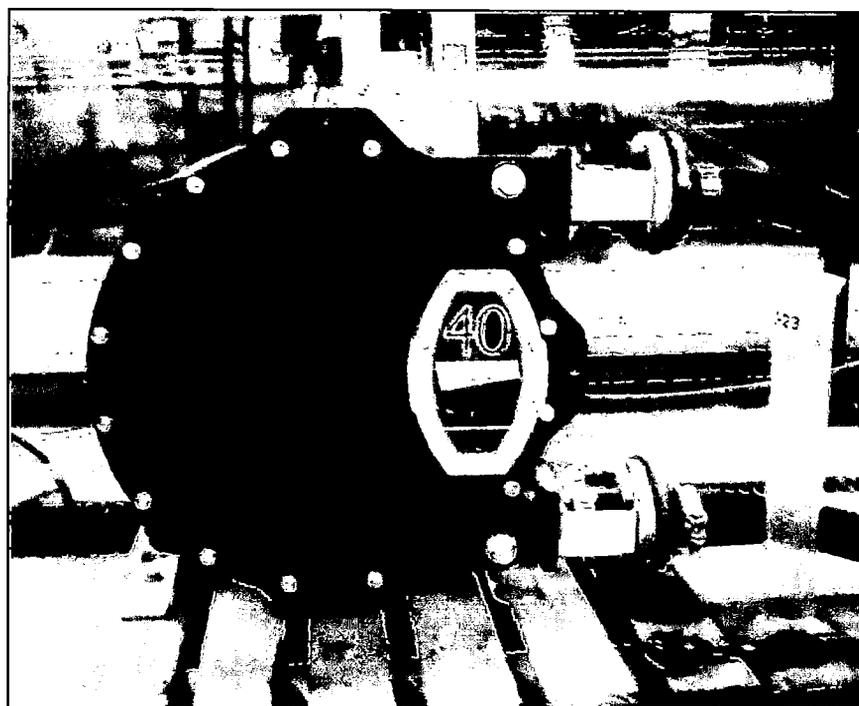


Figura N° 4.3. Bomba peristáltica de impulsión. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú

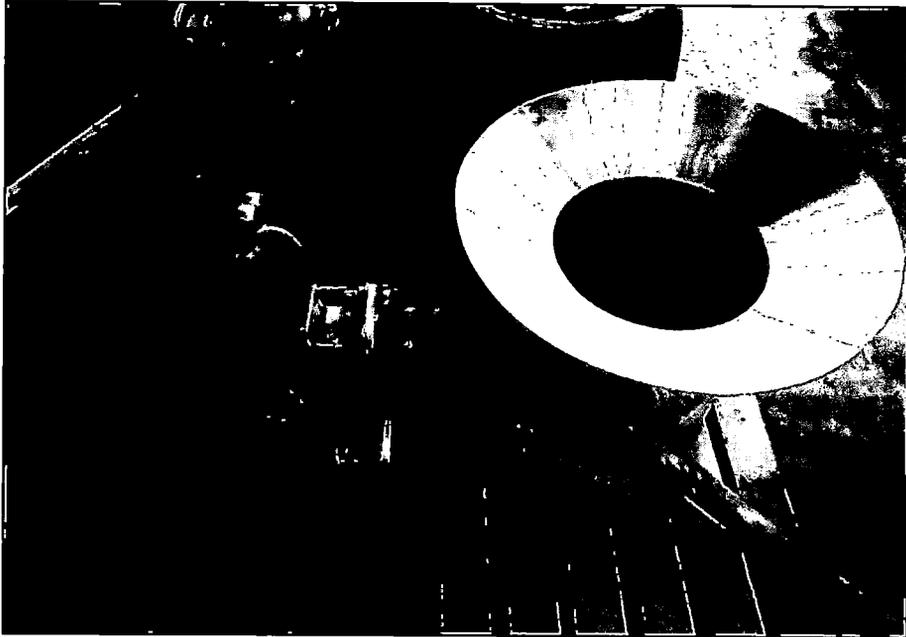


Figura N° 4.4. Mangueras de alimentación y descarga. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú .

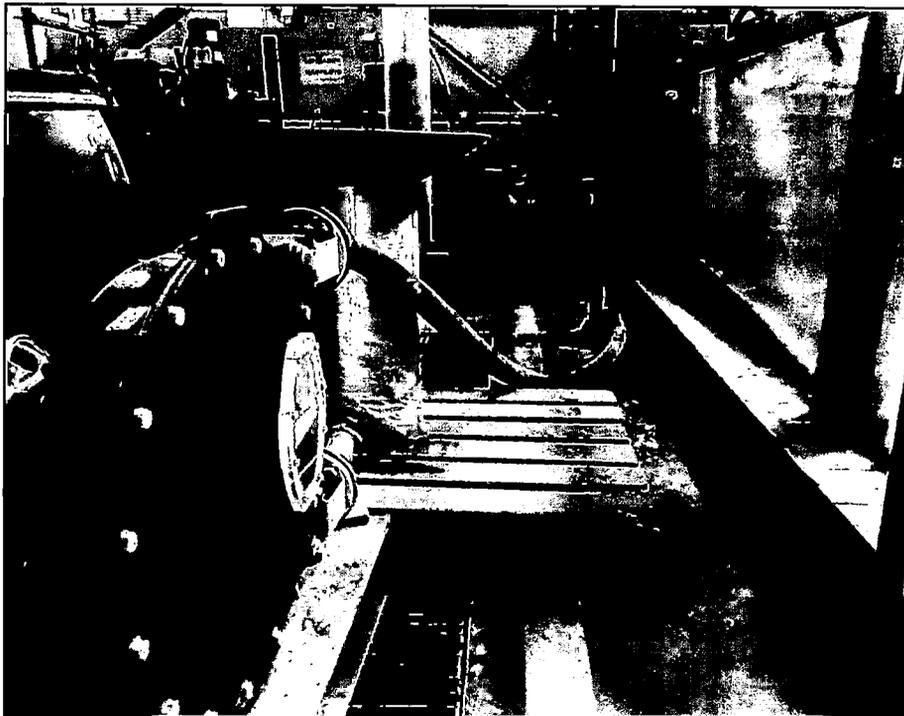


Figura N° 4.5. Sistema integrado de alimentación y descarga incluida la canaleta. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú

4.3 MUESTRAS DE RELAVE

Para la presente investigación se estudiaron en total 5 muestras de relave espesado, estas muestras han sido codificadas y caracterizadas previamente de ser ensayadas. La muestra CH01 fue colectada directamente desde la descarga hacia el depósito relaves. La operación minera de donde provienen las muestras se ubica en Cerro de Pasco y procesa minerales de Zinc, Plomo y Cobre.

Las muestras MC01, MC02 y MC03 han sido obtenidas como producto de pruebas de espesamiento en el laboratorio de Golder en Lima y por último la muestra MZ01 es el resultado de un compuesto de dos muestras de relave polimetálico (50% de participación de cada una).

En el Cuadro N° 4.1 se da un resumen descriptivo de las muestras ensayadas consideradas en este trabajo:

Cuadro N° 4.1. Resumen descriptivo de las muestras ensayadas.

Muestra	Procedencia	Tipo de relave	Color	Mineral
CH01	Cerro de Pasco	Espesado	Gris	Zn, Pb, Cu.
MC01	Nazca	Espesado	Gris	Cu.
MC02	Nazca	Espesado	Gris	Cu.
MC03	Nazca	Espesado	Gris - marrón	Cu.
MZ01	Compósito	Espesado	Plomo - negro	Zn, Pb, Cu, Au.

4.4 OBTENCIÓN DE MUESTRAS

Muestra CH01

Las muestra CH01 llegó al laboratorio en 20 bidones de 30 litros cada uno, ver Figura N° 4.6, con la intención de obtener una muestra que sea representativa de todo el volumen se extrajo 1.5 Litros de cada bidón (previamente homogenizado) para formar un nuevo bidón que contenga partes iguales de todos los 20 bidones, ver Figura N° 4.7, Figura N° 4.8 y Figura N° 4.9. Posteriormente a partir de esta muestra representativa se realizaron los ensayos de caracterización.



Figura N° 4.6. Veinte bidones conteniendo la muestra CH01. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú



Figura N° 4.7. Homogenización de cada bidón de la muestra CH01 para generar la muestra representativa. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú



Figura N° 4.8. Bidón conteniendo la muestra representativa CH01 homogenizada. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú



Figura N° 4.9. Tara con muestra representativa CH01 previamente de ser ingresada al horno. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú

Muestra MC01

La muestra MC01 se obtiene como resultado de una prueba de espesamiento a muestras de relaves convencionales, ver Figura N° 4.10. Gracias a la cantidad generada de material espesado, posteriormente se realizaron ensayos de canaleta. Sin embargo a pesar de que la cantidad permitió realizar el ensayo, éste solo pudo realizarse en disposiciones de una sola capa a fin de cubrir un intervalo de tres ensayos a diferentes consistencias, así también la totalidad de la muestra se tomó como representativa.

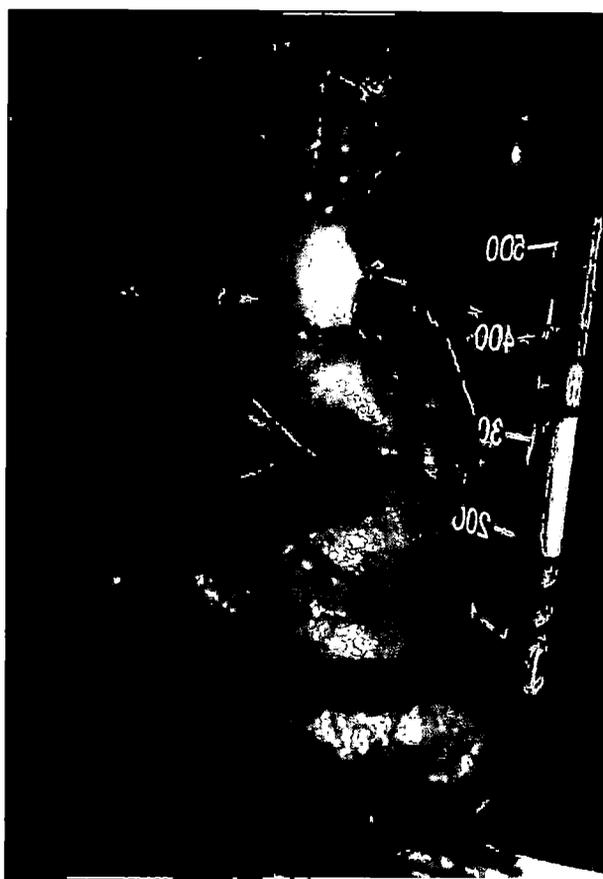


Figura N° 4.10. Relave MC01 a la salida del espesador. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.

Muestra MC02

La muestra MC02 se obtiene como resultado de una prueba de espesamiento a muestras de relaves convencionales, ver Figura N° 4.11. Gracias a la cantidad generada de material espesado, posteriormente se realizaron ensayos de canaleta. Sin embargo a pesar de que la cantidad permitió realizar el ensayo, éste solo pudo realizarse en disposiciones de una sola capa a fin de

cubrir un intervalo de tres ensayos a diferentes consistencias, así también la totalidad de la muestra se tomó como representativa.



Figura N° 4.11. Relave MC02 a la salida del espesador. Fuente Laboratorio Golder Associates Perú

Muestra MC03

La muestra MC03 se obtiene como resultado de una prueba de espesamiento a muestras de relaves convencionales, ver Figura N° 4.12. Gracias a la cantidad generada de material espesado, posteriormente se realizaron ensayos de canaleta. Sin embargo a pesar de que la cantidad permitió realizar el ensayo este solo pudo realizarse en disposiciones en una sola capa a fin de cubrir un intervalo de tres ensayos a diferentes consistencias, así también la totalidad de la muestra se tomó como representativa.



Figura N° 4.12. Relave MC03 a la salida del espesador. Fuente Laboratorio Golder Associates Perú.

Muestra MZ01

En cuanto a la muestra MZ01 esta fue preparada en laboratorio como un compuesto de muestras del año 2011 provenientes de minas ubicadas en Cerro de Pasco e Ica con participación igual de cada una (50% cada una), toda la muestra generada ocupó un bidón de 140 litros por lo que se tomó como representativa, ver Figura N° 4.13.



Figura N° 4.13. Muestra MZ01. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú

4.5 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

La caracterización geotécnica de las muestras de relave abarcó la determinación de las propiedades índice de los materiales, los ensayos realizados son los siguientes:

4.5.1 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico se realizó sobre las muestras siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D422. En la Figura N° 4.14 y Figura N° 4.15 se observan los equipos básicos empleados en el ensayo de granulometría. Las curvas obtenidas se presentan en la Figura N° 4.16, Figura N° 4.17, Figura N° 4.18, Figura N° 4.19 y Figura N° 4.20.



Figura N° 4.14. Tamices utilizados en el ensayo de granulometría. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú



Figura N° 4.15. Ensayo de granulometría por hidrómetro. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú

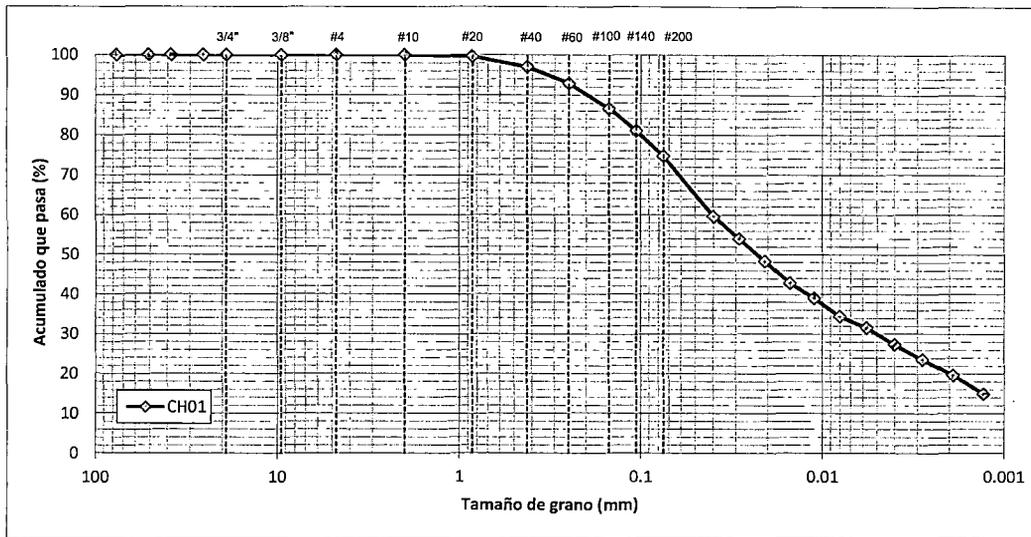


Figura N° 4.16. curva granulométrica muestra CH01. Fuente Elaboración propia.

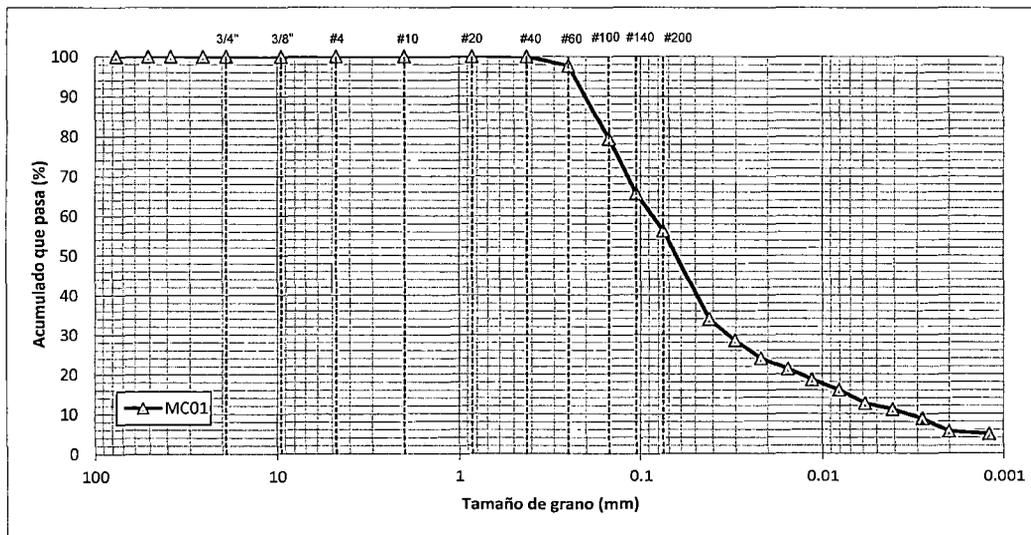


Figura N° 4.17. Curva granulométrica muestra MC01. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú

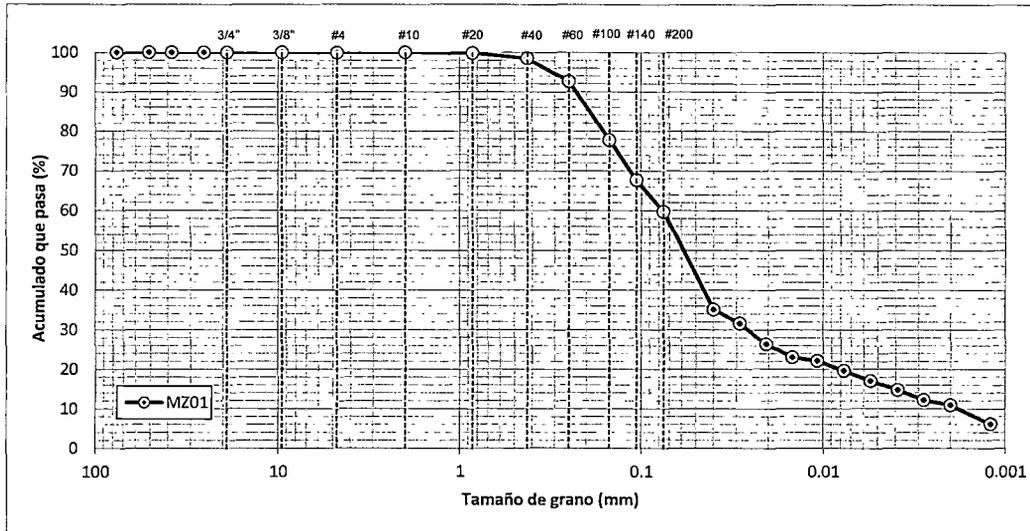


Figura N° 4.20. Granulometría muestra MZ01. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú

Para este estudio se consideran que los parámetros más representativos de cada material son el d_{50} y el porcentaje de partículas finas (representado por el porcentaje total que pasa la malla N°200). El resumen de estos parámetros se muestra en el Cuadro N° 4.2:

Cuadro N° 4.2. Diámetro “ d_{50} ” y porcentaje de finos de las muestras de relave

Muestra	D_{50} (mm)	Porcentaje de finos (%)
CH01	0.0228	74.7
MC01	0.0635	56.3
MC02	0.0565	62
MC03	0.0550	60
MZ01	0.0057	60.2

4.5.2 Humedad y contenido de sólidos

El contenido de humedad fue medido sobre cada muestra siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D2216. El contenido de sólidos ha sido calculado en base a la ecuación (1.1), los resultados se muestran en el Cuadro N° 4.3.

Cuadro N° 4.3. Humedad y contenido de sólidos iniciales de las muestras.

Muestra	Humedad (%)	Cont. de sólidos (%)
CH01	64	61
MC01	39	72
MC02	41	71
MC03	56	64
MZ01	32	76



Figura N° 4.21. Ingreso de muestras al horno para medición del contenido de humedad. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú

4.5.3 Gravedad específica

De acuerdo al análisis granulométrico, el cálculo de la gravedad específica corresponderá a la normativa para suelos finos ASTM D854. Los valores se presentan en el Cuadro N° 4.4. Los equipos de laboratorio empleados para la determinación de la gravedad específica se muestran en las figuras: Figura N° 4.22 y Figura N° 4.23.

Cuadro N° 4.4. Gravedad específica de las muestras.

Muestra	G.S.
CH01	2.965
MC01	3.160
MC02	3.042
MC03	2.834
MZ01	3.464



Figura N° 4.22. Fiola empleada para el ensayo de gravedad específica. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú

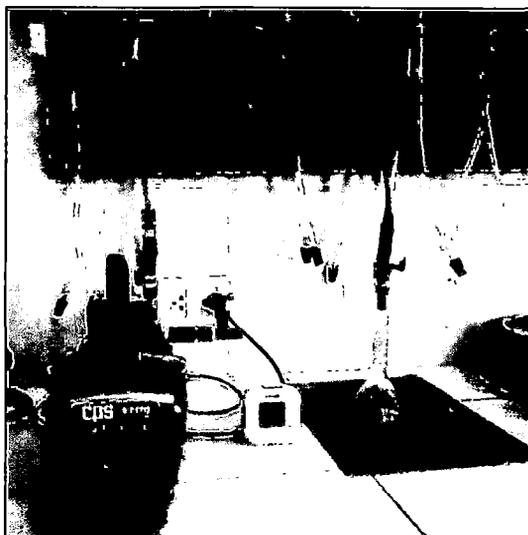


Figura N° 4.23. Bomba y sistema de vacíos empleada en el ensayo de gravedad específica. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú

4.5.4 Plasticidad y Clasificación SUCS

Las muestras que se utilizaron para los ensayos de granulometría y humedad fueron aprovechadas para realizar los ensayos de plasticidad, a partir de las cuales se realizó la clasificación SUCS, las cuales se resumen a continuación

- CH01: LL=24, LP=16 - SUCS: CL
- MC01: LL=21, LP=8 - SUCS: CL
- MC02: LL=19, LP=5 - SUCS: CL-ML
- MC03: LL=NP, LP=NP - SUCS: ML
- MZ01: LL=NP, LP=NP - SUCS: ML

4.6 MEDICIÓN DEL ESFUERZO DE FLUENCIA

El esfuerzo de fluencia es un parámetro importante para el estudio de la disposición de los relaves espesados, para esta tesis se consideró la medición del esfuerzo de fluencia empleando un viscosímetro, ver Figura N° 4.24, en cada ensayo de canaleta llevado a cabo. En el Cuadro N° 4.5 se muestra un resumen de los esfuerzos de fluencia de las muestras de relave ensayadas.

Cuadro N° 4.5. Esfuerzo de fluencia.

Muestra	Cont. de Sólidos (%)	Esfuerzo de fluencia (Pa)
CH01	61	86
MC01	72	38
MC02	71	71
MC03	64	34
MZ01	76	38

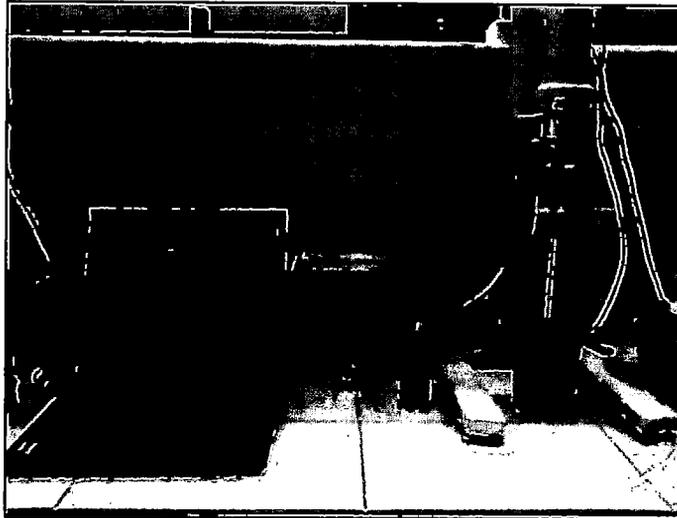


Figura N° 4.24. Equipo para medición del esfuerzo de fluencia. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú

4.7 ENSAYOS DE DISPOSICIÓN EN CANALETA

Con el ensayo de canaleta se evalúa el comportamiento de las muestras de relave durante su disposición y debido a que el comportamiento de los relaves espesados en los depósitos está fuertemente influenciado por su contenido de sólidos (o contenido de humedad) para los ensayos de canaleta se ha previsto variar este parámetro, dependiendo del comportamiento y consistencia de la muestra, durante la realización del ensayo con el fin de evaluar su impacto sobre el comportamiento de los relaves al depositar.

4.7.1 Procedimiento del ensayo

El ensayo de disposición involucra depositar sucesivamente capas de relaves a través de múltiples descargas, el siguiente procedimiento fue el seguido para el ensayo:

- i. Se calibra la tasa de descarga mediante recirculación.
- ii. La muestra es completamente mezclada en sus contenedores y posteriormente vertida al tanque alimentador.
- iii. Se acciona la bomba peristáltica y se fija una tasa de descarga.

- iv. El punto de descarga se fija a una altura de aproximadamente 10 cm desde el fondo de la canaleta o capa subyacente.
- v. Los relaves espesados son descargados continuamente en la línea central del canal, de ser posible cada capa depositada es fotografiada y grabada en video.
- vi. Durante la descarga de cada capa, se toma una muestra de aproximadamente 0.40 litros. Para la medición del esfuerzo de fluencia.
- vii. Finalizada la etapa de disposición de cada capa el perfil desarrollado es medido.
- viii. De ser posible se favorece la evaporación de agua empleando ventiladores.

4.7.2 Ensayo de Canaleta – Muestra CH01.

La muestra de CH01 viene a ser para este estudio un caso base debido a que la operación minera de donde proviene es una de las pocas que está actualmente descargando relaves espesados sobre su depósito, lo que brinda la posibilidad de aplicar lo encontrado en laboratorio a campo.

Sobre esta muestra se han realizado tres ensayos de disposición multicapa, los cuales se resumen en el Cuadro N° 4.6.

Cuadro N° 4.6. Resumen de los ensayos de canaleta realizados a la muestra CH01.

N° Ensayo	N° de Capas	Cs (%)
01	3	64
02	4	61
03	7	56

4.7.2.1 Observaciones

Las siguientes observaciones fueron hechas durante la realización del ensayo:

- i. Los relaves viajan en régimen laminar, éstos se dispersan lateralmente desde el punto de disposición y fluyen formando la playa de relaves con un frente uniforme.
- ii. A medida que el volumen de relave depositado aumenta, se puede apreciar el efecto de las paredes de la canaleta sobre el libre flujo de los relaves.

- iii. Luego de finalizado el ensayo se observa agua expelida de la masa del relave. El agua liberada es clara y sin presencia de sólidos suspendidos.

4.7.2.2 Resultados

Cuando el relave está siendo depositado en la canaleta, se pueden llevar a cabo mediciones sobre esta masa. Para este estudio son tres las más importantes: contenido de sólidos, esfuerzo de fluencia y perfil final de la capa de relave depositada.

Las observaciones obtenidas de la prueba de canaleta son reportadas en los siguientes cuadros: Cuadro N° 4.7, Cuadro N° 4.8, Cuadro N° 4.9 y Cuadro N° 4.10 y también en las siguientes figuras: Figura N° 4.25, Figura N° 4.26, Figura N° 4.27, Figura N° 4.28 y Figura N° 4.29 para cada etapa del ensayo.

Mediciones - Ensayo de canaleta 01.

Cuadro N° 4.7. Mediciones realizadas, ensayo 01 - CH01.

Muestra :		CH01			
N° Ensayo :		1			
Pendiente prom :		9.45%			
N° Capa :	1	N° Capa :	2	N° Capa :	3
Cs (%) :	63	Cs (%) :	64	Cs (%) :	64
τs (Pa) :	60	τs (Pa) :	66	τs (Pa) :	64
Pendiente :	6.30%	Pendiente :	6.90%	Pendiente :	8.60%
Tasa de descarga :	10 lt/min	Tasa de descarga :	9.5 lt/min	Tasa de descarga :	12 lt/min
Long. Horizontal (m)	Altura (m)	Long. Horizontal (m)	Altura (m)	Long. Horizontal (m)	Altura (m)
0	0.117	0	0.183	0	0.215
0.1	0.111	0.1	0.175	0.1	0.207
0.2	0.11	0.2	0.168	0.2	0.2
0.3	0.108	0.3	0.164	0.3	0.195
0.4	0.103	0.4	0.159	0.4	0.186
0.5	0.1	0.5	0.152	0.5	0.178
0.6	0.097	0.6	0.146	0.6	0.17
0.7	0.093	0.7	0.137	0.7	0.163
0.8	0.09	0.8	0.131	0.8	0.155
0.9	0.089	0.9	0.125	0.9	0.145
1	0.085	1	0.119	1	0.129
1.1	0.081	1.1	0.113		
1.2	0.079	1.2	0.106		
1.3	0.074	1.3	0.101		
1.4	0.069	1.4	0.092		
1.5	0.065	1.5	0.085		
1.6	0.06	1.6	0.076		
1.7	0.049	1.7	0.065		
1.8					
1.9					
2	0.024				
2.1	0.018				
2.2	0.007				



Figura N° 4.25. Vista lateral del relave depositado ensayo 01 – CH01. Fuente, Elaboración propia.



Figura N° 4.26. Vista frontal del relave depositado, ensayo 01 – CH01. Fuente, Elaboración propia.

Mediciones - Ensayo de canaleta 02.

Cuadro N° 4.8. Mediciones realizadas, ensayo 02 – CH01.

Muestra	: CH01							
N° Ensayo	: 2							
Pendiente prom	: 7.71%							
N° Capa	: 1	N° Capa	: 2	N° Capa	: 3	N° Capa	: 4	
Cs (%)	: 61	Cs (%)	: 60	Cs (%)	: 61	Cs (%)	: 61	
rs (Pa)	: 33	rs (Pa)	: 27	rs (Pa)	: 33	rs (Pa)	: 33	
Pendiente	: 4.30%	Pendiente	: 5.10%	Pendiente	: 5.60%	Pendiente	: 7.60%	
Tasa de descarga	: 7.5 lt/min	Tasa de descarga	: 6.7 lt/min	Tasa de descarga	: 9.0 lt/min	Tasa de descarga	: 10.7 lt/min	
Long. Horizontal (m)	Altura (m)							
0	0.085	0	0.143	0	0.163	0	0.194	
0.1	0.082	0.1	0.138	0.1	0.159	0.1	0.186	
0.2	0.081	0.2	0.134	0.2	0.154	0.2	0.18	
0.3	0.079	0.3	0.13	0.3	0.148	0.3	0.175	
0.4	0.078	0.4	0.125	0.4	0.146	0.4	0.169	
0.5	0.076	0.5	0.123	0.5	0.141	0.5	0.163	
0.6	0.075	0.6	0.115	0.6	0.135	0.6	0.156	
0.7	0.072	0.7	0.111	0.7	0.126	0.7	0.145	
0.8	0.069	0.8	0.107	0.8	0.121	0.8	0.133	
0.9	0.068	0.9	0.101	0.9	0.113	0.9	0.125	
1	0.067	1	0.098	1	0.105			
1.1	0.066	1.1	0.092					
1.2	0.063	1.2	0.085					
1.3	0.059	1.3	0.077					
1.4	0.056	1.4	0.065					
1.5	0.048							
1.6	0.047							
1.7	0.044							
1.8								
1.9								
2	0.023							
2.1	0.022							
2.2	0.021							
2.3	0.016							
2.4	0.009							

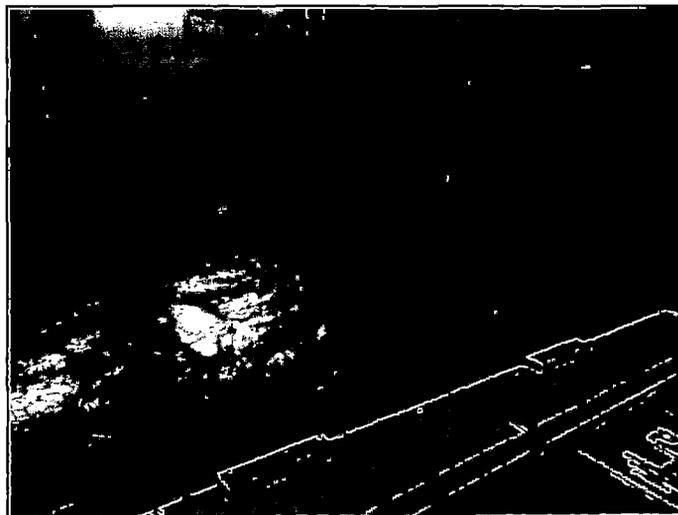


Figura N° 4.27. Vista lateral del relave depositado, ensayo 02 – CH01. Fuente, Elaboración propia.

Mediciones - Ensayo de canaleta 03.

Cuadro N° 4.9. Mediciones realizadas, ensayo 03 – CH01.

Muestra	: CH01						
N° Ensayo	: 3						
Pendiente prom	: 8.10%						
N° Capa	: 1	N° Capa	: 2	N° Capa	: 3	N° Capa	: 4
Cs (%)	: 56						
τs (Pa)	: 14	τs (Pa)	: 15	τs (Pa)	: 14	τs (Pa)	: 14
Pendiente	: 3.30%	Pendiente	: 3.40%	Pendiente	: 4.30%	Pendiente	: 5.20%
Tasa de descarga	: 7.7 lt/min	Tasa de descarga	: 5.8 lt/min	Tasa de descarga	: 4.5 lt/min	Tasa de descarga	: 4.7 lt/min
Long. Horizontal (m)	Altura (m)						
0	0.065	0	0.102	0	0.126	0	0.151
0.1	0.062	0.1	0.098	0.1	0.124	0.1	0.148
0.2	0.061	0.2	0.097	0.2	0.123	0.2	0.145
0.3	0.06	0.3	0.095	0.3	0.119	0.3	0.141
0.4	0.059	0.4	0.093	0.4	0.116	0.4	0.136
0.5	0.058	0.5	0.092	0.5	0.112	0.5	0.131
0.6	0.057	0.6	0.086	0.6	0.107	0.6	0.126
0.7	0.056	0.7	0.084	0.7	0.098	0.7	0.119
0.8	0.054	0.8	0.081	0.8	0.096	0.8	0.115
0.9	0.053	0.9	0.077	0.9	0.089	0.9	0.108
1	0.052	1	0.075	1	0.082	1	0.103
1.1	0.05	1.1	0.071	1.1	0.079	1.1	0.094
1.2	0.049	1.2	0.068	1.2	0.071	1.2	0.081
1.3	0.044	1.3	0.064				
1.4	0.043	1.4	0.058				
1.5	0.04	1.5	0.053				
1.6	0.036	1.6	0.049				
1.7	0.034	1.7	0.045				
1.8							
1.9							
2	0.02						
2.1	0.018						
2.2	0.016						
2.3	0.014						
2.4	0.012						
2.5	0.004						

Cuadro N° 4.10. Mediciones realizadas, ensayo 03 – CH01.

Muestra	: CH01					
N° Ensayo	: 3					
Pendiente prom	: 8.10%					
N° Capa	: 5	N° Capa	: 6	N° Capa	: 7	
Cs (%)	: 56	Cs (%)	: 56	Cs (%)	: 56	
τs (Pa)	: 14	τs (Pa)	: 13	τs (Pa)	: 13	
Pendiente	: 5.70%	Pendiente	: 6.40%	Pendiente	: 8.00%	
Tasa de descarga	: 4.3 lt/min	Tasa de descarga	: 6.8 lt/min	Tasa de descarga	: 4.7 lt/min	
Long. Horizontal (m)	Altura (m)	Long. Horizontal (m)	Altura (m)	Long. Horizontal (m)	Altura (m)	
0	0.171	0	0.187	0	0.203	
0.1	0.162	0.1	0.181	0.1	0.193	
0.2	0.161	0.2	0.177	0.2	0.186	
0.3	0.157	0.3	0.173	0.3	0.1795	
0.4	0.152	0.4	0.166	0.4	0.175	
0.5	0.145	0.5	0.161	0.5	0.166	
0.6	0.138	0.6	0.151	0.6	0.155	
0.7	0.131	0.7	0.145	0.7	0.147	
0.8	0.125	0.8	0.136			
0.9	0.12	0.9	0.126			
1	0.109	1	0.112			
1.1	0.098					

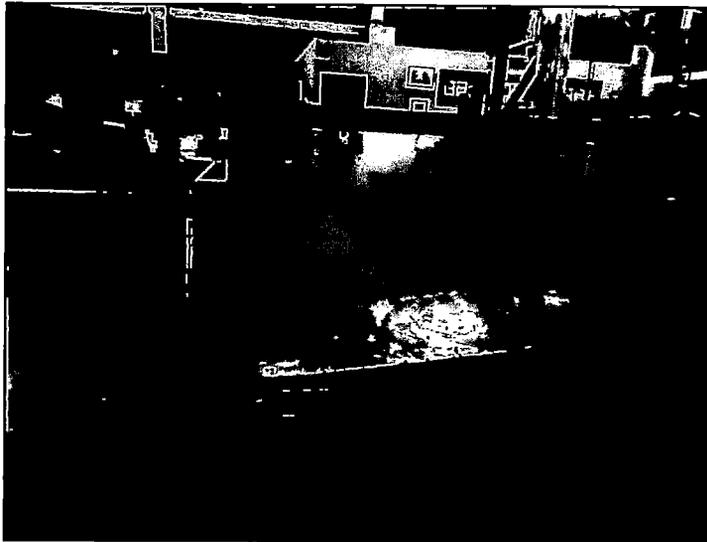


Figura N° 4.28. Vista lateral del relave depositado, ensayo 03 – CH01. Fuente, Elaboración propia.



Figura N° 4.29. Vista frontal del relave depositado, ensayo 03 – CH01. Fuente, Elaboración propia.

4.7.3 Ensayo de Canaleta – Muestra MC01.

La muestra MC01 fue obtenida en laboratorio a través de un ensayo de espesamiento. Debido al volumen generado se planteó la realización de ensayos de disposición considerando solo una capa para cada contenido de

sólidos, en el Cuadro N° 4.11 se muestra un resumen de los ensayos realizados:

Cuadro N° 4.11. Resumen de los ensayos realizados de canaleta realizados a la muestra MC01.

N° Ensayo	N° de Capas	Cs (%)
01	1	72
02	1	70
03	1	68

4.7.3.1 Observaciones

Las siguientes observaciones fueron hechas durante la realización del ensayo:

- i. Los relaves viajan en régimen laminar, éstos se dispersan lateralmente desde el punto de disposición y fluyen formando la playa de relaves con un frente uniforme.
- ii. A medida que el volumen de relave depositado aumenta, se puede apreciar el efecto de las paredes de la canaleta sobre el libre flujo de los relaves.
- iii. Luego de finalizado el ensayo se observa agua expelida de la masa del relave. El agua liberada es clara y sin presencia de sólidos suspendidos.
- iv. A pesar de los altos contenidos de sólidos se observa un comportamiento fluido bastante diferente al observado por la muestra CH01.

4.7.3.2 Resultados

Cuando el relave está siendo depositado en la canaleta, se pueden llevar a cabo mediciones sobre esta masa. Para este estudio son tres las más importantes, contenido de sólidos, esfuerzo de fluencia y perfil final de la capa de relave depositado.

Las observaciones obtenidas de la prueba de canaleta son reportadas los siguientes cuadros: Cuadro N° 12, Cuadro N° 4.13 y Cuadro N° 4.14 y en las

siguientes figuras: Figura 4.30, Figura 4.31, Figura N° 4.32, Figura N° 4.33 y Figura N° 4.34 para cada etapa del ensayo.

Mediciones - Ensayo de canaleta 01.

Cuadro N° 4.12. Mediciones realizadas, ensayo 01 – MC01.

Muestra	:	MC01
N° Ensayo	:	1
Pendiente prom	:	3.90%
N° Capa	:	Única
Cs (%)	:	72
τ_s (Pa)	:	38
Pendiente	:	3.90%
Tasa de descarga	:	8.2 lt/min
Long. Horizontal (m)		Altura (m)
0		0.07
0.1		
0.2		
0.3		0.061
0.4		
0.5		
0.6		0.052
0.7		
0.8		
0.9		0.042
1		
1.1		
1.2		0.029
1.3		
1.4		
1.5		0.018
1.6		
1.7		
1.8		0.01
1.9		

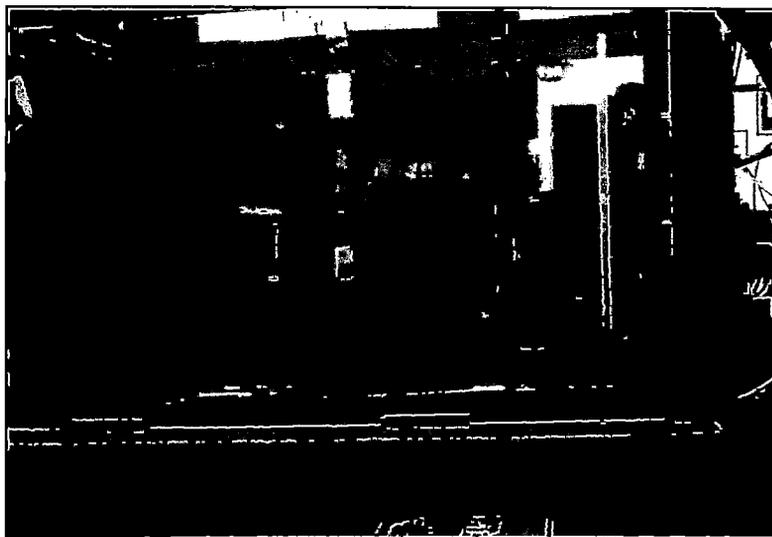


Figura N° 4.30. Vista lateral del relave depositado, ensayo 01 – MC01. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú

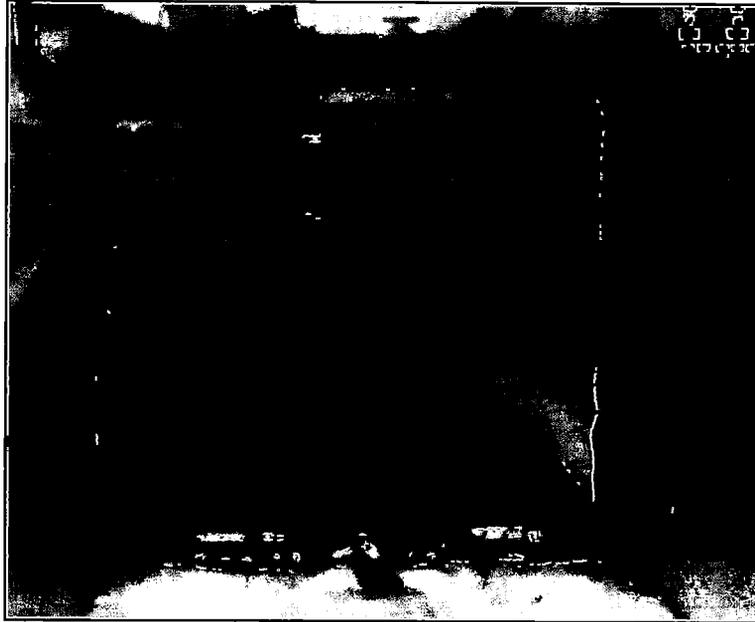


Figura N° 4.31. Vista frontal del relave depositado, ensayo 01 – MC01. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú

Mediciones - Ensayo de canaleta 02.

Cuadro N° 4.13. Mediciones realizadas, ensayo 02 – MC01.

Muestra	:	MC01
N° Ensayo	:	2
Pendiente prom	:	3.20%
N° Capa	:	Única
Cs (%)	:	70
τ_s (Pa)	:	21
Pendiente	:	3.20%
Tasa de descarga	:	8.2 lt/min
Long. Horizontal (m)		Altura (m)
0		0.058
0.1		
0.2		
0.3		0.051
0.4		
0.5		
0.6		0.042
0.7		
0.8		
0.9		0.035
1		
1.1		
1.2		0.028
1.3		
1.4		
1.5		0.017
1.6		
1.7		
1.8		0.001
1.9		

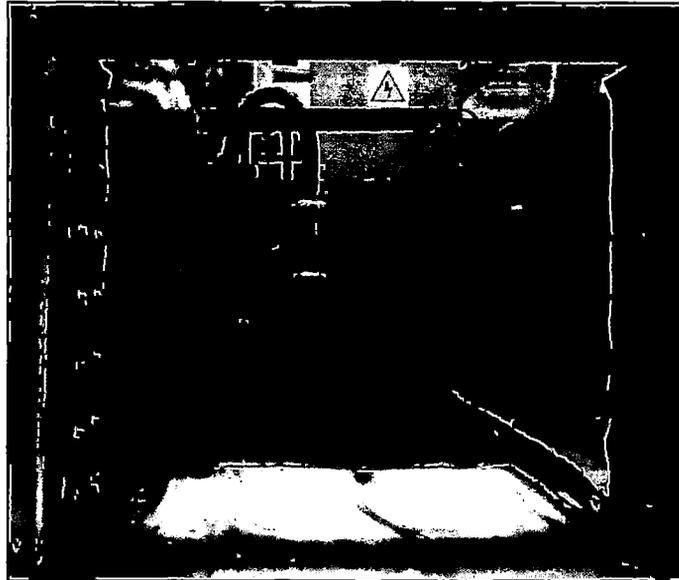


Figura N° 4.32. Vista frontal del relave depositado, ensayo 02- MC01. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.

Mediciones - Ensayo de canaleta 03.

Cuadro N° 4.14. Mediciones realizadas, ensayo 03 – MC01.

Muestra	:	MC01
N° Ensayo	:	3
Pendiente prom	:	2.30%
N° Capa	:	Única
Cs (%)	:	68
ts (Pa)	:	13
Pendiente	:	2.30%
Tasa de descarga	:	8.2 lt/min
Long. Horizontal (m)		Altura (m)
0		0.055
0.1		
0.2		
0.3		0.05
0.4		
0.5		
0.6		0.042
0.7		
0.8		
0.9		0.038
1		
1.1		
1.2		0.037
1.3		
1.4		
1.5		0.03
1.6		
1.7		
1.8		0.018
1.9		
2		
2.1		0.015
2.2		
2.3		
2.4		0.007



Figura N° 4.33. Vista lateral del relave depositado, ensayo 03 – MC01. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.



Figura N° 4.34. Vista frontal del relave depositado, ensayo 03 – MC01. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.

4.7.4 Ensayo de Canaleta – Muestra MC02.

La muestra MC02 fue obtenida en laboratorio a través de un ensayo de espesamiento, debido al volumen generado se planteó la realización de ensayos de disposición considerando solo una capa para cada contenido de

sólidos, en el Cuadro N° 4.15 se muestra un resumen de los ensayos realizados:

Cuadro N° 4.15. Resumen de los ensayos realizados de canaleta realizados a la muestra MC02.

N° Ensayo	N° de Capas	Cs (%)
01	1	71
02	1	68
03	1	65

4.7.4.1 Observaciones

Las siguientes observaciones fueron hechas durante la realización del ensayo:

- i. Los relaves viajan en régimen laminar, éstos se dispersan lateralmente desde el punto de disposición y fluyen formando la playa de relaves con un frente uniforme.
- ii. A medida que el volumen de relave depositado aumenta, se puede apreciar el efecto de las paredes de la canaleta sobre el libre flujo de los relaves.
- iii. Luego de finalizado el ensayo se observa agua exudada de la masa del relave. El agua liberada es clara y sin presencia de sólidos suspendidos.
- iv. Pequeñas reducciones del contenido de sólidos, impactan significativamente sobre el comportamiento del material.

4.7.4.2 Resultados

Cuando el relave está siendo depositado en la canaleta, se pueden llevar a cabo mediciones sobre éste. Para el presente estudio son tres las más importantes: contenido de sólidos, esfuerzo de fluencia y el perfil final de la capa de relave depositado.

Las observaciones obtenidas de la prueba de canaleta son reportadas en los siguientes cuadros: Cuadro 4.16, Cuadro N° 4.17 y Cuadro N° 4.18 y en las

siguientes figuras: Figura 4.35, Figura N° 4.36, Figura N° 4.37 y Figura N° 4.38 para cada etapa del ensayo.

Mediciones - Ensayo de canaleta 01.

Cuadro N° 4.16. Mediciones realizadas, ensayo 01 – MC02.

Muestra	:	MC02
N° Ensayo	:	1
Pendiente prom	:	6.20%
N° Capa	:	Única
Cs (%)	:	71
τ_s (Pa)	:	71
Pendiente	:	6.20%
Long. Horizontal (m)		Altura (m)
0		0.082
0.1		
0.2		
0.3		0.072
0.4		
0.5		
0.6		0.065
0.7		
0.8		
0.9		0.046
1		
1.1		
1.2		0.03
1.3		
1.4		
1.5		0

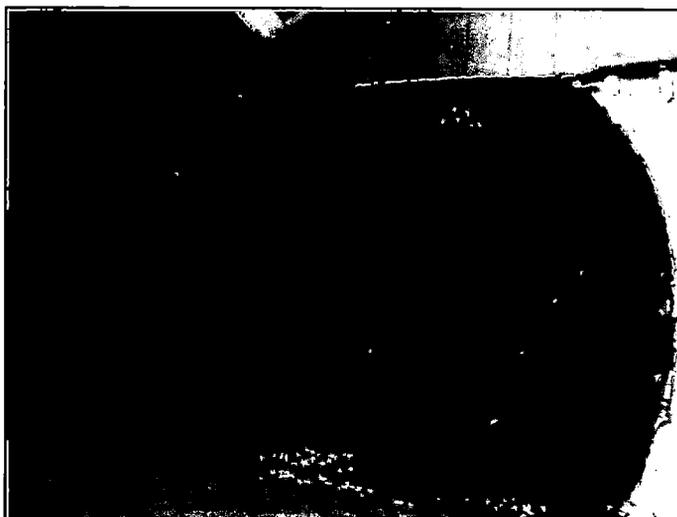


Figura N° 4.35. Vista en planta del relave depositado, ensayo 01 – MC02. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.

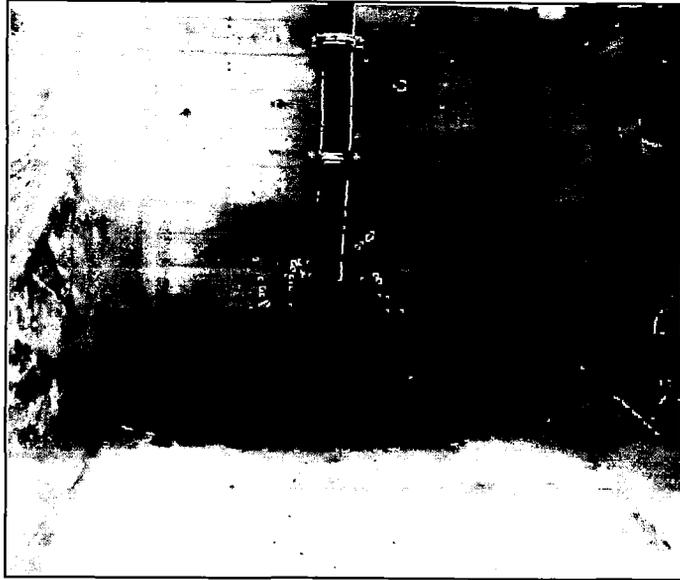


Figura N° 4.36. Vista frontal proceso de disposición, ensayo 01 – MC02. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.

Mediciones - Ensayo de canaleta 02.

Cuadro N° 4.17. Mediciones realizadas, ensayo 02 – MC02.

Muestra	:	MC02
N° Ensayo	:	2
Pendiente prom	:	3.50%
N° Capa	:	Única
Cs (%)	:	68
τ_s (Pa)	:	28.5
Pendiente	:	3.50%
Long. Horizontal (m)		Altura (m)
0		0.066
0.1		
0.2		
0.3		0.063
0.4		
0.5		
0.6		0.06
0.7		
0.8		
0.9		0.052
1		
1.1		
1.2		0.043
1.3		
1.4		
1.5		0.024
1.6		
1.7		
1.8		0.005

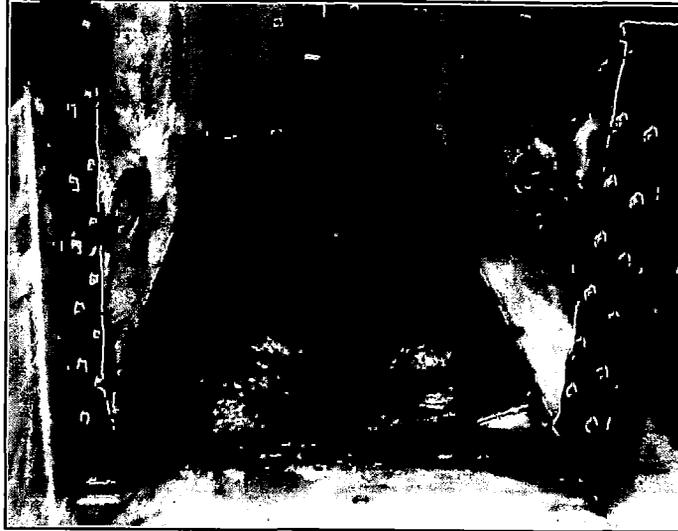


Figura N° 4.37. Vista frontal proceso de disposición, ensayo 02 – MC02. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.

Mediciones - Ensayo de canaleta 03.

Cuadro N° 4.18. Mediciones realizadas, ensayo 03 – MC02.

Muestra	:	MC02
N° Ensayo	:	3
Pendiente prom	:	2.80%
N° Capa	:	Única
Cs (%)	:	65
τ_s (Pa)	:	14
Pendiente	:	2.80%
Long. Horizontal (m)		Altura (m)
0		0.05
0.1		
0.2		
0.3		0.045
0.4		
0.5		
0.6		0.042
0.7		
0.8		
0.9		0.035
1		
1.1		
1.2		0.028
1.3		
1.4		
1.5		0.015
1.6		
1.7		
1.8		0.003



Figura N° 4.38. Vista frontal proceso de disposición, ensayo 03 – MC02. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.

4.7.5 Ensayo de Canaleta – Muestra MC03.

La muestra MC03 fue obtenida en laboratorio a través de un ensayo de espesamiento, debido al volumen generado se planteó la realización de ensayos de disposición considerando solo una capa para cada contenido de sólidos, en el Cuadro N° 4.19 se muestra un resumen de los ensayos realizados:

Cuadro N° 4.19. Resumen de los ensayos realizados de canaleta realizados a la muestra MC03.

N° Ensayo	N° de Capas	Cs (%)
01	1	64
02	1	60
03	1	58

4.7.5.1 Observaciones

Las siguientes observaciones fueron hechas durante la realización del ensayo:

- i. Los relaves viajan en régimen laminar, éstos se dispersan lateralmente desde el punto de disposición y fluyen formando la playa de relaves con un frente uniforme.
- ii. A medida que el volumen de relave depositado aumenta, se puede apreciar el efecto de las paredes de la canaleta sobre el libre flujo de los relaves.
- iii. Luego de finalizado el ensayo se observa agua exudada de la masa del relave. El agua liberada es clara y sin presencia de sólidos suspendidos.
- iv. Esta muestra no presenta cambios tan bruscos en su comportamiento al disminuir su contenido de sólidos, esto es reflejado al medir su esfuerzo de fluencia.

4.7.5.2 Resultados

Cuando el relave está siendo depositado en la canaleta, se pueden llevar a cabo mediciones sobre éste. Para el presente estudio son tres las más importantes, contenido de sólidos, esfuerzo de fluencia y el perfil final de la capa de relave depositado.

Las observaciones obtenidas de la prueba de canaleta son reportadas en los siguientes cuadros: Cuadro 4.20, Cuadro 4.21 y Cuadro N° 4.22.

Mediciones - Ensayo de canaleta 01.

Cuadro N° 4.20. Mediciones realizadas, ensayo 01 – MC03.

Muestra	:	MC03
N° Ensayo	:	1
Pendiente prom	:	4.40%
N° Capa	:	Única
Cs (%)	:	64
τ_s (Pa)	:	34
Pendiente	:	4.40%
Long. Horizontal (m)		Altura (m)
0		0.077
0.1		
0.2		
0.3		0.072
0.4		
0.5		
0.6		0.063
0.7		
0.8		
0.9		0.055
1		
1.1		
1.2		0.05
1.3		
1.4		
1.5		0.033
1.6		
1.7		
1.8		0
1.9		

Mediciones - Ensayo de canaleta 02.

Cuadro N° 4.21. Mediciones realizadas, ensayo 02 – MC03.

Muestra	:	MC03
N° Ensayo	:	2
Pendiente prom	:	3.80%
N° Capa	:	Única
Cs (%)	:	60
τ_s (Pa)	:	24
Pendiente	:	3.80%
Long. Horizontal (m)		Altura (m)
0		0.072
0.1		
0.2		
0.3		0.065
0.4		
0.5		
0.6		0.06
0.7		
0.8		
0.9		0.056
1		
1.1		
1.2		0.05
1.3		
1.4		
1.5		0.04
1.6		
1.7		
1.8		0.01
1.9		

Mediciones - Ensayo de canaleta 03.

Cuadro N° 4.22. Mediciones realizadas, ensayo 03 – MC03.

Muestra	:	MC03
N° Ensayo	:	3
Pendiente prom	:	3.30%
N° Capa	:	Única
Cs (%)	:	58
τ_s (Pa)	:	6
Pendiente	:	3.30%
Long. Horizontal (m)		Altura (m)
0		0.065
0.1		
0.2		
0.3		0.06
0.4		
0.5		
0.6		0.055
0.7		
0.8		
0.9		0.05
1		
1.1		
1.2		0.042
1.3		
1.4		
1.5		0.032
1.6		
1.7		
1.8		0.008
1.9		
2		
2.1		0

4.7.6 Ensayo de Canaleta – Muestra MZ01.

La muestra MZ01 es generada como un compósito de dos muestras de relave (50% de participación cada una) del año 2011 provenientes de minas ubicadas en Cerro de Pasco e Ica, el volumen generado de muestra permitió la disposición de 02 capas para cada ensayo. Se observó que al disminuir gradualmente el contenido de sólidos de la muestra el esfuerzo de fluencia disminuía rápidamente, por lo cual se consideraron para esta muestra dos contenidos de sólidos a ser ensayados. En el Cuadro 4.23 se muestra un resumen de los ensayos realizados:

Cuadro N° 4.23. Resumen de los ensayos realizados de canaleta realizados a la muestra CH01.

N° Ensayo	N° de Capas	Cs (%)
01	2	76
02	2	74.5

4.7.6.1 Observaciones

Las siguientes observaciones fueron hechas durante la realización del ensayo:

- i. Los relaves viajan en régimen laminar, éstos se dispersan lateralmente desde el punto de disposición y fluyen formando la playa de relaves con un frente uniforme.
- ii. A medida que el volumen de relave depositado aumenta, se puede apreciar el efecto de las paredes de la canaleta sobre el libre flujo de los relaves.
- iii. Luego de finalizado el ensayo se observa poca cantidad de agua exudada de la masa del relave. El agua liberada es clara y sin presencia de sólidos suspendidos.
- iv. Pequeñas reducciones del contenido de sólidos, impactan significativamente sobre el comportamiento del material.

4.7.6.2 Resultados

Cuando el relave está siendo depositado en la canaleta, se pueden llevar a cabo mediciones sobre éste. Para el presente estudio son tres las más importantes, contenido de sólidos, esfuerzo de fluencia y el perfil final de la capa de relave depositado.

Las observaciones obtenidas de la prueba de canaleta son reportadas en los siguientes cuadros: Cuadro N° 4.24 y Cuadro N° 4.25 y en las siguientes figuras: Figura N° 4.39, Figura N° 4.40, Figura N° 4.41 y Figura N° 4.42 para cada etapa del ensayo.

Mediciones - Ensayo de canaleta 01.

Cuadro N° 4.24. Mediciones realizadas, ensayo 01 – MZ01.

Muestra	MZ01		
N° Ensayo	1		
Pendiente prom	: 10.50%		
N° Capa	1	N° Capa	2
Cs (%)	75.9	Cs (%)	76.1
τ_s (Pa)	87	τ_s (Pa)	86
Pendiente	: 6.21%	Pendiente	: 11.75%
Tasa de descarga	: 8.7 lt/min	Tasa de descarga	: 6.9 lt/min
Long. Horizontal (m)	Altura (m)	Long. Horizontal (m)	Altura (m)
0	0.115	0	0.188
0.1	0.108	0.1	0.174
0.2	0.1	0.2	0.158
0.3	0.095	0.3	0.155
0.4	0.09	0.4	0.151
0.5	0.085	0.5	0.137
0.6	0.079	0.6	0.12
0.7	0.073	0.7	0.107
0.8	0.065	0.8	0.094
0.9	0.061	0.9	0.068
1	0.057		
1.1	0.048		
1.2	0.045		
1.3	0.034		
1.4	0.019		

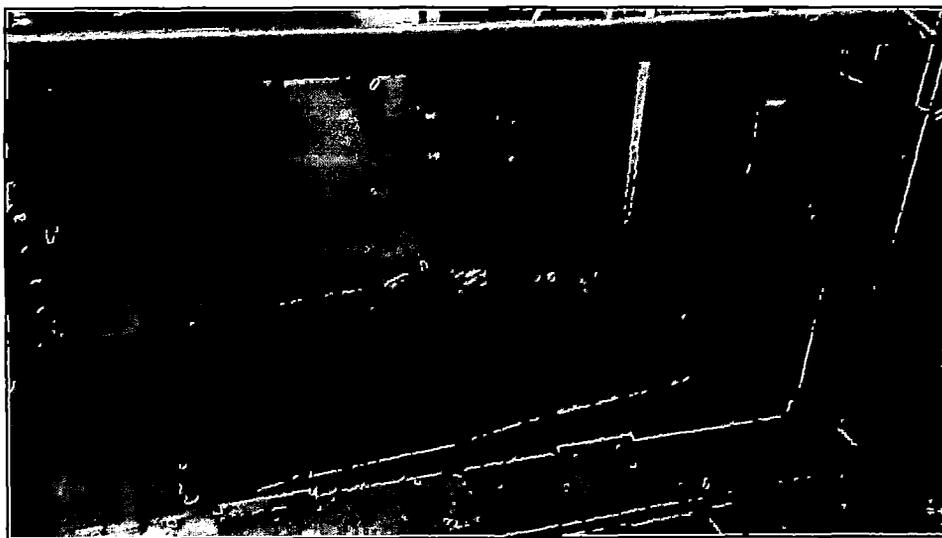


Figura N° 4.39. Vista lateral del relave depositado, ensayo 01 – MZ01. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.

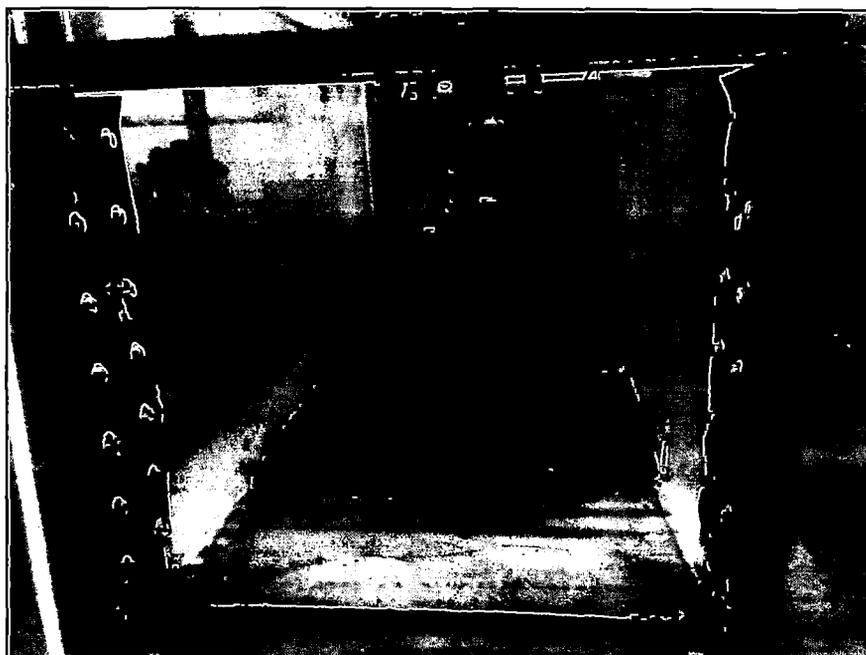


Figura N° 4.40. Vista frontal del relave depositado, ensayo 01 – MZ01. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.

Mediciones - Ensayo de canaleta 02.

Cuadro N° 4.25. Mediciones realizadas, ensayo 02 – MZ01.

Muestra	MZ01		
N° Ensayo	2		
Pendiente prom	: 10.50%		
N° Capa	1	N° Capa	2
Cs (%)	74.5	Cs (%)	74.6
τ_s (Pa)	47	τ_s (Pa)	49
Pendiente	: 4.80%	Pendiente	: 7.51%
Tasa de descarga	: 10 lt/min	Tasa de descarga	: 6.3 lt/min
Long. Horizontal (m)	Altura (m)	Long. Horizontal (m)	Altura (m)
0	0.07	0	0.112
0.1	0.064	0.1	0.102
0.2	0.06	0.2	0.095
0.3	0.057	0.3	0.094
0.4	0.055	0.4	0.083
0.5	0.051	0.5	0.073
0.6	0.046	0.6	0.067
0.7	0.041	0.7	0.051
0.8	0.033	0.8	
0.9	0.013	0.9	
1	0.007		



Figura N° 4.41. Vista en planta del relave depositado, ensayo 02 – MZ01. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.

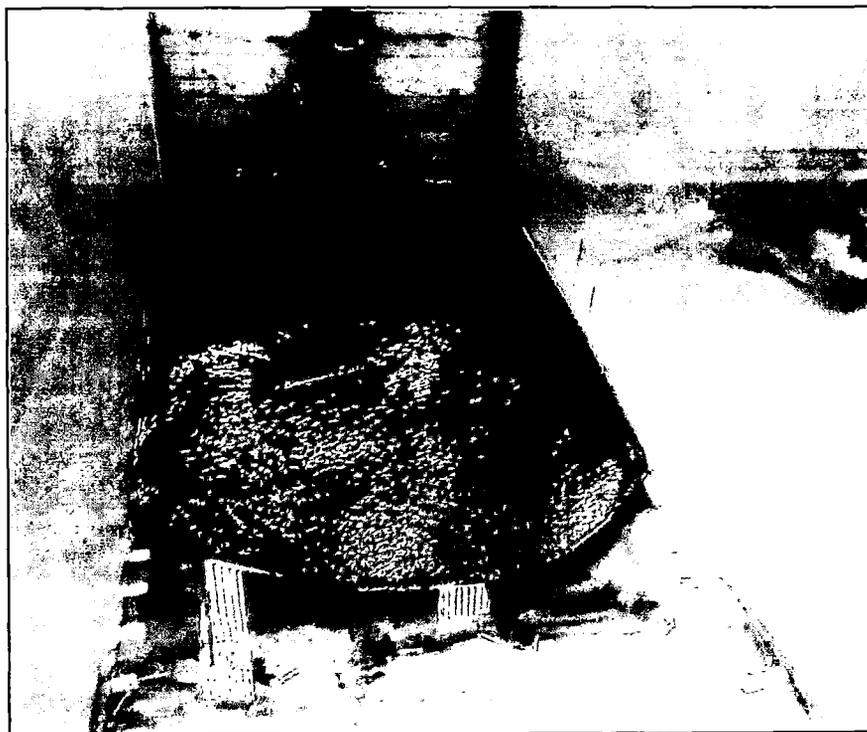


Figura N° 4.42. Vista frontal del relave depositado, ensayo 02 – MZ01. Fuente, Laboratorio Golder Associates Perú.

CAPÍTULO V. PROCESAMIENTO DE RESULTADOS

5.1 MODELAMIENTO DE LOS ENSAYOS DE CANALETA

La ecuación (4) desarrollada en el Capítulo III se empleó para la simulación de los ensayos de disposición en canaleta de las muestras CH01, MC01, MC02, MC03 y MZ01.

$$\frac{x_2 - x_1}{c} = \frac{y_2 - y_1}{a} + \frac{b}{a^2} \left[\ln \frac{a \cdot y_1 + b}{a \cdot y_2 + b} \right] \dots (4)$$

$$a = \omega \cdot \gamma \cdot \tan\theta - 2(1 + \tan^2\theta) \cdot \tau_y$$

$$b = -(1 + \tan^2\theta) \cdot \tau_y \cdot \omega$$

$$c = \gamma \cdot \omega \cdot \cos^2\theta$$

La secuencia seguida para el trabajo de modelamiento es la siguiente:

- i. Del ensayo se conoce la máxima altura alcanzada (cerca al punto de disposición), este valor será el inicial a partir del cual se resolverán los demás puntos del perfil.
- ii. Del ensayo se conoce también la máxima longitud alcanzada por el relave, así esto también debe reproducirse en los resultados del modelamiento.
- iii. Las alturas en el perfil se resolverán cada 10 cm ($\Delta x = 10\text{cm}$), considerando este aspecto se tuvo cuidado de medir en el ensayo el perfil cada 10 cm también en la mayoría de los casos.
- iv. Como es sabido que pequeños cambios en el contenido de sólidos (humedad) pueden originar grandes cambios en el esfuerzo de fluencia, se estudiará el cambio en este esfuerzo al variar el contenido de sólidos.
- v. Se tomará como valor inicial (τ_{y0}) el valor medido de esfuerzo de fluencia en el viscosímetro, éste se irá cambiando progresivamente (en la búsqueda del mejor ajuste) hasta encontrar el valor en el cual el perfil simulado por el modelo numérico muestre concordancia con el real.

La Figura N° 5.3 el perfil simulado como resultado del procesamiento en el modelo numérico planteado.

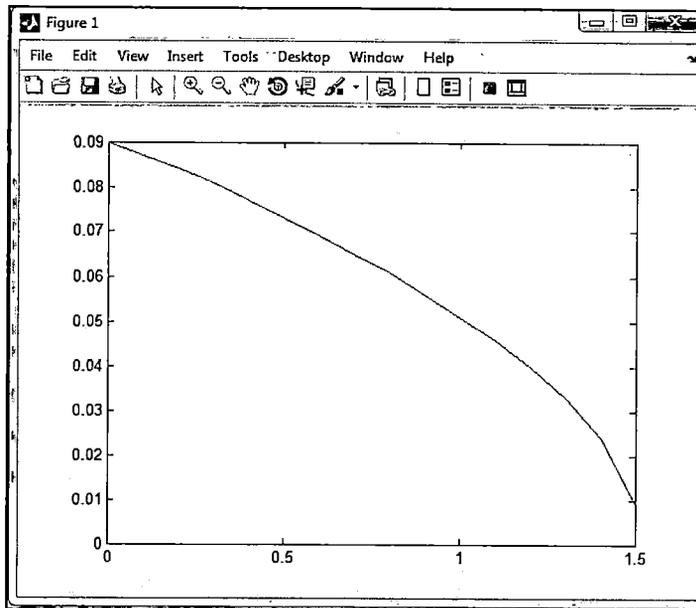


Figura N° 5.3. Perfil de disposición obtenido del modelamiento numérico, Fuente. Elaboración propia.

La Figura N° 5.4 presenta parte de la codificación realizada en el ambiente de programación propio de MatLab.

```

Editor - C:\Users\Franco\Desktop\Simulación del Flume Test\Almacenamiento
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
1 - disp(' SIMULACIÓN DEL ENSAYO DE DISPOSICIÓN - FLUME TEST')
2 - disp('          ENEFOQUE DE EQUILIBRIO LÍMITE ')
3 - disp('          Franklin Olaya Trinidad - Solder Associates Peru S.A.')
4 - disp(' ')
5 - disp(' ')
6
7 %Ingresamos propiedades del relave expresado y del flume
8 - x1 = input('ingrese el valor inicial de x (m): ');
9 - xf = input('ingrese el valor final de x (m) : ');
10 - y1 = input('ingrese la altura inicial de la capa de relave (m) : ');
11 - gamma = input('ingrese el peso específico del relave(KN/m3): ');
12 - ty = input('ingrese el yield stress (Pa): ');
13 - w = input('ingrese el ancho del flume (m): ');
14 - teta = input('ingrese la inclinación del fondo del flume (rad): ');
15 - a = input('ingrese el tamaño del paso en x en metros (m): ');
16 %Cálculo de los auxiliares
17 - a = gamma*w*cos(teta)-2*(1+(tan(teta))^2)*ty;
18 - b = -(1+(tan(teta))^2)*ty*w;
19 - c = gamma*w*(cos(teta))^2;
20 %Ciclo para solución de la ecuación
21 - n = (xf-x1)/a;
22 - x = x1:n:xf;
23 - y= linspace(y1,0,n);
24 - for i = 1:n-1
25 -     y0=y(i)-0.001:0;
26 -     m = y(i)/0.001+1;
27 -     for j = 1:m-1
28 -         R(j)=abs((y0(j+1)-y(i))/a+(b/a^2)*log(abs((a*y(i)+b)/(a*y0(j+1)+b)))-s/c);
29 -         y2(j)= y0(j+1);
30 -     end
31 -     [minimo posicion]=min(R);
32 -     y(i+1)= y2(posicion);
33 - end
    
```

Figura N° 5.4. Código implementado en lenguaje MatLab, Fuente. Elaboración propia.

5.1.1 Modelamiento del ensayo de disposición – Muestra CH01.

Modelamiento - Ensayo de canaleta 01.

En el Cuadro N° 5.1 se muestran los perfiles medidos (columnas de color negro) y los resultantes del proceso de modelamiento (columnas de color rojo). En la Figura N° 5.5 se grafica tanto los perfiles reales como los modelados.

Cuadro N° 5.1. Ensayo de Canaleta 01, modelamiento.

Modelamiento del ensayo de disposición en Canaleta												
Muestra : CH01												
N° Ensayo : 1												
N° Capa : 1			N° Capa : 2			N° Capa : 3						
Cs (%) : 63			Cs (%) : 64			Cs (%) : 64						
ts (Pa) : 60			ts (Pa) : 66			ts (Pa) : 64						
tm (Pa) : 44			tm (Pa) : 50			tm (Pa) : 45						
Long. Horiz. (m)	Altura (m)	Hm (m)	Long. Horizontal (m)	Altura (m)	$\Delta H1^*yZ^*$	$\Delta(SOPa)$	Hm (m)	Long. Horizontal (m)	Altura (m)	$\Delta H2^*yZ^*$	$\Delta(45Pa)$	$Y(45Pa)$
0	0.117	0.117	0	0.183	0.066	0.066	0.183	0	0.215	0.032	0.032	0.215
0.1	0.111	0.114	0.1	0.175	0.064	0.064	0.175	0.1	0.207	0.032	0.029	0.204
0.2	0.11	0.111	0.2	0.168	0.058	0.062	0.172	0.2	0.2	0.032	0.032	0.2
0.3	0.108	0.108	0.3	0.164	0.056	0.06	0.168	0.3	0.195	0.031	0.028	0.192
0.4	0.103	0.105	0.4	0.159	0.056	0.058	0.161	0.4	0.186	0.027	0.023	0.182
0.5	0.1	0.102	0.5	0.152	0.052	0.056	0.156	0.5	0.178	0.026	0.014	0.166
0.6	0.097	0.099	0.6	0.146	0.049	0.053	0.15	0.6	0.17	0.024	0.009	0.155
0.7	0.093	0.096	0.7	0.137	0.044	0.05	0.143	0.7	0.163	0.026	0.009	0.146
0.8	0.09	0.093	0.8	0.131	0.041	0.047	0.137	0.8	0.155	0.024	0.009	0.14
0.9	0.089	0.089	0.9	0.125	0.036	0.043	0.132	0.9	0.145	0.02	0.009	0.134
1	0.085	0.085	1	0.119	0.034	0.039	0.124	1	0.129	0.01	0.009	0.128
1.1	0.081	0.081	1.1	0.113	0.032	0.034	0.115					
1.2	0.079	0.077	1.2	0.106	0.027	0.027	0.106					
1.3	0.074	0.073	1.3	0.101	0.027	0.016	0.09					
1.4	0.069	0.069	1.4	0.092	0.023	0.015	0.084					
1.5	0.065	0.064	1.5	0.085	0.02	0.014	0.079					
1.6	0.06	0.059	1.6	0.076	0.016	0.013	0.073					
1.7	0.049	0.054	1.7	0.065	0.016	0.012	0.061					
1.8		0.048										
1.9		0.041										
2	0.024	0.033										
2.1	0.018	0.023										
2.2	0.007	0.001										

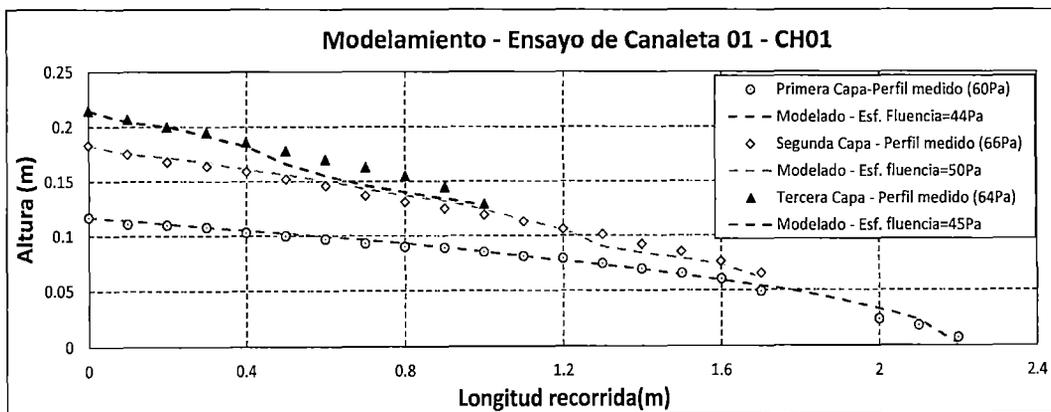


Figura N° 5.5. Perfiles medidos y modelados, ensayo 01. Fuente, Elaboración propia.

Modelamiento - Ensayo de canaleta 02.

En los cuadros: Cuadro N° 5.2 y Cuadro N° 5.3 se muestran los perfiles medidos (columnas de color negro) y los resultantes del proceso de modelamiento (columnas de color rojo). En la Figura N° 5.6 se grafica tanto los perfiles reales como los modelados.

Cuadro N° 5.2. Ensayo de Canaleta 02, modelamiento.

Modelado del ensayo de disposición en Canaleta													
Muestra :		CH01											
N° Ensayo :		2											
N° Capa :			1				N° Capa :			2			
Cs (%) :			61				Cs (%) :			60			
ts (Pa) :			33				ts (Pa) :			27			
tm (Pa) :			18				tm (Pa) :			23			
N° Capa :			3				N° Capa :			3			
Cs (%) :			61				Cs (%) :			61			
ts (Pa) :			33				ts (Pa) :			33			
tm (Pa) :			18				tm (Pa) :			18			
Long. Horiz. (m)	Altura (m)	Hm (m)	Long. Horizontal (m)	Altura (m)	$\Delta H 1^\circ y 2^\circ$	$\Delta(50Pa)$	Hm (m)	Long. Horizontal (m)	Altura (m)	$\Delta H 2^\circ y 3^\circ$	$\Delta(45Pa)$	Y(45Pa)	
0	0.085	0.085	0	0.143	0.058	0.058	0.143	0	0.163	0.02	0.02	0.163	
0.1	0.082	0.083	0.1	0.138	0.056	0.056	0.138	0.1	0.159	0.021	0.021	0.159	
0.2	0.081	0.081	0.2	0.134	0.053	0.054	0.135	0.2	0.154	0.02	0.02	0.154	
0.3	0.079	0.079	0.3	0.13	0.051	0.052	0.131	0.3	0.148	0.018	0.019	0.149	
0.4	0.078	0.077	0.4	0.125	0.047	0.05	0.128	0.4	0.146	0.021	0.018	0.143	
0.5	0.076	0.075	0.5	0.123	0.047	0.048	0.124	0.5	0.141	0.018	0.016	0.139	
0.6	0.075	0.073	0.6	0.115	0.04	0.046	0.121	0.6	0.135	0.02	0.013	0.128	
0.7	0.072	0.071	0.7	0.111	0.039	0.043	0.115	0.7	0.126	0.015	0.007	0.118	
0.8	0.069	0.069	0.8	0.107	0.038	0.04	0.109	0.8	0.121	0.014	0	0.107	
0.9	0.068	0.067	0.9	0.101	0.033	0.037	0.105	0.9	0.113	0.012	0	0.101	
1	0.067	0.065	1	0.098	0.031	0.034	0.101	1	0.105	0.007	0	0.098	
1.1	0.066	0.063	1.1	0.092	0.026	0.03	0.096						
1.2	0.063	0.06	1.2	0.085	0.022	0.026	0.089						
1.3	0.059	0.057	1.3	0.077	0.018	0.021	0.08						
1.4	0.056	0.054	1.4	0.065	0.009	0.017	0.073						
1.5	0.048	0.051											
1.6	0.047	0.048											
1.7	0.044	0.045											
1.8		0.042											
1.9		0.038											
2	0.023	0.034											
2.1	0.022	0.029											
2.2	0.021	0.024											
2.3	0.016	0.017											
2.4	0.009	0.01											

Cuadro N° 5.3. Ensayo de Canaleta 02, modelamiento.

Modelado del ensayo de disposición en Canaleta				
Muestra :		CH01		
N° Ensayo :		2		
N° Capa :		4		
Cs (%) :		61		
ts (Pa) :		33		
tm (Pa) :		17		
Long. Horizontal (m)	Altura (m)	$\Delta H 1^\circ y 2^\circ$	$\Delta(50Pa)$	Hm (m)
0	0.194	0.031	0.031	0.194
0.1	0.186	0.027	0.03	0.189
0.2	0.18	0.026	0.029	0.183
0.3	0.175	0.027	0.028	0.176
0.4	0.169	0.023	0.027	0.173
0.5	0.163	0.022	0.026	0.167
0.6	0.156	0.021	0.025	0.16
0.7	0.145	0.019	0.007	0.133
0.8	0.133	0.012	0	0.121
0.9	0.125	0.012	0	0.113

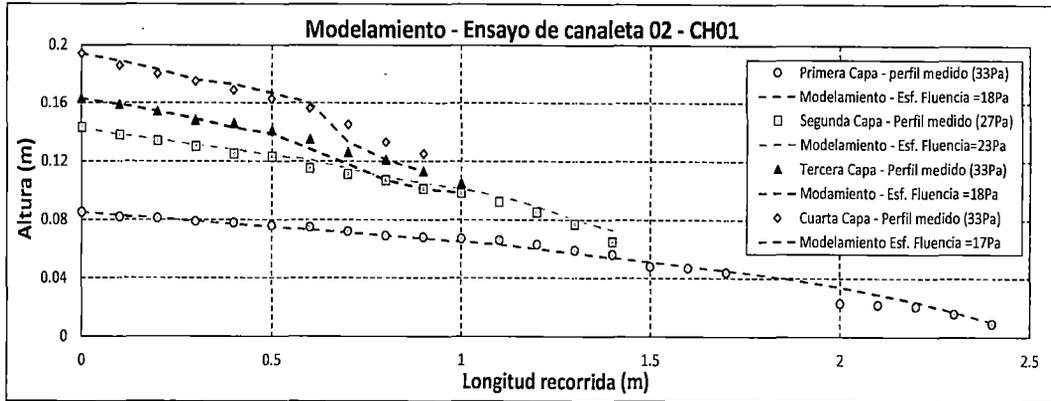


Figura N° 5.6. Perfiles medidos y modelados, ensayo 02. Fuente Elaboración propia.

Modelamiento - Ensayo de canaleta 03.

En los cuadros: Cuadro N° 5.4, Cuadro N° 5.5 y Cuadro N° 5.6 se muestran los perfiles medidos (columnas de color negro) y los resultantes del proceso de modelamiento (columnas de color rojo). En la Figura N° 5.7 se grafica tanto los perfiles reales como los modelados.

Cuadro N° 5.4. Ensayo de Canaleta 03, modelamiento.

Modelado del ensayo de disposición en Canaleta												
Muestra : CH01												
N° Ensayo : 3												
N° Capa : 1			N° Capa : 2				N° Capa : 3					
Cs (%) : 56			Cs (%) : 56				Cs (%) : 56					
ts (Pa) : 13			ts (Pa) : 15				ts (Pa) : 14					
tm (Pa) : 12			tm (Pa) : 10.9				tm (Pa) : 10.9					
Long. Horiz. (m)	Altura (m)	Hm (m)	Long. Horizontal (m)	Altura (m)	$\Delta H 1^{\circ} y 2^{\circ}$	$\Delta(50Pa)$	Hm (m)	Long. Horizontal (m)	Altura (m)	$\Delta H 2^{\circ} y 3^{\circ}$	$\Delta(45Pa)$	$\Delta(45Pa)$
0	0.065	0.065	0	0.102	0.037	0.037	0.102	0	0.126	0.024	0.024	0.126
0.1	0.062	0.064	0.1	0.098	0.036	0.036	0.098	0.1	0.124	0.026	0.026	0.124
0.2	0.061	0.063	0.2	0.097	0.036	0.035	0.096	0.2	0.123	0.026	0.025	0.122
0.3	0.06	0.062	0.3	0.095	0.035	0.034	0.094	0.3	0.119	0.024	0.024	0.119
0.4	0.059	0.061	0.4	0.093	0.034	0.033	0.092	0.4	0.116	0.023	0.023	0.116
0.5	0.058	0.06	0.5	0.092	0.034	0.032	0.09	0.5	0.112	0.02	0.022	0.114
0.6	0.057	0.059	0.6	0.086	0.029	0.031	0.088	0.6	0.107	0.021	0.021	0.107
0.7	0.056	0.057	0.7	0.084	0.028	0.028	0.084	0.7	0.098	0.014	0.014	0.098
0.8	0.054	0.055	0.8	0.081	0.027	0.027	0.081	0.8	0.096	0.015	0.011	0.092
0.9	0.053	0.053	0.9	0.077	0.024	0.026	0.079	0.9	0.089	0.012	0.005	0.082
1	0.052	0.051	1	0.075	0.023	0.025	0.077	1	0.082	0.007	0.005	0.08
1.1	0.05	0.049	1.1	0.071	0.021	0.024	0.074	1.1	0.079	0.008	0.005	0.076
1.2	0.049	0.047	1.2	0.068	0.019	0.023	0.072	1.2	0.071	0.003	0.005	0.073
1.3	0.044	0.045	1.3	0.064	0.02	0.022	0.066					
1.4	0.043	0.043	1.4	0.058	0.015	0.021	0.064					
1.5	0.04	0.041	1.5	0.053	0.013	0.019	0.059					
1.6	0.036	0.039	1.6	0.049	0.013	0.017	0.053					
1.7	0.034	0.037	1.7	0.045	0.011	0.014	0.048					
1.8		0.035										
1.9		0.033										
2	0.02	0.03										
2.1	0.018	0.027										
2.2	0.016	0.024										
2.3	0.014	0.02										
2.4	0.012	0.015										
2.5	0.004	0.008										

Cuadro N° 5.5. Ensayo de Canaleta 03, modelamiento.

Modelado del ensayo de disposición en Canaleta														
Muestra :		CH01												
N° Ensayo :		3												
N° Capa : 4					N° Capa : 5					N° Capa : 6				
Cs (%) : 56					Cs (%) : 56					Cs (%) : 56				
rs (Pa) : 14					rs (Pa) : 14					rs (Pa) : 13				
rm (Pa) : 10.9					rm (Pa) : 10.9					rm (Pa) : 10.9				
Long. Horizontal (m)	Altura (m)	$\Delta H 1^\circ \text{ y } 2^\circ$	$\Delta(50\text{Pa})$	Hm (m)	Long. Horizontal (m)	Altura (m)	$\Delta H 1^\circ \text{ y } 2^\circ$	$\Delta(50\text{Pa})$	Hm (m)	Long. Horizontal (m)	Altura (m)	$\Delta H 1^\circ \text{ y } 2^\circ$	$\Delta(50\text{Pa})$	Hm (m)
0	0.151	0.025	0.025	0.151	0	0.171	0.02	0.02	0.171	0	0.187	0.016	0.016	0.187
0.1	0.148	0.024	0.024	0.148	0.1	0.162	0.014	0.016	0.164	0.1	0.181	0.019	0.019	0.181
0.2	0.145	0.022	0.023	0.146	0.2	0.161	0.016	0.015	0.16	0.2	0.177	0.016	0.017	0.178
0.3	0.141	0.022	0.022	0.141	0.3	0.157	0.016	0.014	0.155	0.3	0.173	0.016	0.016	0.173
0.4	0.136	0.02	0.021	0.137	0.4	0.152	0.016	0.013	0.149	0.4	0.166	0.014	0.015	0.167
0.5	0.131	0.019	0.02	0.132	0.5	0.145	0.014	0.011	0.142	0.5	0.161	0.016	0.014	0.159
0.6	0.126	0.019	0.019	0.126	0.6	0.138	0.012	0.012	0.138	0.6	0.151	0.013	0.013	0.151
0.7	0.119	0.021	0.018	0.116	0.7	0.131	0.012	0.009	0.128	0.7	0.145	0.014	0.011	0.142
0.8	0.115	0.019	0.017	0.113	0.8	0.125	0.01	0.01	0.125	0.8	0.136	0.011	0.007	0.132
0.9	0.108	0.019	0.016	0.105	0.9	0.12	0.012	0.004	0.112	0.9	0.126	0.006	0.004	0.124
1	0.103	0.021	0.015	0.097	1	0.109	0.006	0.004	0.107	1	0.112	0.003	0.004	0.113
1.1	0.094	0.015	0.014	0.093	1.1	0.098	0.004	0.004	0.098	1.1				
1.2	0.081	0.01	0.013	0.084	1.2					1.2				

Cuadro N° 5.6. Ensayo de Canaleta 03, modelamiento.

Modelado del ensayo de disposición en Canaleta					
Muestra :		CH01			
N° Ensayo :		3			
N° Capa :		7			
Cs (%) :		56			
rs (Pa) :		13			
rm (Pa) :		10.9			
Long. Horizontal (m)	Altura (m)	$\Delta H 1^\circ \text{ y } 2^\circ$	$\Delta(50\text{Pa})$	Hm (m)	
0	0.203	0.016	0.016	0.203	
0.1	0.193	0.012	0.012	0.193	
0.2	0.186	0.009	0.011	0.188	
0.3	0.1795	0.0065	0.009	0.182	
0.4	0.175	0.009	0.009	0.175	
0.5	0.166	0.005	0.002	0.163	
0.6	0.155	0.004	0.002	0.153	
0.7	0.147	0.002			
0.8					

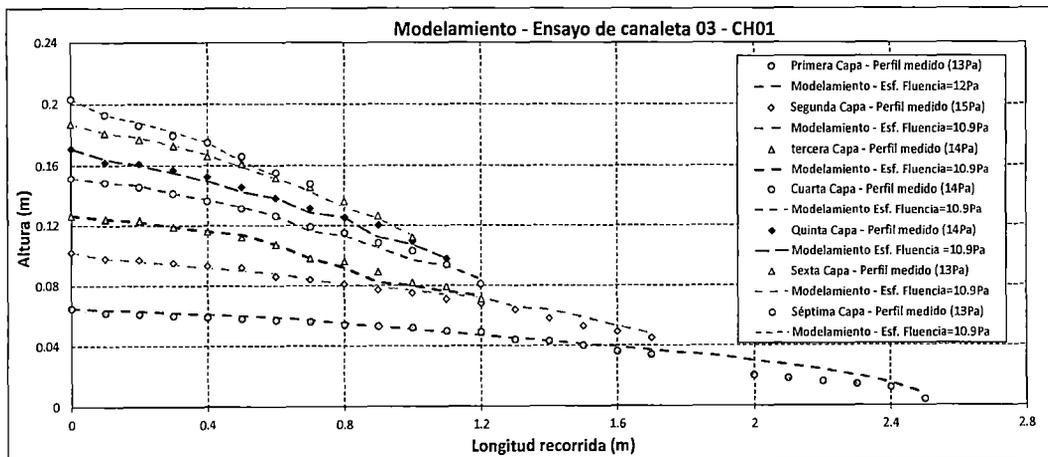


Figura N° 5.7. Perfiles medidos y modelados, ensayo 03. Fuente, Elaboración propia.

5.1.2 Modelamiento del ensayo de disposición – Muestra MC01.

Modelamiento - Ensayo de canaleta 01.

En el Cuadro 5.7 se muestran el perfil medido (columna de color negro) y el resultante del proceso de modelamiento (columna de color rojo). En la Figura N° 5.8 se grafica tanto los perfiles reales como los modelados.

Cuadro N° 5.7. Ensayo de Canaleta 01, modelamiento.

Modelamiento del ensayo de disposición en Canaleta		
Muestra :	MC01	
N° Ensayo :	1	
N° Capa :	Única	
Cs (%) :	72	
τ_s (Pa) :	38	
τ_m (Pa) :	27	
Long. Horiz. (m)	Altura (m)	Hm (m)
0	0.07	0.07
0.1		0.068
0.2		0.066
0.3	0.061	0.063
0.4		0.06
0.5		0.057
0.6	0.052	0.054
0.7		0.051
0.8		0.048
0.9	0.042	0.045
1		0.041
1.1		0.037
1.2	0.029	0.033
1.3		0.028
1.4		0.022
1.5	0.018	0.014
1.6		0.007
1.7		0.000
1.8	0.01	0
1.9		
2		

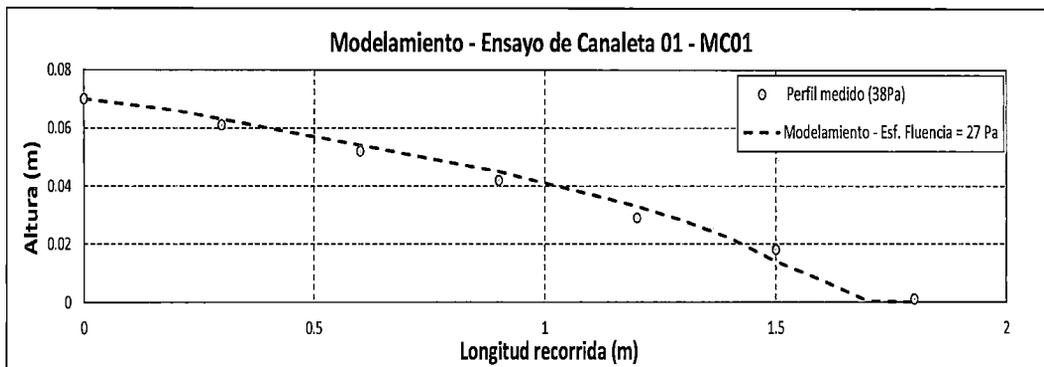


Figura N° 5.8. Perfiles medidos y modelados, ensayo 01. Fuente, Elaboración propia.

Modelamiento - Ensayo de canaleta 02.

En el Cuadro N° 5.8 se muestran el perfil medido (columna de color negro) y el resultante del proceso de modelamiento (columna de color rojo). En la Figura N° 5.9 se grafica tanto los perfiles reales como los modelados.

Cuadro N° 5.8. Ensayo de Canaleta 02, modelamiento.

Modelamiento del ensayo de disposición en Canaleta		
Muestra	: MCO1	
N° Ensayo	: 2	
N° Capa	: Única	
Cs (%)	: 70	
τ_s (Pa)	: 21	
τ_m (Pa)	: 18	
Long. Horiz. (m)	Altura (m)	Hm (m)
0	0.058	0.058
0.1		0.056
0.2		0.054
0.3	0.051	0.052
0.4		0.05
0.5		0.048
0.6	0.042	0.046
0.7		0.044
0.8		0.042
0.9	0.035	0.039
1		0.036
1.1		0.033
1.2	0.028	0.03
1.3		0.026
1.4		0.022
1.5	0.017	0.017
1.6		0.009
1.7		0.001
1.8	0.001	0
1.9		
2		

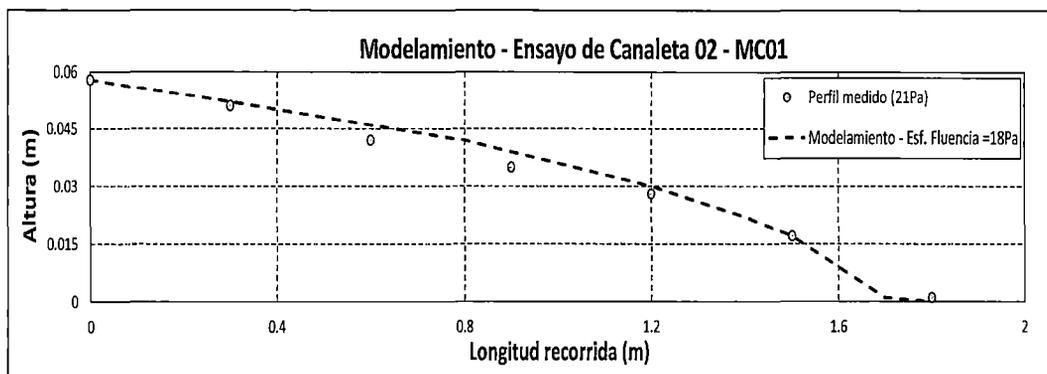


Figura N° 5.9. Perfiles medidos y modelados, ensayo 02. Fuente Elaboración propia.

Modelamiento - Ensayo de canaleta 03.

En el Cuadro 5.9 se muestran el perfil medido (columna de color negro) y el resultante del proceso de modelamiento (columna de color rojo). En la Figura N° 5.10 se grafica tanto los perfiles reales como los modelados.

Cuadro N° 5.9. Ensayo de Canaleta 03, modelamiento.

Modelamiento del ensayo de disposición en Canaleta		
Muestra	: MC01	
N° Ensayo	: 3	
N° Capa	: Única	
Cs (%)	: 68	
τ_s (Pa)	: 13	
τ_m (Pa)	: 11.5	
Long. Horiz. (m)	Altura (m)	Hm (m)
0	0.055	0.055
0.1		0.054
0.2		0.053
0.3	0.05	0.052
0.4		0.051
0.5		0.05
0.6	0.042	0.049
0.7		0.048
0.8		0.047
0.9	0.038	0.045
1		0.043
1.1		0.041
1.2	0.037	0.039
1.3		0.037
1.4		0.035
1.5	0.03	0.033
1.6		0.031
1.7		0.029
1.8	0.018	0.027
1.9		0.024
2		0.021
2.1		0.018
2.2	0.007	0.014
2.3		0.008
2.4		0.002

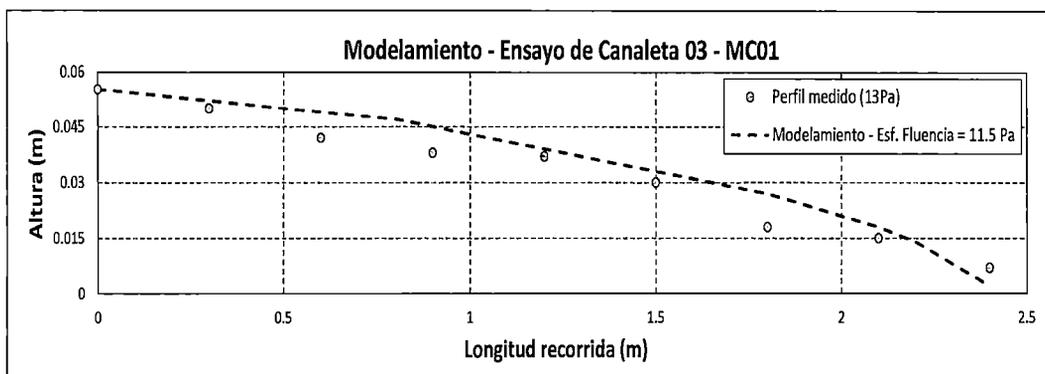


Figura N° 5.10. Perfiles medidos y modelados, ensayo 03. Fuente Elaboración propia.

5.1.3 Modelamiento del ensayo de disposición – Muestra MC02.

Modelamiento - Ensayo de canaleta 01.

En el Cuadro N° 5.10 se muestran el perfil medido (columna de color negro) y el resultante del proceso de modelamiento (columna de color rojo). En la Figura N° 5.11 se grafican tanto los perfiles reales como los modelados.

Cuadro N° 5.10. Ensayo de Canaleta 01 – MC02, modelamiento.

Modelamiento del ensayo de disposición en Canaleta		
Muestra	:	MC02
N° Ensayo	:	1
N° Capa	:	Única
Cs (%)	:	71
τ_s (Pa)	:	68
τ_m (Pa)	:	40
Long. Horiz. (m)	Altura (m)	Hm (m)
0	0.082	0.082
0.1		0.079
0.2		0.076
0.3	0.072	0.073
0.4		0.069
0.5		0.065
0.6	0.065	0.061
0.7		0.057
0.8		0.053
0.9	0.046	0.048
1		0.043
1.1		0.037
1.2	0.03	0.03
1.3		0.021
1.4		0.01
1.5	0	0

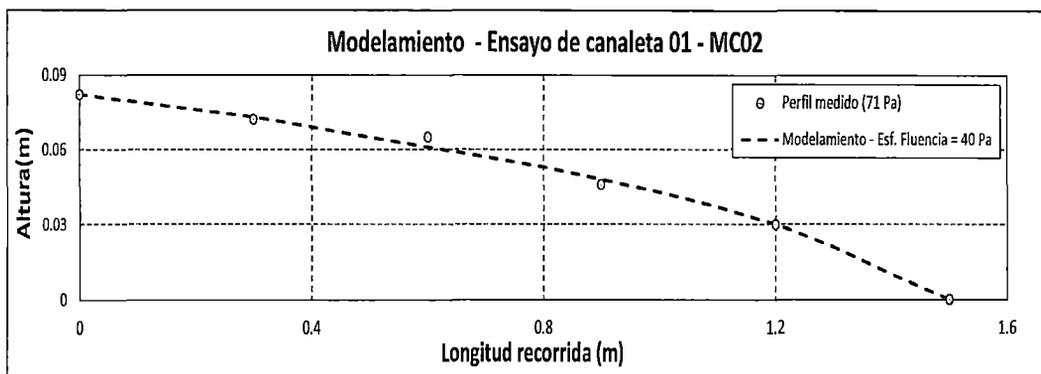


Figura N° 5.11. Perfiles medidos y modelados, ensayo 01 – MC02. Fuente Elaboración propia.

Modelamiento - Ensayo de canaleta 02.

En el Cuadro 5.11 se muestran el perfil medido (columna de color negro) y el resultante del proceso de modelamiento (columna de color rojo). En la Figura N° 5.12 se grafica tanto los perfiles reales como los modelados.

Cuadro N° 5.11. Ensayo de Canaleta 02 – MC02, modelamiento.

Modelamiento del ensayo de disposición en Canaleta		
Muestra	: MC02	
N° Ensayo	: 2	
N° Capa	: Única	
Cs (%)	: 68	
τ_s (Pa)	: 28.5	
τ_m (Pa)	: 20	
Long. Horiz. (m)	Altura (m)	Hm (m)
0	0.066	0.066
0.1		0.064
0.2		0.062
0.3	0.063	0.06
0.4		0.058
0.5		0.056
0.6	0.06	0.054
0.7		0.052
0.8		0.05
0.9	0.052	0.047
1		0.044
1.1		0.041
1.2	0.043	0.038
1.3		0.035
1.4		0.031
1.5	0.024	0.027
1.6		0.022
1.7		0.016
1.8	0.005	0.005

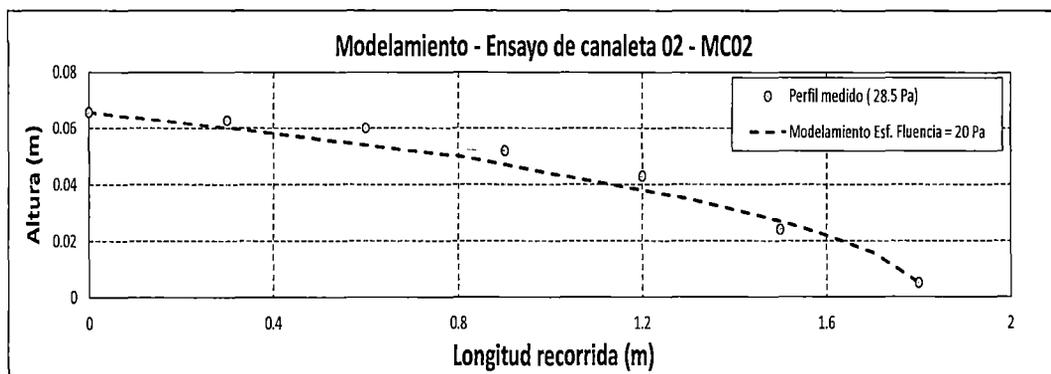


Figura N° 5.12. Perfiles medidos y modelados, ensayo 02 – MC02.

Modelamiento - Ensayo de canaleta 03.

En el Cuadro N° 5.12 se muestran el perfil medido (columna de color negro) y el resultante del proceso de modelamiento (columna de color rojo). En la Figura N° 5.13 se grafica tanto los perfiles reales como los modelados.

Cuadro N° 5.12. Ensayo de Canaleta 03 – MC02, modelamiento

Modelamiento del ensayo de disposición en Canaleta		
Muestra	: MC02	
N° Ensayo	: 3	
N° Capa	: Única	
Cs (%)	: 65	
τ_s (Pa)	: 14	
τ_m (Pa)	: 12	
Long. Horiz. (m)	Altura (m)	Hm (m)
0	0.05	0.05
0.1		0.048
0.2		0.046
0.3	0.045	0.044
0.4		0.042
0.5		0.04
0.6	0.042	0.038
0.7		0.036
0.8		0.034
0.9	0.035	0.032
1		0.03
1.1		0.027
1.2	0.028	0.024
1.3		0.021
1.4		0.017
1.5	0.015	0.012
1.6		0.002
1.7		0.000
1.8	0.003	0.000

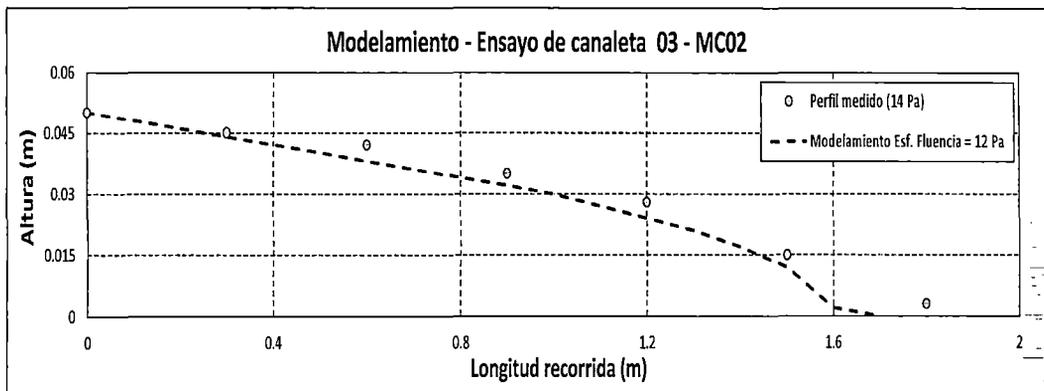


Figura N° 5.13. Perfiles medidos y modelados, ensayo 03 – MC02. Fuente Elaboración propia.

5.1.4 Modelamiento del ensayo de disposición – Muestra MC03.

Modelamiento - Ensayo de canaleta 01.

En el Cuadro N° 5.13 se muestran el perfil medido (columna de color negro) y el resultante del proceso de modelamiento (columna de color rojo). En la Figura N° 5.14 se presenta tanto los perfiles reales como los modelados.

Cuadro N° 5.13. Ensayo de Canaleta 01 – MC03, modelamiento.

Modelamiento del ensayo de disposición en Canaleta		
Muestra	: MC03	
N° Ensayo	: 1	
N° Capa	: Única	
Cs (%)	: 64	
τ_s (Pa)	: 34	
τ_m (Pa)	: 25	
Long. Horiz. (m)	Altura (m)	Hm (m)
0	0.077	0.077
0.1		0.075
0.2		0.073
0.3	0.072	0.071
0.4		0.068
0.5		0.065
0.6	0.063	0.062
0.7		0.059
0.8		0.056
0.9	0.055	0.053
1		0.05
1.1		0.047
1.2	0.05	0.043
1.3		0.039
1.4		0.035
1.5	0.033	0.03
1.6		0.024
1.7		0.016
1.8	0	0.001
1.9		
2		

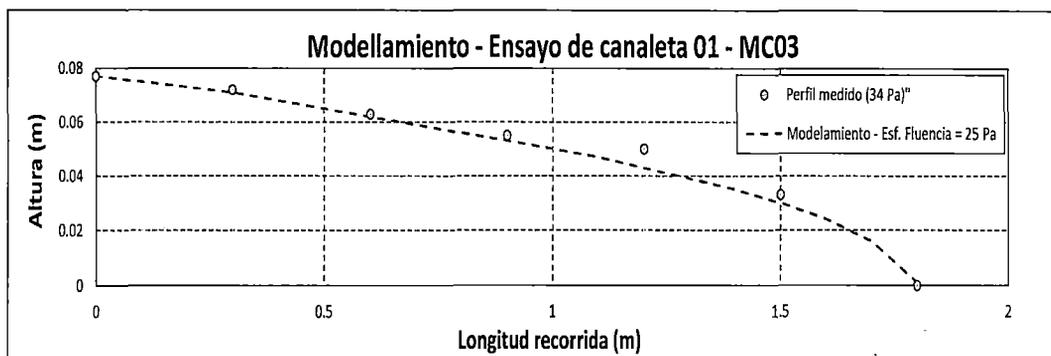


Figura N° 5.14. Perfiles medidos y modelados, ensayo 01 – MC03. Fuente Elaboración propia.

Modelamiento - Ensayo de canaleta 02.

En el Cuadro N° 5.14 se muestran el perfil medido (columna de color negro) y el resultante del proceso de modelamiento (columna de color rojo). En la Figura N° 5.15 se grafican tanto los perfiles reales como los modelados.

Cuadro N° 5.14. Ensayo de Canaleta 02 – MC03, modelamiento.

Modelamiento del ensayo de disposición en Canaleta		
Muestra	: MC03	
N° Ensayo	: 2	
N° Capa	: Única	
Cs (%)	: 60	
τ_s (Pa)	: 24	
τ_m (Pa)	: 20	
Long. Horiz. (m)	Altura (m)	Hm (m)
0	0.072	0.072
0.1		0.07
0.2		0.068
0.3	0.065	0.066
0.4		0.064
0.5		0.062
0.6	0.06	0.06
0.7		0.058
0.8		0.055
0.9	0.056	0.052
1		0.049
1.1		0.046
1.2	0.05	0.043
1.3		0.04
1.4		0.036
1.5	0.04	0.032
1.6		0.027
1.7		0.022
1.8	0.01	0.015
1.9		0.008
2		0.001

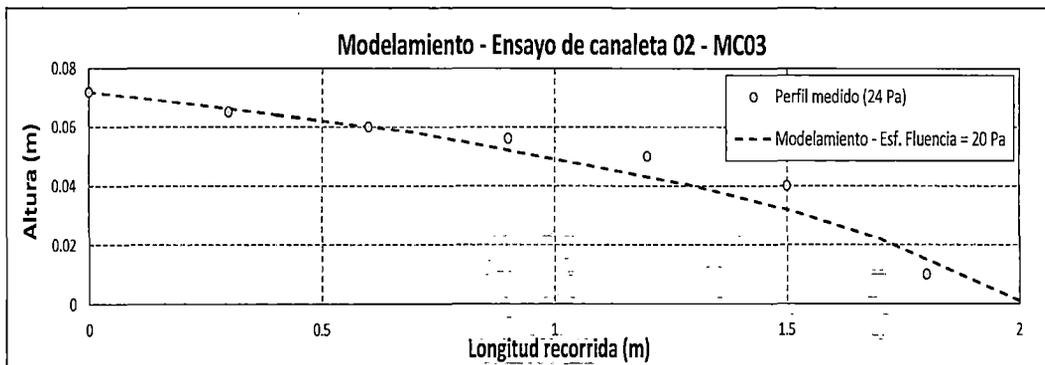


Figura N° 5.15. Perfiles medidos y modelados, ensayo 02 – MC03. Fuente Elaboración propia.

Modelamiento - Ensayo de canaleta 03.

En el Cuadro N° 5.15 se muestran el perfil medido (columna de color negro) y el resultante del proceso de modelamiento (columna de color rojo). En la Figura N° 5.16 se grafica tanto los perfiles reales como los modelados.

Cuadro N° 5.15. Ensayo de Canaleta 03 – MC03, modelamiento.

Modelamiento del ensayo de disposición en Canaleta		
Muestra	: MC03	
N° Ensayo	: 3	
N° Capa	: Única	
Cs (%)	: 58	
τ_s (Pa)	: 6	
τ_m (Pa)	: 15	
Long. Horiz. (m)	Altura (m)	Hm (m)
0	0.065	0.065
0.1		0.063
0.2		0.061
0.3	0.06	0.059
0.4		0.057
0.5		0.055
0.6	0.055	0.053
0.7		0.051
0.8		0.049
0.9	0.05	0.047
1		0.045
1.1		0.043
1.2	0.042	0.04
1.3		0.037
1.4		0.034
1.5	0.032	0.031
1.6		0.027
1.7		0.023
1.8	0.008	0.018
1.9		0.011
2		0.001
2.1	0	0

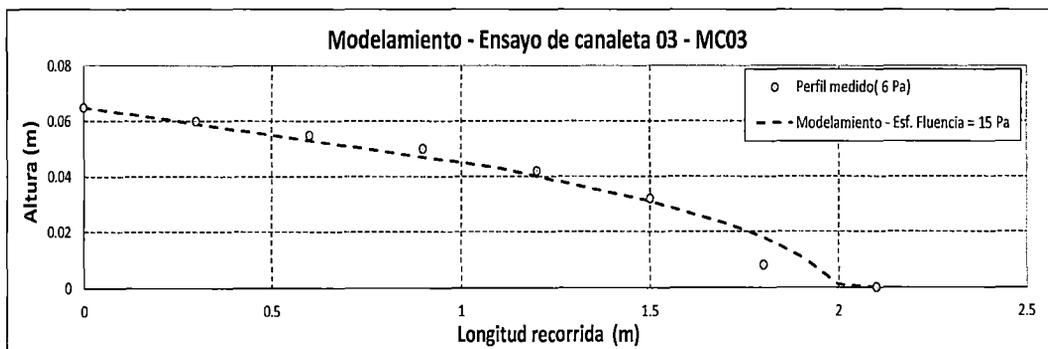


Figura N° 5.16. Perfiles medidos y modelados, ensayo 03 – MC03. Fuente Elaboración propia.

5.1.5 Modelamiento del ensayo de disposición – Muestra MZ01.

Modelamiento - Ensayo de canaleta 01.

En el Cuadro N° 5.16 se muestran el perfil medido (columna de color negro) y el resultante del proceso de modelamiento (columna de color rojo). En la Figura N° 5.17 se grafica tanto los perfiles reales como los modelados.

Cuadro N° 5.16. Ensayo de Canaleta 01 – MZ01, modelamiento.

Modelado del ensayo de disposición en Canaleta							
Muestra : MZ01							
N° Ensayo : 1							
N° Capa : 1		N° Capa : 2					
Cs (%) : 75.9		Cs (%) : 76.1					
τs (Pa) : 87		τs (Pa) : 93					
τm (Pa) : 80		τm (Pa) : 86					
Long. Horiz. (m)	Altura (m)	Hm (m)	Long. Horiz. (m)	Altura (m)	$\Delta H 1^\circ \vee 2^\circ$	$\Delta(86Pa)$	Hm (m)
0	0.115	0.115	0	0.188	0.073	0.073	0.188
0.1	0.108	0.111	0.1	0.174	0.066	0.071	0.179
0.2	0.1	0.107	0.2	0.158	0.058	0.069	0.169
0.3	0.095	0.102	0.3	0.155	0.06	0.067	0.162
0.4	0.09	0.097	0.4	0.151	0.061	0.065	0.155
0.5	0.085	0.092	0.5	0.137	0.052	0.052	0.137
0.6	0.079	0.087	0.6	0.12	0.041	0.048	0.127
0.7	0.073	0.082	0.7	0.107	0.034	0.043	0.116
0.8	0.065	0.076	0.8	0.094	0.029	0.03	0.095
0.9	0.061	0.07	0.9	0.068	0.007	0.015	0.076
1	0.057	0.063	1				
1.1	0.048	0.056	1.1				
1.2	0.045	0.048	1.2				
1.3	0.034	0.038	1.3				
1.4	0.019	0.029	1.4				

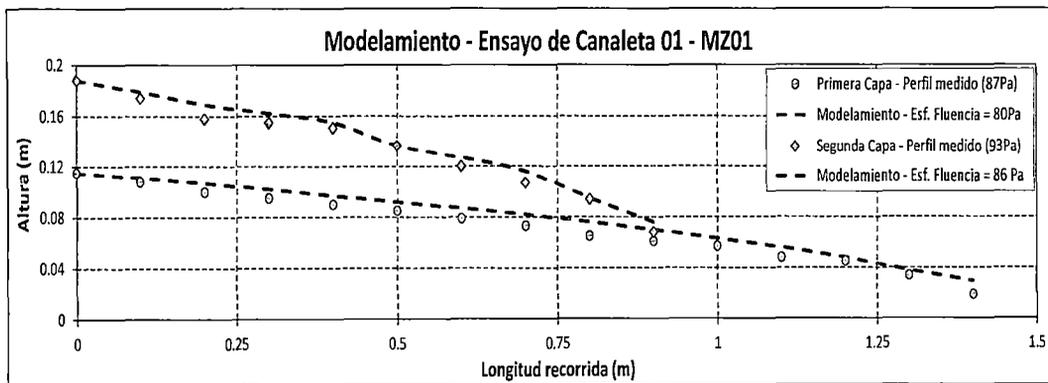


Figura N° 5.17. Perfiles medidos y modelados, ensayo 01 – MZ01. Fuente Elaboración propia.

Modelamiento - Ensayo de canaleta 02.

En el Cuadro N° 5.17 se muestran el perfil medido (columnas de color negro) y el resultante del proceso de modelamiento (columnas de color rojo). En la Figura N° 5.18 se grafica tanto los perfiles reales como los modelados.

Cuadro N° 5.17. Ensayo de Canaleta 02 – MZ01, modelamiento.

Modelado del ensayo de disposición en Canaleta									
Muestra	: MZ01								
N° Ensayo	: 2								
N° Capa	: 1				N° Capa	: 2			
Cs (%)	: 74.5				Cs (%)	: 74.6			
τ_s (Pa)	: 47				τ_s (Pa)	: 49			
τ_m (Pa)	: 44				τ_m (Pa)	: 46			
Long. Horiz. (m)	Altura (m)	Hm (m)	Long. Horiz. (m)	Altura (m)	$\Delta H 1^\circ \text{ y } 2^\circ$	$\Delta(46\text{Pa})$	Hm (m)		
0	0.07	0.07	0	0.112	0.042	0.042	0.112		
0.1	0.064	0.066	0.1	0.102	0.038	0.04	0.104		
0.2	0.06	0.062	0.2	0.095	0.035	0.038	0.098		
0.3	0.057	0.058	0.3	0.094	0.037	0.035	0.092		
0.4	0.055	0.054	0.4	0.083	0.028	0.032	0.087		
0.5	0.051	0.049	0.5	0.073	0.022	0.028	0.079		
0.6	0.046	0.044	0.6	0.067	0.021	0.025	0.071		
0.7	0.041	0.038	0.7	0.051	0.01	0.008	0.049		
0.8	0.033	0.031	0.8						
0.9	0.013	0.023	0.9						
1	0.007	0.009	1						

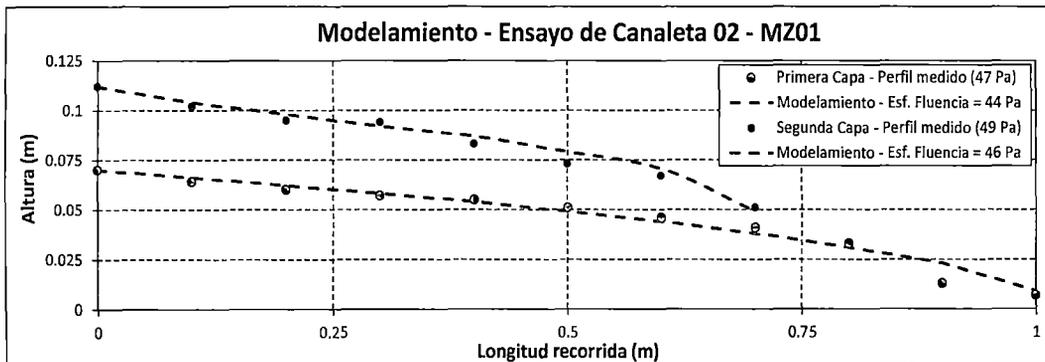


Figura N° 5.18. Perfiles medidos y modelados, ensayo 02 – MZ01. Fuente Elaboración propia.

5.2 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO.

El trabajo de modelamiento de los ensayos realizados sobre diferentes muestras indica que es posible emplear el modelo numérico desarrollado en esta tesis para la simulación del proceso de disposición de relaves espesados.

Puede observarse en cada uno de los procesos de modelamiento el alto grado de concordancia entre los perfiles reales y los generados por el modelo, este

hecho corroborado en distintos tipos de muestras con diferentes características, a distintos niveles de contenidos de sólidos y en diferentes ensayos valida su uso para estimaciones en depósitos reales.

Sin embargo, antes de extrapolar su uso a condiciones reales en campo el modelo propuesto requiere de calibración, principalmente en el esfuerzo de fluencia, para capturar el perfil real que se desarrollaría. Este trabajo de calibración que básicamente consiste en corregir el valor de esfuerzo de fluencia a ser empleado se realizará mediante los ensayos de disposición en canaleta y el modelamiento numérico, tal y como lo muestra esta tesis.

5.3 CORRECCIÓN DEL ESFUERZO DE FLUENCIA

En esta sección se presenta la relación existente entre los valores de esfuerzo de fluencia medidos en el viscosímetro y el de ajuste obtenido en el trabajo de modelado.

El modelamiento de los ensayos de canaleta muestra que los valores de esfuerzo de fluencia que proveen la correcta simulación matemática de la disposición de relaves espesados discrepan de los medidos sobre las mismas muestras mediante el método de veleta. Es decir los valores de esfuerzo de fluencia medidos requieren ser corregidos previamente a su uso en simulaciones bajo el modelo matemático. Los resultados del presente trabajo corroboran lo encontrado anteriormente por Henríquez et. al en 2009.

De acuerdo a los resultados obtenidos al procesar los ensayos con el modelo numérico, el grado de corrección necesario varía con el cambio en la consistencia de la muestra, la cual es representada por el contenido de sólidos (también podría usarse el contenido humedad).

Basado en lo anterior se tratará de encontrar y presentar una relación de corrección dependiente del contenido de sólidos del relave.

5.3.1 Corrección del esfuerzo de fluencia, muestra CH01.

En los cuadros: Cuadro N° 5.18, Cuadro N° 5.19 y Cuadro N° 5.20 se presentan los esfuerzos de fluencia medidos (con el método de veleta) y los obtenidos del modelamiento numérico, para cada ensayo respectivamente, así también un pequeño análisis de la diferencia de estos esfuerzos es mostrada:

Cuadro N° 5.18. Ensayo de Canaleta 01, resumen del proceso de modelamiento.

Ensayo de Canaleta 01 - Muestra CH01 (Cs =64%)				
Capa	τ_s medido (Pa)	τ_s modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
1	60	44	16	27%
2	66	50	16	24%
3	64	45	19	30%
Prom.	63.3	46.3	17.0	27%

Cuadro N° 5.19. Ensayo de Canaleta 02, resumen del proceso de modelamiento.

Ensayo de Canaleta 02 - Muestra CH01 (Cs=61%)				
Capa	τ_s medido (Pa)	τ_s modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
1	33	18	15	45%
2	27	23	4	15%
3	33	18	15	45%
4	33	17	16	48%
Prom.	33.0	17.7	15.3	46%

En los resultados del ensayo de canaleta 02, la segunda capa presenta una diferencia que no guarda relación con lo encontrado en las demás capas, en la tabla puede observarse que el valor medido de esfuerzo de fluencia es bastante menor al obtenido en las otras capas y por el contrario el esfuerzo de fluencia en el modelo se ubica en el rango del resto de capas. Por lo cual para este ensayo el cálculo de los valores promedio no se tomará en cuenta la segunda capa.

Cuadro N° 5.20. Ensayo de Canaleta 03, resumen del proceso de modelamiento.

Ensayo de Canaleta 03 - Muestra CH01 (Cs=56%)				
Capa	τ_s medido (Pa)	τ_s modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
1	13	12	1	8%
2	15	10.9	4.1	27%
3	14	10.9	3.1	22%
4	14	10.9	3.1	22%
5	14	10.9	3.1	22%
6	13	10.9	2.1	16%
7	13	10.9	2.1	16%
Prom	13.7	11.1	2.7	19%

Las diferencias encontradas entre los esfuerzos de fluencia son más o menos constantes para cada ensayo, por lo cual es adecuado asumir el valor

promedio como representativo de cada ensayo, esto se presenta resumido en el Cuadro N° 5.21:

Cuadro N° 5.21. Valores promedio del esfuerzo de fluencia, muestra CH01

Cs	τ_s - Medido (Pa)	τ_s Modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
64	63.3	46.3	17.0	27%
61	33.0	17.7	15.3	46%
56	13.7	11.1	2.7	19%

La diferencia entre los esfuerzos de fluencia será entonces tomada como la corrección necesaria de aplicar a los esfuerzos de fluencia medidos (veleta) para generar los esfuerzos a ser usados en las simulaciones a escala real. Entonces podemos plantear:

$$\tau_{s,medido} - corrección = \tau_{s,modelo}$$

Empleando los resultados obtenidos del procesamiento de los tres ensayos de canaleta realizados para la muestra CH01, podemos graficar las curvas de ajuste correspondientes para estimar la corrección aplicable a cualquier contenido de sólidos (Cs) dentro del rango de Cs empleados en los ensayos, ver Figura N° 5.19:

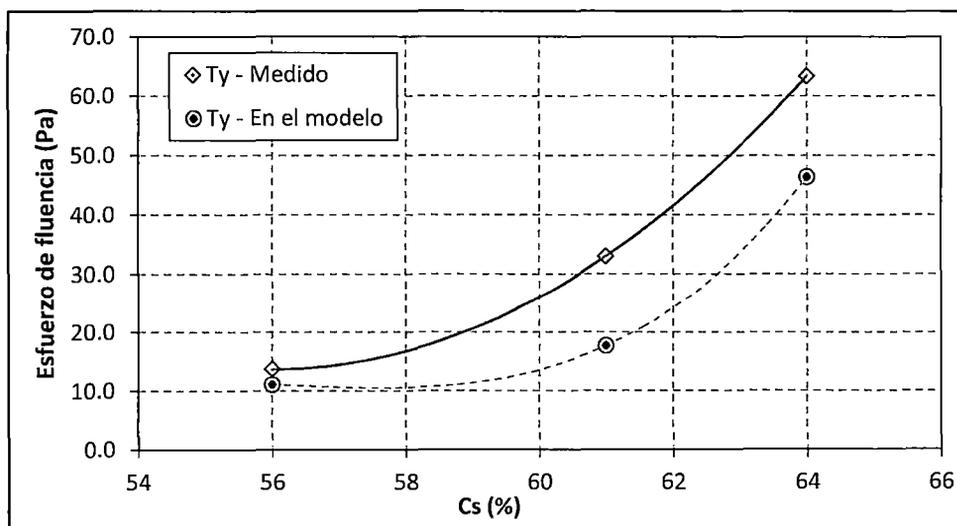


Figura N° 5.19. Comportamiento del esfuerzo de fluencia medido y modelado, variando el contenido de sólidos - muestra CH01. Fuente Elaboración propia.

A partir de la Figura N° 5.19 podría estimarse el valor de esfuerzo de fluencia corregido a cualquier contenido de sólidos, independientemente de haber o no realizado el ensayo de canaleta para ese valor de contenido de sólidos.

5.3.2 Corrección del esfuerzo de fluencia, muestra MC01.

En los cuadros: Cuadro N° 5.22, Cuadro N° 5.23 y Cuadro N° 5.24 se presentan los esfuerzos de fluencia medidos (con el método de veleta) y los obtenidos del modelamiento numérico, para cada ensayo respectivamente, así también un pequeño análisis de la diferencia que entre ellos existe es mostrada:

Cuadro N° 5.22. Ensayo de Canaleta 01, resumen del proceso de modelamiento.

Ensayo de Canaleta 01 - Muestra MC01 (Cs =72%)				
Capa	τ_s medido (Pa)	τ_s modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
Única	38	27	11	29%
Prom.	38	27	11.0	29%

Cuadro N° 5.23. Ensayo de Canaleta 02, resumen del proceso de modelamiento.

Ensayo de Canaleta 02 - Muestra MC01 (Cs =70%)				
Capa	τ_s medido (Pa)	τ_s modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
Única	21	18	3	14%
Prom.	21	18	3.0	14%

Cuadro N° 5.24. Ensayo de Canaleta 03, resumen del proceso de modelamiento. Fuente, Elaboración propia

Ensayo de Canaleta 03 - Muestra MC01 (Cs =68%)				
Capa	τ_s medido (Pa)	τ_s modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
Única	13	11.5	1.5	11.5%
Prom.	13	11.5	1.5	11.5%

Con la información anterior se puede generar el Cuadro N° 5.25 resumiendo los tres ensayos realizados:

Cuadro N° 5.25. Valores promedio del esfuerzo de fluencia, muestra MC01 Fuente,

Cs	τ_s - Medido (Pa)	τ_s Modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
72	38	27	11	29%
70	21	18	3	14%
68	13	11.5	1.5	11.5%

La diferencia entre los esfuerzos de fluencia será entonces tomada como la corrección necesaria de aplicar a los esfuerzos de fluencia medidos (veleta) para generar los esfuerzos a ser usados en las simulaciones a escala real. Entonces podemos plantear:

$$\tau_{s,medido} - corrección = \tau_{s,modelo}$$

Empleando los resultados obtenidos del procesamiento de los tres ensayos de canaleta realizados para la muestra MC01, podemos graficar las curvas de ajuste correspondientes para estimar la corrección aplicable a cualquier contenido de sólidos (Cs) dentro del rango de Cs empleados en los ensayo, ver Figura N° 5.20:

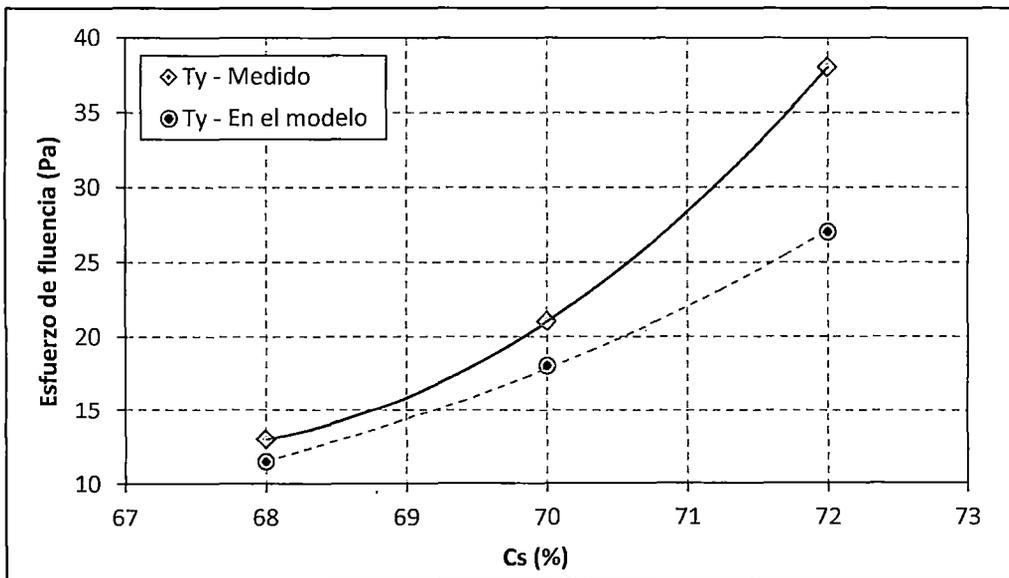


Figura N° 5.20. Comportamiento del esfuerzo de fluencia medido y modelado, variando el contenido de sólidos - muestra MC01. Fuente Elaboración propia.

5.3.3 Corrección del esfuerzo de fluencia, muestra MC02.

En los cuadros: Cuadro N° 5.26, Cuadro N° 5.28 y Cuadro N° 5.28 se presentan los esfuerzos de fluencia medidos (con el método de veleta) y los obtenidos del modelamiento numérico, para cada ensayo respectivamente, así también un pequeño análisis de la diferencia que entre ellos existe es mostrada:

Cuadro N° 5.26. Ensayo de Canaleta 01, resumen del proceso de modelamiento.

Ensayo de Canaleta 01 - Muestra MC02 (Cs = 71%)				
Capa	τ_s medido (Pa)	τ_s modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
Única	71	40	31	44%
Prom.	71	40	31	44%

Cuadro N° 5.27. Ensayo de Canaleta 02, resumen del proceso de modelamiento.

Ensayo de Canaleta 02 - Muestra MC02 (Cs = 68%)				
Capa	τ_s medido (Pa)	τ_s modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
Única	28.5	20	8.5	30%
Prom.	28.5	20	8.5	30%

Cuadro N° 5.28. Ensayo de Canaleta 03, resumen del proceso de modelamiento.

Ensayo de Canaleta 03 - Muestra MC02 (Cs = 65 %)				
Capa	τ_s medido (Pa)	τ_s modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
Única	14	12	2	14%
Prom.	14	12	2	14%

Con la información anterior se puede generar el cuadro Cuadro N° 5.29 resumiendo los tres ensayos realizados:

Cuadro N° 5.29. Valores promedio del esfuerzo de fluencia, muestra MC02

Cs	τ_s - Medido (Pa)	τ_s Modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
71	71	40	31	44%
68	28.5	20	8.5	30%
65	14	12	2	14%

La diferencia entre los esfuerzos de fluencia será entonces tomada como la corrección necesaria de aplicar a los esfuerzos de fluencia medidos para

generar los esfuerzos a ser usados en las simulaciones a escala real. Entonces podemos plantear:

$$\tau_{s,medido} - corrección = \tau_{s,modelo}$$

Empleando los resultados obtenidos del procesamiento de los tres ensayos de canaleta realizados para la muestra MC02, podemos graficar las curvas de ajuste correspondientes para estimar la corrección aplicable a cualquier contenido de sólidos (Cs) dentro del rango de Cs empleados en los ensayos, ver Figura N° 5.21:

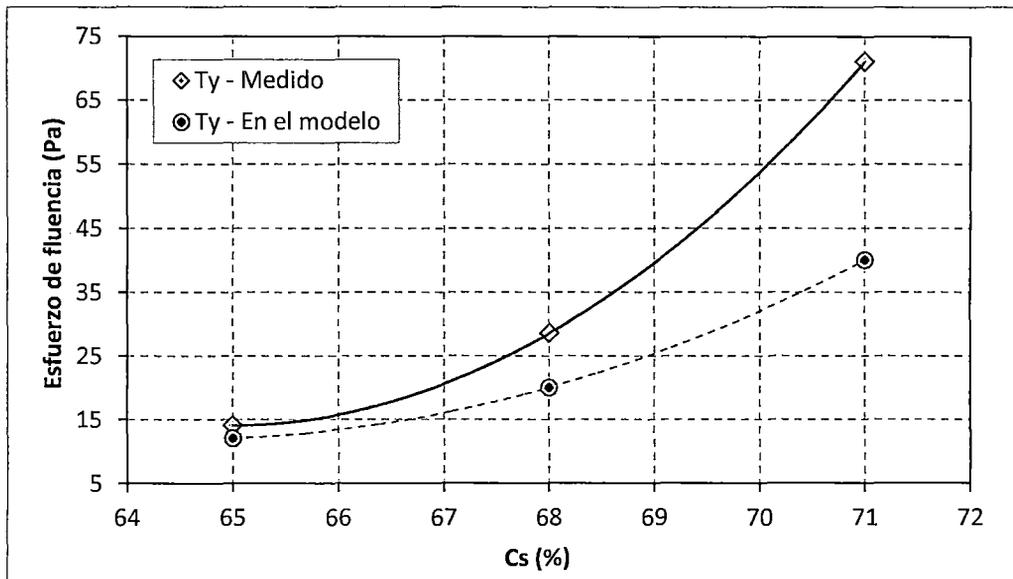


Figura N° 5.21. Comportamiento del esfuerzo de fluencia medido y modelado, variando el contenido de sólidos muestra MC02. Fuente Elaboración propia.

5.3.4 Corrección del esfuerzo de fluencia, muestra MC03.

En los cuadros: Cuadro N° 30, Cuadro N° 31 y Cuadro N° 5.32 se presentan los esfuerzos de fluencia medidos (con el método de veleta) y los obtenidos del modelamiento numérico, para cada ensayo respectivamente, así también un pequeño análisis de la diferencia que entre ellos existe es mostrada:

Cuadro N° 5.30. Ensayo de Canaleta 01, resumen del proceso de modelamiento

Ensayo de Canaleta 01 - Muestra MC03 (Cs = 64%)				
Capa	τ_s medido (Pa)	τ_s modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
Única	34	25	9	26%
Prom.	34	25	9	26%

Cuadro N° 5.31. Ensayo de Canaleta 02, resumen del proceso de modelamiento.

Ensayo de Canaleta 02 - Muestra MC03 (Cs = 60%)				
Capa	τ_s medido (Pa)	τ_s modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
Única	24	20	4	17%
Prom.	24	20	4	17%

Cuadro N° 5.32. Ensayo de Canaleta 03, resumen del proceso de modelamiento.

Ensayo de Canaleta 03 - Muestra MC03 (Cs = 58 %)				
Capa	τ_s medido (Pa)	τ_s modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
Única	6	15	-9	-150%
Prom.	6	15	-9	-150%

Con la información anterior se puede generar el Cuadro N° 5.33 resumiendo los tres ensayos realizados:

Cuadro N° 5.33. Valores promedio del esfuerzo de fluencia, muestra MC03

Cs	τ_s - Medido (Pa)	τ_s Modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
64	34	25	9	26%
60	24	20	4	17%
58	6	15	-9	-150%

La diferencia entre los esfuerzos de fluencia será entonces tomada como la corrección necesaria de aplicar a los esfuerzos de fluencia medidos para generar los esfuerzos a ser usados en las simulaciones a escala real. Entonces podemos plantear:

$$\tau_{s,medido} - \text{corrección} = \tau_{s,modelo}$$

Empleando los resultados obtenidos del procesamiento de los tres ensayos de canaleta realizados para la muestra MC03, podemos graficar las curvas de ajuste correspondientes para estimar la corrección aplicable a cualquier contenido de sólidos (C_s) dentro del rango de los contenidos de sólidos empleados en los ensayo, ver Figura N° 5.22:

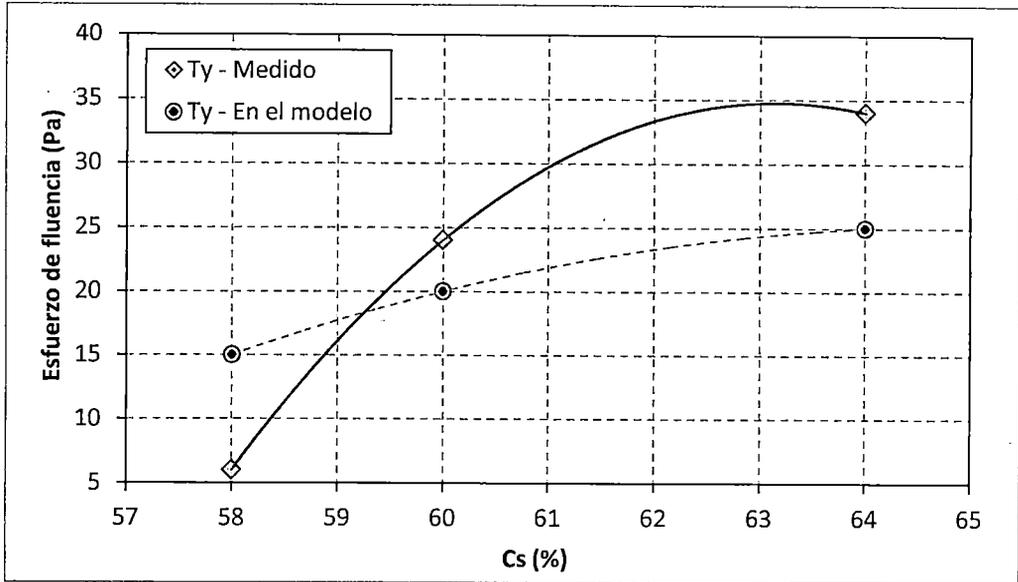


Figura N° 5.22. Comportamiento del esfuerzo de fluencia medido y modelado, variando el contenido de sólidos muestra MC03. Fuente Elaboración propia.

5.3.5 Corrección del esfuerzo de fluencia, muestra MZ01.

En los cuadros: Cuadro N° 5.34 y Cuadro N° 5.35 se presentan los esfuerzos de fluencia medidos (con el método de veleta) y los obtenidos del modelamiento numérico, para cada ensayo respectivamente, así también un pequeño análisis de la diferencia que entre ellos existe es mostrada:

Cuadro N° 5.34. Ensayo de Canaleta 01, resumen del proceso de modelamiento.

Ensayo de Canaleta 01 - Muestra MZ01 ($C_s = 76\%$)				
Capa	τ_s medido (Pa)	τ_s modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
1	87	80	7	8 %
2	93	86	7	7.5 %
Prom.	90	83	7	7.8 %

Cuadro N° 5.35. Ensayo de Canaleta 02, resumen del proceso de modelamiento.

Ensayo de Canaleta 02 - Muestra MZ01 (Cs = 74.5%)				
Capa	τ_s medido (Pa)	τ_s modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
1	47	44	3	6.4 %
2	49	46	3	6.1 %
Prom.	48	45	3	6.3 %

Con la información anterior se puede generar el cuadro Cuadro N°5.36 resumiendo los tres ensayos realizados:

Cuadro N°5.36. Valores promedio del esfuerzo de fluencia, muestra MZ01

Cs	τ_s - Medido (Pa)	τ_s Modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia
76	90	83	7	7.8 %
74.5	48	45	3	6.3 %

La diferencia entre los esfuerzos de fluencia será entonces tomada como la corrección necesaria de aplicar a los esfuerzos de fluencia medidos para generar los esfuerzos a ser usados en las simulaciones a escala real. Entonces podemos plantear:

$$\tau_{s,medido} - \text{corrección} = \tau_{s,modelo}$$

Empleando los resultados obtenidos del procesamiento de los tres ensayos de canaleta realizados para la muestra MC03, podemos graficar las curvas de ajuste correspondientes para estimar la corrección aplicable a cualquier contenido de sólidos (Cs) dentro del rango de los Cs empleados en los ensayos, ver Figura N° 5.23:

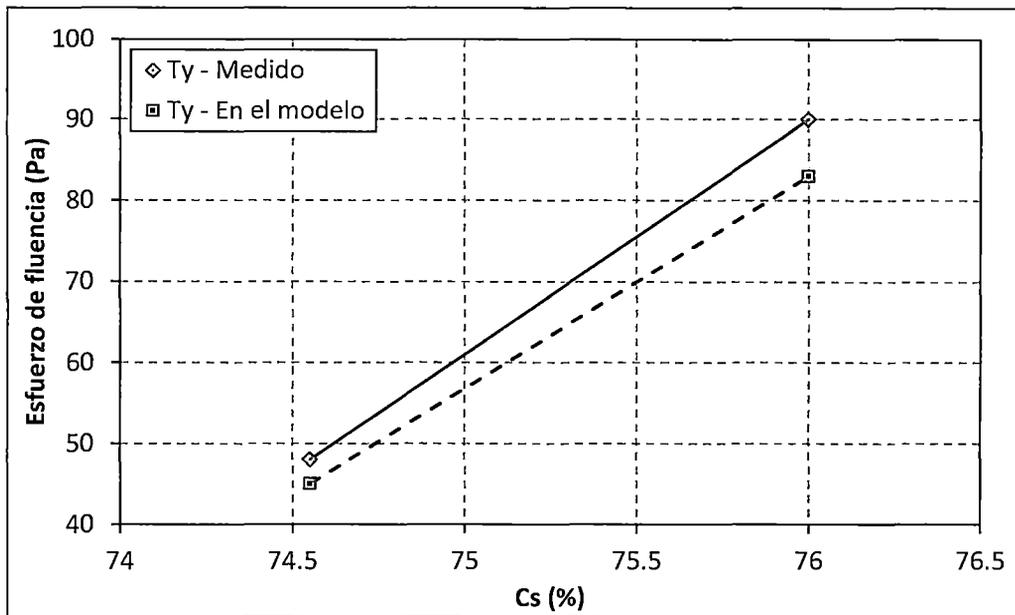


Figura N° 5.23. Comportamiento del esfuerzo de fluencia medido y modelado, variando el contenido de sólidos muestra MC03. Fuente Elaboración propia.

5.4 INTERPRETACIÓN DE LA CORRECCIÓN DEL ESFUERZO DE FLUENCIA.

Hasta ahora en el desarrollo de este capítulo se ha comprobado que: el modelo numérico propuesto es capaz de simular con un alto grado de concordancia el proceso de disposición de los relaves espesados en la Canaleta y que para lograr que el modelo numérico alcance tal grado de concordancia, se requiere de corregir el valor del esfuerzo de fluencia del relave.

Se ha podido observar, en cada una de las muestras analizadas, que la corrección del esfuerzo de fluencia es directamente dependiente del contenido de sólidos, sin embargo aparentemente esta dependencia es única para cada muestra. Es decir que para dos muestras distintas, a un mismo contenido de sólidos, no les correspondería el mismo valor de corrección del esfuerzo de fluencia. Se analizarán en conjunto los esfuerzos de fluencia medidos y modelados de las cinco muestras ensayadas a fin de corroborar la idea anterior. En el Cuadro N° 5.37 se muestra el consolidado del trabajo de corrección del esfuerzo de fluencia de las cinco muestras ensayadas.

Cuadro N° 5.37. Consolidado de los esfuerzos de fluencia medidos y modelados,

Muestra	Cs	τ_s - Medido (Pa)	τ_s Modelo (Pa)	Diferencia (Pa)	% Diferencia	d50 (mm)	% Finos
CH01	64	63.3	46.3	17	27%	0.0228	74.7
	61	33	17.7	15.3	46%		
	56	13.7	11.1	2.7	19%		
MC01	72	38	27	11	29%	0.0635	56.3
	70	21	18	3	14%		
	68	13	11.5	1.5	11.50%		
MC02	71	71	40	31	44%	0.0565	62
	68	28.5	20	8.5	30%		
	65	14	12	2	14%		
MC03	64	34	25	9	26%	0.055	60
	60	24	20	4	17%		
	58	6	15	-9	-150%		
MZ01	76	90	83	7	7.80%	0.057	60.2
	74.5	48	45	3	6.30%		

En la Figura N° 5.24 se muestra el consolidado del trabajo de corrección del esfuerzo de fluencia de las cinco muestras ensayadas:

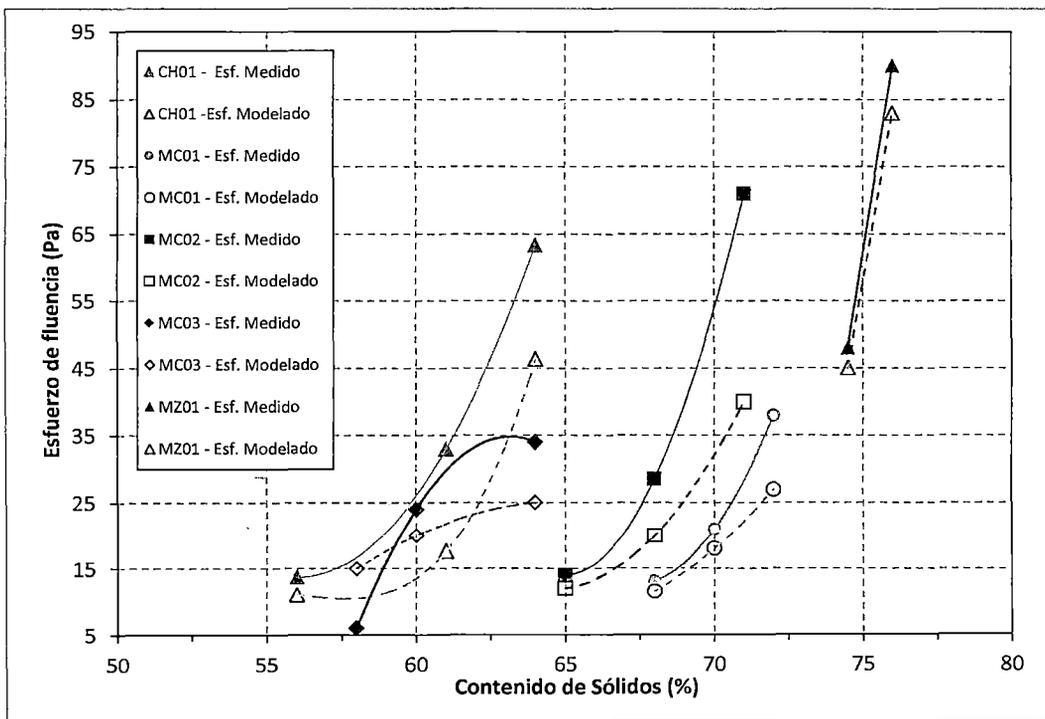


Figura N° 5.24. Consolidado de los esfuerzos de fluencia medidos y modelados.

En las figuras Figura N° 5.25 y Figura N° 5.26 se muestra el comportamiento de la corrección del esfuerzo de fluencia con el d_{50} y el porcentaje de partículas final presentes en cada muestra.

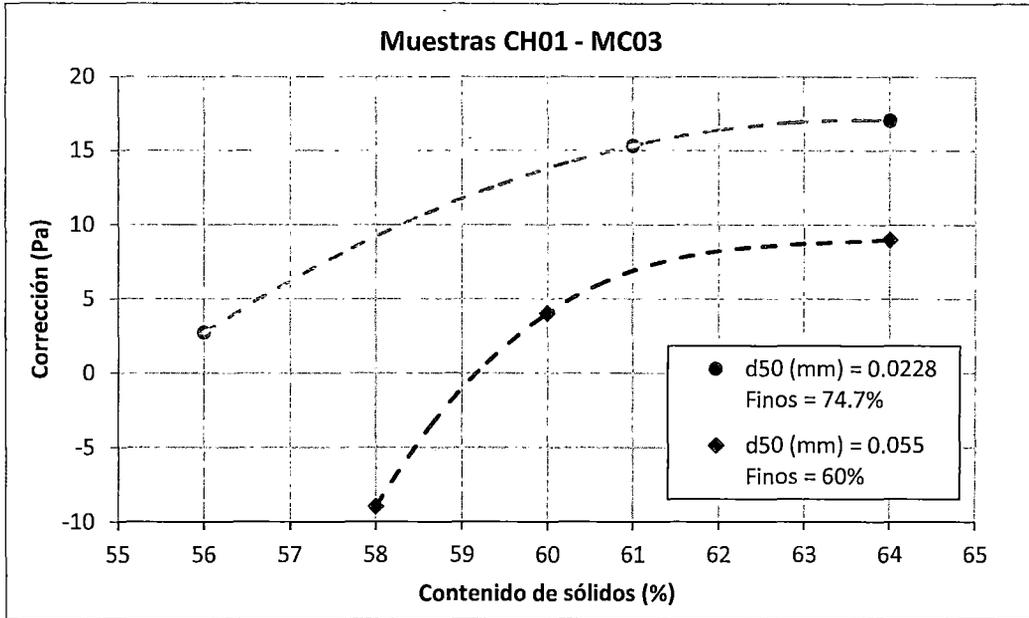


Figura N° 5.25. Comportamiento del esfuerzo de fluencia con el d_{50} y el porcentaje de Finos – Muestras CH01 y MC03. Fuente Elaboración propia.

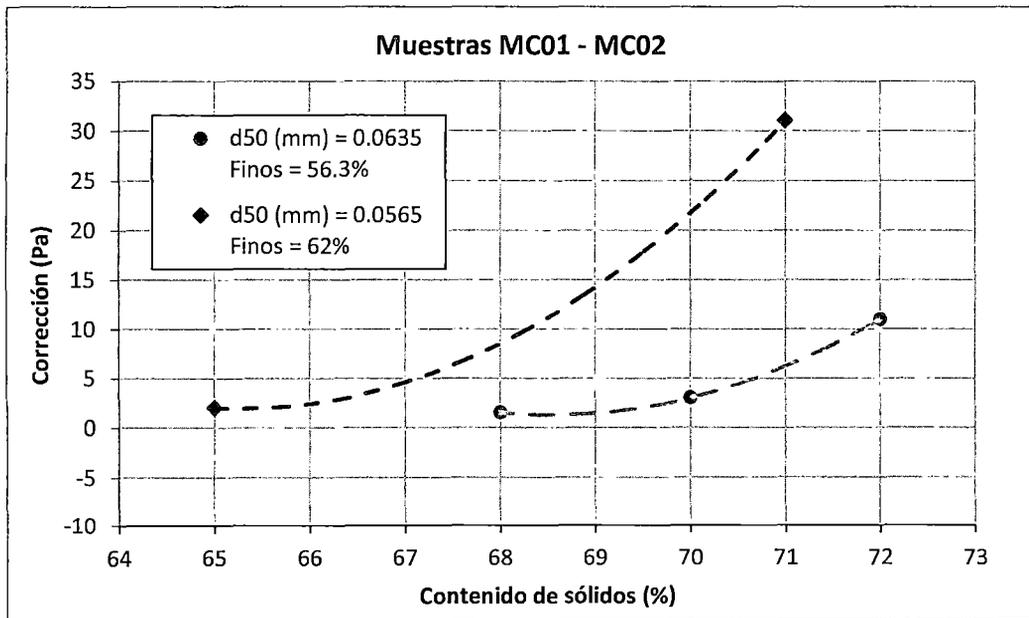


Figura N° 5.26. Comportamiento del esfuerzo de fluencia con el d_{50} y el porcentaje de Finos – Muestras MC01 y MC02. Fuente Elaboración propia.

Del Cuadro N° 5.37 y la Figura N° 5.24 se observa que:

- Las dos muestras CH01 y MC03 han sido ensayadas en el rango de contenido de sólidos de 55 % a 65 % (Figura N° 5.24), sin embargo la

corrección del esfuerzo de fluencia (Cuadro N° 5.37) es marcadamente distinta en cada caso, de igual manera se puede observar que no existe correspondencia al comparar los esfuerzos de fluencia medidos y/o modelados. Otro aspecto interesante es la relación existente encontrada al comparar las granulometrías de los materiales y los valores de corrección de esfuerzo de fluencia, se observa que a mayor contenido de finos y menor valor de "d₅₀" (CH01) los valores de corrección son mayores. Esto puede observarse conjuntamente en la Figura N° 5.24 y el Cuadro N° 5.37.

- Las dos muestras MC01 y MC02 han sido ensayadas en el rango de contenido de sólidos de 65 % a 72.5 % (Figura N° 5.24), sin embargo la corrección del esfuerzo de fluencia (Cuadro N° 5.37) es marcadamente distinta en cada caso, de igual manera se puede observar que no existe correspondencia al comparar los esfuerzos de fluencia medidos y/o modelados. Para este par de muestras se ha encontrado también la relación existente entre las granulometrías de los materiales y los valores de corrección de esfuerzo de fluencia, observándose que a mayor contenido de finos y menor valor de "d₅₀" (MC02) los valores de corrección son mayores. Esto puede observarse conjuntamente en la Figura N° 5.24 y el Cuadro N° 5.37.

- Por último la muestra MZ01 muestra un nivel de corrección bastante bajo al compararlo con las demás muestras, a pesar de ser la muestra que ha sido ensayada con los altos contenidos de sólidos, es más al encontrarse en un rango de contenido de sólidos distinto al de las otras muestras no se pueden realizar comparaciones entre granulometrías y correcciones del esfuerzo de fluencia, ver Figura N° 5.24, Figura N° 5.25 y Figura N° 5.26.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

La presente Tesis abarca el estudio del proceso de disposición de relaves espesados, incidiendo en la interpretación de su esfuerzo de fluencia mediante trabajos de modelamiento numérico asumiendo un enfoque de equilibrio límite para el análisis del estado de equilibrio. Las siguientes conclusiones son producto del análisis de los diferentes ensayos de disposición realizados y su modelamiento numérico.

1. El equipamiento para la realización de los ensayos de canaleta resultó satisfactorio, permitiendo probar de forma exitosa distintos tipos de muestras de relaves espesados y diferentes escenarios de disposición.
2. Se ha comprobado que el modelo numérico propuesto tiene la capacidad de simular la disposición de relaves espesados, mostrando altos grados de concordancia entre los perfiles reales y los generados en el modelo, este hecho valida su uso para estimaciones de la pendiente de disposición bajo condiciones reales de Campo.
3. Los fundamentos teóricos empleados en el desarrollo del presente modelo numérico podrían ser aplicables a condiciones de Campo si se cambian las condiciones de frontera en el modelo y las etapas del análisis de equilibrio.
4. Los resultados del modelamiento numérico realizado, muestra la necesidad de “corregir” los esfuerzos de fluencia (medidos con el método de veleta) con el objetivo de obtener perfiles simulados con un alto grado de concordancia, el porqué de esta corrección podría deberse a los siguientes dos factores:
 - El modelo numérico propuesto busca representar el fenómeno en estudio con la matemática menos exigente, describiéndolo sin embargo correctamente bajo hipótesis y parámetros que son controlables experimentalmente.

- Las simplificaciones asumidas en el análisis del estado de equilibrio para el desarrollo del modelo numérico repercuten en acciones que no son tomadas en cuenta para el análisis, por ejemplo consolidación inicial por peso propio (exudación de agua) y la redistribución de esfuerzos en la masa de relaves ya depositados que afectan su forma final.
5. De acuerdo a los resultados obtenidos, los niveles de corrección del esfuerzo de fluencia son dependientes del contenido de sólidos en peso para cada muestra estudiada. Al punto que los esfuerzos de fluencia medido y del resultado del modelamiento son casi coincidentes para el contenido de sólidos al cual la muestra comienza a segregar (inspección visual) durante la disposición. Para los ensayos realizados en esta tesis los porcentajes máximos de corrección obtenidos han sido:
 - Muestra CH01: 46 %
 - Muestra MC01: 29 %
 - Muestra MC02: 44 %
 - Muestra MC03: 26 %
 - Muestra MZ01: 8.0 %
 6. La corrección del esfuerzo de fluencia de un determinado relave es definido en un rango de contenido de sólidos a partir de una función de ajuste. Por tal motivo en el caso de tener dos relaves con un mismo contenido de sólidos, la corrección correspondiente a una de ellas no puede ser usada ni extrapolada a la otra muestra
 7. Entre dos materiales con contenidos de sólidos similares, el porcentaje de finos y el d_{50} obtenidos de la granulometría nos pueden indicar que muestra requiere mayor corrección del esfuerzo de fluencia. Esto puede ayudar a verificar la validez de los ensayos realizados y los resultados obtenidos.
 8. Aparentemente existe un límite en el esfuerzo de fluencia que puede ser ingresado al modelo numérico ya que a valores muy bajos como por

ejemplo 6 Pa el modelo no es capaz de representar la realidad (ensayo). Esto ha sido observado en el modelamiento de la muestra MC03.

9. El proceso de disposición es un fenómeno natural muy complejo que difícilmente podría ser representado perfectamente por un modelo matemático. El concepto de corrección del esfuerzo de fluencia provee de una solución a este problema asumiendo los fenómenos no capturados por el modelo numérico.

6.1.1 Utilidad y Aplicación de la Presente Investigación en Casos Reales

Durante el desarrollo de esta tesis se ha resaltado el creciente uso de la tecnología de relaves espesados en el país y la importancia de estimar la pendiente de disposición de este material para un diseño seguro de los depósitos que los contienen, en ese sentido esta tesis aporta dos herramientas que permiten abordar el problema de la estimación de la pendiente de disposición.

La primera es el modelo numérico, desarrollado para el entorno de la canaleta de ensayo, el cual permite simular el perfil de los relaves espesados depositados, el cual sería aplicable a condiciones de campo con los siguientes ajustes:

- i. Eliminar las fuerzas debidas a rozamiento en las paredes, ya que solo existiría rozamiento con el suelo/capa subyacente.
- ii. Consideración de la topografía del sitio, para la cual se tendrá que considerar los cambios en la pendiente del terreno.
- iii. Investigación y consideración de los efectos de la fricción y segregación sobre las propiedades del relave y como estos efectos, de ser apreciables, podrían ingresarse al modelo numérico.

La segunda herramienta es el uso de la metodología desarrollada en esta tesis para la corrección del esfuerzo de fluencia, este esfuerzo corregido debería emplearse junto con el modelo numérico modificado según los ajustes sugeridos anteriormente.

Finalmente con la aplicación de los anteriores consideraciones el modelo numérico permitiría lo siguiente:

- Conocer con un aceptable grado de certeza la geometría general del depósito de relaves y su volumen de almacenamiento.
- Conocer la altura de presa necesaria para la contención de los relaves
- Estimación de bordes libres en el contacto presa-relaves.
- Para el caso de depósitos de relaves muy grandes se debe realizar un análisis de estabilidad post-licuación de los relaves depositados (grandes taludes de relaves que pueden fallar y conllevar catástrofes). Para esto la pendiente de disposición es un parámetro de mucha importancia.

6.2 RECOMENDACIONES

Del desarrollo de la presente investigación se puede recomendar para futuros estudios lo siguiente:

1. Los ensayos han sido realizados bajo condiciones de laboratorio, se recomienda realizar ensayos de disposición in situ a gran escala, los cuales tomen en cuenta factores como la topografía del terreno a fin de comprobar la validez de los hallazgos de la presente tesis.
2. Esta tesis consideró la medición del esfuerzo de fluencia por el método de veleta, se recomienda realizar similar estudio tomando en cuenta la medición del esfuerzo de fluencia por la técnica de "slump" ya que esta es de fácil aplicación en Campo.
3. En este estudio se tuvo como limitante la cantidad de muestra disponible, se recomienda que para futuras investigaciones se asegure para cada muestra un peso seco aproximado de 1000 kg.
4. En este estudio se ha considerado las fuerzas externas actuantes sobre relave, sin embargo para afinar el modelo se podrían considerar también las fuerzas internas desarrolladas en el relave durante el proceso de disposición.
5. Se recomienda equipar con instrumentos de medición de succión (tensiómetros) y humedad (sensores de humedad) la canaleta

empleada en esta investigación con la finalidad de generar la curva característica suelo-agua del relave depositado.

6. Se recomienda mucha precisión para la medición del perfil de los relaves depositados, de ser posible considerar el uso de una wincha electrónica, a fin de no disturbar la muestra.
7. Este estudio está orientado a estimar el valor de la pendiente de disposición natural del relave depositado (modelamiento con topografía real y esfuerzo de fluencia corregido). Por tanto se recomienda realizar estudios que validen los resultados de esta investigación empleando el modelo numérico propuesto y la metodología de corrección planteados en esta tesis para estimaciones de la pendiente de disposición en depósitos de relaves.
8. Como se mencionó en el Capítulo 2, es necesario verificar la estabilidad post-sismo de la pendiente de disposición, se recomienda realizar este trabajo en futuros estudios.

BIBLIOGRAFÍA

1. Been, K. y Jefferies, M.G. "A state parameter for sands" *Géotechnique* 35, 1985.
2. Boger D, Scales P.J., Sofra F. "Rheological concepts" *Paste and Thickened Tailings – A guide* Western Australia, Australia, 2002.
3. Bold CMK "Beach characteristics of mine waste tailings, 9171" US Bureau of mines, Estados Unidos, 1988.
4. Boldt, "Beach characteristics of mine waste tailings" US Bureau of mines, Estados Unidos, 1979.
5. Castro, G. y Poulos, S.J. "Factors affecting liquefaction and cyclic mobility" *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1977.
6. Crowder JJ. "Deposition, consolidation and strength of non-plastic tailings paste for surface disposal", PhD Thesis, Toronto, Canadá, 2004
7. Fitton T.G. "Tailings Beach Slope Prediction" PhD Dissertation, RMIT University, Melbourne, Australia, 2007
8. Fitton T.G., Chryss, A.G. y Bhattacharya S.N. "Tailings beach slope prediction: A new rheological method" *Int. J. Surface Mining, Reclamation and Environment*, 2006.
9. Fourie AB. "Beaching and Permeability Properties of Tailings" *Hydraulic Fill Structures*, 1988.
10. Fourie A.B. "Liquefaction potential of surface deposits of high density thickened tailings" *Paste and Thickened Tailings 2006*, Limerick, Irlanda, 2006.

11. Fourie, A. B. y Gawu, S.K.Y., "The validity of laboratory flume data for predicting beach slopes of thickened tailings deposits" Paste 2010, Proceedings of the 13th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Toronto, Canadá, 2010.
12. Fredlund D.G., Stone J. y Stianson J. "Determination of Water Storage and Permeability Function for Oil Sands Tailings" Proceedings of Tailings and Mine Waste 2011, Vancouver, Canada.
13. Henriquez J., Vandervoort A. y Simms P. "Imaging and Modelling of Flows of Gold Paste Tailings During Deposition – Laboratory Study and Field Scale Predictions". Paste 2009, Proceedings of the Twelfth International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Viña del Mar, Chile, 2009.
14. Jefferies, M.G. y Been, K. "Soil Liquefaction, a critical state approach" Taylor and Francis, Londres, Reino Unido, 2006.
15. Krizek Raymond. "Slurries in geotechnical engineering" Northwestern University Evanston, Illinois, Estados Unidos, 2004.
16. Lara J.L., Pornillos E. y Loayza C. "The application of highly dewatered tailings in the design of tailings storage facilities – Experience in mining projects in Peru" Proceedings Tailings and Mine Waste, Colorado, Estados Unidos, 2012.
17. Li, Allen "Prediction of tailings beach slopes and tailings flow profiles", Paste 2011, proceedings of the 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Perth, Australia, 2011.
18. Li, A., Been, K., Ritchie, D. y Welch, D. "Stability of large thickened, non-segregated tailings slopes", Paste 2009, Proceedings 12th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Viña del Mar, Chile, 2009.
19. McPhail G.I. "Prediction of the Beach Profile of High-Density Thickened Tailings from Rheological and Small-Scale Trial Deposition Data"

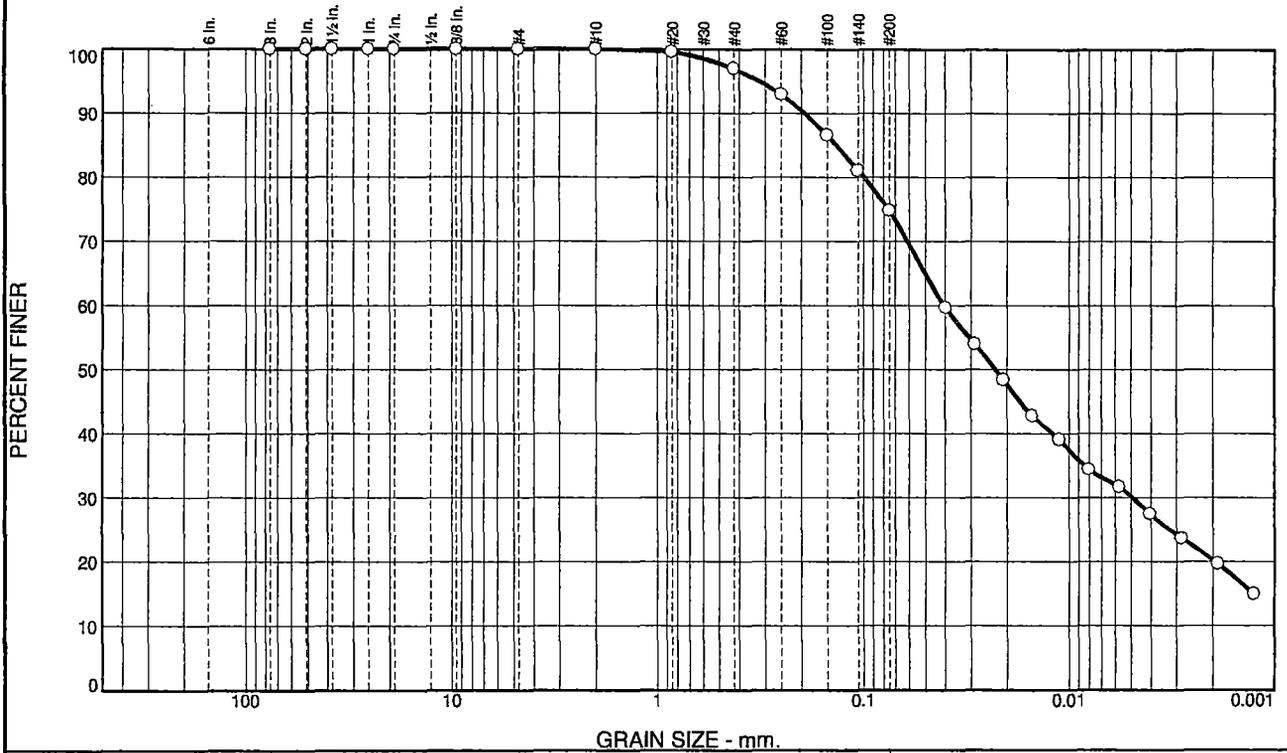
- Proceedings of the Eleventh International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Kasane, Botswana, 2008.
20. Palmer B. y Krizek R. "Thickened slurry disposal method for process tailings" ASCE Geotechnical Special Publication, 1987.
21. Paterson y Cooke. "V Curso transporte de relaves espesados" compendio del quinto curso de transporte de relaves espesados, Santiago, Chile, 2013.
22. Robinsky E. "Tailings disposal by the thickened discharge method for improved economy and environmental control" Proceedings of the second international tailings symposium, California, Estados Unidos, 1979.
23. Valenzuela Luis. "Tendencias en la optimización del recurso agua en la minería" Instituto de ingenieros de Chile, Chile, 2006.

ANEXOS

ANEXO A

REPORTES DE ENSAYOS DE
CARACTERIZACIÓN

Particle Size Distribution Report



% +3"	% Gravel		% Sand			% Fines	
	Coarse	Fine	Coarse	Medium	Fine	Silt	Clay
0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	22.3	44.5	30.2

SIEVE SIZE	PERCENT FINER	SPEC.* PERCENT	PASS? (X=NO)
3"	100.0		
2"	100.0		
1.5"	100.0		
1"	100.0		
0.75"	100.0		
0.375"	100.0		
#4	100.0		
#10	100.0		
#20	99.6		
#40	97.0		
#60	92.9		
#100	86.6		
#140	81.0		
#200	74.7		
0.0397 mm.	59.6		
0.0288 mm.	54.0		
0.0208 mm.	48.4		
0.0151 mm.	42.8		
0.0111 mm.	39.0		
0.0080 mm.	34.4		
0.0057 mm.	31.6		
0.0040 mm.	27.4		
0.0028 mm.	23.6		
0.0019 mm.	19.6		
0.0013 mm.	14.9		

* (no specification provided)

Soil Description

Material de relaves espesado. De consistencia pastosa. Color gris claro.

Atterberg Limits
 PL= 16 LL= 24 PI= 8

Coefficients
 D₉₀= 0.1929 D₈₅= 0.1354 D₆₀= 0.0404
 D₅₀= 0.0228 D₃₀= 0.0049 D₁₅= 0.0013
 D₁₀= C_u= C_c=

Classification
 USCS= CL AASHTO= A-4(4)

Remarks

Source of Sample: MRChungar
 Sample Number: 02

Date: 06/05/2013

Golder Associates Perú S.A. Lima, Perú	Client: Golder Associates Perú Project: Proyecto - CIR Project No: _____ Figure _____
---	--

Tested By: J.S./F.O. _____

GOLDER ASSOCIATES PERÚ S.A

Manual de Aseguramiento de Calidad

Control de documentos

Registro de Calidad Mecánica de Suelos

LAB-MS-R-08

Rev. 0

**GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS
ASTM D 854/ AASHTO T 100**

Proyecto : Centro de Investigación en Relaves

N° Solicitud : -

N° Proyecto : -

Solicitante : -

Cliente : -

Ejecutado por : F.O / J.S.

Ubicación : -

Revisado por : -

Fecha : 27/05/2013

Muestra : CH01

ID Laboratorio :

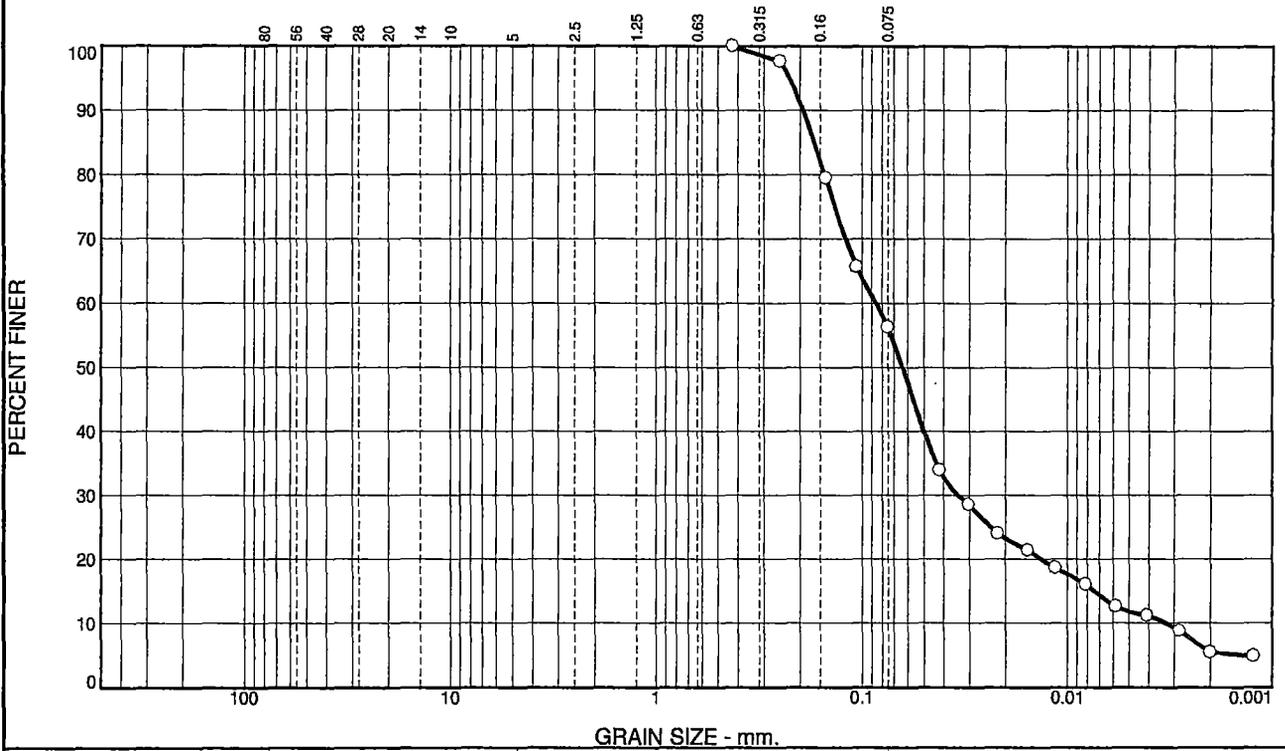
Profundidad (m) : -

				Promedio
N° de picnómetro		9	10	
Peso de tara	(g)	98.99	81.03	
Peso de tara + muestra seca	(g)	149.15	131.08	
Peso de la muestra seca	(g)	50.16	50.05	
Peso del picnómetro lleno de agua	(g)	347.97	329.88	
Peso picnómetro+muestra +agua hasta el enrase	(g)	381.37	362.91	
Coefficiente de Temperatura ⁽¹⁾		0.99904	0.99904	
Gravedad Especifica	Gs	2.990	2.939	2.965
Temperatura del agua	° C	24.2	24.2	

⁽¹⁾ Tabla 2 Norma ASTM D854

Observaciones :

Particle Size Distribution Report



% +3"	% Gravel		% Sand			% Fines	
	Coarse	Fine	Coarse	Medium	Fine	Silt	Clay
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.7	44.5	11.8

SIEVE SIZE	PERCENT FINER	SPEC.* PERCENT	PASS? (X=NO)
#40	100.0		
#60	97.7		
#100	79.4		
#140	65.6		
#200	56.3		
0.0420 mm.	33.9		
0.0303 mm.	28.5		
0.0218 mm.	24.0		
0.0155 mm.	21.3		
0.0114 mm.	18.6		
0.0081 mm.	16.0		
0.0058 mm.	12.6		
0.0041 mm.	11.1		
0.0028 mm.	8.8		
0.0020 mm.	5.5		
0.0012 mm.	4.9		

(no specification provided)

Soil Description
sandy lean clay

Atterberg Limits
 PL= 13 LL= 21 PI= 8

Coefficients
 D₉₀= 0.1934 D₈₅= 0.1707 D₆₀= 0.0856
 D₅₀= 0.0635 D₃₀= 0.0340 D₁₅= 0.0074
 D₁₀= 0.0033 C_u= 26.13 C_c= 4.12

Classification
 USCS= CL AASHTO= A-4(1)

Remarks

Source of Sample: MC-01 Depth: -- Date: 20/05/2013
 Sample Number: B855

Golder Associates Perú S.A.	Client: Marcobre S.A.C.
Lima, Perú	Project: Marcobre/Pruebas MetalurEspes/Mina Justa
	Project No: 1394154005 / LGGA- Figure

Tested By: EL Checked By: RZ

GOLDER ASSOCIATES PERÚ S.A

Manual de Aseguramiento de Calidad

Control de documentos

Registro de Calidad Mecánica de Suelos

LAB-MS-R-08

Rev. 0

**GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS
ASTM D 854/ AASHTO T 100**

Proyecto : Marcobre /PruebasMetalurEspes/Mina Justa

N° Solicitud : LGGA-13-053

N° Proyecto : 1394154005

Solicitante : Ing. Katty Travezaño

Cliente : Marcobre S.A.C.

Ejecutado por : EL

Ubicación : Nazca

Revisado por : RZ

Fecha : 20/05/2013

Muestra : MC-01

ID Laboratorio : B855

Profundidad (m) : -

				Promedio
N° de picnómetro		2	5	
Peso de tara	(g)	94.78	85.69	
Peso de tara + muestra seca	(g)	145.13	136.06	
Peso de la muestra seca	(g)	50.35	50.37	
Peso del picnómetro lleno de agua	(g)	343.93	334.39	
Peso picnómetro+muestra +agua hasta el enrase	(g)	378.32	368.89	
Coefficiente de Temperatura ⁽¹⁾		0.99889	0.99852	
Gravedad Especifica	Gs	3.150	3.170	3.160
Temperatura del agua	° C	24.8	26.2	

⁽¹⁾ Tabla 2 Norma ASTM D854

Observaciones :

GOLDER ASSOCIATES PERÚ S.A

Manual de Aseguramiento de Calidad

Control de documentos

Registro de Calidad Mecánica de Suelos

LAB-MS-R-08

Rev. 0

**GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS
ASTM D 854/ AASHTO T 100**

Proyecto : Marcobre /PruebasMetalurEspes/Mina Justa

N° Solicitud : LGGA-13-053

N° Proyecto : 1394154005

Solicitante : Ing. Katty Travezaño

Cliente : Marcobre S.A.C.

Ejecutado por : EL

Ubicación : Nazca

Revisado por : RZ

Fecha : 20/05/2013

Muestra : MC-02

ID Laboratorio : B851

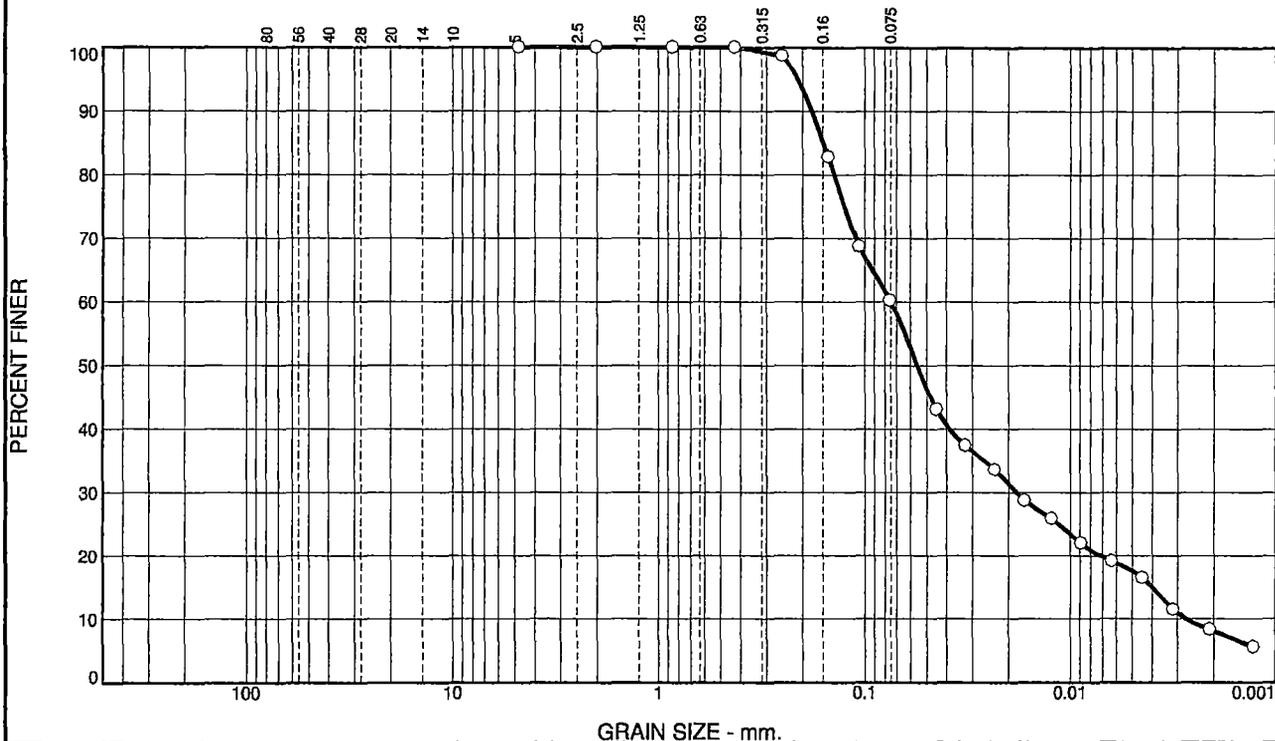
Profundidad (m) : -

				Promedio
N° de picnómetro		2	5	
Peso de tara	(g)	94.78	85.69	
Peso de tara + muestra seca	(g)	145.78	136.15	
Peso de la muestra seca	(g)	51.00	50.46	
Peso del picnómetro lleno de agua	(g)	344.11	334.65	
Peso picnómetro+muestra +agua hasta el enrase	(g)	378.31	368.56	
Coefficiente de Temperatura ⁽¹⁾		0.99972	0.99966	
Gravedad Especifica	Gs	3.035	3.049	3.042
Temperatura del agua	° C	21.3	21.6	

⁽¹⁾ Tabla 2 Norma ASTM D854

Observaciones :

Particle Size Distribution Report



% +3"	% Gravel		% Sand			% Fines	
	Coarse	Fine	Coarse	Medium	Fine	Silt	Clay
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.8	42.6	17.6

SIEVE SIZE	PERCENT FINER	SPEC.* PERCENT	PASS? (X=NO)
#4	100.0		
#10	100.0		
#20	100.0		
#40	100.0		
#60	98.7		
#100	82.7		
#140	68.7		
#200	60.2		
0.0448 mm.	43.1		
0.0324 mm.	37.4		
0.0232 mm.	33.5		
0.0167 mm.	28.7		
0.0123 mm.	25.8		
0.0088 mm.	22.0		
0.0063 mm.	19.1		
0.0045 mm.	16.5		
0.0031 mm.	11.5		
0.0021 mm.	8.3		
0.0013 mm.	5.5		

* (no specification provided)

Soil Description
sandy silt

Atterberg Limits
LL= NP PI= NP

Coefficients
 D₉₀= 0.1803 D₈₅= 0.1584 D₆₀= 0.0745
 D₅₀= 0.0555 D₃₀= 0.0183 D₁₅= 0.0040
 D₁₀= 0.0027 C_u= 27.44 C_c= 1.66

Classification
USCS= ML AASHTO= A-4(0)

Remarks

Source of Sample: MC-03
Sample Number: B852

Depth: --

Date: 03/06/2013

Golder Associates Perú S.A.

Client: Marcobre S.A.C.
Project: Marcobre/Pruebas MetalurEspes/Mina Justa

Lima, Perú

Project No: 1394154005 / LGGA-

Figure

Tested By: EL

Checked By: RZ

GOLDER ASSOCIATES PERÚ S.A

Manual de Aseguramiento de Calidad	Control de documentos	
Registro de Calidad Mecánica de Suelos	LAB-MS-R-08	Rev. 0

**GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS
ASTM D 854/ AASHTO T 100**

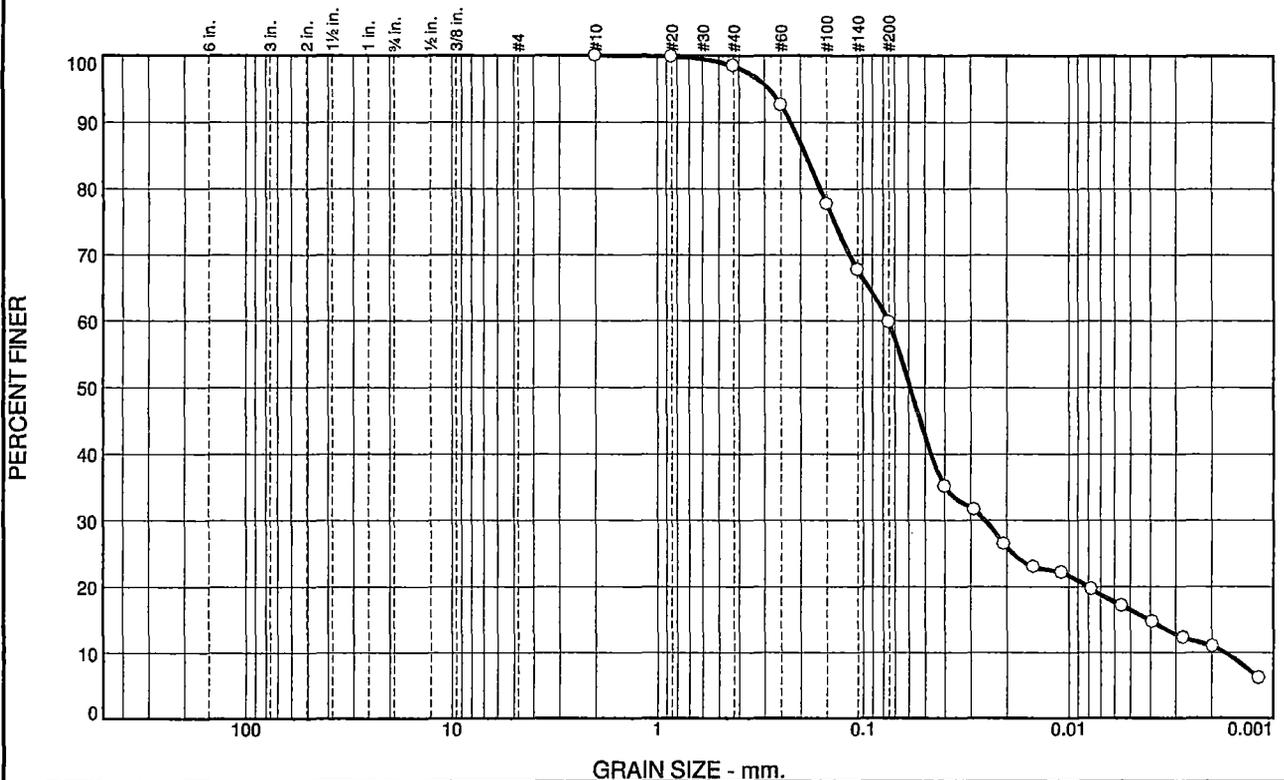
Proyecto : Marcobre /PruebasMetalurEspes/Mina Justa	N° Solicitud : LGGA-13-053
N° Proyecto : 1394154005	Solicitante : Ing. Katty Travezaño
Cliente : Marcobre S.A.C.	Ejecutado por : EL
Ubicación : Nazca	Revisado por : RZ
Fecha : 03/06/2013	Muestra : MC-03
ID Laboratorio : B852	Profundidad (m) : -

					Promedio
N° de picnómetro		16	20		
Peso de tara	(g)	96.39	91.97		
Peso de tara + muestra seca	(g)	147.06	142.51		
Peso de la muestra seca	(g)	50.67	50.54		
Peso del picnómetro lleno de agua	(g)	345.47	341.10		
Peso picnómetro+muestra +agua hasta el enrase	(g)	378.30	373.78		
Coefficiente de Temperatura ⁽¹⁾		0.99972	0.99972		
Gravedad Especifica	Gs	2.840	2.828		2.834
Temperatura del agua	° C	21.3	21.3		

⁽¹⁾ Tabla 2 Norma ASTM D854

Observaciones :

Particle Size Distribution Report



% +3"	% Gravel		% Sand			% Fines	
	Coarse	Fine	Coarse	Medium	Fine	Silt	Clay
0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	38.7	43.3	16.5

SIEVE SIZE	PERCENT FINER	SPEC.* PERCENT	PASS? (X=NO)
#10	100.0		
#20	99.8		
#40	98.5		
#60	92.6		
#100	77.7		
#140	67.7		
#200	59.8		
0.0399 mm.	35.1		
0.0286 mm.	31.6		
0.0206 mm.	26.4		
0.0148 mm.	23.0		
0.0108 mm.	22.1		
0.0077 mm.	19.6		
0.0055 mm.	17.1		
0.0039 mm.	14.7		
0.0028 mm.	12.2		
0.0020 mm.	10.9		
0.0012 mm.	6.1		

Soil Description
Sandy Silt

Atterberg Limits
 LL= NP PI= NP

Coefficients
 D₉₀= 0.2243 D₈₅= 0.1884 D₆₀= 0.0755
 D₅₀= 0.0589 D₃₀= 0.0254 D₁₅= 0.0041
 D₁₀= 0.0017 C_u= 43.76 C_c= 4.95

Classification
 USCS= ML AASHTO= A-4(0)

Remarks

(no specification provided)

Location: MZ01
Sample Number: 02

Depth: --

Date:

Golder Associates Perú S.A.

Lima, Perú

Client: Golder
Project: CIR

Project No:

Figure 01

GOLDER ASSOCIATES PERÚ S.A

Manual de Aseguramiento de Calidad	Control de documentos	
Registro de Calidad Mecánica de Suelos	149-41G-13LRS07	Rev. 1

**GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS
ASTM D 854/ AASHTO T 100**

Proyecto : CIR	N° Solicitud : -
N° Proyecto : 13941A0900	Solicitante : Franklin Olaya
Cliente : Interno	Ejecutado por : FO
Ubicación : --	Revisado por : JCHO
Fecha : 30/09/2013	Muestra : MZ01
ID Laboratorio : -	Profundidad (m) : -

				Promedio
N° de picnómetro		4	6	
Peso de tara	(g)	97.37	107.37	
Peso de tara + muestra seca	(g)	147.59	157.43	
Peso de la muestra seca	(g)	50.22	50.06	
Peso del picnómetro lleno de agua	(g)	346.96	357.17	
Peso picnómetro+muestra +agua hasta el enrase	(g)	382.67	392.77	
Coefficiente de Temperatura ⁽¹⁾		1.00052	1.00052	
Gravedad Especifica	Gs	3.463	3.464	3.464
Temperatura del agua	° C	17.3	17.3	

⁽¹⁾ Tabla 2 Norma ASTM D854

Observaciones :

ANEXO B
REPORTES DE ENSAYOS DE CANALETA

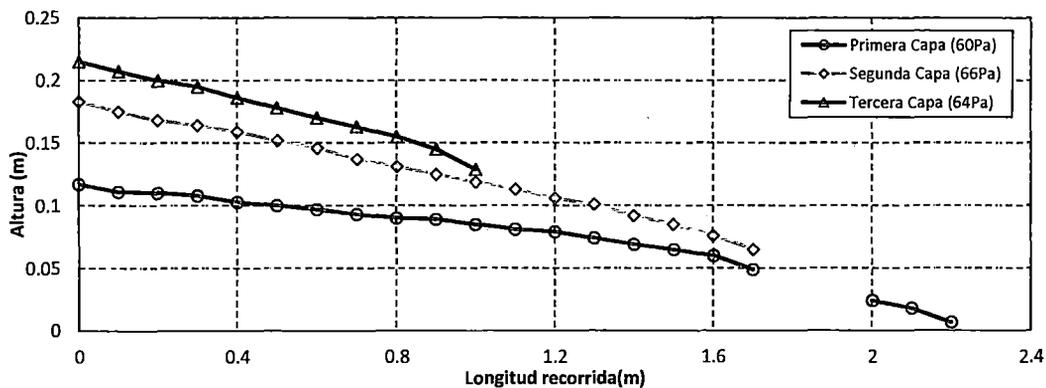
Laboratorio Perú

 Ca. Pedro Huilca, Mz 4 - Lt - Subtole 3,
 Parque Industrial, Villa El Salvador.

 Trabajo N° 1
 Ensayo N° 1
 Hoja N° 1 de 3
 Fecha del ensayo 03/09/13 al 05/09/13

Reporte - Ensayo de disposición en Canaleta

 Cliente: **Interno**
 Proyecto: **CIR - Disposición de relaves espesados**
 Localización: **Lima**

 Muestra: **CH01**
 SUCS: **CL**
 Descripción visual: **Material arcilloso de color gris**
Perfiles desarrollados.

Foto

Parámetros de ensayo.

Capa	Tasa de descarga (lt/min)	Cont. Sólidos (%)	Est. Fluencia (Pa)
Primera	10	63	60
Segunda	9.5	64	66
Tercera	12	64	64

 Realizado por: Franklin Olaya T.

 Supervisado por: Jorge Chávez O.
 Ingeniero geotécnico

Laboratorio Perú

Ca. Pedro Huilca, Mz 4 - Lt - Subtole 3,
Parque Industrial, Villa El Salvador.

Trabajo N° 1

Ensayo N° 2

Hoja N° 2 de 3

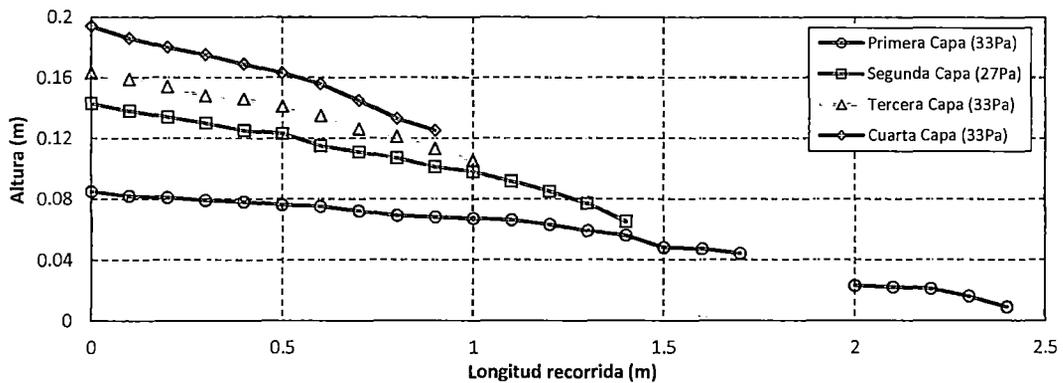
Fecha del ensayo 10/09/13 al 12/09/13

Reporte - Ensayo de disposición en Canaleta

Cliente: **Interno**
Proyecto: **CIR - Disposición de relaves espesados**
Localización: **Lima**

Muestra: **CH01**
SUCS: **CL**
Descripción visual: **Material arcilloso de color gris**

Perfiles desarrollados.



Foto



Parámetros de ensayo.

Capa	Tasa de descarga (lt/min)	Cont. Sólidos (%)	Esf. Fluencia (Pa)
Primera	7.5	61	33
Segunda	6.7	60	27
Tercera	9	61	33
Cuarta	10.7	61	33

Realizado por: Franklin Olaya T.

Supervisado por: Jorge Chávez O.
Ingeniero geotécnico

Laboratorio Perú

Ca. Pedro Huilca, Mz 4 - Lt - Subtole 3,
Parque Industrial, Villa El Salvador.

Trabajo N° 1

Ensayo N° 3

Hoja N° 3 de 3

Fecha del ensayo 17/09/13 al 25/09/13

Reporte - Ensayo de disposición en Canaleta

Cliente: Interno

Proyecto: CIR - Disposición de relaves espesados

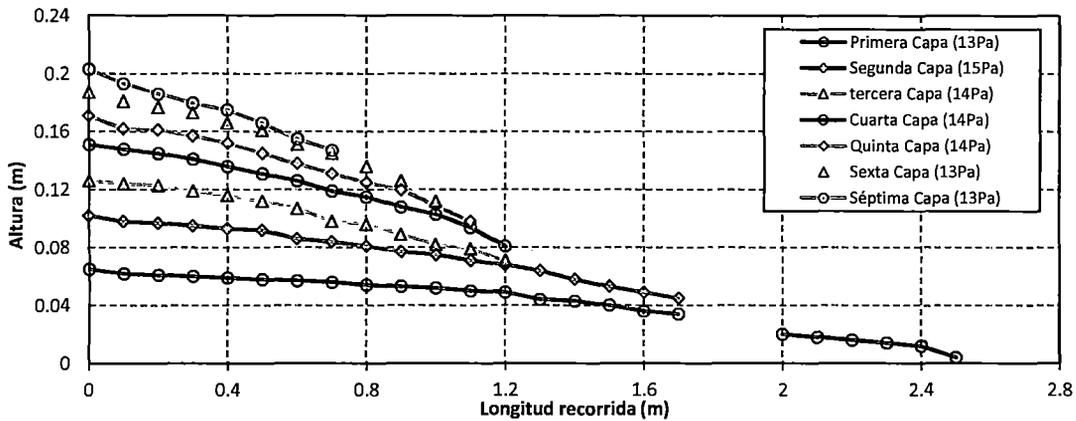
Localización: Lima

Muestra: CH01

SUCS: CL

Descripción visual: Material arcilloso de color gris

Perfiles desarrollados.



Foto



Parámetros de ensayo.

Capa	Tasa de descarga (lt/min)	Cont. Sólidos (%)	Esf. Fluencia (Pa)
Primera	7.7	56	14
Segunda	5.8	56	15
Tercera	4.5	56	14
Cuarta	4.7	56	14
Quinta	4.3	56	14
Sexta	6.8	56	13
Séptima	4.7	56	13

Realizado por: Franklín Olaya T.

Supervisado por: Jorge Chávez O.
Ingeniero geotécnico

Laboratorio Perú

Ca. Pedro Huilca, Mz 4 - Lt - Subtole 3,
Parque Industrial, Villa El Salvador.

Trabajo N° **2**

Ensayo N° **1**

Hoja N° **1 de 3**

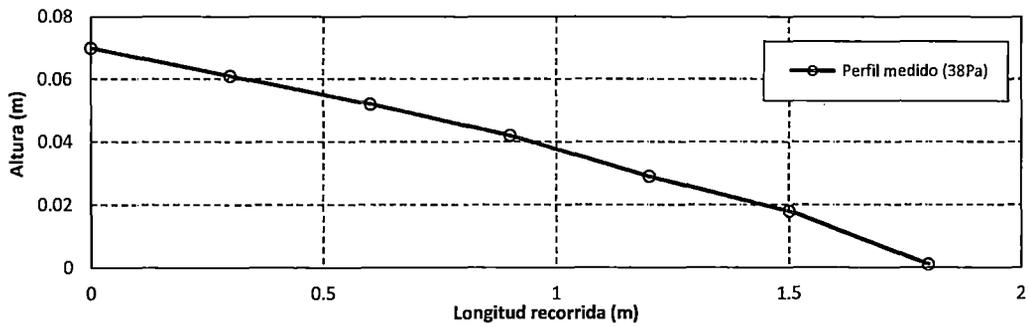
Fecha del ensayo **26/09/13 al 27/09/13**

Reporte - Ensayo de disposición en Canaleta

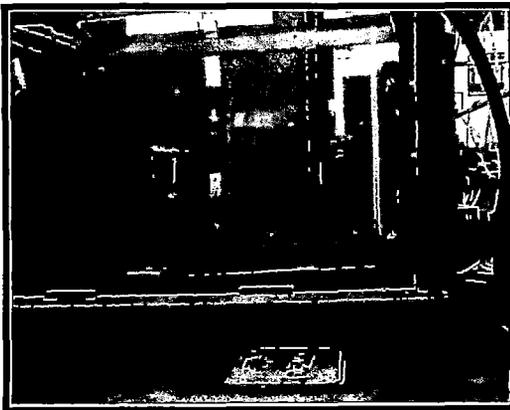
Cliente: **Interno**
Proyecto: **CIR - Disposición de relaves espesados**
Localización: **Lima**

Muestra: **MC01**
SUCS: **ML**
Descripción visual: **Material limoso
de color gris**

Perfiles desarrollados.



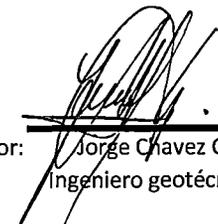
Foto



Parámetros de ensayo.

Capa	Tasa de descarga (lt/min)	Cont. Sólidos (%)	Esf. Fluencia (Pa)
Única	8.2	72	38

Realizado por: Franklin Olaya T.

Supervisado por: 
Jorge Chavez O.
Ingeniero geotécnico

Laboratorio Perú

Ca. Pedro Huilca, Mz 4 - Lt - Subtole 3,
Parque Industrial, Villa El Salvador.

Trabajo N° 2

Ensayo N° 2

Hoja N° 2 de 3

Fecha del ensayo 30/09/13 al 01/10/13

Reporte - Ensayo de disposición en Canaleta

Cliente: **Interno**

Proyecto: **CIR - Disposición de relaves espesados**

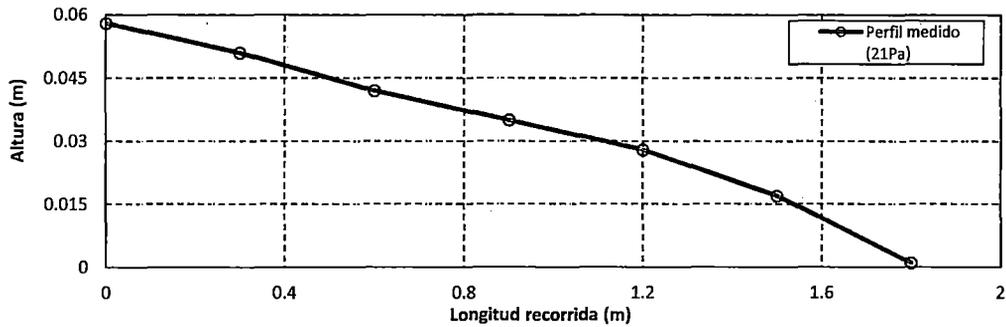
Localización: **Lima**

Muestra: **MC01**

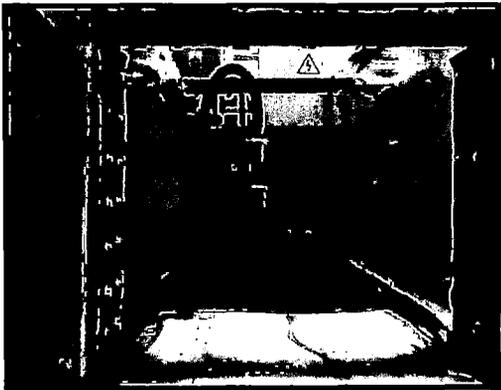
SUCS: **ML**

Descripción visual: **Material limoso
de color gris**

Perfiles desarrollados.



Foto



Parámetros de ensayo.

Capa	Tasa de descarga (lt/min)	Cont. Sólidos (%)	Esf. Fluencia (Pa)
Única	8.2	70	21

Realizado por: Franklin Olaya T.

Supervisado por: Jorge Chavez O.
Ingeniero geotécnico

Laboratorio Perú

Ca. Pedro Huilca, Mz 4 - Lt - Subtole 3,
Parque Industrial, Villa El Salvador.

Trabajo N° 2

Ensayo N° 3

Hoja N° 3 de 3

Fecha del ensayo 02/10/13 al 03/10/13

Reporte - Ensayo de disposición en Canaleta

Cliente: *Interno*

Proyecto: *CIR - Disposición de relaves espesados*

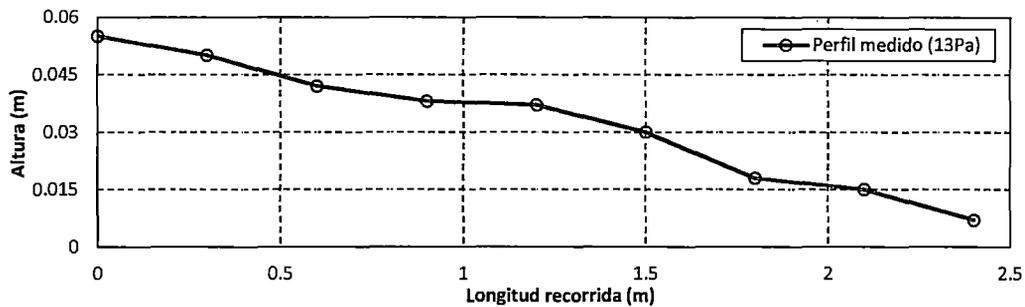
Localización: *Lima*

Muestra: *MCO1*

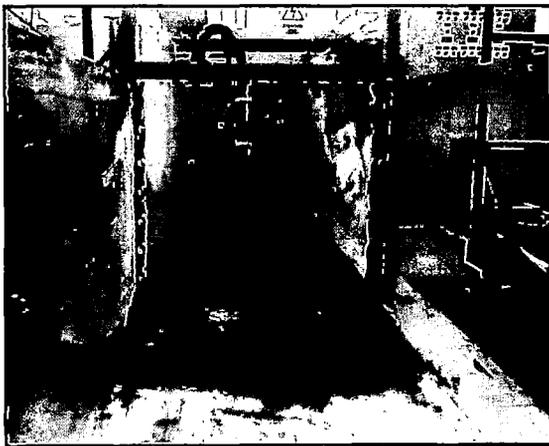
SUCS: *ML*

Descripción visual: *Material limoso de color gris*

Perfiles desarrollados.



Foto



Parámetros de ensayo.

Capa	Tasa de descarga (lt/min)	Cont. Sólidos (%)	Esf. Fluencia (Pa)
Única	8.2	68	13

Realizado por: Franklin Olaya T.

Supervisado por: Jorge Chavez O.
Ingeniero geotécnico

Laboratorio Perú

Ca. Pedro Huilca, Mz 4 - Lt - Subtole 3,
Parque Industrial, Villa El Salvador.

Trabajo N° **3**

Ensayo N° **1**

Hoja N° **1 de 3**

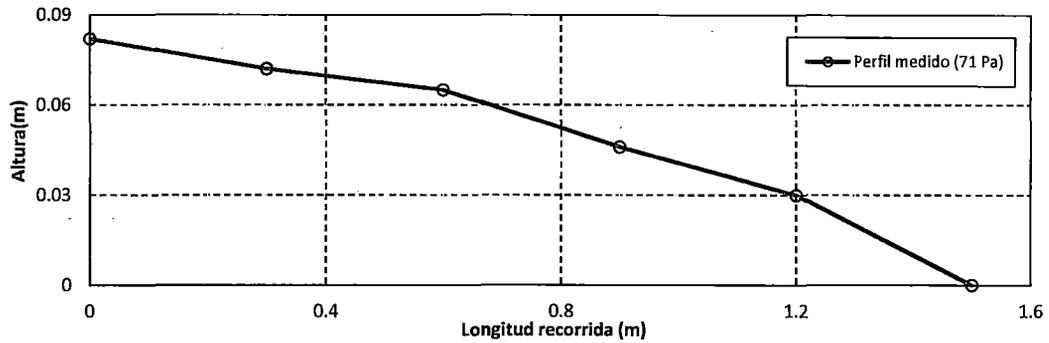
Fecha del ensayo **07/10/13 al 08/10/13**

Reporte - Ensayo de disposición en Canaleta

Cliente: **Interno**
Proyecto: **CIR - Disposición de relaves espesados**
Localización: **Lima**

Muestra: **MC02**
SUCS: **ML**
Descripción visual: **Material limoso de color gris**

Perfiles desarrollados.



Foto



Parámetros de ensayo.

Capa	Tasa de descarga (lt/min)	Cont. Sólidos (%)	Esf. Fluencia (Pa)
Única	8	71	71

Realizado por: Franklin Olaya T.

Supervisado por: Jorge Chavez O.
Ingeniero geotécnico

Laboratorio Perú

Ca. Pedro Huilca, Mz 4 - Lt - Subtole 3,
Parque Industrial, Villa El Salvador.

Trabajo N° **3**

Ensayo N° **2**

Hoja N° **2 de 3**

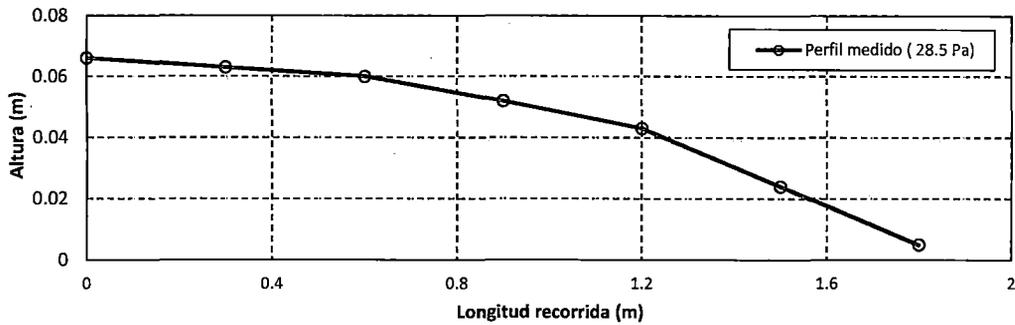
Fecha del ensayo **09/10/13 al 10/10/13**

Reporte - Ensayo de disposición en Canaleta

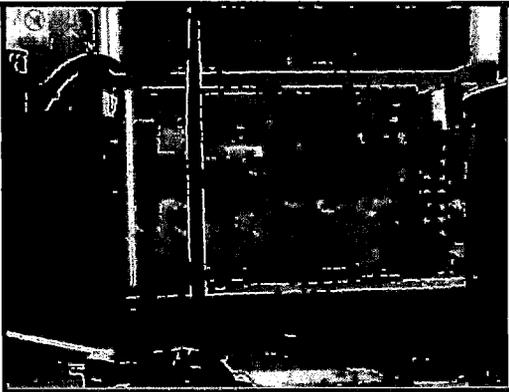
Cliente: **Interno**
Proyecto: **CIR - Disposición de relaves espesados**
Localización: **Lima**

Muestra: **MC02**
SUCS: **ML**
Descripción visual: **Material limoso de color gris**

Perfiles desarrollados.



Foto



Parámetros de ensayo.

Capa	Tasa de descarga (lt/min)	Cont. Sólidos (%)	Est. Fluencia (Pa)
Única	8	68	28.5

Realizado por: Franklin Olaya T.

Supervisado por: Jorge Chavez O.
Ingeniero geotécnico

Laboratorio Perú

Ca. Pedro Huilca, Mz 4 - Lt - Subtole 3,
Parque Industrial, Villa El Salvador.

Trabajo N° 3

Ensayo N° 3

Hoja N° 3 de 3

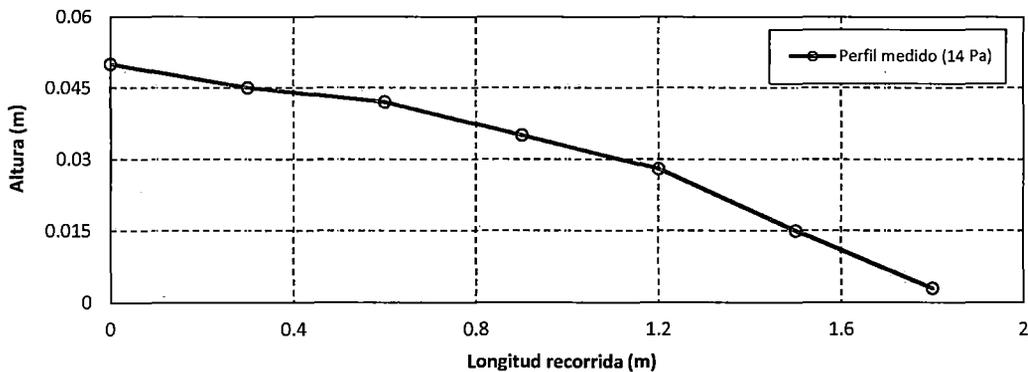
Fecha del ensayo 10/10/13 al 11/10/13

Reporte - Ensayo de disposición en Canaleta

Cliente: Interno
Proyecto: CIR - Disposición de relaves espesados
Localización: Lima

Muestra: MC02
SUCS: ML
Descripción visual: Material limoso de color gris

Perfiles desarrollados.



Foto



Parámetros de ensayo.

Capa	Tasa de descarga (lt/min)	Cont. Sólidos (%)	Esf. Fluencia (Pa)
Única	8	65	14

Realizado por: Franklin Olaya T.

Supervisado por: Jorge Chávez O.
Ingeniero geotécnico



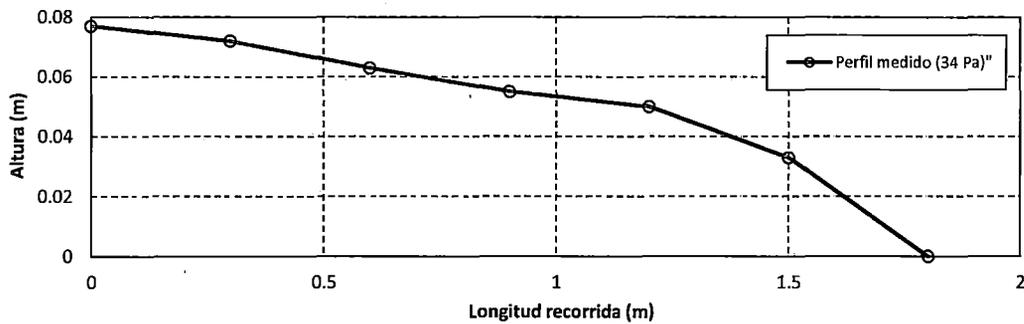
Laboratorio Perú
 Ca. Pedro Huilca, Mz 4 - Lt - Subtole 3,
 Parque Industrial, Villa El Salvador.

Trabajo N° 4
 Ensayo N° 1
 Hoja N° 1 de 3
 Fecha del ensayo 14/10/13 al 15/10/13

Reporte - Ensayo de disposición en Canaleta

Cliente: **Interno** Muestra: **MC03**
 Proyecto: **CIR - Disposición de relaves espesados** SUCS: **ML**
 Localización: **Lima** Descripción visual: **Material limoso de color gris**

Perfiles desarrollados.



Parámetros de ensayo.

Capa	Tasa de descarga (lt/min)	Cont. Sólidos (%)	Esf. Fluencia (Pa)
Única	8	64	34

Realizado por: Franklin Olaya T.

Supervisado por: Jorge Chavez O.
 Ingeniero geotécnico



Laboratorio Perú

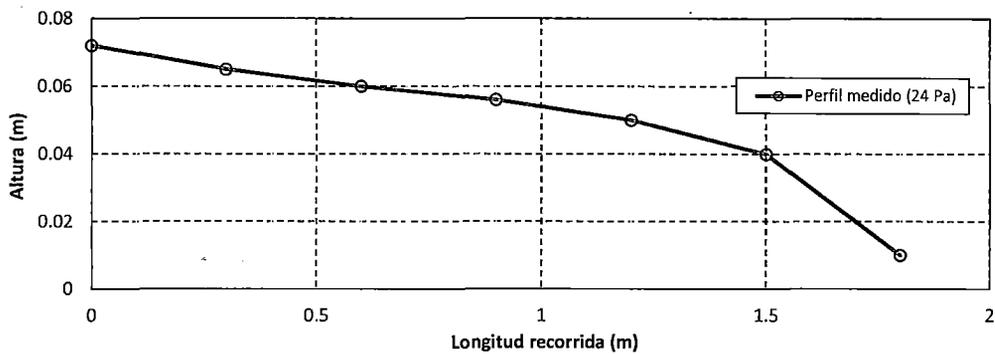
Ca. Pedro Huilca, Mz 4 - Lt - Subtole 3,
Parque Industrial, Villa El Salvador.

Trabajo N° 4
Ensayo N° 2
Hoja N° 2 de 3
Fecha del ensayo 15/10/13 al 16/10/13

Reporte - Ensayo de disposición en Canaleta

Cliente: **Interno** Muestra: **MC03**
Proyecto: **CIR - Disposición de relaves espesados** SUCS: **ML**
Localización: **Lima** Descripción visual: **Material limoso de color gris**

Perfiles desarrollados.



Parámetros de ensayo.

Capa	Tasa de descarga (lt/min)	Cont. Sólidos (%)	Est. Fluencia (Pa)
Única	8	68	28.5

Realizado por: Franklin Olaya T.

Supervisado por: Jorge Chavez O.
Ingeniero geotécnico



Laboratorio Perú

Ca. Pedro Huilca, Mz 4 - Lt - Subtole 3,
Parque Industrial, Villa El Salvador.

Trabajo N° 4

Ensayo N° 3

Hoja N° 3 de 3

Fecha del ensayo 17/10/13 al 18/10/13

Reporte - Ensayo de disposición en Canaleta

Cliente: *Interno*

Proyecto: *CIR - Disposición de relaves espesados*

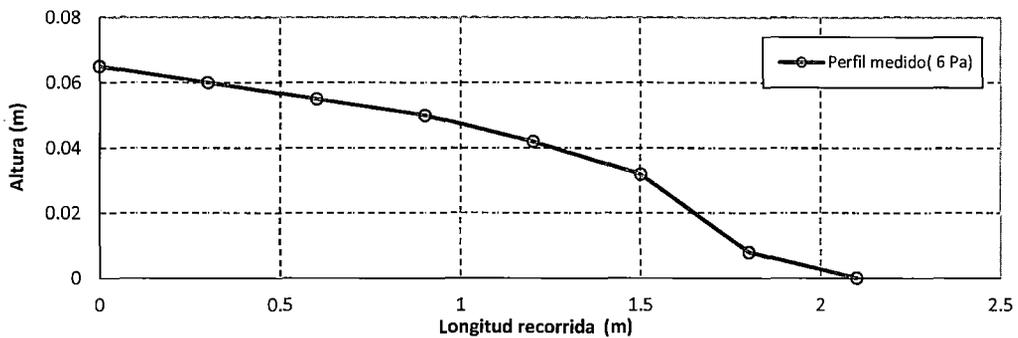
Localización: *Lima*

Muestra: *MC03*

SUCS: *ML*

Descripción visual: *Material limoso de color gris*

Perfiles desarrollados.



Parámetros de ensayo.

Capa	Tasa de descarga (lt/min)	Cont. Sólidos (%)	Esf. Fluencia (Pa)
Única	8	58	6

Realizado por: Franklin Olaya T.

Supervisado por: Jorge Chavez O.
Ingeniero geotécnico

Laboratorio Perú

 Ca. Pedro Huilca, Mz 4 - Lt - Subtole 3,
 Parque Industrial, Villa El Salvador.

Trabajo N° 5

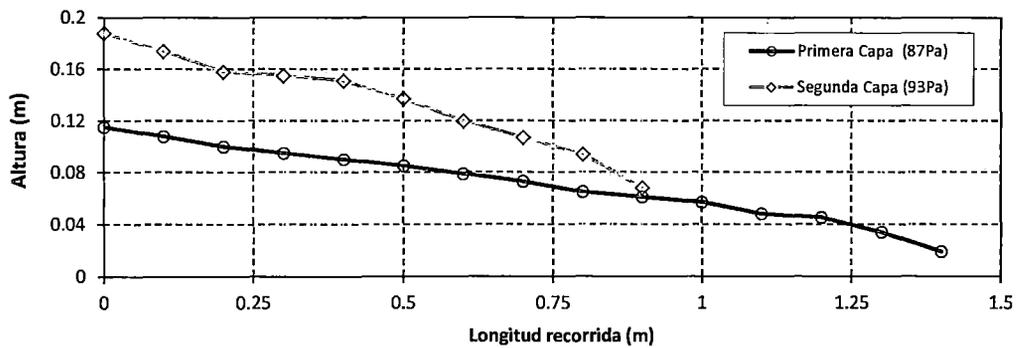
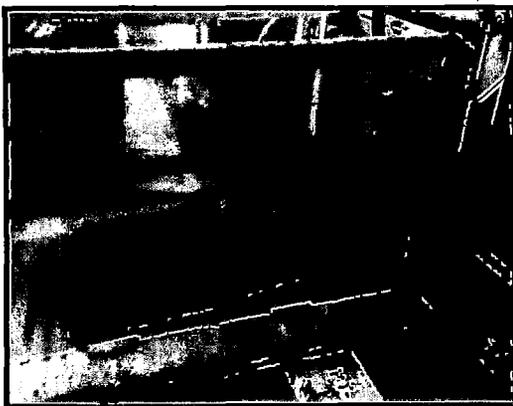
Ensayo N° 1

Hoja N° 1 de 2

Fecha del ensayo 21/10/13 al 23/10/13

Reporte - Ensayo de disposición en Canaleta

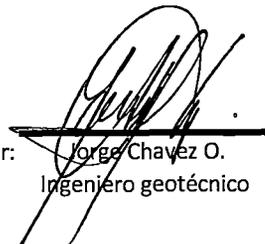
 Cliente: **Interno**
 Proyecto: **CIR - Disposición de relaves espesados**
 Localización: **Lima**

 Muestra: **MZ01**
 SUCS: **CL-ML**
 Descripción visual: **Material arcilloso de color gris**
Perfiles desarrollados.

Foto

Parámetros de ensayo.

Capa	Tasa de descarga (lt/min)	Cont. Sólidos (%)	Esf. Fluencia (Pa)
Primera	8.7	75.9	87
Segunda	6.9	76.1	86

 Realizado por: Franklin Olaya T.

 Supervisado por: Jorge Chavez O.
 Ingeniero geotécnico



Laboratorio Perú

 Ca. Pedro Huilca, Mz 4 - Lt - Subtole 3,
 Parque Industrial, Villa El Salvador.

Trabajo N° 5

Ensayo N° 2

Hoja N° 2 de 2

Fecha del ensayo 23/10/13 al 25/10/13

Reporte - Ensayo de disposición en Canaleta

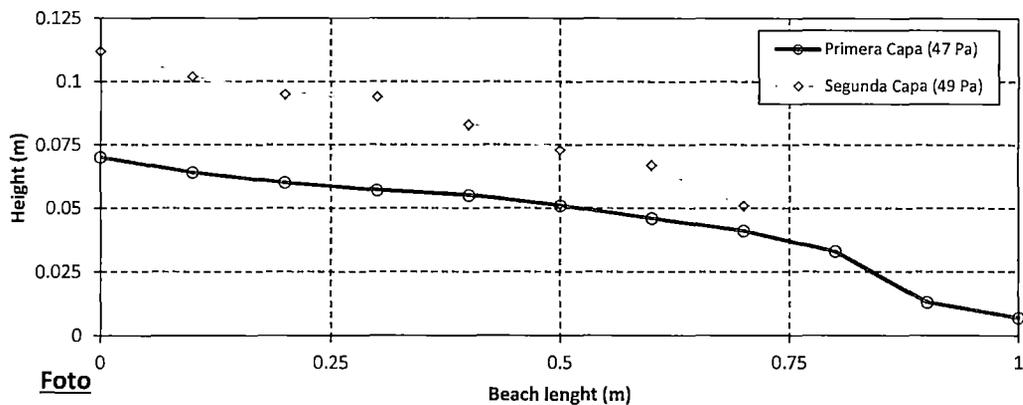
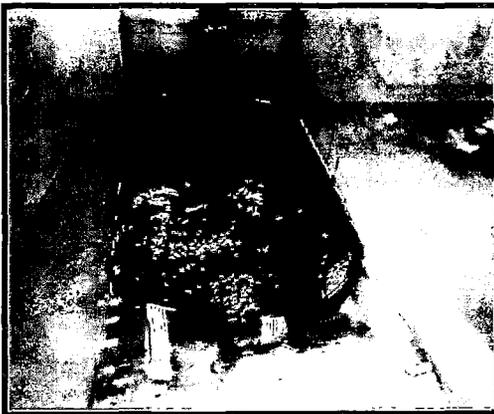
 Cliente: **Interno**

 Muestra: **MZ01**

 Proyecto: **CIR - Disposición de relaves espesados**

 SUCS: **CL-ML**

 Localización: **Lima**

 Descripción visual: **Material arcilloso de color gris**
Perfiles desarrollados.

Foto

Parámetros de ensayo.

Capa	Tasa de descarga (lt/min)	Cont. Sólidos (%)	Esf. Fluencia (Pa)
Primera	10	74.5	47
Segunda	6.3	74.6	49

 Realizado por: Franklin Olaya T.

 Supervisado por: Jorge Chávez O.
 Ingeniero geotécnico

ANEXO C

MODELAMIENTO A ESCALA REAL

ÍNDICE

ANEXO C	MODELAMIENTO A ESCALA REAL	1
C.1	Perfiles estudiados	1
C.2	Parámetros para el modelamiento	1
C.3	resultados del modelamiento	2

ANEXO C MODELAMIENTO A ESCALA REAL

El modelamiento numérico se realizó sobre un depósito de relaves pequeño. De este depósito se conoce topografía y batimetría en dos etapas de disposición distintas (correspondientes a los años 2009 y 2013 respectivamente). Con la intención de verificar la utilidad de la metodología desarrollada en esta tesis se ha simulado el perfil de los relaves depositados para la etapa 2013 tomando como base la topografía existente en el 2009.

De este depósito de relaves se conoce los datos de producción de relaves y además de éste se extrajo la muestra CH01 empleada en esta tesis, por lo cual se conocen también las propiedades geotécnicas y las curvas de corrección.

C.1 PERFILES ESTUDIADOS

Los perfiles del depósito de relaves estudiado se presentan en la **Figura C.1**, se asume como base a la sección correspondiente al año 2009 y como sección final a la del año 2013.

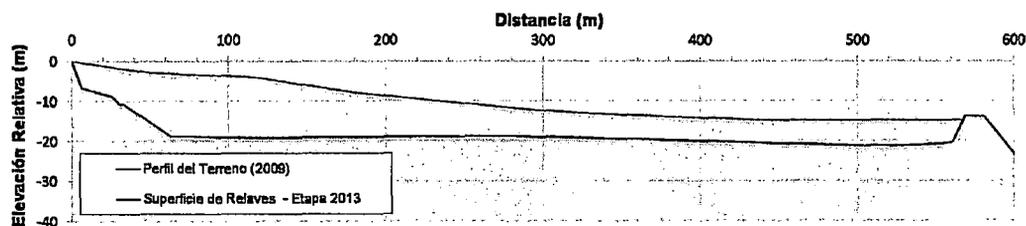


Figura C.1 Perfiles de Terreno base y Superficie de Relaves Final.

C.2 PARÁMETROS PARA EL MODELAMIENTO

Los parámetros considerados para el modelamiento del perfil de relaves depositados se muestran a continuación.

- Muestra de Relaves CH01
- Rango de Contenido de Sólidos (en Campo) 62.5% – 63.5%
- Esfuerzo de Fluencia Corregido 34 Pa (**Figura C.2**)
- Tasa de descarga de los relaves 0.0496 m³/s

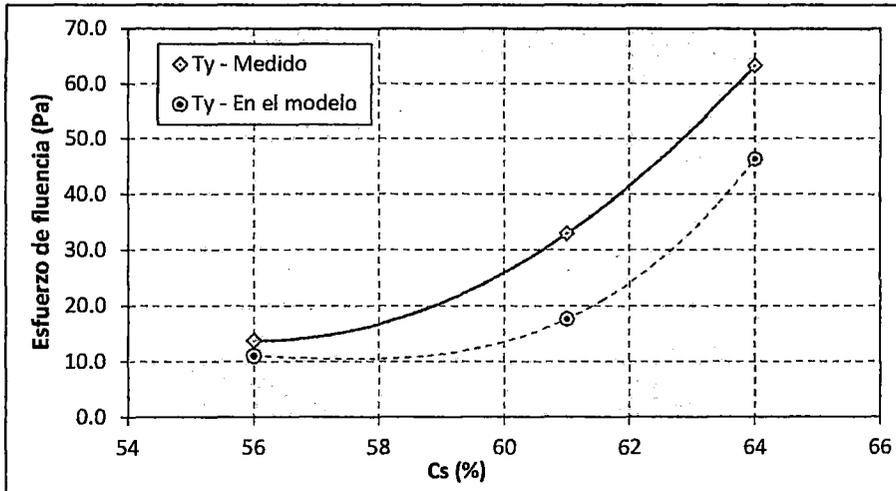


Figura C.2 Comportamiento del esfuerzo de fluencia medido y modelado, variando el contenido de sólidos - muestra CH01. Fuente Elaboración propia.

C.3 RESULTADOS DEL MODELAMIENTO

Considerando los perfiles de los años 2009 y 2013 y empleando las propiedades del relave descritas líneas arriba se ha realizado el modelamiento a escala real del depósito de relaves. El objetivo es verificar que la metodología de corrección y el modelo numérico basado en equilibrio límite dan buenos resultados en casos reales (Ver Figura C.3).

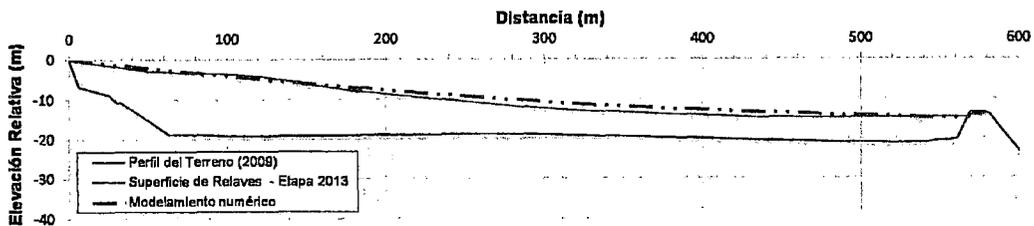


Figura N° C.3 Comparación de los Resultados del Modelamiento y el Perfil Real de Relaves