

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES  
SANTIAGO-CHILE



**Migración de la fase sólida de pulpas sedimentables en ductos de larga distancia**

Memoria de titulación presentada por

**Consuelo Paz Salinas Monsalve**

Como requisito parcial para optar al título de

**Ingeniero Civil**

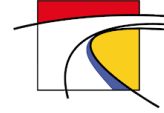
Profesor Guía

Sebastián Rayo Villanueva

Profesor Correferente

Álvaro Ossandón Álvarez

Mayo 2021



## Agradecimientos

Sin duda lo primero que viene a mi mente al momento de extender mis agradecimientos, es mi familia: mi abuela Mirtha Guerrero, mi mamá Gabriela Monsalve, mi hermana Bárbara Collao, mi hermano Marco Salinas, junto con su familia también: Tamara Bianchi, Florencia Salinas y Julieta Salinas. Gracias por siempre confiar en mí, por ser mi gran apoyo y compañía en todo momento, infinitas gracias.

A mi pololo José Cofré, por ser mi gran compañero y apoyo durante toda nuestra estadía en la universidad y en la vida. Por ayudarme, animarme y reír conmigo cada vez que lo necesité.

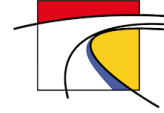
A las amigas y los amigos que me entregó la universidad, por todos los momentos alegres y no tan alegres que pasamos.

Ahora, quiero agradecer a la comisión revisora, principalmente por interesarse en este trabajo, por todas sus sugerencias, comentarios y en general su buena disposición. Especialmente quisiera agradecer a mi profesor guía, Sebastián Rayo, por confiar en mí para realizar este estudio, motivarme y acompañarme en el proceso. Además, quisiera agradecer a José Muñoz, por despertar el interés en mí en el área minera y ayudarme en el camino.

También quiero agradecer al Centro de Investigación de JRI, especialmente a: Pamela Garrido y Patricia Fernández, por abrirme las puertas del laboratorio y ayudarme cada vez que lo necesité, y a José Donoso, por apoyarme en el desarrollo de todos los ensayos y pruebas que requerí.

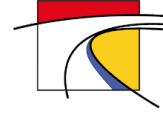


UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA



# Dedicatoria

*A mi madre, por creer en mí más que yo misma. Por su infinita entrega y preocupación por mí y mis hermanos.*



## Resumen

En la industria minera, ante ciertas variaciones operacionales o emergencias externas se hace necesario detener el transporte de pulpa de concentrado de cobre. En este escenario, bajo la detención del transporte hidráulico, se genera una separación entre la fase sólida y la fase líquida de la pulpa mineral, producto de la sedimentación de partículas, formando un lecho de sedimento en la parte inferior de la tubería. En el caso de que la pendiente de la tubería sea suficientemente grande, las partículas sólidas comienzan a deslizar entre ellas, migrando hacia zonas de baja pendiente y/o puntos bajos del trazado, lo que corresponde a la migración de partículas sólidas. La ocurrencia de este fenómeno genera problemas operacionales durante el reinicio del transporte de pulpa, provocados principalmente por el aumento de densidad de la pulpa en los puntos bajos del trazado.

En estudios anteriores se ha abordado este problema a través de dos enfoques: empleando simulaciones numéricas, complementadas experimentalmente con pulpas idealizadas y con modelos predictivos generados a partir de datos operacionales.

En este trabajo, el enfoque fue analizar la validez del procedimiento de ensayo utilizado actualmente, para evaluar si es posible resuspender las partículas de concentrado de cobre ante una detención. Para esto, se ajustaron algunas características del equipo y la metodología del ensayo, y se implementaron un sistema de extracción de muestras y un sistema de procesamiento de imágenes para describir de mejor forma la mecánica de la migración de partículas y de esta forma, determinar la influencia tanto de la pendiente del trazado como de la concentración de partículas sólidas.

En total se desarrollaron 12 ensayos con pulpa de concentrado de cobre proveniente de un yacimiento minero, combinando cuatro pendientes (entre 5 y 20%) y tres concentraciones de pulpa ( $C_p$  entre 55 y 65%), utilizando valores dentro del rango operacional encontrado comúnmente en concentraductos operativos actualmente. El análisis de los resultados obtenidos permitió determinar que ambas variables poseen un efecto en la morfología de la pulpa al final de cada ensayo. Como conclusión principal, se encontró que el comportamiento más desfavorable frente a migración de partículas, dentro del rango de pendientes del sistema y concentraciones exploradas, se encuentra dominado por la concentración de sólidos más baja, correspondiente a 55%, y la condición más favorable por la pendiente del sistema más baja, correspondiente a 5%.

Por último, se analizó la metodología de ensayo existente actualmente y se establecieron algunas oportunidades de mejora. Así como también se proponen algunas oportunidades de trabajos de investigación para continuar con el estudio del fenómeno migratorio a mayor escala y evaluando otras variables que no fueron consideradas en este estudio.



## Abstract

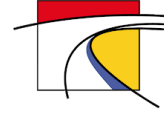
In the mining industry, when faced with certain operational variations or external emergencies, it becomes necessary to stop the transport of copper concentrate slurry. In this scenario, when the hydraulic transport is stopped, a separation is generated between the solid phase and the liquid phase of the mineral pulp, due to the sedimentation of particles, forming a sediment bed in the lower part of the pipeline. In the event that the slope of the pipe is sufficiently large, the solid particles begin to slide between them, migrating towards areas of low slope and/or low points of the route, which corresponds to the migration of solid particles. The occurrence of this phenomenon generates operational problems during the restart of the slurry transport, mainly caused by the increase of slurry density in the low points of the route.

Previous studies have addressed this problem through two approaches: through numerical simulations, experimentally complemented with idealized slurries, and with predictive models generated from operational data.

In this work, the approach was to analyze the validity of the test procedure currently used to evaluate whether it is possible to resuspend copper concentrate particles upon detention. For this purpose, some features of the equipment and the test methodology were adjusted, and a sample extraction system and an image processing system were implemented to better describe the mechanics of particle migration and thus determine the influence of both the slope of the trace and the concentration of solid particles.

A total of 12 tests were developed with copper concentrate pulp from a mining deposit, combining four slopes (between 5 and 20%) and three slurry concentrations ( $C_p$  between 55% y 65%), using values within the operational range commonly found in currently operating concentrators. The analysis of the results obtained allowed determining that both variables have an effect on the slurry morphology at the end of each test. As a main conclusion, it was found that the most unfavorable behavior in terms of particle migration, within the range of system slopes and concentrations explored, is dominated by the lowest solids concentration, corresponding to 55%, and the most favorable condition by the lowest system slope, corresponding to 5%.

Lastly, the current testing methodology was analyzed and some opportunities for improvement were established. Some research work opportunities were also proposed to continue with the study of the migratory phenomenon on a larger scale and evaluating other variables that were not considered in this study.



# Glosario

$\rho_s$ : densidad del sólido

$M$ : masa del sólido

$V$ : volumen del sólido

$\gamma$ : peso específico del sólido

$g$ : aceleración de gravedad

$S$ : densidad relativa del sólido

$\rho_l$ : densidad del agua

$d_{tamiz}$ : diámetro de tamiz

$d_n$ : diámetro nominal de partícula

$D_{10}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{80}$ : diámetros característicos por los cuales pasa el 10%, 50% y 80% del material

$\rho_f$ : densidad del fluido

$\rho_p$ : densidad de la pulpa

$S_p$ : densidad relativa de la pulpa

$C_v$ : Concentración en volumen de la pulpa

$C_p$  ( $C_m$ ): Concentración en peso de la pulpa

$C_{v,máx}$ : Concentración máxima de empaquetamiento

$\nu$ : viscosidad cinemática

$\mu$ : viscosidad dinámica

$\tau$ : esfuerzo de corte sobre el fluido

$\dot{\gamma}$ : velocidad de deformación angular

$C_a$ : coeficiente de arrastre hidrodinámico

$Re$ : número de Reynolds

$Re_p$ : número de Reynolds de partícula

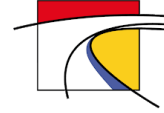
$W$ : velocidad de sedimentación de Stokes

$D_i$ : Diámetro interno del tubo de ensayo

$e$ : espesor de la pared del tubo de ensayo



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA

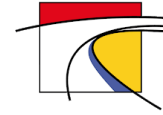


$L$ : longitud del tubo de ensayo

$i_s$ : pendiente del sistema del ensayo

$\theta_s$ : ángulo del sistema del ensayo

$i_p$ : pendiente de la interfaz sólido-líquido del ensayo



# Índice de contenido

Agradecimientos .....	2
Dedicatoria .....	3
Resumen.....	4
Abstract .....	5
Glosario.....	6
1. Introducción.....	17
1.1. Objetivos.....	18
2. Revisión bibliográfica .....	20
2.1. Componentes de un concentrado .....	20
2.2. Caracterización de la fase dispersa.....	22
2.2.1 Densidad y peso específico .....	22
2.2.2 Tamaño de las partículas.....	23
2.2.3 Forma de las partículas.....	24
2.3. Caracterización de pulpas metalúrgicas.....	26
2.3.1 Densidad y peso específico .....	26
2.3.2 <b>pH</b> .....	26
2.3.3 Concentración de sólidos en una pulpa minera .....	27
2.3.4 Reología.....	28
2.3.4.1 Viscosidad .....	28
2.3.4.2 Curva reológica.....	31
2.3.5 Efecto de parámetros característicos en el comportamiento reológico de pulpas.....	33
2.4. Sedimentación de partículas.....	35
2.4.1 Sedimentación de una partícula única en un medio limitado .....	36
2.4.2 Sedimentación de partículas a altas concentraciones .....	37
2.4.2.1 Sedimentación de suspensiones monodispersas .....	38
2.4.2.2 Sedimentación de suspensiones polidispersas .....	39
2.4.2.3 Sedimentación en planos inclinados .....	41
2.5. Ángulo de reposo y ángulo de deslizamiento.....	44
2.6. Migración de partículas.....	45
2.6.1 Estudios relacionados.....	47
2.6.1.1 Prueba ángulo de reposo.....	47



2.6.1.2	Análisis de datos operacionales .....	50
2.6.1.3	Experimentaciones y simulaciones relacionadas .....	52
2.7.	Características operativas de algunos concentrados de Sudamérica .....	59
3.	Preparación del trabajo experimental .....	61
3.1.	Variables consideradas .....	61
3.2.	Método de ensayo.....	61
3.3.	Ensayos exploratorios.....	63
3.3.1	Primera etapa.....	64
3.3.2	Análisis de resultados primera etapa.....	65
3.3.3	Segunda etapa.....	71
3.4.	Definición métodos de medición.....	74
3.5.	Caracterización muestra completa.....	81
3.5.1	Densidad de sólidos .....	82
3.5.2	Granulometría.....	82
3.5.3	Reología .....	83
3.5.4	Penetrometría.....	85
4.	Ensayos formales .....	88
4.1.	Descripción .....	88
4.2.	Resultados .....	91
4.2.1	Ensayos a $C_p = 65\%$ (E.F.1-E.F.4).....	91
4.2.2	Ensayos a $C_p = 60\%$ (E.F.5-E.F.8).....	99
4.2.3	Ensayos a $C_p = 55\%$ (E.F.9-E.F.12).....	107
5.	Análisis y discusión de resultados.....	114
6.	Conclusiones.....	122
7.	Recomendaciones.....	125
8.	Referencias .....	127
9.	Anexos.....	130
9.1.	Medición de $C_p$ durante la preparación y descarga de muestras.....	130
9.2.	Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido $ip$ en función del tiempo.....	133
9.3.	Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido-líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de los ensayos .....	138
9.4.	Imágenes capturadas de la vista longitudinal en cada ensayo .....	142
9.5.	Imágenes capturadas de la vista transversal en cada ensayo.....	178



# Índice de figuras

Figura 2.1 Estación disipadora compuesta por anillos fijos y variables (Muñoz, 2019).....	20
Figura 2.2 Perfil Hidráulico concentrado Antamina con ubicación de estaciones típicas. (Base de datos de proyectos JRI, 2020).....	21
Figura 2.3 Esquema de las dimensiones triaxiales de una partícula (García & Maza, 1998).....	25
Figura 2.4 Comportamiento de un fluido viscoso entre dos placas paralelas (Fernández, 2013).....	28
Figura 2.5 Esquemización de comportamientos reológicos típicos. En rojo se destaca la curva que se asemeja al comportamiento típico de pulpas mineras (Fuentes, 2011).....	31
Figura 2.6 Definiciones gráficas de viscosidad (Fuentes, 2011) .....	32
Figura 2.7 Esquemización de la variación de la viscosidad aparente en función del diámetro de partícula (adaptado de Fuentes, 2011) .....	33
Figura 2.8 Viscosidad aparente en función de la concentración (adaptado de Fuentes, 2011) .....	34
Figura 2.9 Tensión de fluencia en función de la concentración en volumen (adaptado de Fuentes, 2011).....	34
Figura 2.10 Viscosidad aparente en función del pH (adaptado de Fuentes, 2011).....	35
Figura 2.11 Tensión de fluencia en función del <b>pH</b> (adaptado de Fuentes, 2011).....	35
Figura 2.12 Regiones que se desarrollan durante la sedimentación de una mezcla de tres tipos de partículas (Davis & Acrivos, 1985) .....	40
Figura 2.13 Funciones de obstaculización propuestas por diferentes autores. En este gráfico $\phi$ corresponde a la concentración volumétrica definida como $Cv$ en este estudio(Palma et al., 2016) .....	41
Figura 2.14 Diferentes regiones del campo de flujo durante la sedimentación en un canal inclinado: (A) región de fluido libre de partículas sobre la suspensión, (B) interfase entre el fluido libre de partículas y la suspensión, (C) suspensión, (D) capa delgada de fluido libre de partículas debajo de la capa de cara hacia abajo, (E) sedimento concentrado (Davis & Acrivos, 1985).....	42
Figura 2.15 a) Un montículo de semillas de mostaza que está inclinado en un ángulo más bajo que el ángulo de reposo. b) El mismo montículo después que se ha aumentado ligeramente la pendiente para crear una avalancha. Notar que el flujo se produce solo a lo largo de la superficie y que las semillas en la parte más profunda del montículo no participan en el movimiento (Jaeger et al., 1996) .....	44
Figura 2.16 Análisis de casos ensayo ángulo de reposo (Centro de Investigación JRI S. A., 2019) .....	45
Figura 2.17 Descripción secuencial del fenómeno de migración en un concentrado (Elaboración propia).....	46
Figura 2.18 Dependencia de la longitud crítica del tapón <b>Lp, c</b> con la concentración en masa (definida como <b>Cp</b> en este estudio), $\phi_0$ a) Diferentes valores de gravedad específica de los sólidos, con $S=4.2$ y $2.7$ que asemejan el concentrado de cobre y relave, respectivamente. b) Diferentes valores de diámetro interno de la tubería (C. F. Ihle, 2014) .....	47
Figura 2.19 Esquemización de los resultados de la prueba de ángulo de reposo: (a) con obstrucción, $a \neq 0, b \neq 0$ ; (b) sin obstrucción, $a \neq 0, b = 0$ (Bragança & Silva, 2007).....	48
Figura 2.20 Bosquejo de dimensiones de las cajas: (a) Caja Tipo 1, (b) Caja Tipo 2, (c) Caja Tipo 3 (Cotroneo, 2015).....	52
Figura 2.21 Altura del espesor compuesto por finas y gruesas, para los experimentos con ángulo de inclinación del contenedor de $20^\circ$ y concentración volumétrica total de 35% sin percolación (Cotroneo, 2015).....	53



Figura 2.22 Bosquejo del fenómeno de percolación, donde el lecho de sedimento de partículas gruesas representa el lecho poroso, por donde percolan las finas (partículas rojas). Además, se tiene un lecho donde se depositan las partículas que percolan (partículas de color azul).  $\delta$  simboliza el espesor de la suspensión de partículas finas y  $\Delta$  el espesor de partículas finas (Cotroneo, 2015) ..... 53

Figura 2.23 (a) Esquema del montaje experimental. (A): contenedor de acrílico (**25x21x3 [cm3]**) (ancho x alto x grosor), (B): perlas de resina, (C): cámara de video, (D): conector de laboratorio ajustable, (E): soporte inclinado, (F) iluminación trasera LED. (b) Configuración general del problema (Palma et al., 2016)..... 55

Figura 2.24 Esquema del modelo conceptual: (a) G1: Geometría del ducto inclinado. (b) Geometría del ducto inclinado incluyendo una sección horizontal. Las paredes del ducto y los perfiles de medición son representados por  $w_j$ , con  $j \in \{1, \dots, 6\}$  y  $MP_j$ , con  $j \in \{1, \dots, 4\}$ , respectivamente. La variable  $hSL$  fue utilizada en una prueba de convergencia. En cuanto a la geometría,  $L0 = 40 \text{ mm}$  y  $L1 = 500 \text{ [mm]}$  (Palma et al., 2018) ..... 57

Figura 2.25 Magnitud del campo de velocidades de la fase dispersa para  $t = 50 \text{ s}$ ,  $t = 100 \text{ s}$ ,  $t = 150 \text{ s}$  y  $t = 200 \text{ s}$ . El panel de la izquierda muestra la geometría G1 y el de la derecha la geometría G2. En el recuadro se muestran los detalles de  $u$ . Las flechas negras representan la dirección del flujo de las partículas. Las condiciones numéricas son  $\theta s = 30^\circ$ ,  $\phi_0 = 0.30$  ( $Cv = 30\%$ ) y  $v = 100 \text{ [mPa} \cdot \text{s]}$ . La barra de color representa la magnitud de la velocidad de las partículas (Palma et al., 2018)..... 58

Figura 3.1 Vista en planta del montaje utilizado para el ensayo ángulo de reposo-resuspensión .... 62

Figura 3.2 Vista transversal del montaje utilizado para el ensayo ángulo de reposo-resuspensión incluyendo definiciones de Altura material sedimentado y Altura libre ..... 63

Figura 3.3 Definición geométrica de la pendiente del sistema ( $is$ ) y de la pendiente de la interfaz sólido-líquido ( $ip$ ) ..... 63

Figura 3.4 Método de agitación empleado en la primera etapa de los ensayos exploratorios ..... 64

Figura 3.5 Altura libre en función del tiempo para condiciones de ensayo  $Cp = 67\%$  e  $is = 15\%$  en tubo 1 ..... 66

Figura 3.6 Altura libre en función del tiempo para condiciones de ensayo  $Cp = 55\%$  e  $is = \{5\%, 10\%, 15\%, 20\%\}$  en tubo 1 ..... 67

Figura 3.7 Comparación cualitativa del lecho sedimentado en su vista longitudinal para los ensayos realizados a  $Cp = 55\%$  y  $is = [0\%, 5\%, 10\%, 15\%, 20\%]$  en tubo 1 ..... 68

Figura 3.8 Vista de la cara transversal del tubo aguas abajo transcurridas 24 [h] de ensayo para los casos en que  $is = \{5\%, 10\%, 15\%\}$  en tubo 1, para pendientes mayores no se registró altura libre 68

Figura 3.9 Altura libre en función del tiempo para condiciones de ensayo  $Cp = 55\%$  y  $is = \{5\%, 10\%, 15\%, 20\%\}$  en tubo 2 ..... 69

Figura 3.10 Comparación cualitativa del lecho sedimentado en su vista longitudinal para los ensayos realizados a  $Cp = 55\%$  y  $is = [5\%, 10\%, 15\%, 20\%]$  en tubo 2..... 69

Figura 3.11 Vista de la cara transversal del tubo aguas abajo transcurridas 24 [h] de ensayo para los casos en que  $is = \{5\%, 10\%, \}$  en tubo 2, para pendientes mayores no se registró altura libre ..... 70

Figura 3.12 Vista en elevación del método de agitación utilizado en el CIMS JRI y aplicado a la segunda etapa de ensayos exploratorios y ensayos formales..... 72

Figura 3.13 Primera prueba del sistema de extracción de muestras implementado en tubo 1. Los orificios se encuentran enumerados de arriba hacia abajo como 1, 2 y 3..... 73



Figura 3.14 Esquematación de la operación del sistema de extracción de muestras. a) ingreso de agua y b) extracción de muestra de pulpa. A) pinza cerrada, B) pieza T, C) jeringa.....	73
Figura 3.15 Sistema de extracción de muestras definitivo .....	74
Figura 3.16 Puntos de referencia y sistema coordenado real utilizados para la calibración y rectificación de la cámara en el primer ensayo formal.....	75
Figura 3.17 Cuadro de diálogo principal <i>Camera Calibration Toolbox</i> .....	75
Figura 3.18 Imágenes del tablero utilizadas para la calibración .....	76
Figura 3.19 Parámetros intrínsecos de la cámara generados por MATLAB .....	76
Figura 3.20 Parámetros extrínsecos de la cámara generados por MATLAB, junto con la proyección espacial de las mediciones realizadas con el tablero de ajedrez .....	77
Figura 3.21 Error en las proyecciones asociadas al proceso de calibración .....	78
Figura 3.22 Comparación entre coordenadas reales o medidas y calculadas .....	79
Figura 3.23 Ejemplo de la cantidad y ubicación de los puntos extraídos manualmente en cada imagen de cada ensayo. En rojo los puntos correspondientes a la interfaz y en azul a las paredes del tubo.	80
Figura 3.24 Ubicación de los nuevos ejes definidos para el análisis de resultados de los ensayos formales.....	80
Figura 3.25 Ejemplo de la medición de altura libre en la vista transversal del tubo de ensayo.....	81
Figura 3.26 Curva granulométrica promedio de original y duplicado de la muestra completa .....	83
Figura 3.27 Tensión de fluencia Bingham $\tau_f$ de la muestra para diferentes concentraciones en peso .....	84
Figura 3.28 Viscosidad Bingham $\mu$ de la muestra para diferentes concentraciones en peso .....	84
Figura 3.29 Penetrómetro (Centro de Investigación JRI S. A., 2020) .....	85
Figura 3.30 Puntos de medición en vaso de precipitado para penetrometría (Centro de Investigación JRI S. A., 2020) .....	86
Figura 4.1 Esquematación del proceso de cálculo de la pendiente promedio de los tramos 1, 2 y 3 de la tubería. ....	90
Figura 4.2 Esquematación de las mediciones de la altura de la interfaz a lo largo del tubo de ensayo. Esta figura no se encuentra a escala.....	91
Figura 4.3 Registros de la altura libre en función del tiempo para concentración de sólidos $C_p = 65\%$ y pendiente del sistema variable .....	92
Figura 4.4 Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.1.....	93
Figura 4.5 Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.2.....	93
Figura 4.6 Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.3.....	94
Figura 4.7 Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.4.....	94
Figura 4.8 Comparación de la posición final de interfaz sólido líquido de los ensayos a $C_p = 65\%$ .....	95
Figura 4.9 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido $i_{pen}$ en función del tiempo para E.F.1 .....	96
Figura 4.10 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.1 .....	97



Figura 4.11 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.2 .....	97
Figura 4.12 Puntos 1, 2 y 3 definidos a diferentes alturas en la cara transversal aguas abajo del tubo .....	98
Figura 4.13 Registros de la altura libre en función del tiempo para concentración de sólidos $C_p = 60\%$ y pendiente del sistema variable .....	100
Figura 4.14 Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.5.....	101
Figura 4.15 Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.6.....	101
Figura 4.16 Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.7.....	102
Figura 4.17 Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.8.....	102
Figura 4.18 Comparación de la posición final de interfaz sólido líquido de los ensayos a $C_p = 60\%$ .....	103
Figura 4.19 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido $ip$ en función del tiempo para E.F.5 .....	104
Figura 4.20 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.5 .....	105
Figura 4.21 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.6 .....	105
Figura 4.22 Registros de la altura libre en función del tiempo para concentración de sólidos $C_p = 55\%$ y pendiente del sistema variable .....	107
Figura 4.23 Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.9.....	108
Figura 4.24 Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.10.....	108
Figura 4.25 Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.11.....	109
Figura 4.26 Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.12.....	109
Figura 4.27 Comparación de la posición final de interfaz sólido líquido de los ensayos a $C_p = 55\%$ .....	110
Figura 4.28 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido $ip$ en función del tiempo para E.F.9 .....	111
Figura 4.29 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.9 .....	112
Figura 4.30 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.10.....	112
Figura 5.1 Producción de líquido clarificado a 1 [h] de ensayo (A) para E.F.1, E.F.5 y E.F.9 y estado final de los mismos ensayos (B).....	115
Figura 5.2 Producción de líquido clarificado a 1 [h] de ensayo (A) para E.F.2, E.F.6 y E.F.10 y estado final de los mismos ensayos (B).....	116



Figura 5.3 Producción de líquido clarificado a 1 [h] de ensayo (A) para E.F.3, E.F.7 y E.F.11 y estado final de los mismos ensayos (B) .....	117
Figura 5.4 Producción de líquido clarificado a 1 [h] de ensayo (A) para E.F.4, E.F.8 y E.F.12 y estado final de los mismos ensayos (B) .....	118
Figura 5.5 Pendiente final de la interfaz <i>ip</i> en función de la pendiente del sistema <i>is</i> para las concentraciones analizadas.....	119
Figura 5.6 Altura libre final en función de la pendiente del sistema <i>is</i> para las concentraciones analizadas .....	120
Figura 7.1 Esquematización de un posible nuevo mecanismo de agitación del tubo de ensayo ángulo de reposo y re suspensión.....	126
Figura 9.1 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido <i>ipen</i> función del tiempo para E.F.2 .....	133
Figura 9.2 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido <i>ipen</i> función del tiempo para E.F.3 .....	134
Figura 9.3 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido <i>ipen</i> función del tiempo para E.F.4 .....	134
Figura 9.4 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido <i>ipen</i> función del tiempo para E.F.6 .....	135
Figura 9.5 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido <i>ipen</i> función del tiempo para E.F.7 .....	135
Figura 9.6 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido <i>ipen</i> función del tiempo para E.F.8 .....	136
Figura 9.7 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido <i>ipen</i> función del tiempo para E.F.10 .....	136
Figura 9.8 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido <i>ipen</i> función del tiempo para E.F.11 .....	137
Figura 9.9 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido <i>ipen</i> función del tiempo para E.F.12 .....	137
Figura 9.10 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.3 .....	138
Figura 9.11 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.4 .....	139
Figura 9.12 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.7 .....	139
Figura 9.13 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.8 .....	140
Figura 9.14 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.11.....	140
Figura 9.15 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.12.....	141
Figura 9.16 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.1 (1).....	143
Figura 9.17 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.1 (2).....	144
Figura 9.18 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.1 (3).....	145
Figura 9.19 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.2 (1).....	146
Figura 9.20 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.2 (2).....	147



Figura 9.21	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.2 (3)	148
Figura 9.22	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.3 (1)	149
Figura 9.23	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.3 (2)	150
Figura 9.24	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.4 (1)	151
Figura 9.25	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.4 (2)	152
Figura 9.26	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.4 (3)	153
Figura 9.27	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.5 (1)	154
Figura 9.28	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.5 (2)	155
Figura 9.29	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.5 (3)	156
Figura 9.30	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.6 (1)	157
Figura 9.31	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.6 (2)	158
Figura 9.32	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.6 (3)	159
Figura 9.33	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.7 (1)	160
Figura 9.34	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.7 (2)	161
Figura 9.35	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.7 (3)	162
Figura 9.36	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.8 (1)	163
Figura 9.37	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.8 (2)	164
Figura 9.38	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.8 (3)	165
Figura 9.39	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.9 (1)	166
Figura 9.40	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.9 (2)	167
Figura 9.41	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.9 (3)	168
Figura 9.42	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.10 (1)	169
Figura 9.43	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.10 (2)	170
Figura 9.44	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.10 (3)	171
Figura 9.45	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.11 (1)	172
Figura 9.46	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.11 (2)	173
Figura 9.47	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.11 (3)	174
Figura 9.48	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.12 (1)	175
Figura 9.49	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.12 (2)	176
Figura 9.50	Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.12 (3)	177
Figura 9.51	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.1 (1)	178
Figura 9.52	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.1 (2)	179
Figura 9.53	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.1 (3)	180
Figura 9.54	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.2 (1)	181
Figura 9.55	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.2 (2)	182
Figura 9.56	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.2 (3)	183
Figura 9.57	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.3 (1)	184
Figura 9.58	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.3 (2)	185
Figura 9.59	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.4 (1)	186
Figura 9.60	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.4 (2)	187
Figura 9.61	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.4 (3)	188
Figura 9.62	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.5 (1)	189
Figura 9.63	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.5 (2)	190
Figura 9.64	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.5 (3)	191
Figura 9.65	Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.6 (1)	192

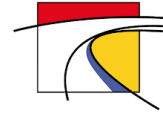
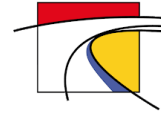


Figura 9.66 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.6 (2).....	193
Figura 9.67 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.6 (3).....	194
Figura 9.68 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.7 (1).....	195
Figura 9.69 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.7 (2).....	196
Figura 9.70 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.7 (3).....	197
Figura 9.71 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.8 (1).....	198
Figura 9.72 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.8 (2).....	199
Figura 9.73 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.8 (3).....	200
Figura 9.74 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.9 (1).....	201
Figura 9.75 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.9 (2).....	202
Figura 9.76 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.9 (3).....	203
Figura 9.77 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.10 (1).....	204
Figura 9.78 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.10 (2).....	205
Figura 9.79 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.10 (3).....	206
Figura 9.80 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.11 (1).....	207
Figura 9.81 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.11 (2).....	208
Figura 9.82 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.11 (3).....	209
Figura 9.83 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.12 (1).....	210
Figura 9.84 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.12 (2).....	211
Figura 9.85 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.12 (3).....	212



# 1. Introducción

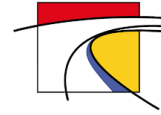
Las pulpas mineras corresponden a una mezcla de partículas sólidas (fase dispersa) en agua (fase continua) que, dependiendo del tipo de sólido transportado, se pueden clasificar en pulpas de mineral, relave y concentrado. Su transporte es parte esencial del proceso minero, y está presente tanto dentro de las plantas concentradoras (distancias cortas) como en su entorno (largas distancias). En Chile es frecuente el transporte a larga distancia, debido principalmente a que la mayoría de los yacimientos mineros se ubican sobre los 3000 [msnm] (Carrasco & Vega, 2011), donde se hace necesario transportar el mineral con valor económico hacia puertos y el relave, sin valor económico, a depósitos de relaves, los cuales frecuentemente están ubicados en sectores lejanos a las plantas concentradoras.

En Chile y el mundo el transporte hidráulico de larga distancia, debido a las ventajas que presenta, se ha desarrollado y consolidado frente a otras tecnologías, tales como el transporte ferroviario, camiones, correas, cable (andarivel) y combinaciones de ellas a partir de 1950 (Rayo & Vásquez, 2013). Entre las ventajas que destacan se encuentran: costo de operación más bajo que transporte terrestre; mayor seguridad para las personas y el medio ambiente, producto de que el riesgo de rotura de cañerías es bajo; mínimo impacto con terceros en etapa de operación; manejo de agua permite integrar el recurso a otras etapas del proceso minero; y alta productividad, porque se necesitan pocos operadores y el proceso se puede automatizar casi completamente.

Muchas empresas mineras, tanto públicas como privadas, operan este tipo de ductos en Chile. La mayoría cuenta con relaveductos y concentraductos que presentan marcadas diferencias, no solo en el tipo de pulpa mineral que transportan sino también en su capacidad, dado que típicamente en faenas mineras la ley mineral es menor al 1%, es decir, de la roca mineralizada que ingresa a la Planta Concentradora, el 1% corresponde a cobre puro y lo demás a relave. Como consecuencia de lo anterior, los concentraductos poseen diámetros notoriamente menores que los relaveductos y debido a los requerimientos operacionales de estos sistemas, generalmente se usan bombas de desplazamiento positivo para los primeros (menor capacidad volumétrica y mayor presión de descarga) y bombas centrífugas para los segundos (mayor capacidad volumétrica y menor presión de descarga).

Durante detenciones en concentraductos, ocurre que la fase sólida de la pulpa mineral, producto de la sedimentación natural de partículas, se separa de la fase líquida, formando un lecho de sedimento en la parte inferior de la tubería. En el caso de que la pendiente de la tubería sea suficiente, las partículas sólidas comienzan a deslizar entre ellas, migrando hacia zonas de baja pendiente y/o puntos bajos del trazado. A este transporte de partículas que ocurre posterior a la sedimentación se le denomina migración.

La ocurrencia de este fenómeno puede generar problemas operacionales en el reinicio del sistema, provocados fundamentalmente por el aumento de densidad que se genera en puntos bajos, lo que causa el aumento de resistencia de la masa de sólidos a ser dispersada y refluidizada, pudiendo ocasionar un embanque generalizado, pérdidas de producción y riesgos a las personas, ambientales y a las instalaciones. Además, los costos de implementación y de operación resultan más altos, ya que, para sortear pendientes altas del terreno natural, el trazado resulta más largo, lo que implica un mayor gasto de inversión al requerir más kilómetros de tubería; y, por otra parte, también puede aumentar la



energía necesaria para realizar el transporte en forma segura, lo que se traduce en mayor gasto operacional.

Una forma de evitar este problema es no realizar detenciones con pulpa, es decir, descargar la tubería con pulpa de concentrado, llenarla con agua y proceder a la detención, pero debido a la escasez del recurso hídrico y su elevado valor, este procedimiento no es recomendable. Actualmente, la forma de proceder ante detenciones prolongadas de concentraductos consiste en empaquetar la tubería con pulpa, aunque no se sabe con certeza el tiempo máximo que el ducto puede estar en este estado sin generar los riesgos descritos en el párrafo anterior. Los tiempos máximos de empaquetamiento son, usualmente, resultado de la experiencia de los operadores de estos sistemas, lo que puede conllevar un aumento del riesgo de embanque y/o roturas, con posible daño hacia terceros.

En cuanto al diseño actual de concentraductos, se utiliza una recomendación empírica, basada en la experiencia de consultores y diseñadores, que corresponde a no exceder 15% de pendiente en longitudes acotadas, para evitar la migración de sólidos y su acumulación en puntos de baja pendiente. Por otra parte, en relaveductos o mineroductos la recomendación es no detenerlos, debido a que por sus granulometrías más gruesas y concentraciones menores en comparación a las de un concentraducto, la sedimentación es más rápida y el embanqueamiento de estos sistemas puede ocurrir en forma más precipitada.

En 2008, Rayo realizó un análisis sobre el manejo de embanques, donde señaló que, de acuerdo con las estadísticas sudamericanas, hasta esa fecha se habían reportado (formal o informalmente), alrededor de 20 embanqueamientos en los casi 20 ductos de pulpa de larga distancia que operaban desde hace casi 30 años. Lo anterior implica un riesgo potencial promedio del 3 a 4% por año de que ocurra un embanque en una tubería de transporte de sólidos. Entre las causas variadas de estos embanques se encuentra directamente el fenómeno de migración (Rayo, 2008).

Considerando lo anterior, y teniendo en cuenta la participación que posee Chile en la producción mundial de cobre y la relevancia que ello representa para el producto interno bruto del país: 12,6% promedio entre 2013 y 2019 (COCHILCO, 2019), es atinente la evaluación de mejoras en los criterios de diseño de estos sistemas, de modo que por una parte, puedan ser aún más seguros para las personas, instalaciones y medioambiente y por otra parte, permitan una reducción del costo de inversión (CAPEX) y/o de operación (OPEX). El desarrollo de esta investigación apunta en esa línea, específicamente al estudio del fenómeno migratorio en concentraductos.

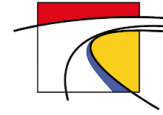
## 1.1. Objetivos

Este trabajo de título tiene por objetivo general el determinar, mediante experimentación, la relación entre las propiedades físicas de la pulpa y la pendiente máxima del trazado de la impulsión, que permita establecer una metodología de diseño para pendientes máximas en sistemas de transporte de concentrado de cobre a larga distancia. Y, en consecuencia, validar o refutar experimentalmente la pendiente máxima recomendada actualmente para mitigar los efectos de la migración en concentraductos durante detenciones. Los objetivos específicos de este trabajo son:

1. Generar una metodología experimental, dentro del ensayo de determinación de ángulo de reposo, que permita visualizar el efecto de la pendiente en el fenómeno de migración.



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA



2. Realizar, observar y medir cuáles son las características de la pulpa que tienen una mayor incidencia en la migración a través del análisis de los resultados experimentales.
3. Evaluar la metodología existente y proponer oportunidades de mejora en el método experimental vigente.
4. A partir del análisis de resultados evaluar la factibilidad de proponer una expresión o metodología de diseño actualizada para pendientes máximas en concentraductos.

## 2. Revisión bibliográfica

### 2.1. Componentes de un concentrado

Generalmente, un concentrado se caracteriza por poseer los siguientes elementos e instalaciones:

**Tubería o *pipeline*:** cañería que permite el transporte de la pulpa a presión o superficie libre a lo largo de todo el trazado, generalmente de acero con o sin revestimiento interior.

**Estanques de cabeza:** estanques para el almacenamiento del concentrado con capacidad para adecuarse a fluctuaciones de la producción. Poseen agitadores en su interior para generar turbulencia y evitar la sedimentación de sólidos y el embanque.

**Estación de bombeo (*PS*):** permiten generar la energía hidráulica requerida para un sistema de transporte hidráulico en presión. Típicamente, para sistemas de transporte de concentrado a larga distancia están compuestas por bombas de desplazamiento positivo (PD), con bombas centrífugas horizontales de carga en la succión de dichas bombas para evitar cavitación.

**Estación disipadora:** permiten disipar el exceso de energía en un sistema de transporte de larga distancia y mantener presurizado el sistema, sobre todo en puntos altos. Están compuestas principalmente de anillos disipadores, generalmente ubicadas al final del trazado. Estas estaciones están compuestas por anillos fijos ubicados en la línea principal y anillos variables ubicado en líneas secundarias, operadas eventualmente mediante el accionamiento de válvulas cuando las condiciones operacionales así lo requieren. En Figura 2.1 se presenta una estación disipadora típica de pulpa.



Figura 2.1 Estación disipadora compuesta por anillos fijos y variables (Muñoz, 2019)

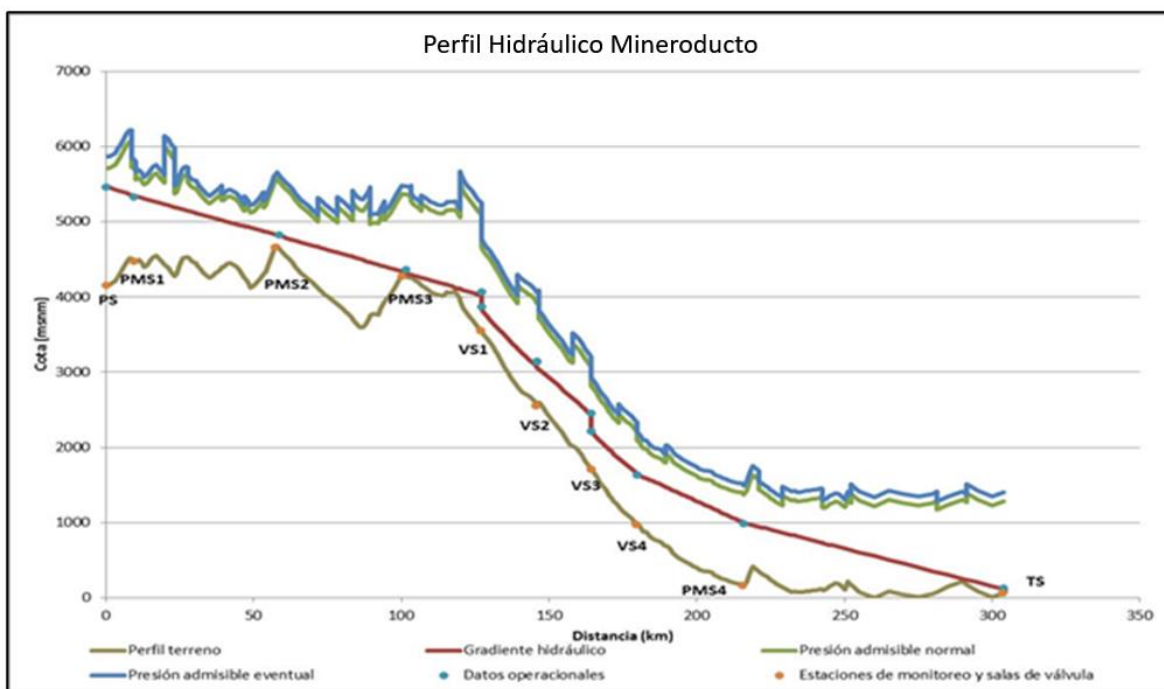
**Estación de válvulas (VS):** permiten segmentar una línea en caso de detenciones, permitiendo reducir la presión hacia aguas abajo y evitando así el sobredimensionamiento de la línea. No se utilizan durante la operación normal, solo son utilizadas durante detenciones con agua o pulpa.

**Estación de monitoreo (PMS):** generalmente ubicadas cada 50 o 60 [km] de trazado, adaptando esta distancia a las características de terreno para monitorear condiciones de escurrimiento en puntos altos y/o de fácil acceso. Están compuestas por manómetros y/o flujómetros.

**Estación de recepción (TS):** correspondiente a un estanque de acumulación y homogenización de descarga.

En la mayoría de los casos, en puntos bajos se cuenta con sistemas que permiten drenar la tubería en casos de emergencia o detenciones programadas.

En Figura 2.2 se incluye un Perfil Hidráulico de un concentrado de faena de explotación de la zona central de Perú, que transporta concentrado de cobre y zinc, donde se pueden distinguir los componentes descritos anteriormente.



**Figura 2.2 Perfil Hidráulico concentrado Antamina con ubicación de estaciones típicas. (Base de datos de proyectos JRI, 2020)**

Las instalaciones que posee este concentrado son las siguientes:

**Tubería o pipeline:** corresponde a una tubería de acero con revestimiento interno (*liner*) de HDPE y revestimiento externo de polietileno, su longitud total es de 302 [km] y posee diámetro de 8 a 10 [in]. Se encuentra instalada bajo el nivel del suelo.

**PS:** una estación de bombeo al inicio del trazado que incluye estanques de acondicionamiento.



**PMS:** 4 estaciones de monitoreo, algunas de ellas ubicadas en puntos altos y con mayor presencia al inicio del trazado, a modo de predecir las condiciones de escurrimiento aguas abajo y poder tomar decisiones operacionales.

**VS:** 4 estaciones de válvulas que, en este caso se encuentran compuestas por anillos de disipación y válvulas. Por tanto, esta instalación corresponde al conjunto de estación de válvulas y estación disipadora descritas anteriormente.

**TS:** ubicada al final del trazado y en este caso compuesta por el conjunto de: estación de válvulas, estación disipadora y estanques de homogenización.

## 2.2. Caracterización de la fase dispersa

Las principales características que interesan de un sedimento no cohesivo se refieren a las partículas que forman el sedimento, pero considerándolas como entes aislados: densidad y peso específico, tamaño, forma y velocidad de caída. Sin embargo, para entender la dinámica de los sedimentos no cohesivos no basta con estudiar únicamente las propiedades de las partículas individuales que lo constituyen, ya que el comportamiento de una partícula aislada sujeta a la acción de un flujo, es muy diferente de aquel que muestra cuando está formando parte de un conjunto (García & Maza, 1998). Por ello, es necesario también tener en cuenta las propiedades de un conjunto o volumen grande de partículas: relaciones entre pesos y volúmenes, distribución de los tamaños de partículas, velocidad de caída y ángulo de fricción interna o de reposo. En los siguientes acápite se presentan las propiedades de interés para este estudio con las definiciones realizadas por García y Maza (1998) para hidráulica fluvial y algunas particularidades señaladas por Fuentes (2011).

### 2.2.1 Densidad y peso específico

La densidad se considera como el cociente entre la masa de una substancia y su volumen a una temperatura especificada. La densidad de una partícula depende de su composición mineralógica, es decir, de la densidad de los minerales que la constituyen. Su formulación es:

$$\rho_s = \frac{M}{V} \quad (2.1)$$

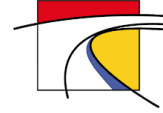
Donde

$\rho_s$ : densidad del sólido [ $kg/m^3$ ]

$M$ : Masa del sólido [ $kg$ ]

$V$ : volumen del sólido [ $m^3$ ]

A partir de esta definición, el peso específico del sólido se formula de la siguiente manera:



$$\gamma = \rho_s \cdot g \quad (2.2)$$

Donde

$\gamma$ : peso específico del sólido [ $N/m^3$ ]

$g$ : aceleración de gravedad [ $m/s^2$ ]

Valores típicos de densidades (Fuentes, 2011) de las partículas naturales en faenas mineras de cobre están entre 2700 y 2900 [ $kg/m^3$ ], pero ya procesado el mineral los valores pueden ser muy diferentes. Por ejemplo, en el caso de relaves de cobre estos valores fluctúan típicamente entre 2400 y 2700 [ $kg/m^3$ ] y en concentrados de cobre entre 4000 y 4500 [ $kg/m^3$ ].

Además, se define la densidad relativa o peso específico relativo del sólido, con respecto a la densidad del agua:

$$S = \frac{\rho_s}{\rho_l} \quad (2.3)$$

Donde:

$S$ : densidad relativa del sólido

$\rho_l$ : densidad del agua [ $kg/m^3$ ]

y el peso específico relativo sumergido:

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} = S - 1 \quad (2.4)$$

### 2.2.2 *Tamaño de las partículas*

El tamaño de las partículas no puede definirse fácilmente con una sola dimensión, como podría hacerse si ellas fueran esferas o cubos, porque las partículas naturales tienen muy diversas formas y nunca alcanzan la forma de esferas en que podría conocerse su tamaño al medir su diámetro. Las formas tan irregulares que asumen las partículas sedimentarias dificultan su clasificación, ya que el diámetro como índice de tamaño pierde su significado usual. Por ello ha sido necesario definir dimensiones, idear métodos y desarrollar procedimientos de laboratorio que, junto con técnicas estadísticas, ayudan a describir y, sobre todo a cuantificar adecuadamente las características de un sedimento. Algunas definiciones de interés en este ámbito son las siguientes:

**Diámetro nominal:** es el diámetro de una esfera de igual volumen que la partícula de que se trata.



**Diámetro de sedimentación:** es el diámetro de una esfera que tiene igual densidad y velocidad de sedimentación que la partícula de que se trata, al sedimentar ambas en el mismo fluido con las mismas condiciones de temperatura y presión.

**Diámetro de cribado/tamiz:** es el tamaño de la abertura de la malla por la cual pasa justamente la partícula. Se utiliza comúnmente para definir el tamaño de partículas mayores de 0.062 [mm], como las arenas y gravas. Fuentes (2011) señala que en un rango cercano a 50 [μm] - 25 [mm] los diámetros pueden definirse con razonable facilidad mediante tamizado, y que como este rango cubre una cantidad grande de aplicaciones y la operación de tamizado es relativamente sencilla y directa, el diámetro de tamiz es el más usado en la práctica minera.

García y Maza (1998) señalan que, en el caso de una esfera, los diámetros nominal y de cribado siempre son iguales, pero para partículas naturales, las cuales muestran siempre desgaste o redondez, ellos encontraron la siguiente relación:

$$d_{tamiz} = 0.90 \cdot d_n \quad (2.5)$$

Donde:

$d_{tamiz}$ : diámetro de tamiz [m]

$d_n$ : diámetro nominal de partícula [m]

En laboratorio se pueden realizar ensayos granulométricos en tamices y por tecnología láser, donde es posible obtener la distribución del tamaño de las partículas de una muestra del orden de 0.02 [μm] a 4750 [μm], además de parámetros característicos como D10, D50 y D80, que corresponde al diámetro por el cual pasa el 10%, 50% y 80% del material, respectivamente.

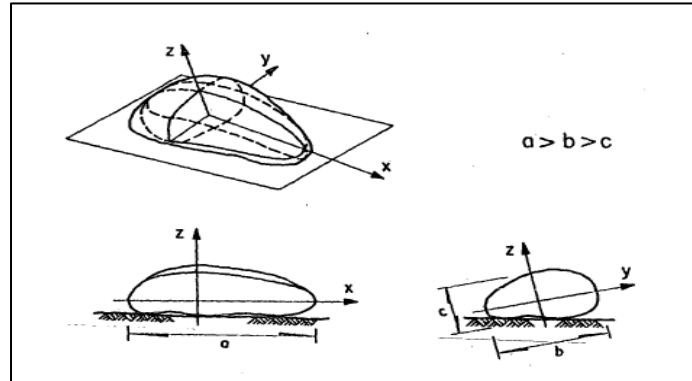
Para realizar ensayos granulométricos a partículas de concentrado de cobre, cuyo D50 se encuentra alrededor de 26 [μm] generalmente se utiliza granulometría láser, cuya capacidad de medición está entre 0.02 [μm] y 2000 [μm].

### 2.2.3 Forma de las partículas

Como se ha señalado anteriormente, por lo general la forma de las partículas se refiere a una esfera, pero esto no es real en el caso tanto de partículas naturales como de partículas industriales que poseen formas irregulares. Algunos planteamientos sencillos para definir la forma de las partículas son:

**Dimensiones triaxiales:** Corey (1949) introdujo la idea de circunscribir a la partícula real en un elipsoide imaginario de semiejes  $a$ ,  $b$  y  $c$  ( $a > b > c$ ). El tamaño de la partícula queda descrito por  $a$ ,  $b$  y  $c$  y la forma por el elipsoide correspondiente. García y Maza (1998) indican que las dimensiones triaxiales se utilizan preferentemente para especificar el tamaño de partículas gruesas o fragmentos rocosos, ya que conforme disminuye el tamaño de una partícula se dificulta la determinación de sus dimensiones triaxiales. Puesto que los ejes tienen que ser ortogonales entre sí, los valores de  $a$ ,  $b$  y  $c$  dependen de la manera como se define o elige el primer eje, o de cuál de ellos

se escoge primero. En Figura 2.3 se presenta un esquema para ejemplificar la definición de las dimensiones triaxiales de una partícula.



**Figura 2.3 Esquema de las dimensiones triaxiales de una partícula (García & Maza, 1998)**

Corey (1949) a partir de la definición de las dimensiones triaxiales, menciona respecto de la sedimentación de partículas que, dado que varios investigadores descubrieron que las partículas generalmente caen con su área proyectada más grande perpendicular a la línea de movimiento, se puede pensar que la planitud es el factor de forma que tiene mayor significancia. El autor señaló que el siguiente factor de forma puede usarse para expresar planitud.

$$CSF = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}} \quad (2.6)$$

Donde:

$a$ : mayor dimensión triaxial [ $m$ ]

$b$ : dimensión triaxial media [ $m$ ]

$c$ : dimensión triaxial mínima [ $m$ ]

Para partículas de forma irregular, Heywood (1938) representó el efecto de la forma introduciendo un coeficiente de volumen  $k_H$  expresado a través de lo siguiente:

$$\text{Volumen de partícula} = k_H \cdot d_a^3 \quad (2.7)$$

Donde:

$k_H$ : coeficiente de volumen (adimensional)

$d_a$ : diámetro de un círculo que tiene la misma área proyectada que la partícula en el plano normal a la dirección del movimiento

El valor de  $k_h$  es igual a 0.524 para partículas esféricas, 0.696 para cubos y 0.328 para tetraedros; para la mayoría de las partículas minerales el promedio es de 0.25 a 0.20.



**Área superficial:** en este ámbito Alger y Simons (1968) realizaron una serie de experimentos con partículas de tamaño grava y partículas con formas de geometría regular para mostrar la importancia del área superficial y el volumen de las partículas en sus velocidades de sedimentación, y desarrollar un factor de forma más significativo que incluyera esas variables como sigue.

$$ASSF = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}} \cdot \left(\frac{D_a}{D_n}\right) \quad (2.8)$$

Donde:

$D_a$ : diámetro de una esfera que tiene la misma área superficial que la partícula

$D_n$ : diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen que la partícula (diámetro nominal).

## 2.3. Caracterización de pulpas metalúrgicas

En general, los fluidos, como todos los materiales, tienen ciertas propiedades físicas que permiten caracterizar y cuantificar su comportamiento, así como distinguirlos unos de otros. Algunas de estas propiedades son exclusivas de los fluidos y otras son típicas de cualquier sustancia. Características como la viscosidad, tensión superficial y presión de vapor solo se pueden definir en los líquidos y gases. Sin embargo, la masa específica, peso específico y densidad son atributos de cualquier materia.

### 2.3.1 Densidad y peso específico

Para el caso de la densidad y el peso específico son aplicables las mismas definiciones presentadas en sección 2.2.1, pero es necesario hacer una distinción entre:

- $\rho_f$ : densidad del fluido que transporta la pulpa
- $\rho_p$ : densidad de la pulpa
- $S_p$ : densidad relativa o peso específico relativo de la pulpa.

### 2.3.2 pH

El pH en las pulpas metalúrgicas tiene influencia principalmente sobre la velocidad límite de depósito de la pulpa y sobre las propiedades reológicas (tensión de fluencia y viscosidad explicadas más adelante en Secciones 2.3.4.1 y 2.3.4). También es un reflejo de varios otros aspectos: potencial Z, cargas eléctricas, composición mineralógica, etc. (Fuentes, 2011).

Mantener el *pH* dentro de un cierto rango (que debe ser estimado caso a caso) puede contribuir a la formación de sedimentos menos compactos.



Por otra parte, dentro de los factores externos que se deben considerar para repartidas, producto del fenómeno migratorio, se encuentran (C. Ihle et al., 2010):

- **Factores fisicoquímicos:** envejecimiento de polímeros, cambio de pH, etc.
- **Factores mecánicos:** caminos de servidumbre, equipos y estructuras como estaciones de bombas, soportes, etc. Y otros, como, por ejemplo, sismos.

### 2.3.3 Concentración de sólidos en una pulpa minera

Este parámetro indica la cantidad de sólidos presente en la mezcla (pulpa) y se puede definir en términos de volumen o peso.

#### Concentración en volumen:

$$C_v = \frac{\text{Volumen del sólido}}{\text{Volumen de la mezcla}} \quad (2.9)$$

#### Concentración en peso (o en masa):

$$C_p(C_m) = \frac{\text{Peso del sólido}}{\text{Peso de la mezcla}} \quad (2.10)$$

Habitualmente, ambos valores se expresan en porcentaje. Los ingenieros generalmente utilizan el término concentración en peso, ya que es más fácil volver a convertirlo en tonelaje total de sólidos para ser transportados a través de una tubería o en una planta de minería extractiva. Sin embargo, las características de la mezcla, la mecánica de fluidos y las propiedades físicas resultantes están más relacionadas con la concentración en volumen (Abulnaga, 2002).

#### Concentración máxima de empaquetamiento:

La concentración máxima de empaquetamiento ( $C_{v,máx}$ ), como su nombre lo indica es la máxima concentración volumétrica que puede alcanzar un sistema de partículas sólidas indeformables. Es, en rigor, un problema complejo de geometría. Respecto a la concentración máxima que puede alcanzarse en la realidad, depende de la distribución granulométrica y de la forma de las partículas. Por lo tanto, es difícil (o imposible) de calcular. Es necesario medirla (Fuentes, 2011).

Existen algunos estudios al respecto. Por ejemplo, (Phillips et al., 1992) en su trabajo sobre migración de partículas inducida por corte utilizando sedimento esférico pesado, utilizó el valor de 68%, señalando que a esta concentración la viscosidad de la suspensión concentrada tendía a infinito. (Krieger, 1972) señala 64%, mientras que (C. F. Ihle, 2014) indica 47% en su investigación para determinar si las presiones máximas en tuberías de mineral se deben calcular para fenómeno transiente o para re arranques del sistema.

Durante la operación de un concentrado, se puede aumentar la concentración media a la que se transporta la pulpa, pero sin acercarse a la concentración máxima de empaquetamiento, para evitar sobrepresiones en el re-arranque del sistema.

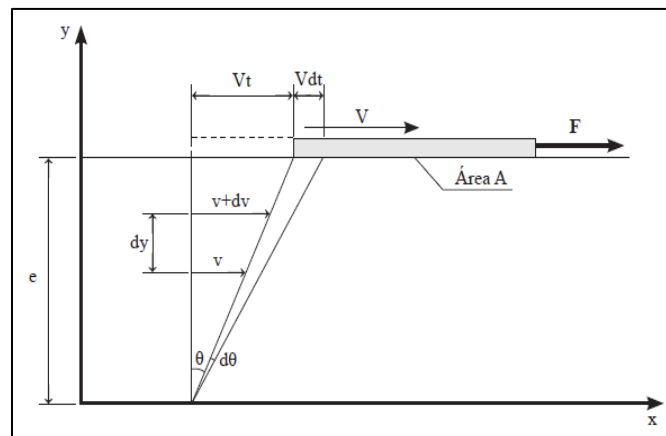
### 2.3.4 Reología

El estudio de las propiedades de deformación de las sustancias en función de los esfuerzos que a ellas se les aplican se denomina reología (Fernández, 2013). Para construir una curva reológica, es necesario definir en primer lugar la viscosidad de un fluido.

#### 2.3.4.1 Viscosidad

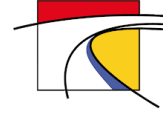
La viscosidad es una propiedad distintiva de los fluidos. Está ligada a la resistencia que opone un fluido a deformarse continuamente cuando se le somete a un esfuerzo de corte. De hecho, esta propiedad es la utilizada para distinguir el comportamiento entre los fluidos y los sólidos. Además, los fluidos pueden ser en general clasificados de acuerdo con la relación que exista entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de deformación.

Para comprender esta propiedad se analiza el comportamiento de un fluido viscoso entre dos placas paralelas, tal como se muestra en Figura 2.4.



**Figura 2.4 Comportamiento de un fluido viscoso entre dos placas paralelas (Fernández, 2013)**

Suponiendo que se tiene un fluido entre dos placas paralelas separadas a una distancia pequeña entre ellas, una de las cuales se mueve con respecto a la otra, manteniendo su paralelismo. Para que la placa superior se mantenga en movimiento con respecto a la inferior, con una diferencia de velocidades  $v$ , es necesario aplicar una fuerza  $F$ , que por unidad de área se traduce en un esfuerzo de corte sobre el fluido,  $\tau = F/A$ , siendo  $A$  el área de la placa en contacto con el fluido. Se puede constatar además que el fluido en contacto con la placa inferior, que está en reposo, se mantiene adherido a ella y, por lo tanto, no se mueve. Por otra parte, el fluido en contacto con la placa superior se mueve a la misma



velocidad que ella. Si el espesor de fluido entre ambas placas es pequeño se puede suponer que la variación de velocidades en su interior es lineal, de modo que se mantiene la proporción:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{v}{e} \quad (2.11)$$

Esta cantidad representa la tasa de deformación del fluido, o una velocidad de deformación angular,  $d\theta/dt$ , siendo  $\theta$  el ángulo que se indica en Figura 2.4. Generalmente, esta velocidad de deformación angular se denomina  $\dot{\gamma}$ .

El ángulo  $\theta$  está relacionado con la velocidad de la placa mediante la expresión:

$$\tan \theta = \frac{v \cdot t}{e} \quad (2.12)$$

Como la distribución de velocidades en el interior del fluido es lineal, también se puede expresar como:

$$\tan \theta = \frac{v \cdot t}{e} = \frac{dv}{dy} \cdot t \quad (2.13)$$

Para un instante  $t$  pequeño,  $dt$ , el ángulo  $\theta$  es también pequeño y su tangente puede aproximarse por  $d\theta$ , entonces:

$$d\theta = \frac{dv}{dy} \cdot dt \quad (2.14)$$

De donde se deduce que:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.15)$$

Es decir, la variación lineal de velocidades provocada en el interior del fluido representa una velocidad de deformación angular de éste. La existencia de una diferencia de velocidades  $dv$  entre dos puntos del fluido que se encuentran a una pequeña distancia  $dy$ , es una evidencia de que el fluido escurre. Lo mismo ocurre con el hecho de que el ángulo  $\theta$  aumenta con el tiempo.

Para fluidos newtonianos, se ha comprobado que la fuerza necesaria para lograr una velocidad  $v$  es proporcional a ella y al área e inversamente proporcional a la separación entre las placas.:

$$F \propto A \frac{v}{e} \quad (2.16)$$



Esta constante de proporcionalidad corresponde a la viscosidad dinámica ( $\mu$ ). Además, debido a la distribución lineal de velocidades, esta relación puede establecerse para cualquier punto al interior del fluido como:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy} \quad (2.17)$$

A esta ecuación se le conoce como la ley de viscosidad de Newton. Se puede entonces definir la viscosidad como una propiedad del fluido por la cual éste opone resistencia a escurrir o a la deformación angular provocada por el esfuerzo de corte.

Al cociente entre la viscosidad dinámica,  $\mu$ , y la densidad de un fluido,  $\rho_f$ , se le llama viscosidad cinemática,  $\nu$ . Esta propiedad puede interpretarse como la dificultad que opone el fluido a escurrir sometido a los esfuerzos internos que provoca su propio peso.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_f} \quad (2.18)$$

Donde

$\nu$ : viscosidad dinámica [ $m^2/s$ ]

$\mu$ : viscosidad cinemática [ $Pa \cdot s$ ]

En los fluidos newtonianos  $\mu$  es una constante. Sin embargo, existen otros tipos de fluido cuyo comportamiento es diferente. Por ejemplo, la pasta de dientes es capaz de escurrir cuando el tubo se aprieta, pero no escurre sola si se pone boca abajo y se abre la tapa, como debiera ocurrir si se tratara de un fluido newtoniano. En este caso existe un valor mínimo de  $\tau$  necesario para iniciar el escurrimiento. Este es el caso de las pulpas mineras, especialmente de aquellas que presentan altas concentraciones y/o presencia de arcillas.

Desde el punto de vista físico, la viscosidad se debe al efecto combinado de dos causas. Por una parte, la cohesión entre las moléculas y, por otra, el intercambio de cantidad de movimiento entre las capas de fluido en movimiento.

Las fuerzas de cohesión entre las moléculas hacen que al desplazarse unas con respecto a las otras tiendan a ser arrastradas las partículas vecinas. Esta fuerza de cohesión depende de la separación entre las moléculas y es importante en los líquidos. A medida que la velocidad de las moléculas aumenta esta fuerza tiende a perder importancia.

Existe también un intercambio de cantidad de movimiento entre las capas de fluido que se desplazan debido a que hay partículas de distinta velocidad que al escurrir el fluido se pasan de una capa a las vecinas. Estas fuerzas son más importantes en la medida en que las velocidades de las partículas lo sean.

### 2.3.4.2 Curva reológica

Tomando como referencia lo descrito en la sección anterior y más específicamente la Figura 2.4, si se miden  $dv/dy$  y  $\tau$  para diferentes valores del gradiente de velocidades se puede definir una curva:

$$\tau = f\left(\frac{du}{dy}\right) = f(\dot{\gamma}) \quad (2.19)$$

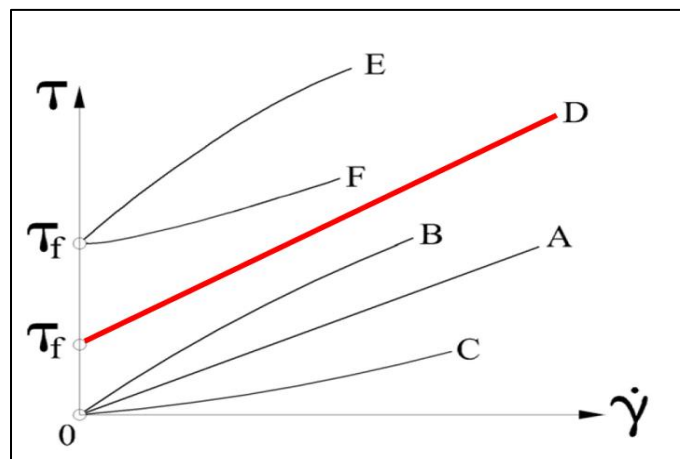
Ella es, por definición, la curva reológica, diagrama reológico o reograma del fluido. Las unidades del esfuerzo de corte  $\tau$  y la velocidad de deformación angular  $\dot{\gamma}$  en el Sistema Internacional y comúnmente utilizadas son, respectivamente:

$$\tau = [Pa] = 1 \left[ \frac{N}{m^2} \right] = 10 \left[ \frac{dina}{cm^2} \right]$$

$$\dot{\gamma} = [s^{-1}]$$

Algunos comportamientos reológicos típicos se incluyen en el gráfico de la Figura 2.5, donde cada curva corresponde a un fluido:

- |  |         |
|--|---------|
| • Newtoniano                             | Curva A |
| • Pseudoplástico                         | Curva B |
| • Dilatante                              | Curva C |
| • Plástico ideal                         | Curva D |
| • Pseudoplástico con tensión de fluencia | Curva E |
| • Dilatante con tensión de fluencia      | Curva F |



**Figura 2.5** Esquemización de comportamientos reológicos típicos. En rojo se destaca la curva que se asemeja al comportamiento típico de pulpas mineras (Fuentes, 2011)

Como se precisó anteriormente y se refleja en Figura 2.5, la viscosidad es constante para fluidos newtonianos. En el caso de fluidos pseudoplásticos (curva B) su viscosidad disminuye

monotónicamente a medida que aumenta la tasa de deformación angular, el caso contrario ocurre en fluidos dilatantes (curva C) que aumentan su viscosidad al aumentar la tasa de deformación angular.

Los demás casos presentados (curvas D, E y F) muestran lo que se denomina tensión de fluencia, que representa el esfuerzo de corte mínimo para iniciar el escurrimiento.

Generalmente, se pueden definir dos viscosidades, tal como se muestra en Figura 2.6:

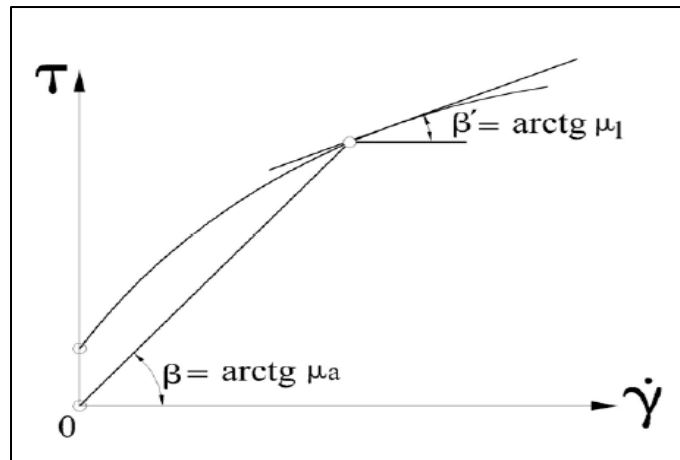
- Viscosidad aparente (o “viscosidad secante”):

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.20)$$

- Viscosidad local (o “viscosidad tangente”):

$$\mu_l = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} \quad (2.21)$$

En ambos casos se debe especificar el valor de  $\dot{\gamma}$  para la que fueron medidas.



**Figura 2.6 Definiciones gráficas de viscosidad (Fuentes, 2011)**

Comúnmente las pulpas mineras se ajustan al comportamiento de plástico ideal (curva D), ajustándose al modelo reológico Bingham:

$$\tau = \tau_f + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2.22)$$

Slatter y Wasp (2002) presentaron una discusión sobre las ventajas y desventajas del modelo Bingham respecto de otros y concluyeron que en muchos casos es una buena aproximación.

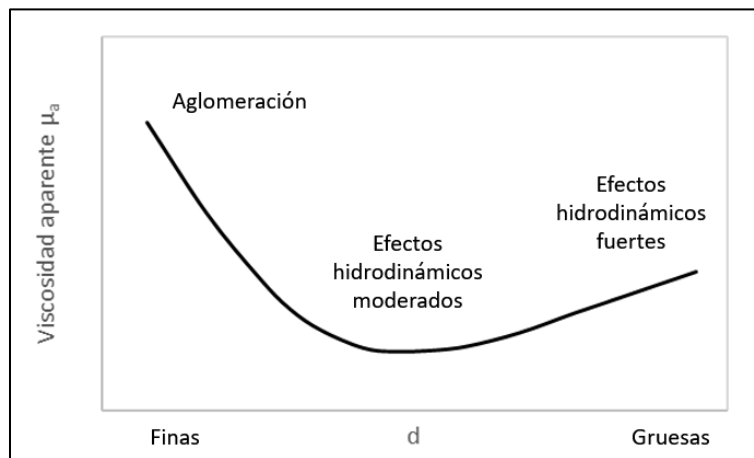
Las definiciones reológicas presentadas anteriormente son simples, pero suficientes para el alcance de esta Memoria de Título. Para mayores detalles se puede consultar (Bird, Stewart, y Lightfoot 1960; Truesdell, 1966; Truesdell y Noll, 2013; Ancy, 2005; y Truesdell y Rajagopal, 2009) .

### 2.3.5 Efecto de parámetros característicos en el comportamiento reológico de pulpas

Con base en lo presentado por (Fuentes, 2011), por una parte, se analizará el efecto de cada parámetro en la viscosidad y por otra parte en la tensión de fluencia.

- **Diámetro de partículas**

Cuando las partículas son muy pequeñas, acciones eléctricas y viscosas producen aglomeración de las partículas y una consiguiente alta viscosidad. Luego, si las partículas son de diámetro intermedio, la viscosidad se encuentra fijada por el movimiento relativo de las partículas debido a efectos hidrodinámicos y sus valores son moderados. Si las partículas son relativamente grandes, la interacción entre el fluido y los granos deviene muy vigorosa y la viscosidad crece. Esta relación se puede visualizar en el esquema de la Figura 2.7.



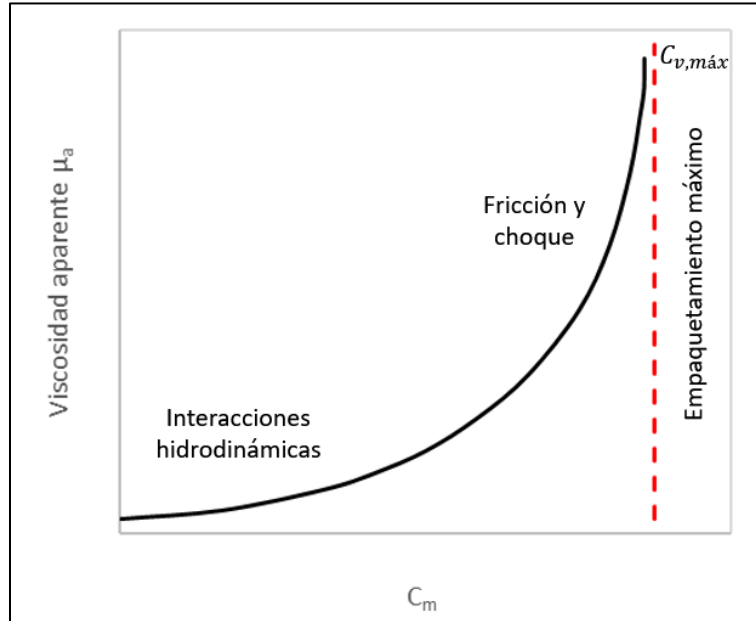
**Figura 2.7 Esquemización de la variación de la viscosidad aparente en función del diámetro de partícula (adaptado de Fuentes, 2011)**

- **Concentración**

La viscosidad crece con la concentración. Para concentraciones relativamente pequeñas la viscosidad crece suavemente. Para valores importantes crece en forma muy pronunciada y para valores elevados el crecimiento es muy fuerte. Particularmente, para la concentración máxima de empaquetamiento ( $C_{v,máx}$ ) la viscosidad tiende al infinito.

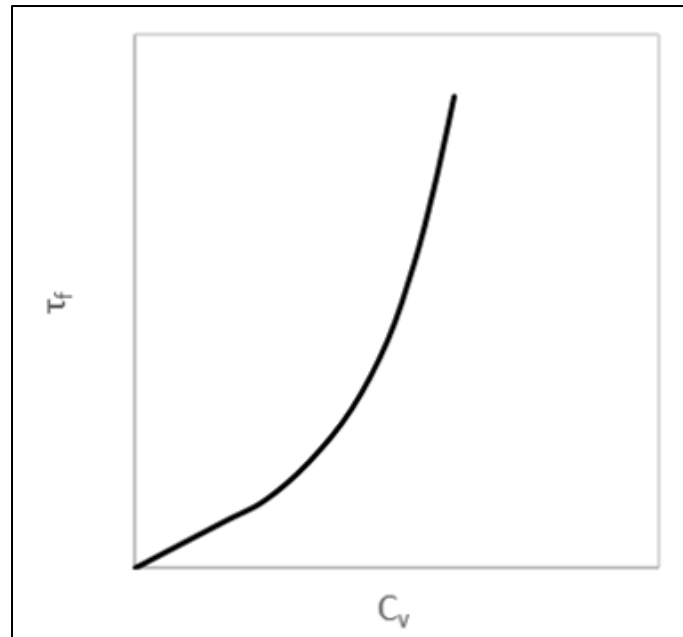
Para suspensiones diluidas la viscosidad queda definida por las interacciones hidrodinámicas entre las partículas y para concentraciones relativamente elevadas además de los efectos hidrodinámicos, la fricción y los choques comienzan a ser preponderantes. Ya cerca de la concentración máxima, el

sistema comienza a empaquetarse e impide que las partículas se deslicen unas respecto de las otras. Este comportamiento se esquematiza en Figura 2.8.



**Figura 2.8 Viscosidad aparente en función de la concentración (adaptado de Fuentes, 2011)**

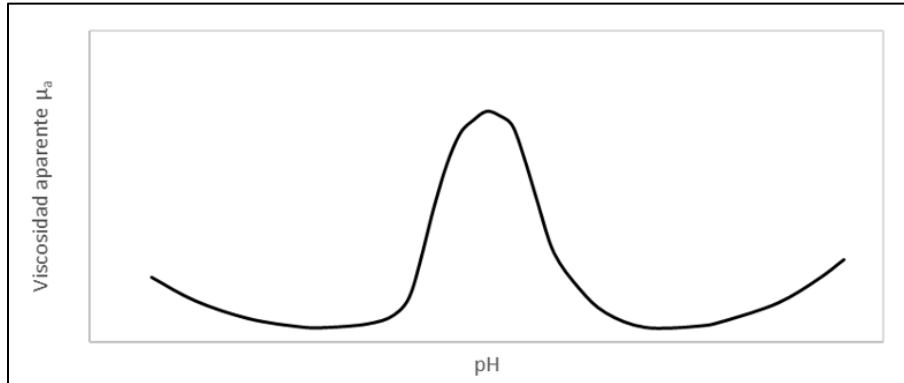
Por su parte, la tensión de fluencia de pulpas metalúrgicas es igual a cero para concentración nula y crece sensiblemente con ella, tal como se muestra en Figura 2.9.



**Figura 2.9 Tensión de fluencia en función de la concentración en volumen (adaptado de Fuentes, 2011)**

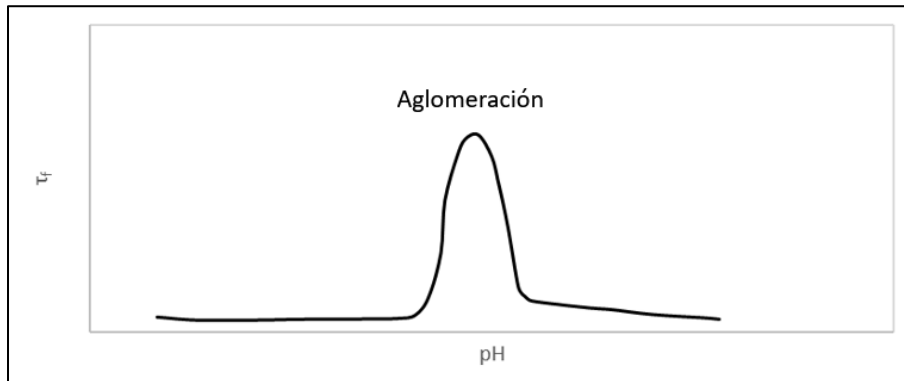
- **pH**

La influencia del  $pH$  sobre la viscosidad se muestra en Figura 2.10. Se ve que la viscosidad aparente alcanza un máximo pronunciado para un cierto valor de  $pH$  y valores mucho menores a la derecha y a la izquierda de dicho valor, aunque estas tendencias decrecientes no son monotónicas.



**Figura 2.10** Viscosidad aparente en función del  $pH$  (adaptado de Fuentes, 2011)

Para visualizar la variación de la tensión de fluencia  $\tau_f$  en función del  $pH$ , se presenta la Figura 2.11. Se observa un máximo pronunciado para un cierto  $pH$  y valores de  $\tau_f$  relativamente pequeños a la derecha e izquierda de ese valor.



**Figura 2.11** Tensión de fluencia en función del  $pH$  (adaptado de Fuentes, 2011)

## 2.4. Sedimentación de partículas

La sedimentación es el proceso en el cual las partículas sólidas caen bajo la acción de la gravedad a través de un fluido en el que se encuentran suspendidas. Comúnmente se aprovecha en las industrias petrolera y química como una forma de separar las partículas del fluido, así como una manera de separar las partículas con diferentes velocidades de asentamiento entre sí (Davis & Acrivos, 1985).



### 2.4.1 Sedimentación de una partícula única en un medio limitado

Un parámetro primordial en el estudio de suspensiones es la velocidad de sedimentación o decantación de partículas,  $W$ .

La expresión más general que da cuenta de las características físicas de las partículas y parámetros que influyen en su cálculo se deduce a partir de un balance de fuerzas de una partícula única en un medio ilimitado, donde interactúan el peso de la partícula, el empuje de Arquímedes asociado y la ley de Newton para la resistencia hidrodinámica (Fuentes, 2011), del cual se obtiene:

$$W = \sqrt{2 \cdot \frac{1}{C_a} \cdot g \cdot (S - 1) \cdot \frac{V_p}{A_p}} \quad (2.23)$$

Donde

$g$ : aceleración de gravedad [ $m/s^2$ ]

$S$ : gravedad específica del sólido (adimensional)

$V_p$ : volumen de la partícula [ $m^3$ ]

$A_p$ : área transversal de la partícula [ $m^2$ ]

$C_a$ : coeficiente de arrastre hidrodinámico (adimensional)

$C_a$  depende del número de Reynolds  $R_e = W \cdot l / \nu$  y de la forma de la partícula.  $l$  es una dimensión lineal que caracteriza el tamaño de ella (diámetro o largo de arista).

Simbólicamente:

$$C_a = C_a(R_e, FF) \quad (2.24)$$

Donde

$FF$ : factores de forma

$R_e$ : número de Reynolds

La relación  $C_a(R_e, FF)$  es conocida en varios casos (Schlichting & Gersten, 2017)

Si se trata de una esfera de diámetro  $d$ , entonces:

$$W = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{1}{C_a} \cdot g \cdot (S - 1) \cdot d} \quad (2.25)$$



$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu}$$

El problema que se presenta es que el parámetro  $W$  interviene en el número de Reynolds, por lo que el cálculo de  $W$  debe hacerse mediante un proceso iterativo. Se han diseñado gráficos para calcular  $W$  en forma directa en algunos casos particulares.

De acuerdo con (Schlichting & Gersten, 2017), si  $Re \ll 1$  (régimen laminar) se puede calcular teóricamente su relación con  $C_a$ :

$$C_a = \frac{24}{Re} \quad (2.26)$$

Combinando la Ecuación 2.25 con la Ecuación 2.26 se encuentra:

$$W = \frac{1}{18} \cdot \frac{g \cdot d^2}{\nu} \cdot (S - 1) \quad (2.27)$$

Se denominan fórmula de Stokes tanto a la Ecuación 2.25 como a la Ecuación 2.27.

Pese a que en rigor  $Re \ll 1$ , con base en lo planteado por (Batchelor, 1967), las fórmulas de Stokes son válidas hasta  $Re \cong 1$ . No obstante, aunque se acepte como límite práctico  $Re = 1$ , el uso de las fórmulas de Stokes resulta muy limitado. Combinando  $Re = 1$  con la Ecuación 2.27 se encuentra:

$$d \ll \left( \frac{18 \cdot \nu^2}{g \cdot (S - 1)} \right)^{1/3}$$

Por ejemplo, para una partícula de concentrado de cobre cayendo en agua a 20 [°C],  $S = 4.2$  y  $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$  [ $m^2/s$ ]. Se tendrá:

$$d \ll 83.1 [\mu m]$$

Sin embargo, como se muestra en Tabla 2.4 tomando como referencia los diámetros característicos D50 entre 25 y 28 [ $\mu m$ ], la relación anterior no se cumple, pero tampoco es un valor muy lejano a los encontrados.

## 2.4.2 Sedimentación de partículas a altas concentraciones

(Fuentes, 2011) indica que si las partículas están suficientemente concentradas y/o están contenidas en un recipiente cuya sección no es muy grande respecto a la de una partícula, su velocidad  $W$  ya no es la misma que para la partícula aislada  $W_0$  y se habla entonces de sedimentación obstruida o retardada.



El caso en que la concentración en volumen no despreciable es de interés en la práctica, ya que corresponde frecuentemente al caso de los sedimentadores y concentradores que se emplean en la industria (Ver Tabla 2.3).

Existen varios autores que han estudiado la sedimentación de partículas a altas concentraciones en el contexto de los asentamientos gravitacionales verticales, como se puede revisar en el trabajo realizado por (Bürguer & Wendland, 2001). Entre otros, se puede destacar el trabajo de (Kynch, 1952), quien realizó uno de los mayores avances en la teoría cinemática de la sedimentación de partículas dispersas en un fluido. En el mismo contexto se puede destacar a Richardson y Zaki (1954) y Davis y Acrivos (1985).

Según el trabajo de Davis y Acrivos (1985), en este ámbito, para partículas no coloidales a bajos números de Reynolds, se puede hacer una separación en 3 casos: sedimentación de suspensiones monodispersas, sedimentación de suspensiones polidispersas y sedimentación mejorada en canales inclinados. El primer caso corresponde a una suspensión de partículas idénticas, el segundo a suspensiones que contienen más de un tipo de partícula (diferentes tamaños y densidades), por lo que tienen diferentes velocidades de sedimentación, y el último caso se refiere al aumento de la tasa de clarificación simplemente por inclinar el vaso de sedimentación.

#### 2.4.2.1 Sedimentación de suspensiones monodispersas

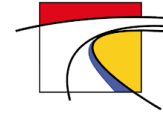
Si bien el primer caso no es directamente aplicable al caso de concentrados de cobre, donde se cuenta con una distribución granulométrica, es importante destacar que para este escenario ocurre que inicialmente una suspensión bien mezclada se separará en tres regiones cuando se someta a sedimentación en un recipiente con paredes laterales verticales. Se formará una capa de fluido clarificado en la parte superior del asentamiento cuya profundidad aumentará con el tiempo a medida que las partículas se asientan. Por debajo de esta capa se ubicará la región de suspensión, a veces llamada zona de clarificación. Como las esferas son idénticas, la interfaz entre el fluido claro y la suspensión se mantendrá bastante marcada, aunque puede propagarse algo debido a la difusión de las partículas.

Si la suspensión está infinitamente diluida, las partículas se asientan con su velocidad de Stokes dada por (2.5). Por otra parte, para fracciones volumétricas de partículas tan pequeñas como el 1%, el promedio de la velocidad de sedimentación de las partículas es notablemente menor que la dada por la ley de Stokes. Este fenómeno puede ser representado por una función de sedimentación obstaculizada  $f(C_v)$ , de tal manera que la velocidad media de caída de una esfera en la suspensión viene dada por:

$$V = Wf(C_v) \quad (2.28)$$

Generalmente, se asume que  $f(C_v)$  depende solo de la fracción volumétrica de sólidos y que es una función monótona decreciente con  $f(0) = 1$ .

La tercera región dentro del vaso de sedimentación es una capa de sedimento que se forma en el fondo del vaso. A menudo se asume que la concentración de sólidos en esta capa es constante e igual a la



densidad máxima de empaquetamiento aleatoria de las esferas, que es alrededor de 60%. Aunque en realidad los sólidos se compactan gradualmente en esta zona, así como el líquido en los intersticios entre las esferas se va extrayendo poco a poco. Así, la capa sedimento en el fondo del vaso a veces se denomina zona de compresión o engrosamiento (Davis & Acrivos, 1985).

Para definir  $f(C_v)$  se emplean con frecuencia en la práctica, los resultados del estudio puramente empírico de Richardson y Zaki (1954).

$$f(C_v) = (1 - C_v)^n \quad (2.29)$$

Para el exponente  $n$ , en la literatura se encuentra típicamente el valor de  $n \approx 5$  (Davis y Acrivos, 1985; Guazzelli y Hinch, 2011) para bajos números de Reynolds.

Por otra parte, los ensayos de sedimentación en laboratorio se realizan en condiciones en que la presencia de las partículas y/o las paredes puede ser importante (probetas).

Si la suspensión es inerte, el problema puede plantearse con suficiente generalidad como el de determinar la función  $F$  siguiente:

$$W' = W_0 \cdot F(C_v, R_{ep}, d/D) \quad (2.30)$$

Donde

$D$ : diámetro de la vasija en que las partículas están descendiendo

$W_0$ : velocidad de las partículas para  $C_v \rightarrow 0$  y  $d/D \rightarrow 0$

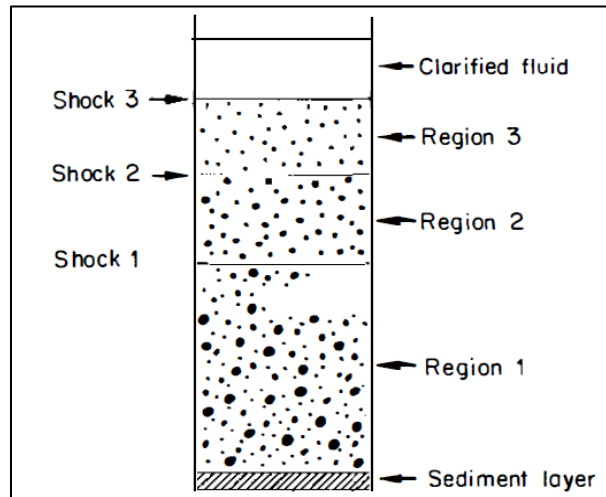
$R_{ep}$ :  $W_0 \cdot d/\nu$

En el caso en que las partículas correspondan a números de Reynolds de partícula  $W_0 \cdot d/\nu$  muy pequeños respecto a la unidad el problema admite soluciones analíticas (Happel & Brenner, 1983).

#### 2.4.2.2 Sedimentación de suspensiones polidispersas

En este escenario, Davis y Acrivos (1985) se limitan al análisis de esferas rígidas que tienen valores muy pequeños de Reynolds de partícula y asumen que la suspensión no puede coagularse. Como se mencionó anteriormente, en este caso existe un rango de velocidades de sedimentación debido a las variaciones en tamaño, forma y densidad de las partículas, por lo tanto, existe movimiento de una partícula con respecto a otra como resultado de la acción de la gravedad. Consecuentemente, y a diferencia del caso anterior, a medida que se desarrolla el asentamiento, las partículas de caída más rápida se alejan de las otras, creando así diferentes regiones en el interior de la suspensión. La región inferior, es decir, la que se encuentra justo encima de la capa de sedimento (Región 1 en Figura 2.12), contiene todos los tipos de partículas en sus concentraciones iniciales, mientras que la región superior (Región 2 en Figura 2.12) se encuentra desprovista de las partículas de sedimentación más rápida. Cada región sucesiva contiene un tipo de partícula menos que la región inferior, mientras que la región

superior de la suspensión contiene solo las partículas de sedimentación más lenta, tal como se presenta en Figura 2.12, donde la región 1 contiene los tres tipos, la región 2 está desprovista de las especies de asentamiento más rápido, y la región 3 contiene solo las especies de asentamiento más lento. En la mayoría de los casos, estas distintas regiones están separadas por una discontinuidad o *shock* en la distribución de las concentraciones de los tipos de partículas. Para distribuciones continuas, no se distingue el desarrollo de discontinuidades, sino que las concentraciones de los diferentes tipos de partículas varían continuamente en función de la altura en el vaso de sedimentación.

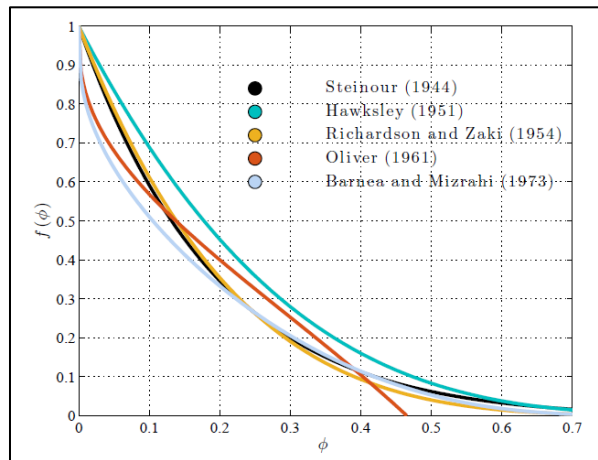


**Figura 2.12** Regiones que se desarrollan durante la sedimentación de una mezcla de tres tipos de partículas (Davis & Acrivos, 1985)

Como se ha dicho anteriormente, en este caso también ocurre que si la fracción volumétrica de partículas total excede alrededor de 1%, el comportamiento difiere significativamente de la predicción de la ley de Stokes como consecuencia de las interacciones entre las partículas de las distintas especies. En particular, cuando una suspensión polidispersa no está extremadamente diluida, la fracción volumétrica de cualquier tipo de partículas difiere en las diversas regiones de la suspensión. Si se toma en cuenta una partícula del tipo  $i$  que posee radio  $a_i$ , densidad  $\rho_i$ , concentración volumétrica  $c_i$ , y velocidad de sedimentación de Stokes  $u_i^{(0)}$ . Su velocidad promedio de caída  $v_i$  depende de la concentración local de todas las partículas presentes y se puede expresar como:

$$v_i = u_i^{(0)} f_i(c) \quad (2.31)$$

Donde  $c$  es un vector de las fracciones volumétricas de todos los tipos de partículas. En general,  $f_i$ , que corresponde a la función de sedimentación obstaculizada, será diferente para cada tipo de partícula y dependerá también de los efectos del movimiento Browniano y las fuerzas interpartículas. Varios autores han presentado modelos para  $f_i$ , (Steinour, 1944; Richardson y Zaki, 1954; Oliver, 1961; Barnea y Mizrahi, 1973). Palma et al. (2016) en su trabajo sobre sedimentación en contenedores inclinados, las resumió de la siguiente manera en la Figura 2.13:



**Figura 2.13 Funciones de obstaculización propuestas por diferentes autores. En este gráfico  $\phi$  corresponde a la concentración volumétrica definida como  $C_v$  en este estudio (Palma et al., 2016)**

En Figura 2.13 se puede notar claramente que la función de obstaculización decrece rápidamente a medida que se aumenta la concentración volumétrica, hasta aproximadamente 0.3 ( $C_v = 30\%$ ). Luego, su disminución es mucho más suave. Como consecuencia de lo anterior, en presencia de sedimentación a altas concentraciones ocurrirá que, a medida que aumente dicha concentración, la velocidad de sedimentación será cada vez más baja.

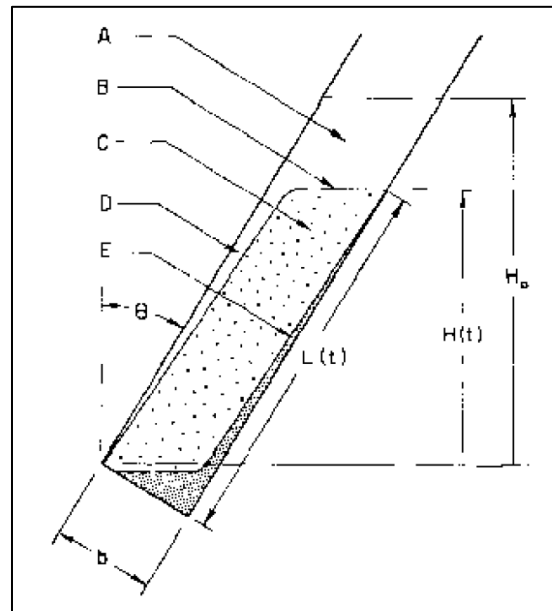
### 2.4.2.3 Sedimentación en planos inclinados

Generalmente, los ensayos de sedimentación de partículas se realizan en contenedores con paredes verticales, sin embargo, la velocidad de sedimentación cambia al modificar la geometría o disposición del contenedor. Específicamente en el caso del transporte de larga distancia, en Chile, este cambio se manifiesta en la pendiente de la tubería, que ocurre con regularidad producto de la topografía existente.

La primera observación del efecto de modificar la pendiente la realizó Boycott (1920), quien experimentando con sangre observó que la sedimentación de los corpúsculos de sangre era más rápida en tubos inclinados que en tubos verticales, muchos científicos trabajaron en este fenómeno para suspensiones monodispersas, polidispersas y ligeramente polidispersas. El efecto Boycott se observa cuando una de las paredes del contenedor está inclinada. Un interesante resumen de estos trabajos hasta 1977 se puede revisar en el trabajo “Sedimentación con bordes mejorados debido a la convección de asentamiento” (Hill et al., 1977). En dicho trabajo, se señala que Nakamura y Kuroda (1937) indican que este incremento aparente de la velocidad de sedimentación en contenedores con pared inclinada es atribuible al descenso de las partículas sólidas a lo largo de la superficie inclinada, provocando un gradiente de densidad a través de la distancia que separa las caras del contenedor, dando lugar al establecimiento de una corriente de convección que transporta más rápidamente las partículas hacia el fondo. La porción del líquido clarificado se suma a la que se produce por la sedimentación de las partículas sólidas debajo de la interfase horizontal entre el líquido y el aire.

Nakamura y Kuroda (1937) propusieron una expresión para calcular la altura de la interfase en sedimentadores de sección transversal rectangular inclinados.

Para modelar las velocidades y flujos que se generan en esta situación se han realizado varios estudios (Acrivos y Herbolzheimer, 1979; Herbolzheimer y Acrivos, 1981; Kapoor y Acrivos, 1995). Estos autores sugieren que en sedimentación en contenedores inclinados se tienen tres regiones principalmente: región de líquido claro, región en suspensión y región de sedimento, tal como se esquematiza a continuación en Figura 2.14:



**Figura 2.14** Diferentes regiones del campo de flujo durante la sedimentación en un canal inclinado: (A) región de fluido libre de partículas sobre la suspensión, (B) interfase entre el fluido libre de partículas y la suspensión, (C) suspensión, (D) capa delgada de fluido libre de partículas debajo de la capa de cara hacia abajo, (E) sedimento concentrado (Davis & Acrivos, 1985)

Davis y Acrivos (1985) en un estudio posterior al de Nakamura y Kuroda (1937), señalan que el aumento de la tasa de sedimentación puede considerarse como resultado del hecho de que, mientras que las partículas solo pueden depositarse en el fondo de un canal con paredes verticales, también pueden depositarse en la pared inferior de un canal inclinado, como se observa en Figura 2.14. Estas partículas forman una fina capa de sedimento que se desliza rápidamente hacia el fondo del contenedor bajo la acción de la gravedad. Así, se puede interpretar el aumento de la tasa de sedimentación como consecuencia del aumento de la superficie disponible para el asentamiento. Por supuesto, dado que la suspensión es incompresible, coincidiendo con la eliminación de las partículas de la suspensión, paralelamente se desarrolla la producción de líquido clarificado. Esto tiene lugar en la parte superior de la suspensión y a lo largo de la pared superior, donde se forma una fina capa de fluido claro. Esta capa libre de partículas es flotante en comparación con la suspensión masiva, y el fluido dentro de ella fluye rápidamente hacia la parte superior del contenedor. Además, esta capa alcanza un grosor de estado constante en un tiempo relativamente corto, porque el fluido que está siendo arrastrado a esta capa ejerce una fuerza de arrastre sobre las partículas en la interfaz que



contrarresta la componente normal de la fuerza gravitatoria de estas partículas (Davis & Acrivos, 1985).

Como se vio en el acápite anterior, en el caso de sedimentación en contenedores verticales, las interacciones fluido-partícula e inter-partícula pueden ser expresadas como una función solo de la concentración local (Davis & Acrivos, 1985). En el caso de la sedimentación en planos inclinados, también existe una dependencia del corte local (Acrivos y Herbolzheimer, 1979; Herbolzheimer y Acrivos, 1981; Phillips et al., 1992).

Otro aspecto relevante de destacar es que en el primer trabajo de Acrivos y Herbolzheimer (1979), los autores desarrollaron una teoría para describir cuantitativamente la sedimentación de pequeñas partículas en contenedores con paredes inclinadas respecto a la vertical. Dicha teoría asume que el flujo es laminar y que el número de Reynolds de partícula es pequeño, pero  $C_{v,0}$ , la concentración en la suspensión, y la geometría del contenedor se dejan arbitrarias. Sus resultados demostraron que la tasa de sedimentación  $S$  depende de dos grupos adimensionales, además de la geometría del contenedor: el número de Reynolds de sedimentación del sistema  $Re_s$ , típicamente en el rango de 1 a 10 y  $\Lambda$ , que es la razón entre el  $Re_s$  y el número de sedimentación de Grashof, que es típicamente muy grande. Estos números adimensionales se definen como sigue:

$$Re_s = \frac{L\rho_f W}{\mu_f} = \frac{2La^2\rho_f(\rho_s - \rho_f)g}{9\mu_f^2} \quad (2.32)$$

$$\Lambda = \frac{L^2g(\rho_s - \rho_f)C_{v,0}}{W\mu_f} = u_i^{(0)} f_i(c) \quad (2.33)$$

Donde:

$L$ : largo característico del sistema macroscópico (altura vertical inicial de la capa en suspensión (Figura 2.14)) [ $m$ ]

$C_{v,0}$ : concentración inicial de partículas

$W$ : velocidad de sedimentación de Stokes [ $m/s$ ]

$\rho_s$ : densidad de las partículas suspendidas [ $kg/cm^3$ ]

$a$ : radio de las partículas [ $m$ ]

$\rho_f$ : densidad del fluido [ $kg/cm^3$ ]

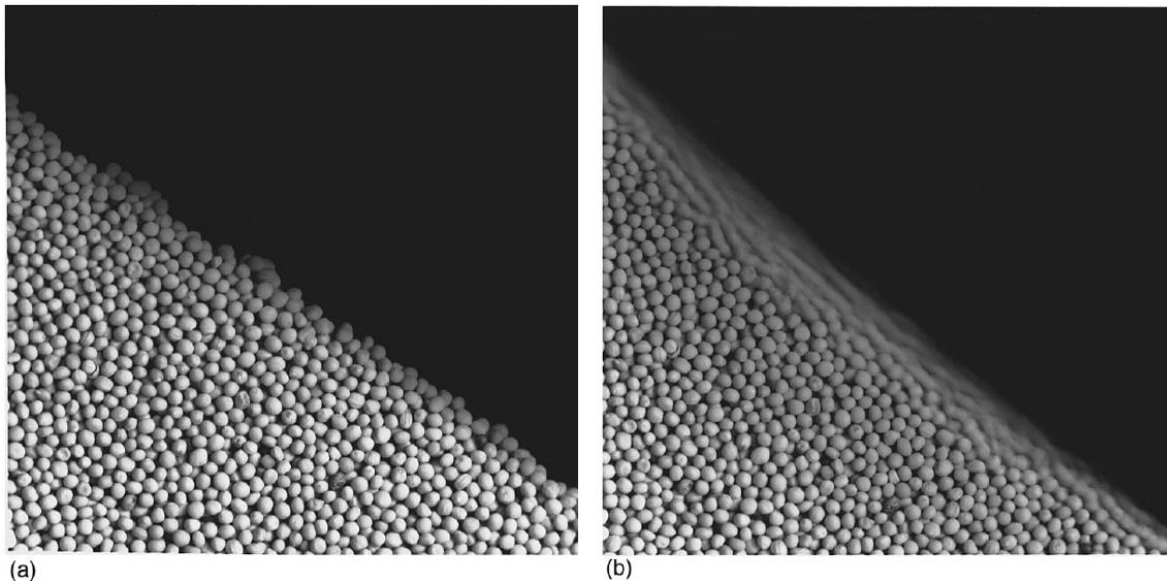
$\mu_f$ : viscosidad dinámica del fluido [ $Pa \cdot s$ ]

Luego, por medio de un análisis asintótico concluyeron que, cuando  $\Lambda \rightarrow \infty$  y para una geometría dada, la tasa de producción de fluido claro en volumen ( $S$ ) se puede predecir por la fórmula de Ponder-Nakamura-Kuroda que se obtuvo usando solo argumentos cinemáticos (Acrivos & Herbolzheimer, 1979). La teoría propuesta por Acrivos y Herbolzheimer (1979) entrega una expresión para el espesor

de la capa de fluido claro que se forma debajo de la pared superior del contenedor, así como para los perfiles de velocidad tanto en la capa de fluido claro como para la región en suspensión. La sedimentación y el grosor de la capa de líquido transparente se midieron bajo las siguientes condiciones experimentales:  $C_{v,0} \leq 0.1$ ,  $Re \sim 1$ ,  $10^5 \leq \Lambda \leq 10^7$  y  $0^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ , donde  $\theta$  es el ángulo del contenedor. Estos investigadores indican que las desviaciones de la teoría PNK reportadas en la literatura son probablemente debidas a inestabilidades del flujo que causan la re-suspensión de partículas, generando una reducción en la eficiencia de proceso de sedimentación.

## 2.5. Ángulo de reposo y ángulo de deslizamiento

El ángulo de reposo o ángulo crítico de reposo corresponde al ángulo más pronunciado respecto al plano horizontal que permite que una porción de sedimentos se mantenga estable sin que se produzca deslizamiento entre ellos. Es decir, si un montículo de sólidos se inclina algunos grados por sobre el ángulo de reposo, los sólidos comenzarán a fluir (Jaeger et al., 1996), esto se esquematiza en Figura 2.15.



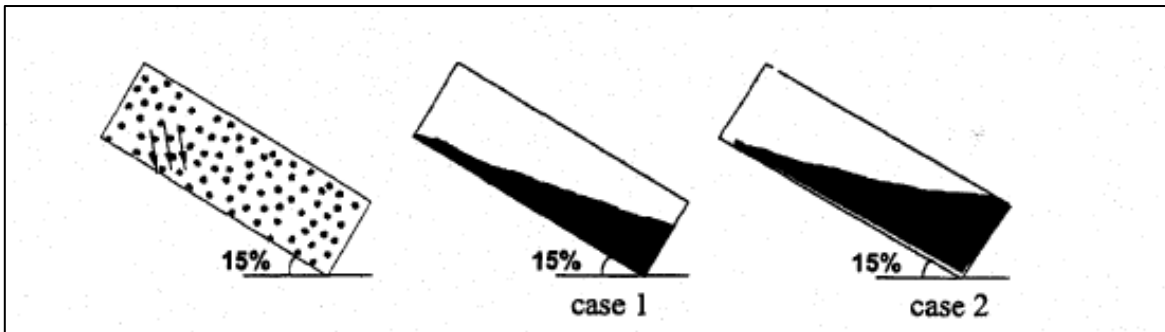
**Figura 2.15 a) Un montículo de semillas de mostaza que está inclinado en un ángulo más bajo que el ángulo de reposo. b) El mismo montículo después que se ha aumentado ligeramente la pendiente para crear una avalancha. Notar que el flujo se produce solo a lo largo de la superficie y que las semillas en la parte más profunda del montículo no participan en el movimiento (Jaeger et al., 1996)**

El ángulo de deslizamiento de la pulpa se define como el ángulo que mantiene estática la capa de sólidos en contacto con la pared interna de la tubería (Shook et al., 1974).

Para determinar el comportamiento de la pulpa ante una detención, se aplica la prueba de ángulo de reposo a la pulpa desarrollado inicialmente por PSI (2007) y luego adoptado por (Centro de Investigación JRI S. A., 2019). Esta prueba consiste en ubicar un tubo con pulpa previamente agitada

manualmente sobre un soporte que permita una pendiente de 15% (8,5° de la base horizontal), donde la pulpa se deja sedimentar por 24 horas. El resultado de este ensayo es cualitativo y corresponde a la calificación de los siguientes casos (Centro de Investigación JRI S. A., 2019):

- **Caso favorable:** ocurre cuando al término del reposo (24 horas), la base inferior del cilindro aún se encuentra con un área libre (Figura 2.16, caso 1).
- **Caso desfavorable:** ocurre cuando al término del reposo (24 horas), la base inferior se encuentra completamente obstruida (Figura 2.16, caso 2)

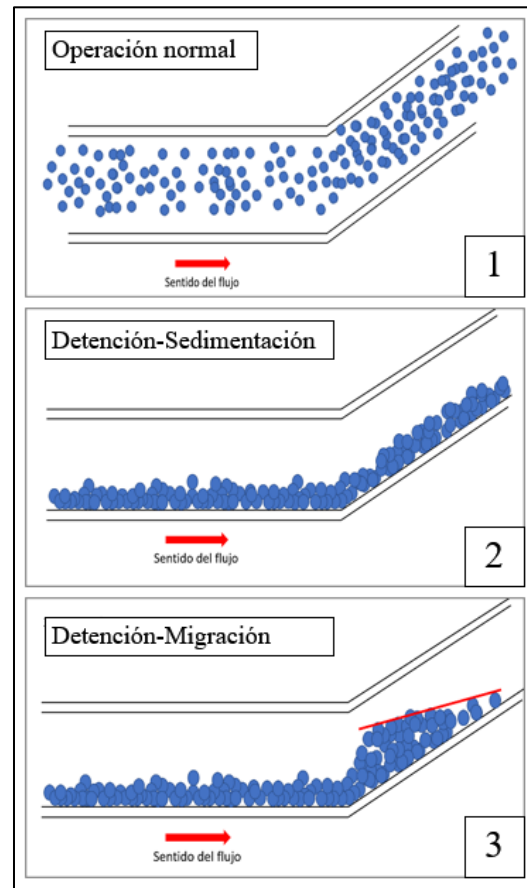


**Figura 2.16** Análisis de casos ensayo ángulo de reposo (Centro de Investigación JRI S. A., 2019)

Cabe mencionar que el procedimiento de laboratorio de PSI (2007) incluye una prueba de ángulo de deslizamiento que a grandes rasgos consiste en agitar la pulpa en un tubo plástico, luego dejarla reposar en posición completamente horizontal por 24 horas y finalmente, lentamente comenzar a aumentar la inclinación del tubo utilizando una gata, hasta un ángulo tal que los sedimentos comiencen a deslizarse. En su procedimiento de ensayo se señala que las partículas finas superficiales suelen empezar a deslizarse antes que la masa de sólidos se deslice en masa, pero el aumento de la inclinación del tubo se debe detener justo cuando la masa de sólidos sedimentados empiece a deslizarse en la tubería, dicho ángulo corresponde al ángulo de deslizamiento. Posteriormente, para realizar la prueba de ángulo de reposo, se señala que puede ser desarrollada para el ángulo de deslizamiento o para 15% de pendiente.

## 2.6. Migración de partículas

En un concentraducto en operación normal, las partículas sólidas se transportan en suspensión turbulenta a través del ducto como se muestra en Figura 2.17 (1). Luego, al ocurrir una detención, la fase sólida comienza a sedimentar, tal como se presenta en Figura 2.17 (2), para posteriormente migrar hacia zonas de baja pendiente Figura 2.17 (3).

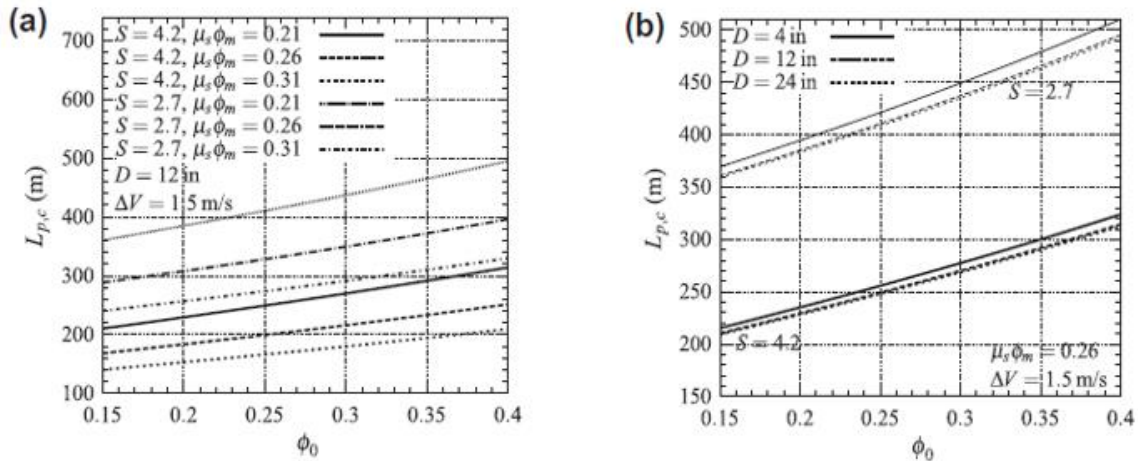


**Figura 2.17 Descripción secuencial del fenómeno de migración en un concentrado (Elaboración propia)**

Como consecuencia de este fenómeno se producen problemas operacionales, debidos fundamentalmente al aumento de densidad que se genera en puntos bajos, lo que se traduce en un aumento de resistencia de la masa de sólidos a ser dispersada y refluidizada, pudiendo ocasionar un embanque generalizado, pérdidas de producción y riesgos a las personas, ambientales y a las instalaciones.

En el contexto de los problemas operacionales generados producto de que exista migración, existe un estudio que muestra que en sistemas de larga distancia con características típicas tanto de la pulpa mineral como de la tubería que cuentan con rutas que tienen secciones inclinadas, la formación de obstrucciones puede convertirse en un factor dominante en las sobrepresiones del sistema (C. F. Ihle, 2014), que tradicionalmente son calculadas por medio de análisis transiente. El autor señala que la importancia relativa entre un golpe de ariete y la fricción adicional causada por un bloqueo en un punto bajo de una tubería dependen de varios factores, pero se pueden considerar como dominantes, dependiendo de las propiedades de la pulpa, la topología de la tubería y las características del material. Por otra parte, indica que no debería existir bloqueo si el ángulo de la tubería se encuentra por debajo tanto del ángulo de reposo como del ángulo de deslizamiento de la pulpa. En el mismo trabajo se define una condición crítica que consiste en igualar el aumento de presión del transiente representado por el pulso de Joukowski con el aumento de presión producto de la fricción generada por el

deslizamiento del tapón, a partir de dicho análisis se define una longitud crítica de bloqueo  $L_{p,c}$ . Sobre este parámetro el autor señala que tiende a crecer con la concentración de sólidos, es decir, una mayor concentración generaría una situación más favorable, dado que se permitiría una mayor longitud bloqueada antes de que la sobrepresión por bloqueo sea predominante frente a la sobrepresión por transiente, tal como se muestra en Figura 2.18. Por otra parte, manifiesta que el efecto del diámetro de la tubería no es importante en la longitud crítica, pero que la gravedad específica de los sólidos sí tiene un impacto significativo.



**Figura 2.18 Dependencia de la longitud crítica del tapón  $L_{p,c}$  con la concentración en masa (definida como  $C_p$  en este estudio),  $\phi_0$  a) Diferentes valores de gravedad específica de los sólidos, con  $S=4.2$  y  $2.7$  que asemejan el concentrado de cobre y relave, respectivamente. b) Diferentes valores de diámetro interno de la tubería (C. F. Ihle, 2014)**

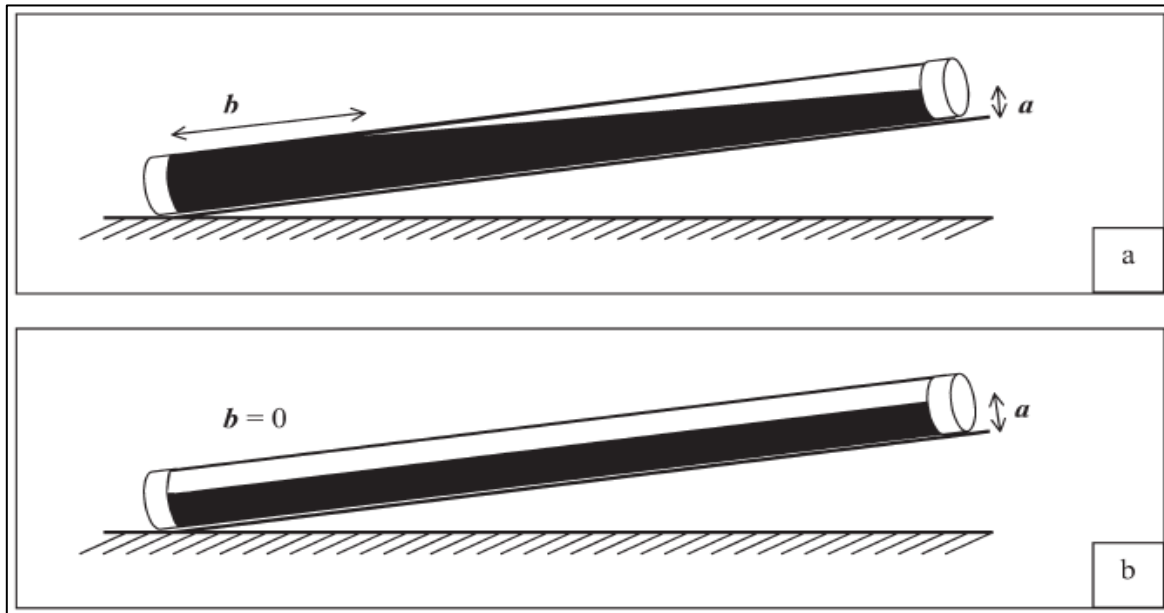
En su estudio, Ihle presenta un ejemplo para un concentrado operando a una fracción volumétrica  $\phi_0 = 0.3$  ( $C_p = 30\%$ ): con solo el 1% de la ruta excediendo el ángulo crítico, podría causar un boqueo de 600 [m], que requeriría más del doble que la presión estimada para el golpe de Ariete usando la ecuación de Joukowski para removerlo. Cabe destacar que dicho valor y los valores presentados en Figura 2.18 son referenciales, pero entregan un orden de magnitud.

## 2.6.1 Estudios relacionados

### 2.6.1.1 Prueba ángulo de reposo

La prueba de ángulo de reposo fue aplicada en el marco de una investigación efectuada por Bragança y Silva (2007) basados en el procedimiento de PSI (2007), para buscar alternativas a la cal como modificador reológico para el transporte de concentrado de hierro en la tubería de Samarco, complejo minero ubicado en Brasil, pero en esa ocasión el tiempo de reposo de la pulpa fue de 4 horas en un tubo plástico de 1200 [mm] de largo y 63 [mm] de diámetro y además se midieron los parámetros  $a$  y  $b$  como una medida para determinar la formación de un bloqueo en la tubería. Estos parámetros,

junto con la formación de una obstrucción y sin la formación de una obstrucción, se muestran en Figura 2.19 (a) y (b), respectivamente.



**Figura 2.19** Esquematización de los resultados de la prueba de ángulo de reposo: (a) con obstrucción,  $a \neq 0, b \neq 0$ ; (b) sin obstrucción,  $a \neq 0, b = 0$  (Bragança & Silva, 2007)

En este estudio se aplicaron los siguientes ensayos:

- Reología
- Prueba de ángulo de reposo (15% de pendiente)
- Prueba de penetración

Específicamente, se compararon los resultados de estos ensayos para 3 muestras de concentrado de hierro elaborado en una planta piloto, antes y después de agitar, correspondientes a:

- A: Muestra en blanco, antes de la agitación
- B: Muestra de referencia coagulada con cal, antes de la agitación
- C: Muestra de ensayo coagulada con polyDADMAC, antes de la agitación
- A': Muestra en blanco, después de la agitación
- B': Muestra de referencia coagulada con cal, después de la agitación
- C': Muestra de ensayo coagulada con polyDADMAC, después de la agitación

Sobre la prueba de penetración es importante agregar que los autores tomaron como indicador de compactación un peso mínimo de 50 [g], considerando a los valores bajo dicha referencia como indicadores de un lecho suave de partículas que sería fácil de refluidizar.



Los resultados de la reología de cada muestra arrojaron que posterior a la agitación tanto la tensión de fluencia como la viscosidad aparente eran más bajas, pudiendo aproximar incluso la muestra A' a un comportamiento newtoniano. Por otra parte, tanto anterior como posterior a la agitación, las muestras con coagulantes resultaron más viscosas.

Luego, a partir de las pruebas de ángulo de reposo se determinó que todos los ensayos arrojaron resultado favorable a excepción de la muestra A', que se condice con su comportamiento newtoniano y en línea también con lo concluido por Sampaio y Brandao (2004). Respecto de las mediciones del parámetro  $\alpha$ , pudieron concluir que mientras más desviadas del comportamiento newtoniano se encontraban las muestras, mayores eran los valores de  $\alpha$ . Por tanto, existía menor deslizamiento de partículas y consecuentemente menor riesgo de embanque. Al comparar las muestras anteriores y posteriores a la agitación, se observó que en el segundo caso hubo mayor deslizamiento para todas las muestras.

Respecto de los resultados de las pruebas de penetración los autores notaron que tanto posterior a la agitación como con la adición de coagulantes (cal o polyDADMAC) el peso necesario para penetrar toda la capa de sedimento disminuía, quedando bajo 50 [g] en todos los casos.

Adicionalmente, en el análisis presentado por Ihle et al. (2010) para poder evaluar el efecto migratorio se recomienda medir la compactación del sedimento formado (pruebas de penetración), considerar el tiempo de la detención y tomar en cuenta condiciones externas, por ejemplo, analizando patrones de vibración.

Sampaio y Brandao (2004) realizaron un estudio al concentrado de mineral de hierro de Samarco en 2004 para determinar por qué al cambiar el tipo de concentrado, pero manteniendo las especificaciones de la pulpa acordes al diseño conceptual (granulometría, porcentaje de sólidos, densidad, viscosidad y otros), aumentaba el riesgo de embanque en la tubería. Además, vieron que, en algunos casos, durante largos períodos de almacenamiento de la pulpa en estanques o incluso durante el transporte, las propiedades reológicas de la pulpa cambiaban, y en algunos casos, presentaba alto riesgo de formación de embanques, además de resultar en sedimentos más compactos que conllevan a problemas en repartidas.

Los ensayos que ellos aplicaron fueron:

- Análisis químico y granulométrico
- Reología de la pulpa
- Prueba de ángulo de reposo (15% de pendiente)
- Prueba de penetración
- Caracterización de la fase acuosa
- Potencial zeta
- Determinación del área superficial específica

A grandes rasgos sus conclusiones fueron que las propiedades reológicas de la pulpa dependían del tiempo de agitación y del estado de agregación/dispersión de la pulpa: pulpas agregadas presentaron comportamiento plástico Bingham, mientras que las pulpas dispersas tuvieron comportamiento newtoniano, quedando asociado el comportamiento newtoniano con una mayor probabilidad de embanque. Y, por otra parte, establecieron que las variables que afectaban el grado de dispersión de



la pulpa eran: área superficial específica y la dosis de lechada de cal o almidón, reactivo que se utiliza comúnmente por su efecto en la modificación del pH de la pulpa.

Cabe mencionar que, de los tres tipos de concentrado de hierro estudiados, uno arrojó resultado desfavorable en la prueba de ángulo de reposo y correspondía al que menor razón de almidón tenía por área superficial de partícula. Al respecto, los autores señalaron que la cantidad de reactivo no fue suficiente para promover la floculación de las partículas, lo que condujo a valores bajos de viscosidad y tensión de fluencia. Por otra parte, la retención de agua entre los sólidos también se vio obstaculizada por la baja cantidad de almidón, que a su vez promovió la compactación del sedimento producto de la proximidad de las partículas.

Dentro de sus conclusiones, los autores señalaron que la dosis de almidón no era el único factor determinante en la compactación de los sedimentos, otros factores como la forma de las partículas, la porosidad y la rugosidad superficial también fueron importantes. Específicamente, ellos indican que las escamas más gruesas de las hematitas laminares de Germano (proveniencia original del mineral de hierro) tendían a compactarse menos densas que las goethitas y martitas de Alegría 6 (nueva proveniencia de mineral de hierro) por lo fibrosa y delgado de las morfologías de placa de estos minerales que tendían a generar capas más compactas.

Por otra parte, indicaron que la adición de cal para generar un rango de *pH* entre 10,8 a 11,2 era una excelente alternativa para mantener la pulpa coagulada, a modo de preservar sus propiedades reológicas y evitar la formación de sedimentos compactos en el caso de detenciones, para consecuentemente evitar el riesgo de embanque.

### 2.6.1.2 Análisis de datos operacionales

Valencia (2017), basándose en la Ecuación 2.27, estableció un modelo para relacionar algunos parámetros geométricos de la línea de transporte con las características de la pulpa y los patrones de acumulación de sólidos en los puntos bajos para concentraductos de hierro, utilizando registros operacionales obtenidos durante la fase de Puesta en Marcha, Ramp Up y operaciones de concentraductos de hierro.

A partir de este trabajo, concluyó que la masa de sólidos que se transporta a los puntos bajos es, a su vez, dependiente del tiempo de duración de la detención y de la velocidad de sedimentación, que a su vez, es dependiente de las características de la pulpa y de la geometría, especialmente las pendientes que propician la convergencia de sólidos en estos puntos bajos. Además, indica que otras variables que teóricamente debieran influir, tanto en masa de sólidos que se desplaza hacia un punto bajo como en el tiempo de detención máximo, son el tamaño característico de partículas, viscosidad de la pulpa, densidad del sólido y diámetro de la conducción.

El modelo que predice el aumento de concentración en los puntos bajos ( $C_p$ ), sobre la base de los registros anteriormente mencionados fue el siguiente:

$$\frac{\Delta C_p}{C_p} = 9.10 \cdot 10^{-3} \cdot \hat{M}^{0.49} \quad (2.34)$$



$\hat{M}$  corresponde al parámetro adimensional que representa la cantidad de sedimentos acumulada en el punto bajo, definido como:

$$\hat{M} = \sum_{i_{e,s}} \frac{g \cdot d^2 \cdot (S - 1) \cdot A \cdot t \cdot \bar{C}_v \cdot \text{sen}(\theta)}{v \cdot A \cdot D} \quad (2.35)$$

Al desarrollar la expresión anterior resulta:

$$\hat{M} = \frac{t \cdot \bar{C}_v \cdot g \cdot d^2 \cdot (S - 1) \cdot (\text{sen}(\theta_e) + \text{sen}(\theta_s))}{v \cdot D} \quad (2.36)$$

Donde

$e$ : agua arriba o entrante al punto bajo

$s$ : agua abajo o saliente del punto

$g$ : aceleración de gravedad [ $m/s^2$ ]

$d$ : diámetro de partícula [ $m$ ]

$S$ : gravedad específica de sólidos (adimensional)

$A$ : Sección de la tubería [ $m^2$ ]

$t$ : tiempo de detención del concentrado [ $s$ ]

$\bar{C}_v$ : concentración volumétrica media de sólidos (adimensional)

$\theta$ : ángulo de entrada o salida al punto bajo

$v$ : viscosidad cinemática [ $m^2/s$ ]

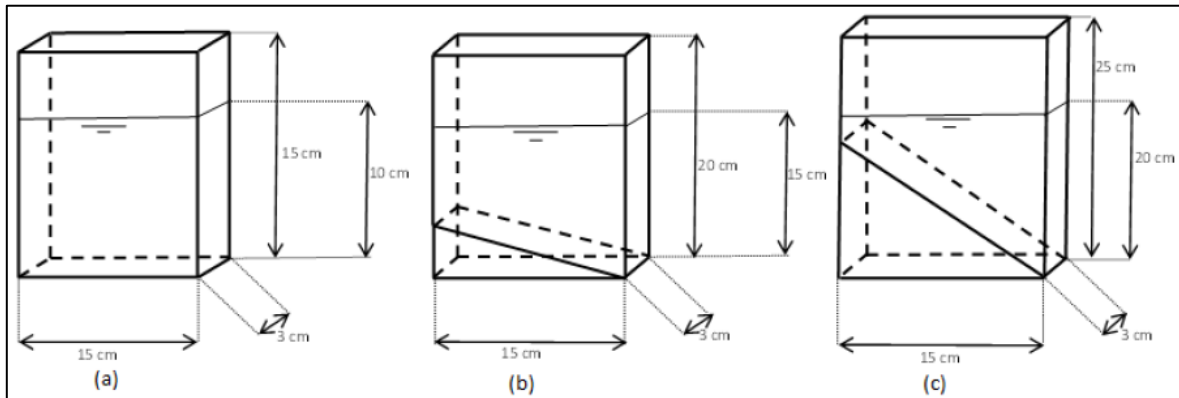
$D$ : diámetro interno de la tubería [ $m$ ]

A partir de esta expresión, el autor realizó una estimación del tiempo máximo de detención de 3 de los 4 mineroductos de hierro que analizó, utilizando como condición crítica un aumento de 20% en la concentración de sólidos inicial, correspondiente al máximo valor de diseño de cada concentrado, bajo condiciones dadas de pendiente entrante y saliente al punto bajo.

Luego, efectuó un análisis de sensibilidad tanto para las pendientes de entrada y salida como para la concentración, manteniendo constantes las características de la pulpa.

### 2.6.1.3 Experimentaciones y simulaciones relacionadas

Cotroneo (2015) realizó un trabajo experimental con el fin de determinar el efecto del contraste de diámetros y concentraciones de mezclas bi-dispersas en la formación de lechos. Incluyendo el efecto de la pendiente del fondo en las características de sedimentación. Cabe mencionar que este estudio se orientó a dilucidar el comportamiento de relaves. Utilizó cajas sedimentadoras de fondo horizontal o inclinado, tal como se muestran en Figura 2.20.



**Figura 2.20 Bosquejo de dimensiones de las cajas: (a) Caja Tipo 1, (b) Caja Tipo 2, (c) Caja Tipo 3 (Cotroneo, 2015)**

En sus experimentaciones, utilizó una mezcla de glicerina diluida de viscosidad  $0.072 [Pa \cdot s]$  (fluido newtoniano) en agua con partículas de vidrio de densidad aproximada  $2500 [kg/m^3]$  con diámetros entre  $20 [\mu m]$  y  $1000 [\mu m]$  separadas en cuatro tipos, a distintas concentraciones y diámetros. Entre otros parámetros, el autor midió la variación de la altura final del lecho sedimentado en función de las concentraciones y diámetros de partícula, para casos en que existía percolación en el medio poroso y casos en que no. Para definir lo anterior, empleó la relación de Apolonio, que se obtiene mediante un análisis geométrico, correspondiente a:

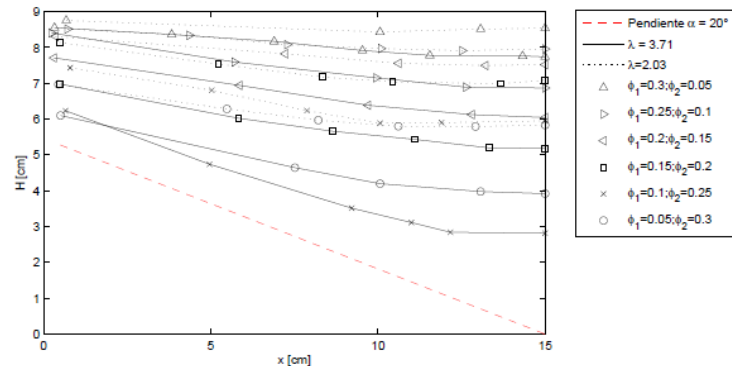
$$\frac{R}{r} > 6,464 \quad (2.37)$$

Donde:

$R$ : radio de las esferas más grandes [ $m$ ]

$r$ : radio de la partícula que está percolando [ $m$ ]

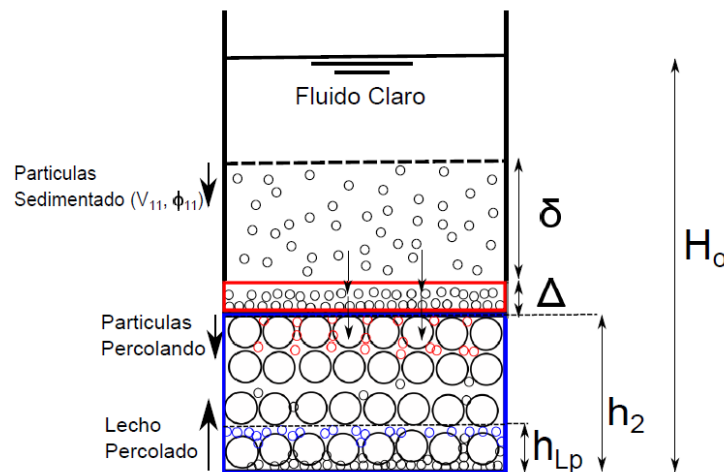
Es decir, para que exista percolación en un medio formado por esferas de dos tamaños se tiene que cumplir la relación de Apolonio de modo que las partículas más pequeñas puedan moverse entre los intersticios que dejan las más grandes. En Figura 2.21 se muestran los resultados de sus ensayos sin incluir el fenómeno de percolación.



**Figura 2.21** Altura del espesor compuesto por finas y gruesas, para los experimentos con ángulo de inclinación del contenedor de  $20^\circ$  y concentración volumétrica total de 35% sin percolación (Cotroneo, 2015)

Es importante señalar que  $\lambda = d_2/d_1$  corresponde a la razón entre el diámetro de las partículas gruesas (2) y partículas finas (1) y  $\phi_1$  y  $\phi_2$  son las concentraciones en volumen ( $C_v$  en este estudio) de las partículas finas y gruesas respectivamente.

Para el análisis con percolación solo se experimentó con un tipo de mezcla, producto de que se contaba con una sola una combinación de diámetros posibles que permitía que existiera percolación. En consecuencia, el análisis de esta situación se enfocó en los tiempos de sedimentación y percolación. Este fenómeno se esquematiza en Figura 2.22.



**Figura 2.22** Bosquejo del fenómeno de percolación, donde el lecho de sedimento de partículas gruesas representa el lecho poroso, por donde percolan las finas (partículas rojas). Además, se tiene un lecho donde se depositan las partículas que percolan (partículas de color azul).  $\delta$  simboliza el espesor de la suspensión de partículas finas y  $\Delta$  el espesor de partículas finas (Cotroneo, 2015)



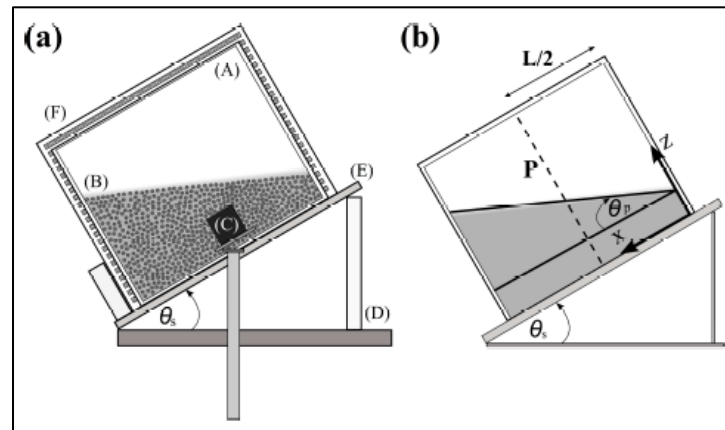
Cabe mencionar que el espesor  $\Delta$  varía en el tiempo producto de que tiene un flujo entrante (sedimentación) y uno saliente (percolación). La altura  $h_2$  es constante teniendo solo flujo entrante (percolación).

Sobre la percolación en fondo inclinado, Cotroneo señala que las partículas finas percolan por caminos preferenciales bien marcados, no como en el caso con el plano horizontal, formando una especie de “dedos” de percolación constituidos por las partículas finas, tanto para inclinación de  $20^\circ$  como de  $50^\circ$ . En algunos casos se observó que estos canales preferentes de percolación provocaban que el espesor de partículas finas que alimenta la percolación variara de forma irregular. El estado final de la percolación depende mucho de las concentraciones y del ángulo de inclinación del fondo. Por otro lado, indica que el efecto de pendiente de fondo, con concentración de partículas, puede llegar a impedir percolación.

Como conclusión general, el autor señaló que la segregación de partículas en el fondo depende fuertemente, aparte de factores conocidos tales como la diferencia de tamaños y la relación de concentraciones, de la historia dinámica, dada por las interacciones irreversibles entre partículas de igual y distinto tamaño (segregación hidrodinámica); y también por otra parte identificó un nuevo proceso que sucede a la misma escala de tiempo que la sedimentación, llamado percolación.

Finalmente, Cotroneo concluye que la razón el tamaño de partículas ( $\lambda$ ) juega un rol importante en la conformación del estrato final, producto del fenómeno de percolación. Además de que, para conocer las condiciones finales de la sedimentación (tiempo, alturas y concentraciones), no basta con saber la concentración total de la mezcla, sino que también es importante conocer la razón entre las partículas que participan en la sedimentación; y por último, sobre la inclinación del fondo, concluye que esta variable influye en la composición del último estrato, dado que cuando se inclina el fondo, se tienen corrientes secundarias al mismo tiempo que se está formando el estrato inferior  $h_2$  (Figura 2.22), teniendo por efecto una resuspensión de las partículas que se están depositando en el fondo. A mayor ángulo de inclinación, mayor es la resuspensión, produciendo mayores diferencias en las concentraciones de partículas de  $h_2$ . Las partículas más afectadas por las corrientes secundarias son las finas.

Continuando con otra investigación relacionada, en 2016 se realizaron algunas experimentaciones y modelaciones numéricas de sedimentación en contenedores inclinados de sección rectangular, con el objetivo de entender los factores que controlan el ángulo final de la capa de sedimentos formada por las partículas casi monodispersas (Palma et al., 2016). El montaje experimental utilizado fue el descrito en Figura 2.23



**Figura 2.23** (a) Esquema del montaje experimental. (A): contenedor de acrílico ( $25 \times 21 \times 3$  [cm<sup>3</sup>] (ancho x alto x grosor)), (B): perlas de resina, (C): cámara de video, (D): conector de laboratorio ajustable, (E): soporte inclinado, (F) iluminación trasera LED. (b) Configuración general del problema (Palma et al., 2016)

El fluido utilizado correspondió a una solución de glicerina y agua, con viscosidades dinámicas entre  $6.30 \pm 0.08$  [mPa · s] y  $11.48 \pm 0.15$  [mPa · s]; y las partículas empleadas fueron perlas de resina esféricas con radio  $a = 125 \pm 13$  [μm] y densidad  $1.31 \pm 0.07$  [g/cm<sup>3</sup>]. El investigador exploró las combinaciones entre 4 ángulos de inclinación, 5 viscosidades de fluido y 7 concentraciones en volumen, tal como se presenta en Tabla 2.1

**Tabla 2.1** Condiciones experimentales (Palma et al., 2016)

Propiedad del fluido/sólido	Valores
Ángulo del sistema $\theta_s$ [grados]	[0,10,20,30]
Viscosidad del fluido $\nu$ [mPa · s]	[6.30, 7.25, 8.40, 9.78, 11.48]
Concentración en volumen inicial $\phi_0$ ( $C_{v,0}$ )[%]	[5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0]

A partir del seguimiento de la interfaz entre los sólidos en suspensión y la zona de fluido claro, determinó que el ángulo final adoptado por la capa de sedimentos muestra una fuerte dependencia con la concentración inicial de partículas y la inclinación del contenedor, pero no con la viscosidad del fluido. Específicamente, señala que la función de obstrucción juega un rol importante en el ángulo del lecho sedimentado; que la relación entre el efecto de la fricción y la pendiente se puede explicar como una función casi lineal de la velocidad proyectada a lo largo del fondo del contenedor y; por último, indica que antes del final de la sedimentación hay una interacción interpartículas significativa a través del fluido que afecta la organización final de la capa de sólidos.

Otro resultado significativo de esta investigación es que existió una excelente concordancia entre los resultados numéricos y experimentales, y producto de que las simulaciones numéricas no incluían ninguna condición de ángulo de reposo o fricción interna entre partículas, se infirió que el mecanismo dominante de la formación de sedimentos no viene dado por la fricción entre partículas, sino por las colisiones mediadas por fluido.



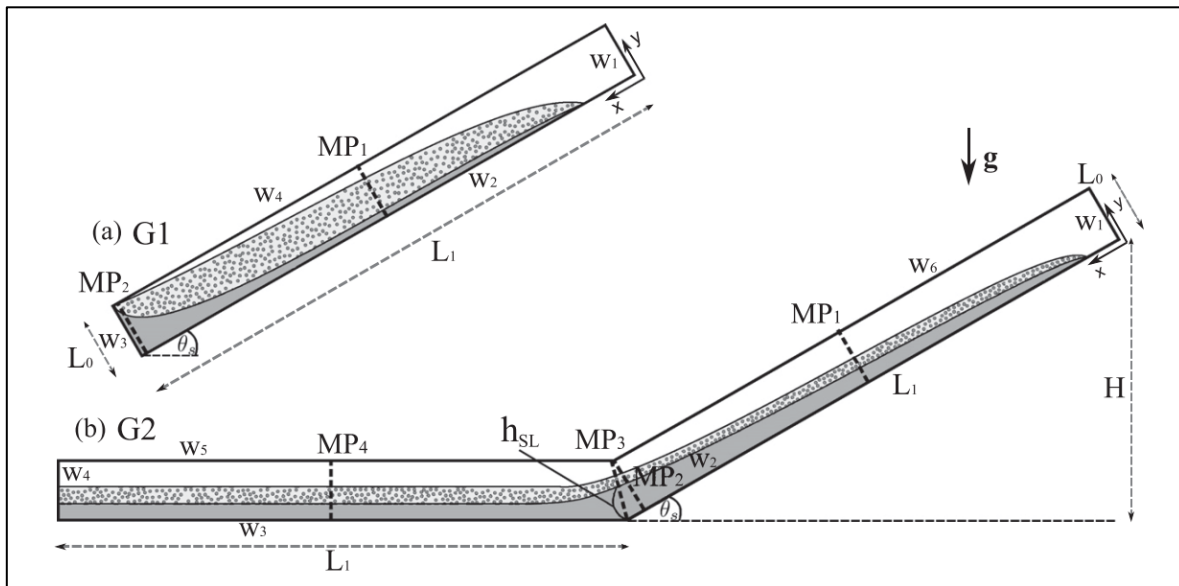
Respecto de la forma adoptada por la capa de sedimento, el autor menciona que el proceso de asentamiento evoluciona hacia la formación de un sedimento cuya superficie superior fue lineal en la mayoría de los experimentos y simulaciones.

Palma señala que el proceso de asentamiento de partículas que forma la capa de sedimento y controla su ángulo final es la consecuencia de tres procesos diferentes que las partículas experimentan en secuencia. El primer proceso es la sedimentación casi vertical de partículas que impulsa el aumento casi lineal, visto con el tiempo, de la altura del depósito. A medida que las partículas se acercan al sedimento contribuyen al segundo proceso: la formación de un flujo de partículas en una concentración cercana al valor de empaquetamiento. Este flujo en pendiente descendente redistribuye las partículas hacia las zonas inferiores del contenedor, que conducen a  $\theta < \theta_s$  con  $\theta = \theta_s - \theta_p$  (Figura 2.23). Además, esta capa introduce la posibilidad de cierto grado de reorganización debido a las colisiones y a los valores de viscosidad local de la mezcla.

Entre sus principales conclusiones, se destaca que el ángulo final adoptado por la capa de sedimento muestra fuertes dependencias con la concentración inicial de partículas y la inclinación del contenedor, pero no con la viscosidad del fluido. Sin embargo, la viscosidad controla la escala de tiempo sobre la cual se establece la morfología.

También, dentro de las conclusiones el autor planteo algunas hipótesis sobre la modificación de las dimensiones del contenedor que utilizó. Específicamente, menciona que para una determinada concentración inicial y ancho del contenedor, el aumento de la altura del contenedor incrementará el período de tiempo durante el cual la capa rica en partículas fluye por la pendiente sobre el depósito de sedimentos en desarrollo, de manera similar a la disminución de  $\theta = \theta_s - \theta_p$  (Ver Figura 2.23) que observó al aumentar la concentración inicial de sólidos. Por el contrario, señala que aumentar el ancho del contenedor (manteniendo constante la altura) no alteraría directamente la pendiente descendente, pero sí se incrementaría el volumen de partículas que deben ser transportadas para lograr un determinado  $\theta$ . Por lo tanto, esperaría que  $\theta$  aumente hacia  $\theta_s$ , obteniendo una capa de sólidos de grosor más uniforme.

Siguiendo en la línea de investigación de Palma, en 2018 realizó nuevas modelaciones con el objetivo de comparar el comportamiento del mismo fenómeno empleando dos geometrías diferentes: con y sin sección horizontal, tal como se muestra en Figura 2.24, incluyendo varias combinaciones de viscosidad del fluido, ángulo del conducto y la concentración de partículas sólidas (Palma et al., 2018). Como resultado de este trabajo, los autores propusieron una expresión matemática formada por tres números adimensionales para representar la altura de la capa de sedimento en la zona de cambio de pendiente del conducto.



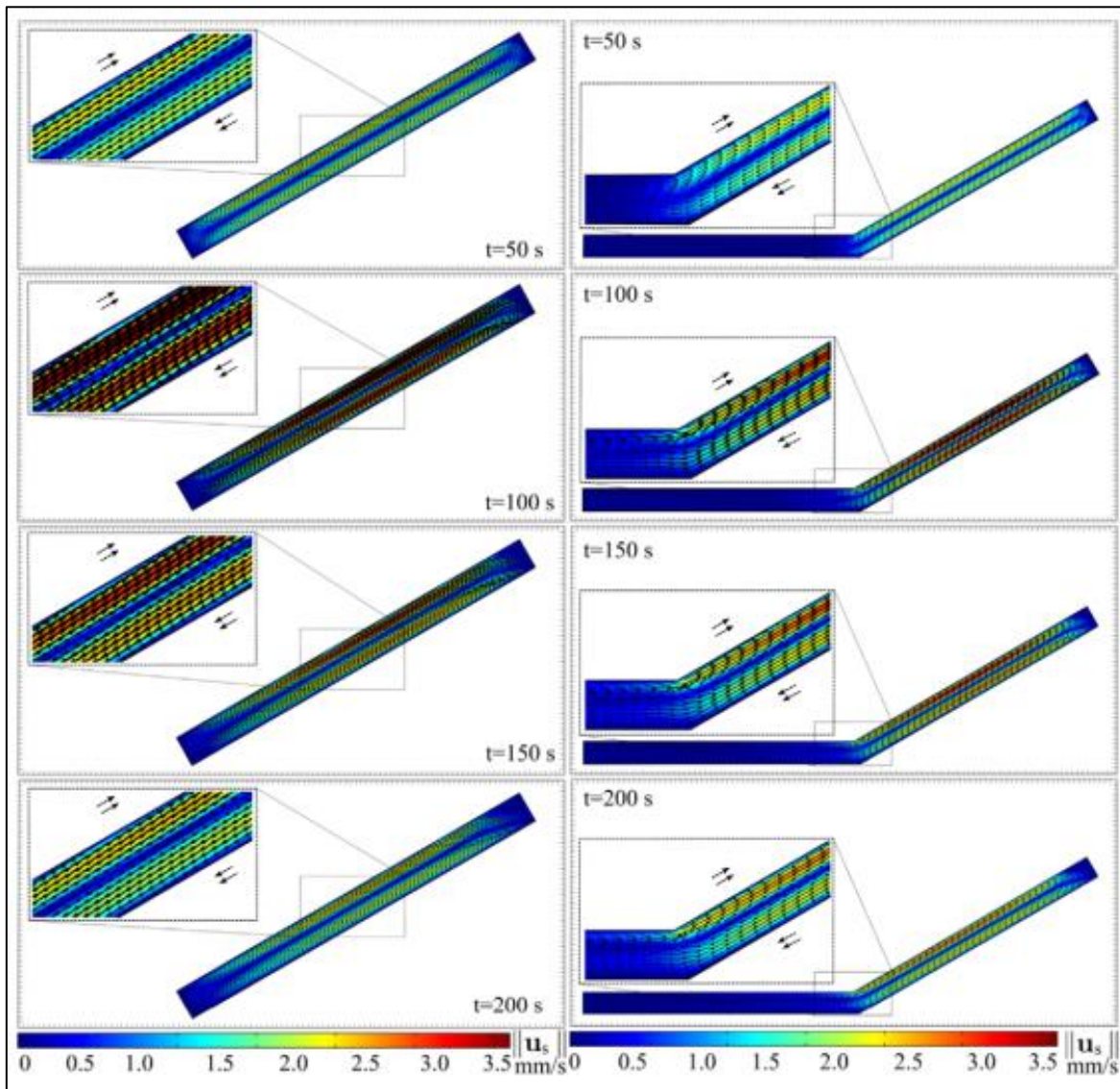
**Figura 2.24** Esquema del modelo conceptual: (a) G1: Geometría del ducto inclinado. (b) Geometría del ducto inclinado incluyendo una sección horizontal. Las paredes del ducto y los perfiles de medición son representados por  $w_j$ , con  $j \in \{1, \dots, 6\}$  y  $MP_j$ , con  $j \in \{1, \dots, 4\}$ , respectivamente. La variable  $h_{SL}$  fue utilizada en una prueba de convergencia. En cuanto a la geometría,  $L_0 = 40 \text{ mm}$  y  $L_1 = 500 \text{ [mm]}$  (Palma et al., 2018)

Las condiciones simuladas se muestran en la Tabla 2.2

**Tabla 2.2** Conjunto de parámetros utilizados para la simulación numérica (Palma et al., 2018)

Propiedad del fluido/sólido	Valores
Densidad de partícula $\rho_s \text{ [kg/m}^3\text{]}$	1200
Densidad del fluido $\rho_f \text{ [kg/m}^3\text{]}$	1000
Diámetro de partícula $d_s \text{ [}\mu\text{m]}$	600
Concentración en volumen máxima $\phi_{s,m\acute{a}x} (C_{v,m\acute{a}x})$	0.62
Ángulo del sistema $\theta_s \text{ [grados]}$	[5, 10, 15, 20, 25,30]
Concentración en volumen inicial $C_{v,0} \text{ [%]}$	[10, 15, 20, 25, 30, 35,40]
Viscosidad del fluido $\eta_f \text{ [mPa} \cdot \text{s]}$	[100, 200, 300]

Los resultados de las simulaciones permitieron concluir que la geometría que incluye una zona horizontal representa una condición más favorable que la geometría sin dicha zona, desde el punto de vista de la altura de la capa de sedimento que se forma en la zona de cambio de pendiente. Cabe mencionar que las simulaciones fueron obtenidas para instantes de tiempo específicos producto de que en esos períodos se visualizan de mejor forma las etapas del flujo de partículas, tanto hacia arriba como hacia abajo del conducto, como se muestra en Figura 2.25.



**Figura 2.25** Magnitud del campo de velocidades de la fase dispersa para  $t = 50 [s]$ ,  $t = 100 [s]$ ,  $t = 150 [s]$  y  $t = 200 [s]$ . El panel de la izquierda muestra la geometría G1 y el de la derecha la geometría G2. En el recuadro se muestran los detalles de  $u$ . Las flechas negras representan la dirección del flujo de las partículas. Las condiciones numéricas son  $\theta_s = 30^\circ$ ,  $\phi_0 = 0.30$  ( $C_v = 30\%$ ) y  $\nu = 100 [mPa \cdot s]$ . La barra de color representa la magnitud de la velocidad de las partículas (Palma et al., 2018)

Otras conclusiones relevantes que permitieron los resultados de las simulaciones fueron, por una parte, que cuanto mayor sea el ángulo del sistema, mayor será la acumulación de material granulado cerca de la zona de cambio de pendiente; y por otra parte, que la dependencia entre la altura y la concentración inicial de partículas es mucho más relevante que la dependencia con la inclinación del sistema, pero que los resultados permitieron determinar que es la combinación de las pendientes del conducto y las concentraciones iniciales controlan el riesgo de formación de tapones.



## 2.7. Características operativas de algunos concentraductos de Sudamérica

Con base en los proyectos que ha desarrollado JRI, se construyó la siguiente base de datos, presentada en la Tabla 2.3, con las características de algunos concentraductos operativos en Sudamérica.

**Tabla 2.3 Características de algunos concentraductos operativos en Sudamérica (Benchmarking JRI)**

Empresa	Tipo	Diámetro tubería [in]	Velocidad mínima de op. [m/s]	S	C <sub>p</sub> [%]	pH	τ [Pa]	v [m <sup>2</sup> /s · 10 <sup>-6</sup> ]
1	Cu	7	1.28	4.0 a 4.6	55 a 65	9 a 12		4 a 7.7
2	Cu-Mo	6	1.42	4.2	55			8
3	Cu-Mo	7	1.29 a 1.41	4.2	57 a 64	10.4 a 11.8	4, 8 a >10	8 a 17
4	Cu-Mo	7	1.69	4.8 a 5.0	49 a 65	10 a 11	0.1, 0.5, 1 a 4	6 a 12
5	Cu-Mo	10	1.77	4.5	65			20
<b>Rango</b>	-	<b>6-10</b>	<b>1.28-1.77</b>	<b>4.0-5.0</b>	<b>49-65</b>	<b>9-12</b>	<b>0.1-10</b>	

A partir de la Tabla 2.3 se desprende que el diámetro de los concentraductos operativos en Chile y 1 de Argentina (número 3 de la tabla) es del orden de 7 [in], que tal como se mencionó anteriormente corresponde a un diámetro mucho más pequeño que los utilizados generalmente para relave, que están en el rango de 28 a 36 [in].

En cuanto a la gravedad específica se observan valores del orden de 4.3, cabe mencionar que esta es una propiedad física de los sólidos, por lo que solo puede ser modificada cambiando el material.

La concentración en peso de los sólidos se encuentra en un amplio rango operacional de 49 a 65% en peso. Sin embargo, es un parámetro relativamente fácil de modificar, dado que incorporando o extrayendo agua, disminuirá o aumentará, respectivamente. Por otra parte, es importante tener en cuenta la influencia de este parámetro en la reología del concentrado presentada en la sección 2.3.4. Por ejemplo, al comparar las empresas 2 y 5 se puede notar que mientras menos concentrada se encuentre la pulpa, su viscosidad es más baja.

En cuanto a la granulometría de estos 5 concentraductos, corresponde a la presentada a continuación en la Tabla 2.4, donde se muestra que todos los casos poseen granulometrías finas con d<sub>50</sub> del orden de 26 [μm].



**Tabla 2.4 Granulometría de algunos concentrados operativos en Sudamérica (Benchmarking JRI)**

<b>Empresa</b>	<b>D50 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>+100# [%]</b>	<b>-325# [%]</b>	<b>+400# [%]</b>
<b>1</b>		<1	71.6	61.2
<b>2</b>	25			
<b>3</b>		<1		60 a 75
<b>4</b>	25	<1	60 a 86	
<b>5</b>	28			
<b>Rango</b>	<b>25-28</b>	<b>&lt;1</b>	<b>60-86</b>	<b>60-75</b>



## 3. Preparación del trabajo experimental

### 3.1. Variables consideradas

Con base en los antecedentes encontrados en la revisión bibliográfica de este estudio, se consideró que era atingente efectuar el ensayo ángulo de reposo variando los siguientes parámetros:

- **Pendiente del sistema:** variable crítica a analizar ( $i_s$ ).
- **Concentración de sólidos:** por su influencia en la reología de la pulpa y en la sedimentación retardada del conjunto de partículas ( $C_p$ ).

Es importante agregar que no se contaba con el equipo, materiales y tiempo necesario para evaluar variables como el diámetro y longitud del tubo, granulometría o gravedad específica de sólidos, las cuales también son variables que deberían influir tanto en el tiempo de estabilización como en la morfología final del fenómeno de migración de partículas.

### 3.2. Método de ensayo

De acuerdo con lo definido por el Centro de Investigación en Minería Sustentable JRI (CIMS JRI), este ensayo consiste en primer lugar, en la preparación de una muestra según los procedimientos definidos por el CIMS JRI que consideran, para un ensayo estándar completo, las siguientes actividades: determinación de densidad de sólidos por picnometría, granulometría a través de tamizaje y análisis laser, preparación de pulpa a la concentración de estudio ( $C_p$ ), medición o ajuste de  $pH$ . Es importante agregar que se utilizan 8 [l] de pulpa para el ensayo de ángulo de reposo, dado que con este volumen queda un espacio con aire dentro del tubo que permite homogeneizar correctamente la muestra.

El ensayo de ángulo de reposo se inicia con la incorporación y homogeneización de la muestra dentro un cilindro de acrílico mediante agitación manual y luego se posiciona el tubo en el ángulo a ensayar. Una vez listo el montaje, se deja la maqueta en reposo por 24 horas. Transcurrido este período, se registra la altura de material sedimentado en referencia al diámetro de la base (Centro de Investigación JRI S. A., 2019)

En los últimos ensayos que ha realizado el CIMS JRI ha incorporado mediciones de la altura de material sedimentado en la cara aguas abajo del tubo a las 5, 8 y 24 horas de transcurrido el ensayo, a modo de visualizar el cambio de posición de la interfaz sólido-líquido dentro del tubo. Sin embargo, formalmente el resultado de este ensayo corresponde a los casos indicados en Figura 2.16.

Las dimensiones de los tubos que posee actualmente el CIMS JRI para realizar este ensayo se presentan en Tabla 3.1.

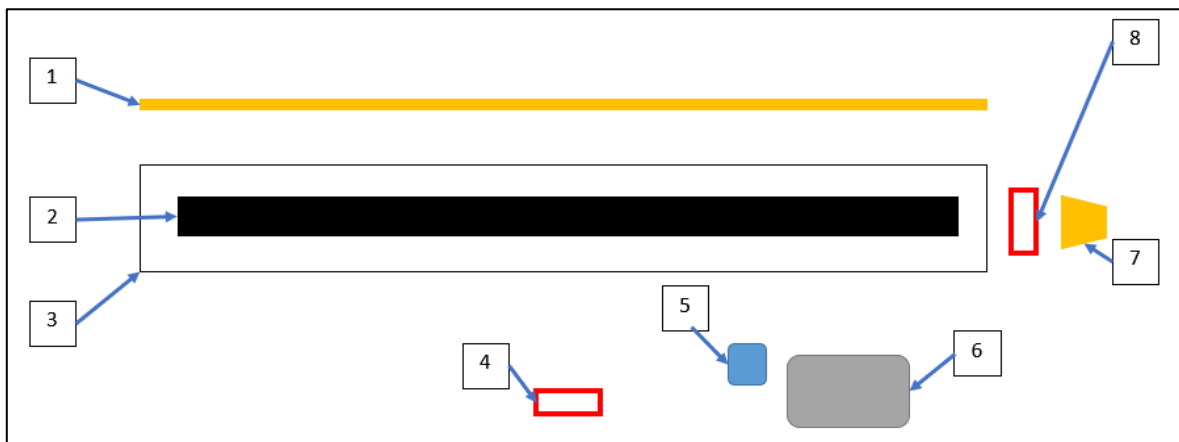
**Tabla 3.1 Dimensiones de tubos de acrílico utilizados actualmente en el ensayo**

Tubo	1	2
<b>Diámetro interno <math>D_i</math> [cm]</b>	10	5
<b>Espesor <math>e</math> [cm]</b>	0.5	0.5
<b>Longitud <math>L</math> [cm]</b>	110	60

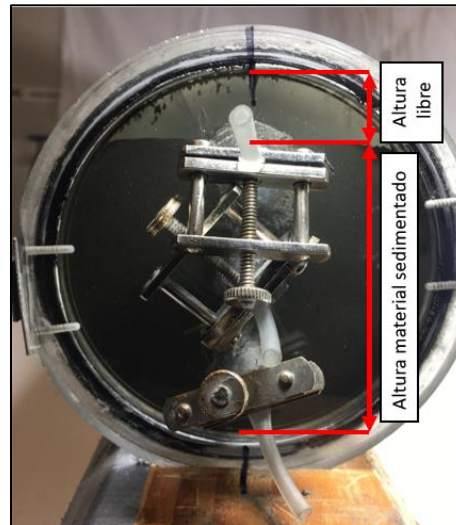
Generalmente el ensayo se ejecuta en tubo 1.

Si bien estos dos tubos tienen diferentes diámetro y largo, de todas maneras, se quiso explorar que ocurría al variar dichos parámetros. Sin embargo, se destaca que sus relaciones de aspecto ( $D/L$ ) son bastante similares, 0.09 y 0.08 para los tubos 1 y 2, respectivamente.

Para visualizar el proceso de forma dinámica se implementó un código en el software MATLAB R2019a con el objetivo de poder realizar un seguimiento en el tiempo de la interfaz sólido-líquido dentro del tubo de ensayo, tanto desde una vista transversal como de una vista longitudinal. En Figura 3.1 se presenta el montaje utilizado visto en planta, con sus componentes correspondientes a: 1: tubo de iluminación LED fría orientado en el mismo ángulo que el tubo, 2: tubo de ensayo con sistema de extracción de muestras incorporado, 3: soporte, 4: cámara para detección de interfaz sólido-líquido en vista longitudinal, 5: wifi móvil, 6: computador portátil conectado a ambas cámaras con rutina de MATLAB en ejecución para captura de imágenes, 7: lámpara de iluminación LED fría ajustada para detección de interfaz, 8: cámara para detección de interfaz sólido-líquido en vista transversal. Y en Figura 3.2 una vista transversal desde la base del tubo. La conexión entre las cámaras (que corresponden a teléfonos móviles) y el computador portátil se realizó mediante *wifi* y *bluetooth* a través de aplicaciones instaladas tanto en los teléfonos como en el notebook. Se debe tener en cuenta que todas las demás luces artificiales de la habitación/sala de montaje se mantuvieron apagadas y el ingreso de luz natural también fue bloqueado durante toda la ejecución de los ensayos.

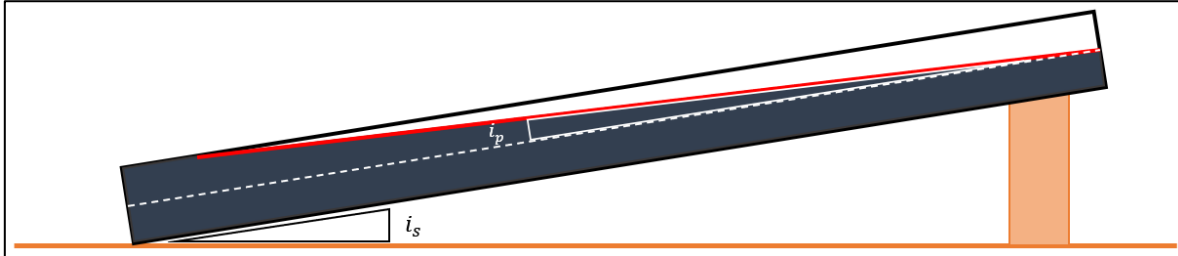


**Figura 3.1 Vista en planta del montaje utilizado para el ensayo ángulo de reposo-resuspensión**



**Figura 3.2** Vista transversal del montaje utilizado para el ensayo ángulo de reposo-resuspensión incluyendo definiciones de Altura material sedimentado y Altura libre

Además de la altura libre, es necesario definir otras variables geométricas que fueron medidas y analizadas como la pendiente del sistema ( $i_s$ ) y la pendiente de la interfaz sólido-líquido ( $i_p$ ), las cuales se muestran en Figura 3.3.

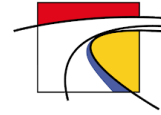


**Figura 3.3** Definición geométrica de la pendiente del sistema ( $i_s$ ) y de la pendiente de la interfaz sólido-líquido ( $i_p$ )

Respecto de los métodos de medición del ensayo, estos fueron variando a lo largo de la ejecución de los ensayos exploratorios para finalmente encontrar un método definitivo apropiado para los ensayos formales. En consecuencia, se describirá su desarrollo cronológicamente en las secciones que corresponda, específicamente en Secciones 3.2, 3.3 y 3.4 para los ensayos exploratorios y Sección 4.1 para los ensayos formales.

### 3.3. Ensayos exploratorios

En primera instancia se recibieron 2 muestras remanentes de concentrado de cobre del Centro de Investigación en Minería Sustentable JRI (CIMS JRI), se contaba con la caracterización de estas dos muestras por separado, consistente en: densidad de sólidos, granulometría, reología, sedimentación, penetrometría y ángulo de reposo. Para la primera etapa de los ensayos exploratorios se empleó una

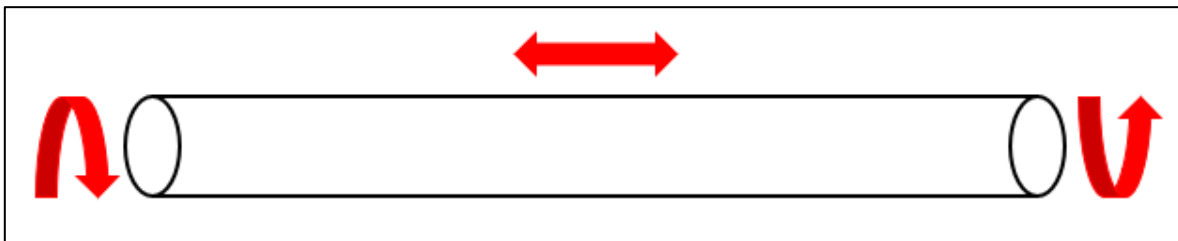


de estas dos muestras, la que inicialmente tenía una concentración en peso  $C_p$  de 67% y un volumen aproximado de 5.9 [l]. Para la segunda etapa se juntaron las dos muestras y se realizó una caracterización completa de la nueva muestra.

Cabe mencionar que los ensayos exploratorios se dividieron en dos etapas, la primera se desarrolló en un domicilio particular y consistió en la optimización de los métodos de medición y ejecución del ensayo y la segunda, efectuada en las instalaciones del CI-JRI, consistió en la búsqueda de una mejor forma de caracterizar la mecánica del fenómeno migratorio.

### 3.3.1 Primera etapa

En la primera etapa de los ensayos exploratorios se contemplaron 10 ensayos para un mismo concentrado y pendiente del sistema variable, pero a concentraciones en peso de 55 y 67% para estimar las mejores condiciones para el desarrollo de las pruebas formales del estudio. Por otro lado, se apuntó a visualizar algunas optimizaciones que se podrían realizar en el proceso de ensayo aplicado actualmente, principalmente con el objetivo de disminuir el tiempo de ensayo y obtener mediciones que permitieran visualizar de forma más completa lo que estaba ocurriendo con la interfaz sólido-líquido a lo largo del tubo. Se debe tener en cuenta que esta etapa de los ensayos exploratorios no fue ejecutada en las instalaciones del CIMS JRI, en consecuencia, no se contaba con el equipo necesario para realizar mediciones de concentración, pH, etc. ni tampoco con la experiencia para agitar la pulpa como se realiza tradicionalmente en el CIMS JRI. Se debe tener en cuenta que producto del peso del tubo 1 cargado con pulpa se requerían dos personas para poder tomar y agitar el tubo como se esquematiza en Figura 3.4.



**Figura 3.4 Método de agitación empleado en la primera etapa de los ensayos exploratorios**

Los valores de los parámetros utilizados en estos ensayos son los que se presentan en Tabla 3.2.



**Tabla 3.2 Valores de las variables contempladas en ensayos exploratorios**

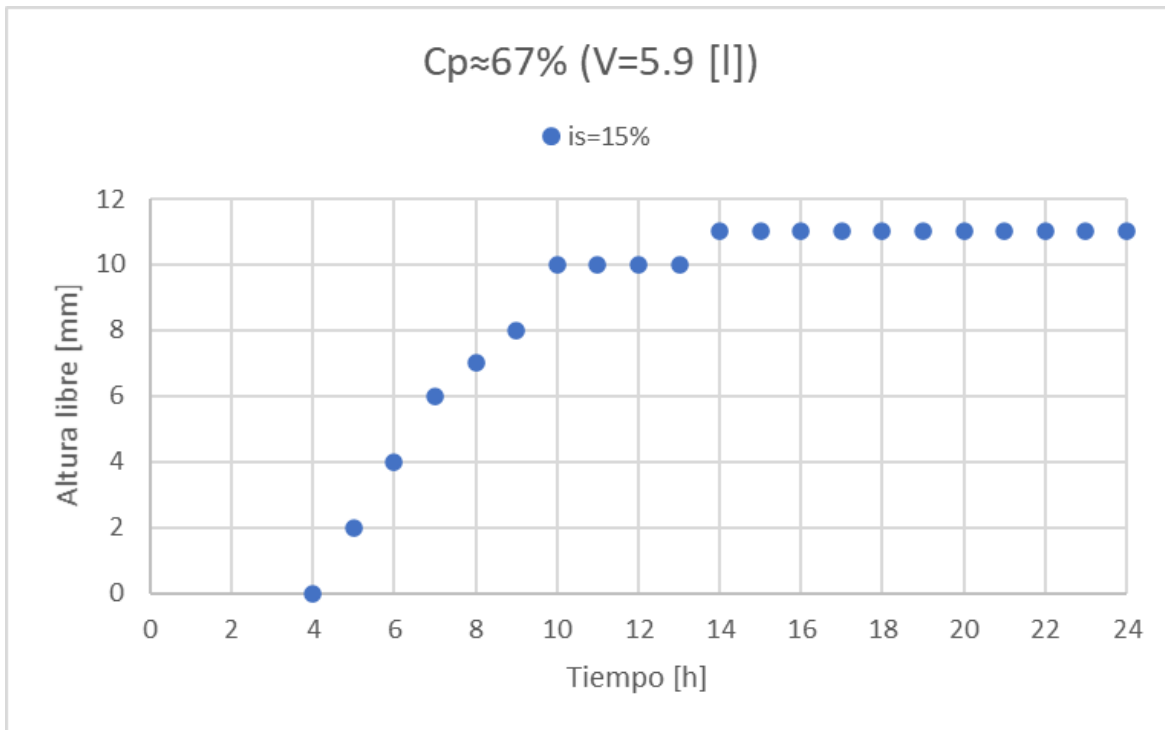
Cp [%]	Pendiente del sistema $i_s$ [%]	Ángulo del sistema $\theta_s$ [°]	Tubo
67	15	8.6	1
55	5	2.9	1
	10	5.7	1
	15	8.6	1
	20	11.5	1
	25	14.5	1
55	5	2.9	2
	10	5.7	2
	15	8.6	2
	20	11.5	2

Para poder medir la altura libre de la interfaz en función del tiempo, como primer acercamiento se utilizó una regla adherida a la cara inferior del tubo, de modo de poder medir la variación de la interfaz en la vista transversal. Por otra parte, se almacenaron imágenes tanto de la vista transversal como de la vista longitudinal cada 15 [min] durante las 24 [h] de ejecución del ensayo, a partir de las cuales se extrajeron dichas mediciones.

Es importante tener en cuenta que la modificación de la concentración de la pulpa se hizo incorporando un volumen de agua calculado para dicho fin, pero no se verificó midiéndolo directamente de la pulpa de concentrado de cobre.

### ***3.3.2 Análisis de resultados primera etapa***

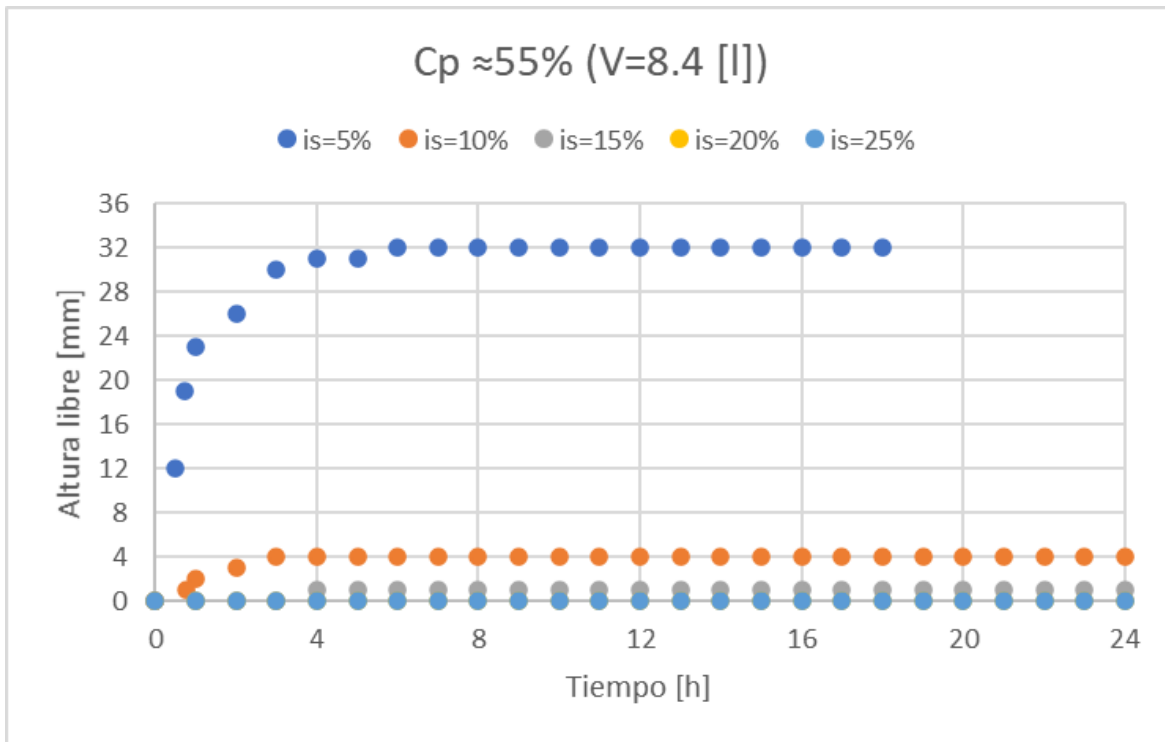
A partir del seguimiento de la interfaz en la vista transversal del tubo 1 durante el primer ensayo, realizado a  $C_p = 67\%$  y  $i_s = 15\%$ , se obtuvieron los resultados presentados en Figura 3.5.



**Figura 3.5** Altura libre en función del tiempo para condiciones de ensayo  $C_p = 67\%$  e  $i_s = 15\%$  en tubo 1

El volumen utilizado en el primer ensayo es menor al requerido por el procedimiento del CI-JRI producto de que era el volumen de muestra caracterizada con el que se contaba.

Los resultados de las mismas mediciones para los ensayos efectuados en el tubo 1 a  $C_p = 55\%$  fueron los mostrados en Figura 3.6.

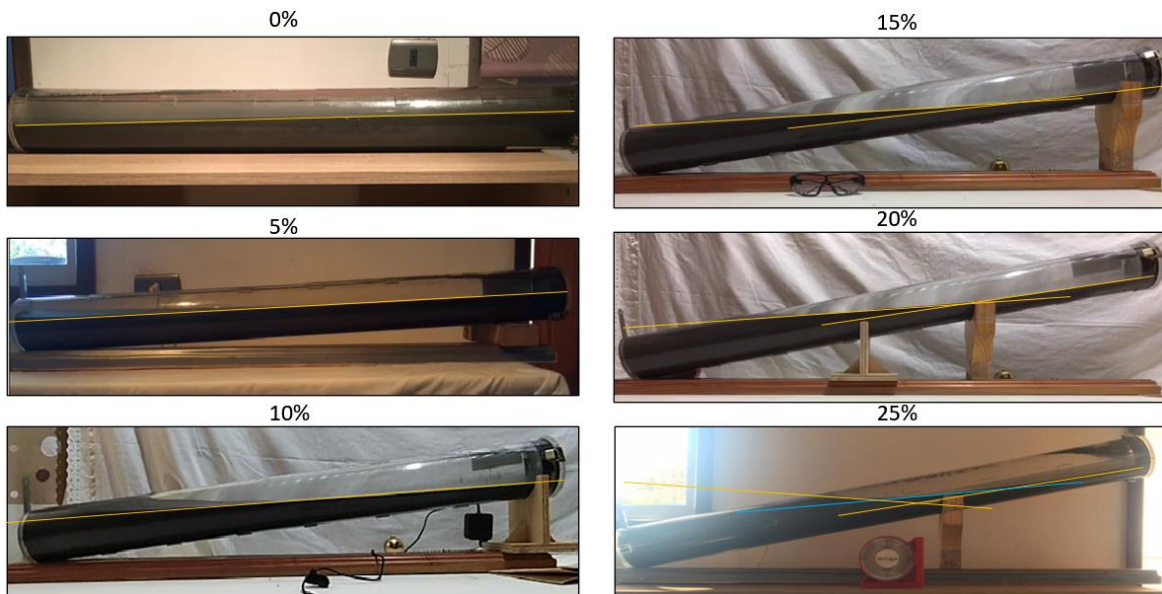


**Figura 3.6** Altura libre en función del tiempo para condiciones de ensayo  $C_p = 55\%$  e  $i_s = \{5\%, 10\%, 15\%, 20\%\}$  en tubo 1

El aumento de volumen, como se mencionó anteriormente, se debe a la incorporación de agua para modificar la concentración de la muestra. A través del análisis de Figura 3.5 y Figura 3.6 y teniendo en cuenta el efecto de las dos variables que se decidió analizar, por una parte, se puede ver que al aumentar la pendiente se tiene menor altura libre y por otra parte que al aumentar la concentración se tiene mayor altura libre, aunque esto último corresponde a la comparación de los ensayos a una sola pendiente del sistema.

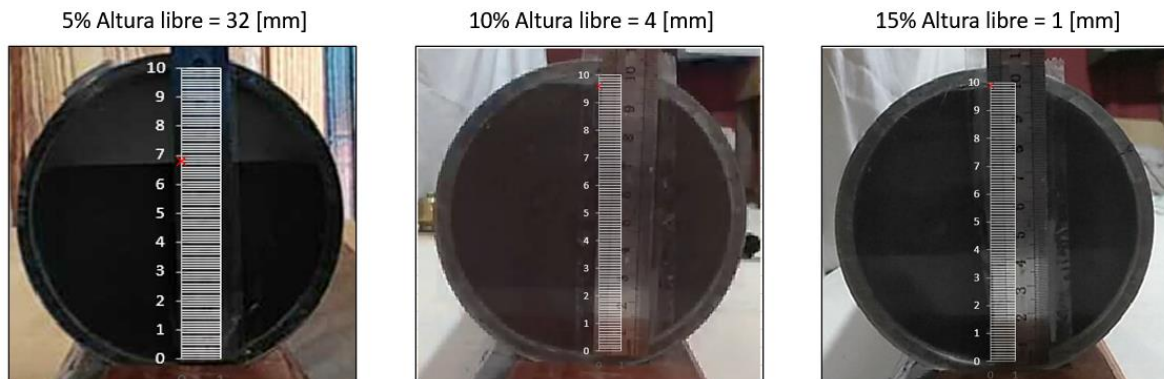
Ahora, respecto del tiempo de ejecución del ensayo se observa que para  $C_p = 67\%$  el tiempo de estabilización de la interfaz fue 14 [h] aproximadamente. En el caso de  $C_p = 55\%$  dicho tiempo se redujo a 6 [h]. Considerando estos resultados, para el rango de concentraciones entre 55% y 67% el tiempo de ejecución del ensayo se podría reducir a 14 [h] en el caso más conservador, teniendo en cuenta que las mediciones pueden tener algún error y que incluso el tiempo de estabilización de la interfaz sólido-líquido podría ser menor.

A partir de las imágenes capturadas con el código descrito anteriormente se puede hacer una comparación cualitativa de la forma adoptada por el lecho de sólidos al final de cada ensayo, tal como se muestra en Figura 3.7:



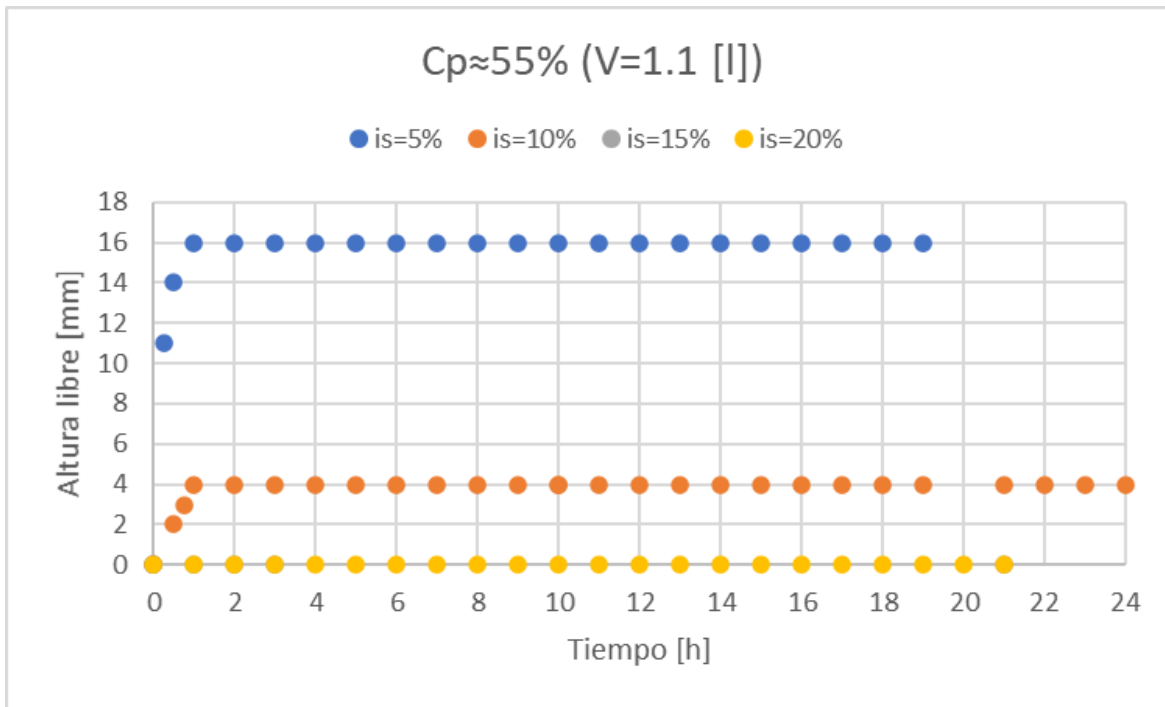
**Figura 3.7** Comparación cualitativa del lecho sedimentado en su vista longitudinal para los ensayos realizados a  $C_p = 55\%$  y  $i_s = [0\%, 5\%, 10\%, 15\%, 20\%]$  en tubo 1

En Figura 3.7 se aprecia que la interfaz puede ser descrita por una sola pendiente para los casos en que la pendiente del sistema corresponde a  $i_s = \{0\%, 5\%, 10\%\}$ , por dos pendientes en los casos de  $i_s = \{15\%, 20\%\}$  y por tres pendientes o una curva que no seguiría una tendencia lineal para  $i_s = 25\%$ . También es posible notar que a medida que la pendiente del sistema aumenta, la pendiente de la interfaz con respecto a la base del tubo también lo hace. Además, se debe tener en cuenta que para las pendientes del sistema mayores o iguales a  $i_s = 15\%$  la cara aguas abajo del tubo resultó prácticamente tapada, como se presenta en Figura 3.8.



**Figura 3.8** Vista de la cara transversal del tubo aguas abajo transcurridas 24 [h] de ensayo para los casos en que  $i_s = \{5\%, 10\%, 15\%\}$  en tubo 1, para pendientes mayores no se registró altura libre

En el tubo 2, se realizaron ensayos solo a  $C_p = 55\%$ , pero con la pendiente del sistema variable  $i_s = \{5\%, 10\%, 15\%, 20\%\}$ . A partir del seguimiento de la interfaz en la vista transversal del tubo 2 se obtuvieron los resultados indicados en Figura 3.9.



**Figura 3.9** Altura libre en función del tiempo para condiciones de ensayo  $C_p = 55\%$  y  $i_s = \{5\%, 10\%, 15\%, 20\%\}$  en tubo 2

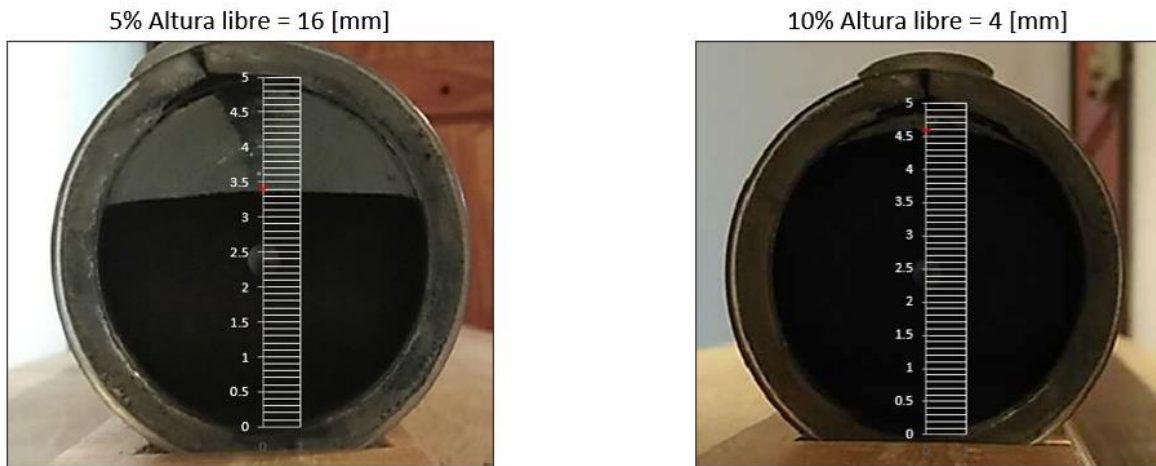
Análogo a lo que ocurrió con el tubo 1, en Figura 3.9 se presenta la misma tendencia para la pendiente del sistema  $i_s$ , al aumentar  $i_s$  se genera menor altura libre en la cara aguas abajo del tubo. También se puede notar que el tiempo de estabilización de la interfaz disminuyó notablemente a aproximadamente 1 [h] en todos los escenarios.

Igual como se presentó para el tubo 1, a continuación, en Figura 3.10, se exponen las imágenes de la interfaz correspondiente al estado final de cada ensayo.



**Figura 3.10** Comparación cualitativa del lecho sedimentado en su vista longitudinal para los ensayos realizados a  $C_p = 55\%$  y  $i_s = [5\%, 10\%, 15\%, 20\%]$  en tubo 2

En Figura 3.10 se aprecia que la interfaz puede ser descrita por una sola pendiente para los casos en que la pendiente del sistema corresponde a  $i_s = \{5\%, 10\%\}$ , mientras que para  $i_s = \{15\%, 20\%\}$  se puede describir por dos pendientes. También es posible notar que a medida que la pendiente del sistema aumenta, la pendiente de la interfaz con respecto a la base del tubo también lo hace. Además, se debe tener en cuenta que para las pendientes del sistema mayores o iguales a  $i_s = 15\%$  la cara aguas abajo del tubo resultó tapada, como se presenta en Figura 3.11



**Figura 3.11** Vista de la cara transversal del tubo aguas abajo transcurridas 24 [h] de ensayo para los casos en que  $i_s = \{5\%, 10\%, \}$  en tubo 2, para pendientes mayores no se registró altura libre

En vista de estos resultados, se decidieron las condiciones de ensayo que serían analizadas en los ensayos formales, correspondientes a las presentadas en Tabla 3.3.



**Tabla 3.3 Condiciones experimentales definidas para ensayos formales**

Variable	Valores
Concentración en peso ( $C_p$ ) [%]	{55%, 60%, 65%}
Pendiente del sistema ( $i_s$ ) [%]	{5%, 10%, 15%, 20%}

Producto de que es necesario describir la interfaz de manera cuantitativa se investigó la manera de realizar mediciones a partir de las imágenes almacenadas con el código de MATLAB mencionado anteriormente. Se trabajó en el desarrollo de este sistema durante la segunda etapa de los ensayos exploratorios paralelo a la implementación de un sistema de extracción de muestras en la cara aguas abajo del tubo, con el objetivo de poder caracterizar de alguna forma las partículas que se transportan hacia esta zona.

Finalmente, se decidió trabajar con el tubo 1 dado que su diámetro es más cercano a los diámetros comúnmente encontrados en concentraductos. Por otra parte, el tiempo de ejecución de los ensayos, a partir de lo visto en esta primera etapa de los ensayos exploratorios y para trabajar de manera más eficiente se redujo a 15 [h].

### **3.3.3 Segunda etapa**

En primer lugar, se debe mencionar que durante este proceso también se trabajó en la caracterización de la muestra completa, compuesta por los 2 concentrados remanentes de concentrado de cobre entregados inicialmente por el CI-JRI. Por lo tanto, a partir de esta etapa se comienza a trabajar con la muestra completa de pulpa de concentrado de cobre.

El trabajo experimental de esta etapa, tal como se mencionó con anterioridad, consistió en la construcción de un sistema de extracción de muestras en la cara aguas abajo del tubo 1.

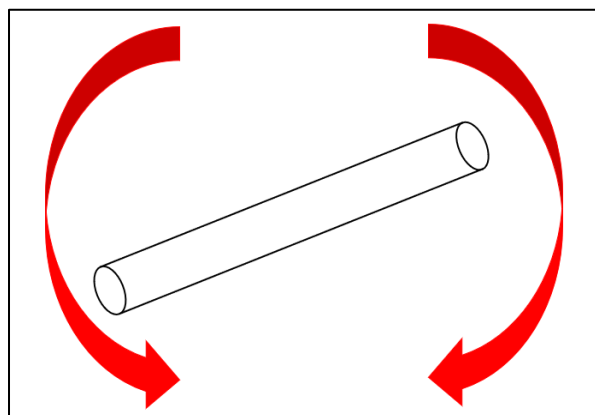
Producto de que ya se contaba con la instrumentación y equipamiento necesario, se pudo realizar la preparación de muestras de forma adecuada. Este procedimiento consiste a grandes rasgos en medir la concentración en peso de la muestra de cabeza (muestra completa), luego calcular la masa de agua y de pulpa requerida para lograr la concentración en peso deseada y mezclar ambas partes. Es importante destacar que, dadas las características de la pulpa, el proceso de mezcla y homogenización de la pulpa es fundamental. Para medir la concentración en peso de la pulpa se utilizó el método de peso seco, que consiste en obtener una porción representativa de la muestra (para  $C_p$  y densidad) y pesarlo antes y después de ser secado en una estufa. A partir de la diferencia de pesos se calcula la concentración en peso de la muestra, además, por picnometría se determina la densidad de los sólidos de esta. Es importante agregar que, para la caracterización reológica, se utiliza el método cilindro y copa y se mide en el reómetro Haake RS6000 de CIMS. Un ejemplo de este procedimiento, utilizado para calcular la concentración en peso de la muestra de cabeza empleada para preparar la pulpa utilizada en la primera prueba de esta segunda etapa se presenta en Tabla 3.4, en la cual  $CV$  representa el coeficiente de variación del  $C_p$  medido en ambas muestras.

**Tabla 3.4 Concentración de sólidos de la muestra de cabeza utilizada para la primera prueba del sistema de extracción de muestras implementado**

Muestra	Vidrio Reloj Vacío [g]	Vidrio Reloj con Muestra [g]	Vidrio reloj con Muestra Seca [g]	Muestra [g]	Muestra Seca [g]	$C_p$ [%]	$C_p$ Promedio [%]	CV [%]
$C_p$ muestra de cabeza original	54.09	99.66	89.06	45.57	34.97	76.74	76.79	0.1
$C_p$ muestra de cabeza duplicado	61.46	114.68	102.36	53.22	40.90	76.85		

Para controlar la alteración de la muestra producto de la extracción de muestras, se decidió realizar mediciones de concentración en peso de la muestra preparada antes de cargar el tubo y posterior a la descarga del tubo luego de la ejecución de 4 ensayos consecutivos (misma concentración nominal), dado que entre un ensayo y otro a una misma concentración solo se agitaba el tubo y se posicionaba en el nuevo ángulo del sistema.

Otro aspecto del procedimiento que fue modificado en esta etapa, fue el método de agitación de la pulpa, dado que la persona que realiza comúnmente este ensayo según el método definido por el CIMS JRI estaba capacitada para manipular y agitar el tubo solo. El método de agitación empleado en esta etapa y posteriores se esquematiza en Figura 3.12.



**Figura 3.12 Vista en elevación del método de agitación utilizado en el CIMS JRI y aplicado a la segunda etapa de ensayos exploratorios y ensayos formales**

Como primer acercamiento se fabricó una nueva tapa, que contaba con tres perforaciones distribuidas equiespaciadas en el diámetro del tubo, es decir, a 2.5 [cm] (Punto 3), 5.0 [cm] (Punto 2) y 7.5 [cm] (Punto 1) desde su base. Estas perforaciones se bloquearon con tapas plásticas, como se muestra en

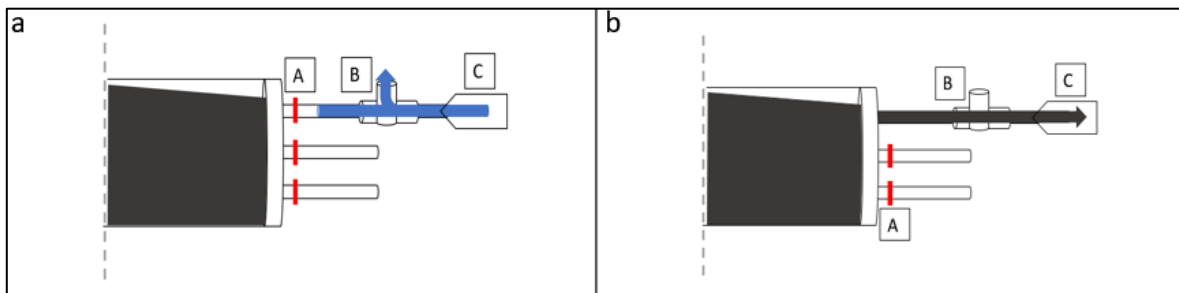
Figura 3.13, y se ejecutó un ensayo para poder evaluar su funcionamiento. Las condiciones experimentales de este ensayo fueron  $C_p = 65\%$  y  $i_s = 15\%$ .



**Figura 3.13 Primera prueba del sistema de extracción de muestras implementado en tubo 1. Los orificios se encuentran enumerados de arriba hacia abajo como 1, 2 y 3.**

Luego de transcurridas las 15 [h] de ensayo se sacó la tapa número 1 para chequear la facilidad de extraer muestra, o si era necesario sacar pulpa con alguna herramienta. Se observó que la pulpa no salió por sí sola, notándose mucho ingreso de aire al sistema. Esto último generó burbujas de gran tamaño al interior del tubo que viajaron desde aguas abajo hacia aguas arriba, removiendo partículas sólidas de la capa superficial del lecho de sólidos y alterando la composición de la muestra. Esto incluso provocó que se perdiera la visualización de la interfaz sólido-líquido.

Para evitar el ingreso de aire, se ideó una modificación al sistema de extracción de muestras consistente en la instalación de mangueras en los tres orificios existentes en la tapa. Durante la ejecución del ensayo (desde la agitación) estas mangueras se encuentran bloqueadas por fuera de la tapa mediante pinzas, y al finalizar el ensayo a cada manguera se le conecta una pieza T de salida bilateral que se opera de dos formas, a) y b) secuencialmente, como se esquematiza en Figura 3.14. Esta operación compuesta por a) y b) se realizó análoga y también secuencial para los orificios 1, 2 y 3, respectivamente.



**Figura 3.14 Esquematización de la operación del sistema de extracción de muestras. a) ingreso de agua y b) extracción de muestra de pulpa. A) pinza cerrada, B) pieza T, C) jeringa**

Este sistema se probó a las tres concentraciones consideradas en la experimentación con  $i_s = 15\%$ , generalmente entregando buenos resultados, a excepción del caso  $C_p = 55\%$  donde ocurrió que los orificios se encontraban tapados y fue necesario remover manualmente el material del orificio para posteriormente succionar muestra con la jeringa. A pesar de lo descrito, se consideró que el sistema era apropiado. En Figura 3.15 se muestra el sistema de extracción de muestras operativo.

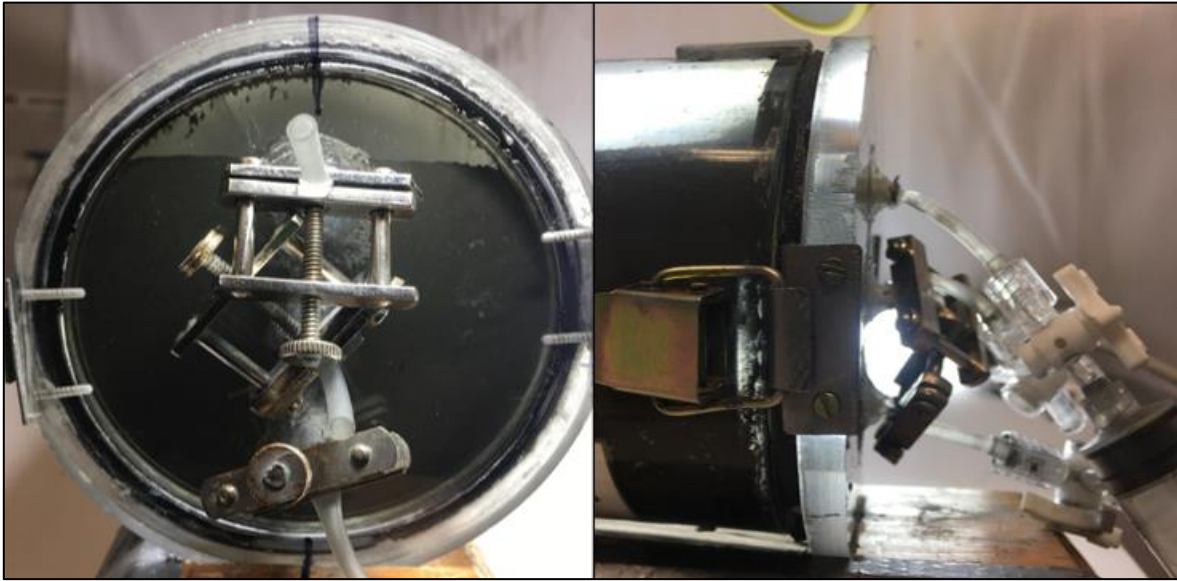


Figura 3.15 Sistema de extracción de muestras definitivo

### 3.4. Definición métodos de medición

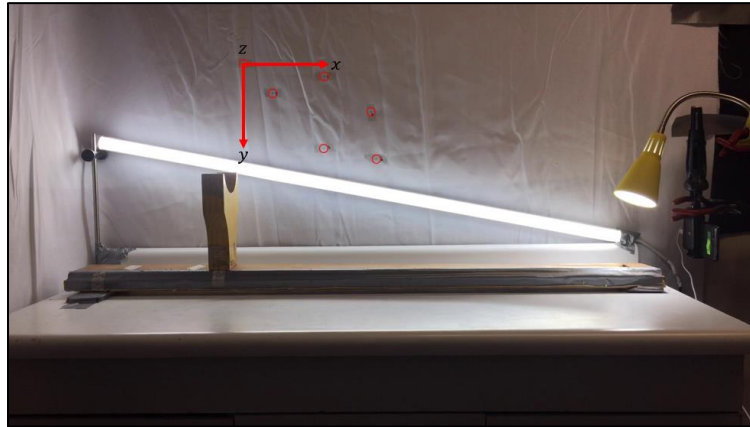
Con el objetivo de obtener mediciones reales de la interfaz sólido-líquido dentro del tubo de ensayo a través de las imágenes capturadas, se utilizó el *Camera Calibration Toolbox for Matlab* (Bouguet, 2013) basado en el modelo de Zhang (Zhang, 2000) que consiste en utilizar una cámara para observar un patrón plano mostrado en diferentes orientaciones. El patrón disponible en este caso fue un tablero de ajedrez que se adhirió a una superficie plana. Mediante la utilización de este *Toolbox*, que relaciona coordenadas reales con coordenadas de imágenes, es posible obtener los parámetros intrínsecos de la cámara, correspondientes a:

- Longitud focal
- Punto principal
- Coeficiente de desviación
- Distorsión

Y los parámetros extrínsecos de la cámara que son una matriz de rotación y un vector de traslación.

La ejecución de este procedimiento se describe a través de los siguientes pasos, complementados con los resultados de la calibración y rectificación del primer ensayo formal como ejemplo:

1. Elección de puntos de referencia para utilizar en el proceso de calibración y rectificación de la cámara. Con la ayuda de una regla se obtienen las coordenadas de los puntos de referencia referidos a un sistema coordenado. Como el tubo posee curvatura se decidió utilizar la pared del fondo para ubicar los puntos de referencia presentados en Figura 3.16. Se debe tener en cuenta que luego del proceso de calibración y rectificación fue necesario rotar y trasladar estos ejes coordenados para que coincidieran con la base del tubo. En
2. Tabla 3.5 se presentan las coordenadas de los puntos de referencia.

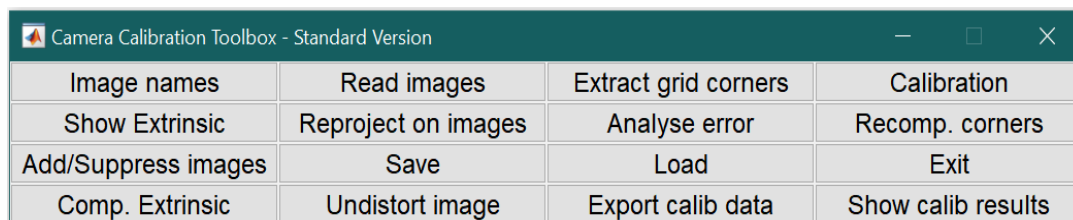


**Figura 3.16** Puntos de referencia y sistema coordenado real utilizados para la calibración y rectificación de la cámara en el primer ensayo formal

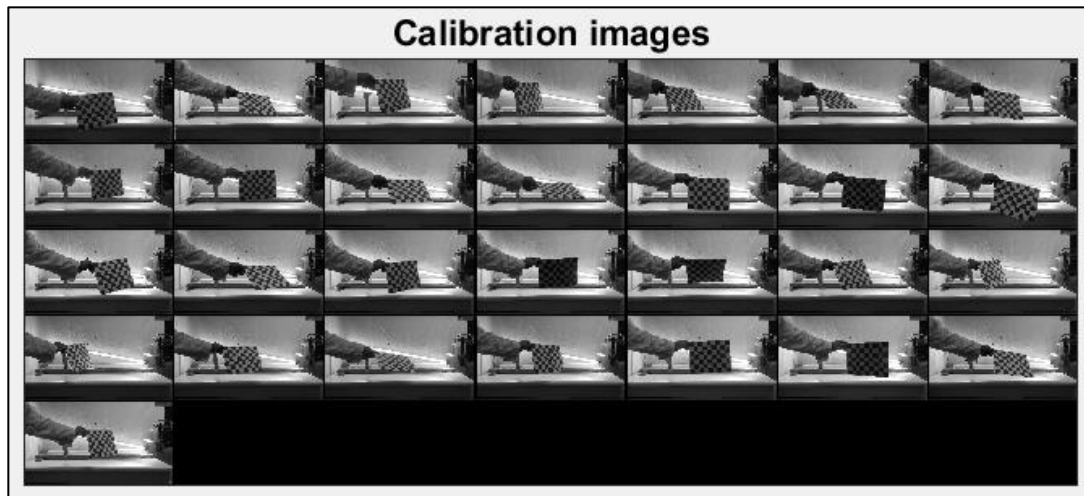
**Tabla 3.5** Coordenadas de los puntos de referencia utilizados en todos los ensayos formales

Punto	x [cm]	y [cm]	z [cm]
1	0	0	0
2	182	38	0
3	64	69	0
4	286	117	0
5	174	194	0
6	291	211	0

3. Luego, se toman fotos del patrón plano seleccionado, en este caso un tablero de ajedrez disponible para impresión (Bouquet, 2013), en distintas posiciones. Se capturan alrededor de 25 imágenes. En Figura 3.17 se muestra la ventana principal del *Toolbox* y en Figura 3.18 la serie de imágenes empleada en la calibración.



**Figura 3.17** Cuadro de diálogo principal *Camera Calibration Toolbox*



**Figura 3.18 Imágenes del tablero utilizadas para la calibración**

4. A través del análisis de las imágenes en el *Toolbox* se realiza el proceso de calibración, donde a grandes rasgos, se ingresan la cantidad de cuadros por cuadrícula y la dimensión de cada cuadro, además de indicar que puntos corresponden a las esquinas del tablero en cada imagen. Este proceso genera automáticamente los parámetros intrínsecos de la cámara que se requieren para el proceso de rectificación. A continuación, en Figura 3.19 se expone un ejemplo de los parámetros intrínsecos de la cámara generados con el *Toolbox* y en Figura 3.20 los parámetros extrínsecos de la cámara.

```

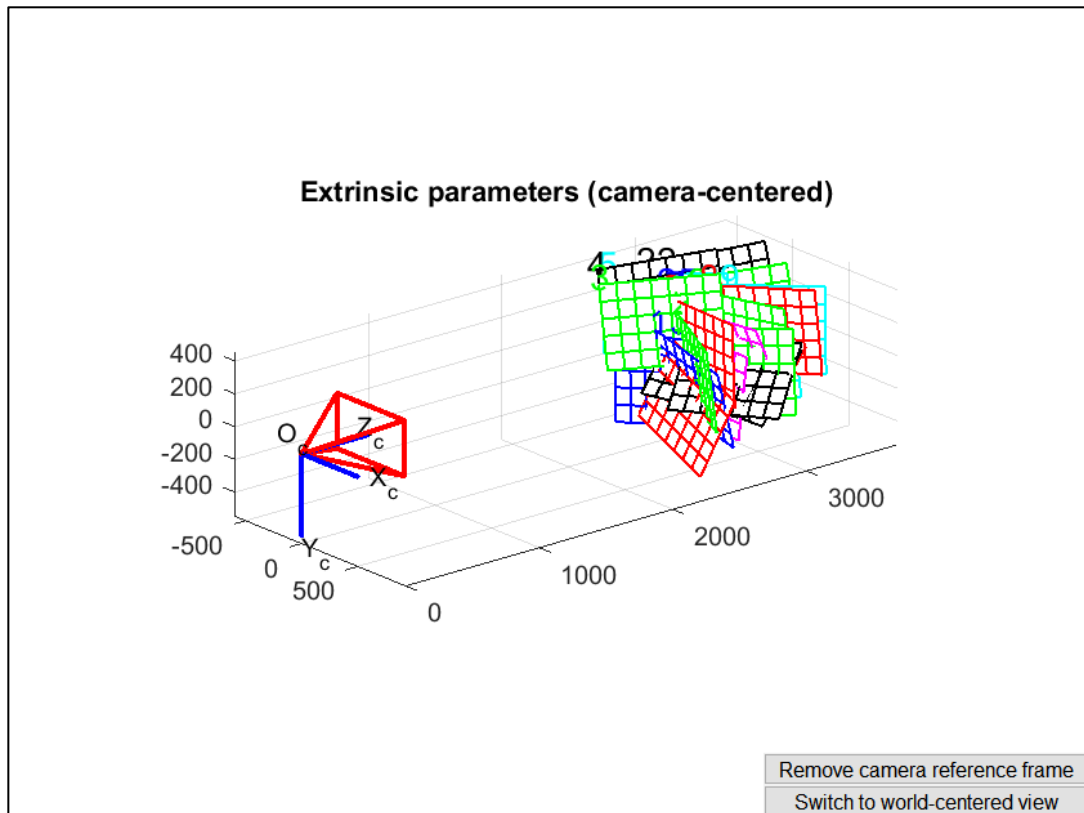
Calibration results (with uncertainties):

Focal Length:      fc = [ 1593.52289  1592.12150 ] ± [ 9.89924  9.55031 ]
Principal point:   cc = [ 894.61009  560.58718 ] ± [ 15.91615  9.57953 ]
Skew:              alpha_c = [ 0.00000 ] ± [ 0.00000 ] => angle of pixel axes = 90.00000 ± 0.00000 degrees
Distortion:        kc = [ 0.00708  0.12391  0.00847  -0.01686  0.00000 ] ± [ 0.02391  0.17802  0.00209
Pixel error:       err = [ 0.26610  0.25900 ]

Note: The numerical errors are approximately three times the standard deviations (for reference).

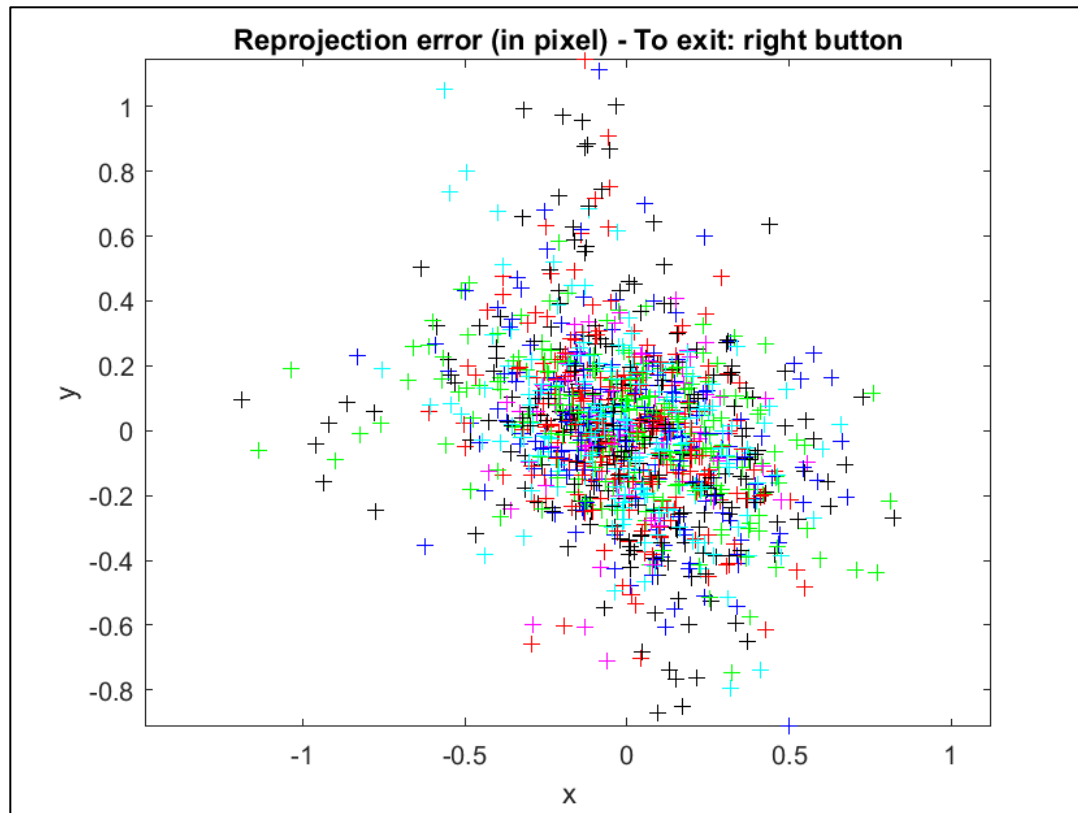
```

**Figura 3.19 Parámetros intrínsecos de la cámara generados por MATLAB**



**Figura 3.20** Parámetros extrínsecos de la cámara generados por MATLAB, junto con la proyección espacial de las mediciones realizadas con el tablero de ajedrez

5. Se minimizan los errores generados a través de algunas iteraciones en el programa. En Figura 3.21 se muestra el error existente en el proceso de calibración.

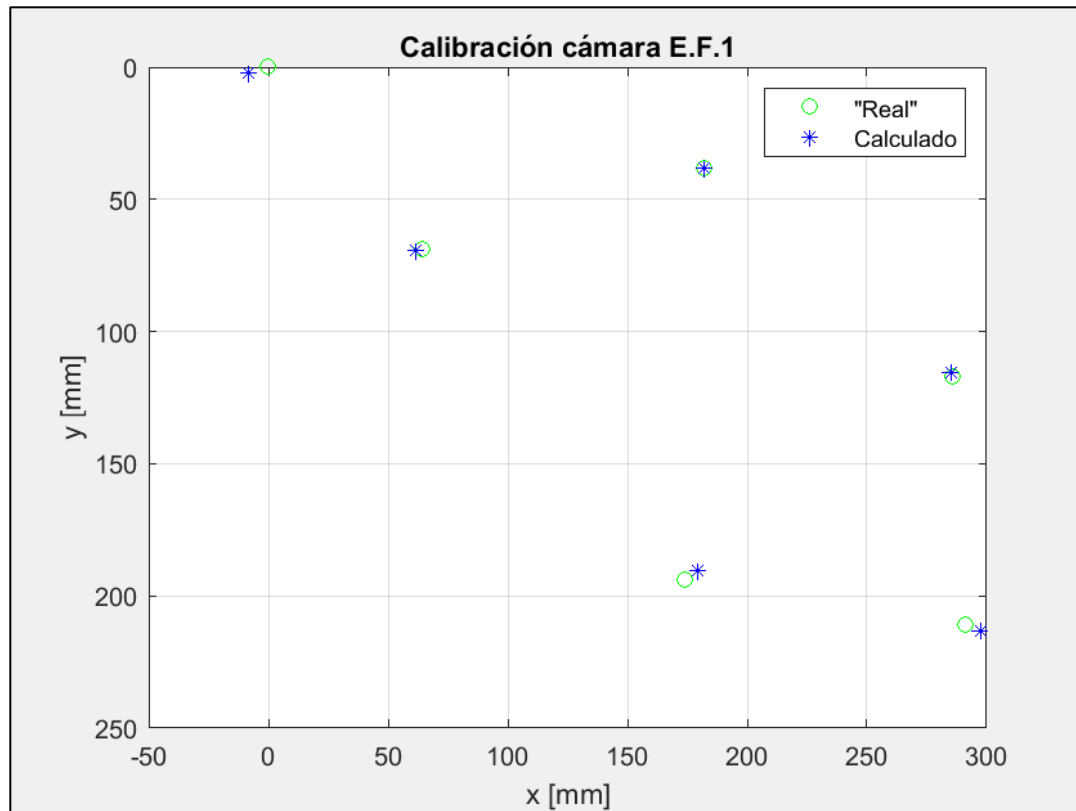


**Figura 3.21 Error en las proyecciones asociadas al proceso de calibración**

6. Se realiza la rectificación de puntos, que consiste en transformar las coordenadas de puntos extraídos de una imagen a coordenadas con respecto a la cámara y luego a coordenadas reales. Para poder realizar este procedimiento se requieren las coordenadas de pixel (sistema de referencia de la imagen) de los puntos mostrados en Figura 3.16, para ello se emplea la aplicación de visualización de imágenes de MATLAB *imtool*. En Tabla 3.6 se muestran las coordenadas en pixeles de los puntos de referencia. Por último, el programa genera un gráfico donde se comparan las coordenadas reales de los puntos de referencia (medidas con regla) con las coordenadas calculadas a partir del proceso de calibración y rectificación, este gráfico se presenta en Figura 3.22

**Tabla 3.6 Coordenadas de los puntos de referencia en pixeles utilizados para el primer ensayo formal**

Punto	x [pix]	y [pix]
1	603	155
2	810	187
3	678	230
4	929	277
5	808	370
6	943	397



**Figura 3.22 Comparación entre coordenadas reales o medidas y calculadas**

Es importante aclarar que hay puntos donde el error se visualiza claramente, sin embargo, se consideró que era aceptable, puesto que el método de medición de las coordenadas reales no posee gran precisión, como, por ejemplo, un teodolito o una estación total. En este caso, la mayor distancia entre un punto medido y calculado corresponde a 8.7 [mm].

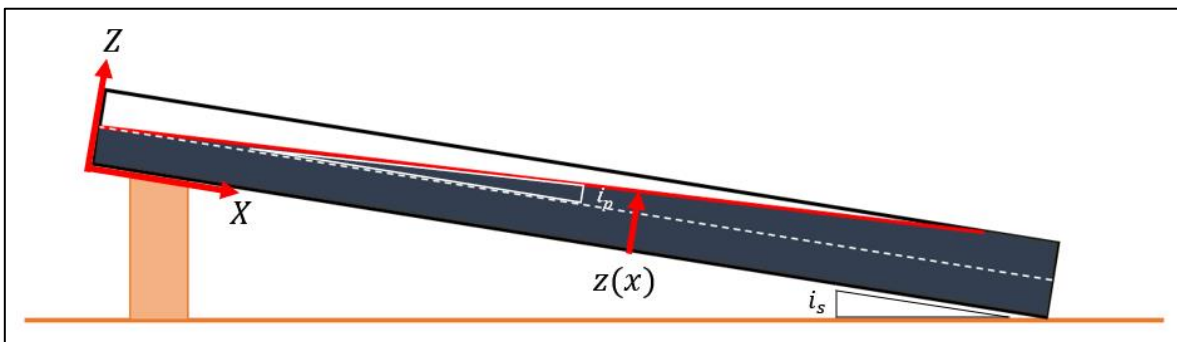
Este mismo cálculo se realizó para los 12 ensayos formales, donde se encontró que el máximo valor fue de 13.9 [mm] (E.F.4). Sin embargo, el promedio fue de 7.4 [mm]. Para las observaciones a realizar, ya que el fenómeno de migración es pausado, la observación de la tendencia de la superficie es más importante que mediciones precisas puntuales.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que los puntos en coordenadas de imagen que fueron ingresados al programa se extrajeron manualmente de las imágenes de la vista longitudinal almacenadas en cada ensayo empleando el comando *ginput*. En total se extrajeron 22 puntos de cada imagen, seleccionando las imágenes cada media hora a partir de 1 [h] de ensayo transcurrido, dado que antes de ese tiempo no se podía distinguir claramente la ubicación de la interfaz. 12 puntos correspondían a la interfaz, 5 puntos de la pared superior del tubo y 5 puntos a la pared inferior. En Figura 3.23 se esquematiza la extracción manual de puntos. Cabe mencionar que los puntos seleccionados en las paredes del tubo solo se extraen de la primera imagen almacenada, ya que se mantienen fijas durante toda la ejecución de los ensayos.



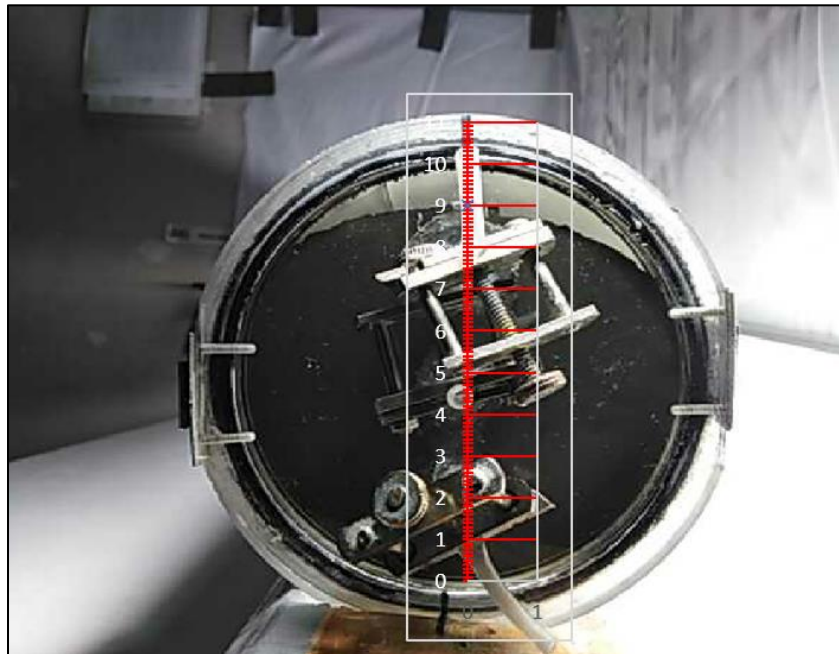
**Figura 3.23** Ejemplo de la cantidad y ubicación de los puntos extraídos manualmente en cada imagen de cada ensayo. En rojo los puntos correspondientes a la interfaz y en azul a las paredes del tubo

Luego de tener los puntos indicados en Figura 3.23 en coordenadas reales respecto del sistema real indicado en Figura 3.16 fue necesario rotar y trasladar estos ejes para que fuera más cómoda su lectura e interpretación. La posición de los nuevos ejes se indica en Figura 3.24.



**Figura 3.24** Ubicación de los nuevos ejes definidos para el análisis de resultados de los ensayos formales

Fue factible utilizar este método de medición solo para la vista longitudinal del tubo, debido a que en la vista transversal no se contaba con el espacio necesario entre la cámara y algún plano vertical como para poder obtener las imágenes requeridas del tablero y realizar una correcta medición de los puntos de referencia. En consecuencia, se utilizaron las herramientas gráficas de Excel para poder medir la altura libre en el tubo desde la vista transversal, tal como se expone en Figura 3.25.



**Figura 3.25 Ejemplo de la medición de altura libre en la vista transversal del tubo de ensayo**

A modo de resumen se puede indicar que en todos los ensayos formales se realizaron mediciones de la interfaz sólido-líquido a partir de las imágenes almacenadas de la vista longitudinal del tubo utilizando el *Camera Calibration Toolbox for Matlab* y de la vista transversal utilizando Excel. Se debe tener en cuenta que el proceso de calibración y rectificación se podría haber realizado solo una vez al comienzo de todos los ensayos, siempre que la cámara se mantuviera en una posición fija durante toda la ejecución de los ensayos formales. Pero como todo el proceso experimental, incluyendo la preparación de muestras, carga y descarga del tubo y extracción de muestras se realizó en una misma sala, se consideró apropiado realizar la calibración y rectificación de la cámara para cada ensayo, manteniendo los mismos puntos de referencia, pero tomando nuevas imágenes del tablero para calcular tanto los parámetros extrínsecos como intrínsecos de la cámara y realizar la rectificación de puntos.

### **3.5. Caracterización muestra completa**

Paralelo a la segunda etapa de los ensayos exploratorios, desarrollada en las instalaciones del CIMS JRI. Dado que ya se contaba con la instrumentación necesaria, se mezclaron las dos muestras remanentes de concentrado de cobre facilitadas por el CIMS JRI en un principio generando así una nueva muestra homogénea a la que se le efectuó la caracterización completa, tanto de su fase dispersa como de la pulpa propiamente tal.



### 3.5.1 Densidad de sólidos

Esta propiedad de los sólidos se obtuvo utilizando el método del picnómetro. Los resultados son los que se muestran en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7 Resultados densidad de sólidos en original y duplicado**

	<b>Original</b>	<b>Duplicado</b>	<b>Triplicado</b>
<b>Densidad del sólido [<math>g/cm^3</math>]</b>	3.99	3.99	N/A
<b>Resultado final [<math>g/cm^3</math>]</b>	3.99±0.17		
<b>Coefficiente de Variación (CV)</b>	0.1%		

### 3.5.2 Granulometría

Como se mencionó en la revisión bibliográfica, para concentrado de cobre el método de medición granulométrica más adecuado es la granulometría láser, los resultados de esta prueba se exponen a continuación en Tabla 3.8 y Figura 3.26.

**Tabla 3.8 Resultados diámetros característicos muestra completa en original y duplicado**

	<b>Original</b>	<b>Duplicado</b>	<b>Promedio</b>	<b>Coefficiente de Variación (CV)</b>
<b>D10 [<math>\mu m</math>]</b>	3.83	3.65	3.74	2.41
<b>D50 [<math>\mu m</math>]</b>	27.23	23.43	25.33	7.50
<b>D80 [<math>\mu m</math>]</b>	72.78	59.38	66.08	10.14

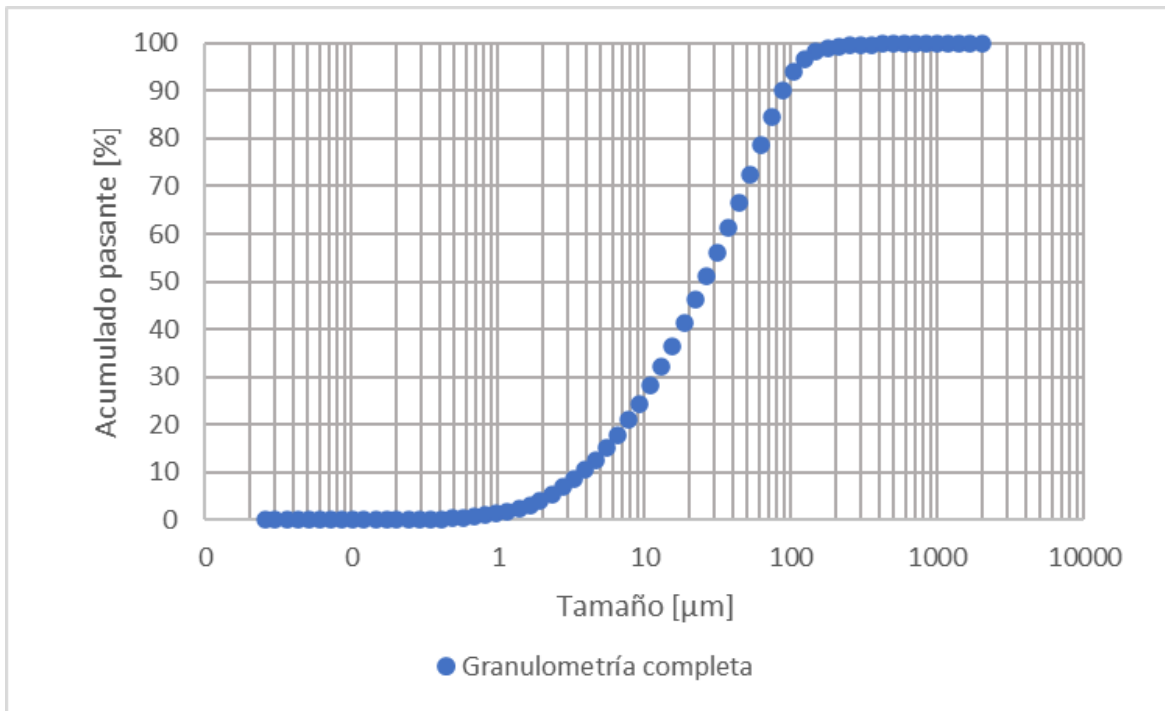


Figura 3.26 Curva granulométrica promedio de original y duplicado de la muestra completa

### 3.5.3 Reología

La tensión de fluencia y viscosidad de la pulpa se obtuvo empleando un Reómetro modelo Haake RheoStress RS600, los valores de estas propiedades y mediciones asociadas se incluyen en Tabla 3.9, Figura 3.27 y Figura 3.28.

Tabla 3.9 Parámetros reológicos de la muestra obtenidos a partir de original y duplicado empleando modelo Bingham

$C_p$ real [%]	Temperatura [°C]	pH	Tensión de fluencia Bingham $\tau_f$ [Pa]	Viscosidad Bingham $\mu$ [mPa-s]
50.2	20.1	7.8	$0.3 \pm 0.01$	$4 \pm 0$
55.2	20.6	7.8	$0.7 \pm 0.02$	$3.9 \pm 0$
60.2	20.9	7.7	$1.2 \pm 0.0$	$4.3 \pm 0$
65.3	20.8	7.7	$1.9 \pm 0.1$	$8 \pm 1$
70.3	20.9	7.7	$4.3 \pm 0.1$	$14.1 \pm 0$

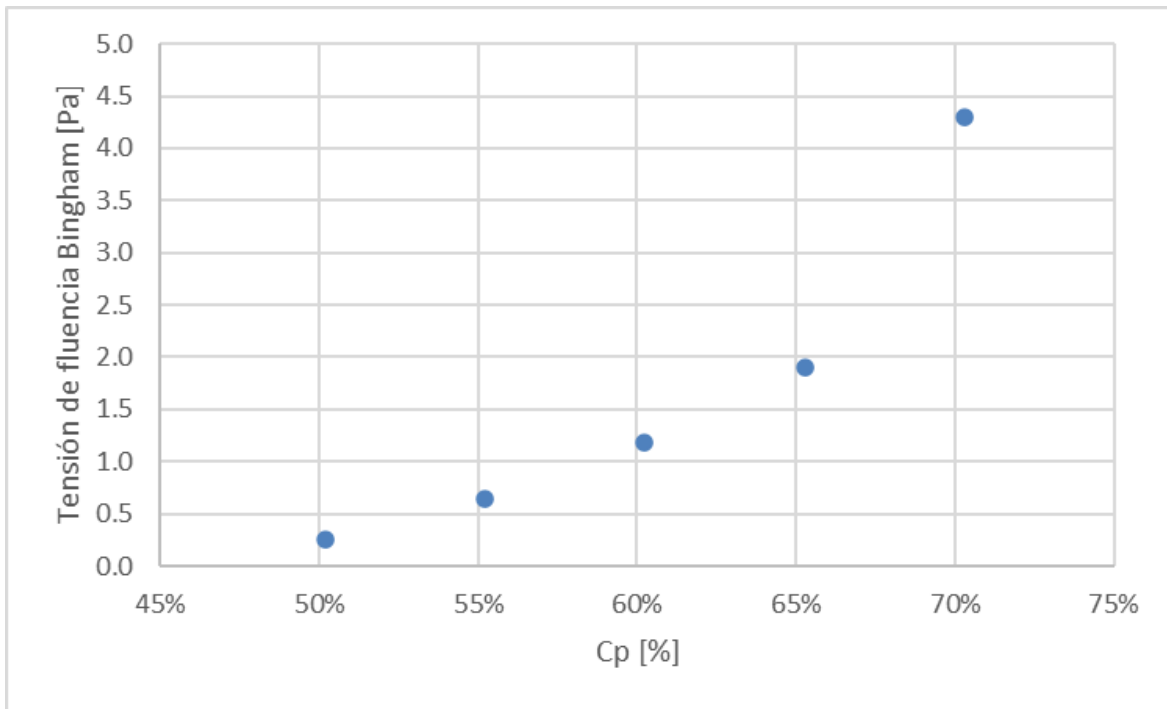


Figura 3.27 Tensión de fluencia Bingham  $\tau_f$  de la muestra para diferentes concentraciones en peso

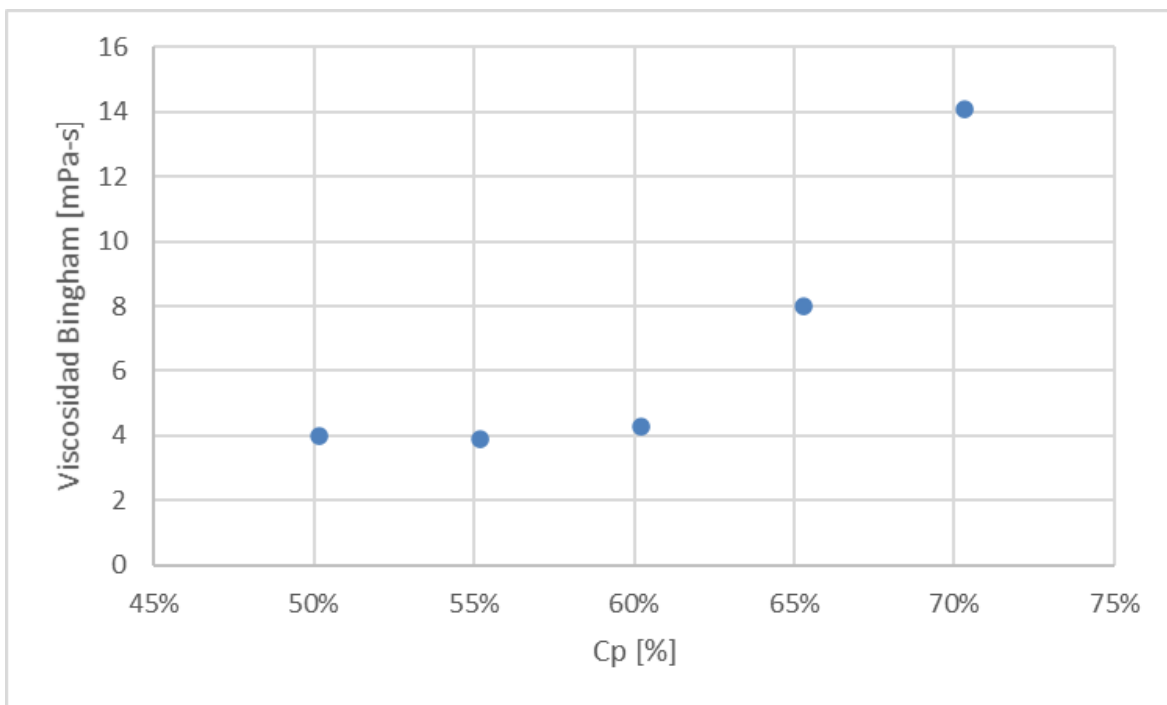


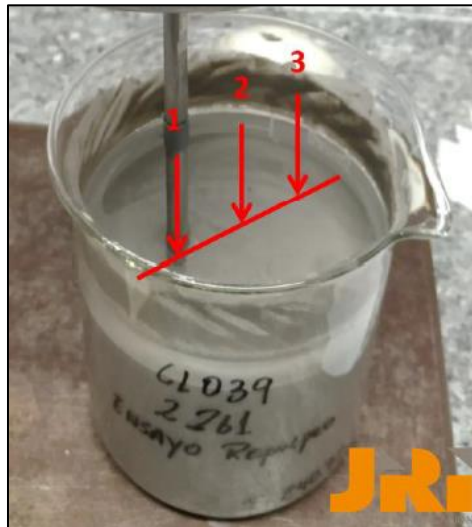
Figura 3.28 Viscosidad Bingham  $\mu$  de la muestra para diferentes concentraciones en peso

### 3.5.4 Penetrometría

Producto de lo señalado en el capítulo de Revisión bibliográfica de este documento, se optó por realizar esta prueba para definir si la pulpa se considera repulpeable o refluidizable (Bragança & Silva, 2007), sin embargo, es necesario aclarar que este ensayo se efectuó según el procedimiento con que cuenta el CIMS JRI. La prueba consiste, a grandes rasgos, en medir la masa necesaria para penetrar completamente el estrato de sólidos formado luego de que ocurra sedimentación durante diferentes períodos de tiempo. Para ello se emplea una balanza y un vaso de precipitado de 1 [l] con 800 [ml] de pulpa en su interior. En Figura 3.29 se muestra el penetrómetro empleado y en Figura 3.30 se indican los puntos de cada vaso donde se efectúan las mediciones.

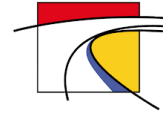


**Figura 3.29 Penetrómetro (Centro de Investigación JRI S. A., 2020)**



**Figura 3.30 Puntos de medición en vaso de precipitado para penetrometría (Centro de Investigación JRI S. A., 2020)**

Los resultados de esta prueba se exponen en Tabla 3.10



**Tabla 3.10 Resultados prueba de penetrometría para diferentes tiempos de reposo y concentraciones de la muestra**

$C_p$ real [%]	Tiempo de reposo [h]	Masa total zona 1 [g]	Masa total zona 2 [g]	Masa total zona 3 [g]	Masa promedio [g]
66	2	10	13	12	12
	4	24	20	15	20
	17	31	34	-	33
	24	43	30	30	34
59	1	17	23	12	17
	2	15	18	34	22
	4	15	44	44	34
	16	27	27	44	33
	24	30	30	32	35
55	1	10	19	10	13
	2	10	19	34	21
	4	34	15	24	24
	17	32	25	24	27
	24	20	23	29	24

Como en ninguno de los casos la masa supera 50 [g], la pulpa se considera refluidizable.



## 4. Ensayos formales

### 4.1. Descripción

Como se ha indicado anteriormente, la ejecución de los ensayos formales fue en las instalaciones del CIMS JRI donde se contaba con todas las condiciones óptimas para el desarrollo de esta etapa.

Se debe tener en cuenta que, como una de las cámaras estaba conectada mediante conexión wifi al notebook, en ocasiones ocurría que durante la ejecución de algún ensayo se desconectaba y durante ciertos periodos de tiempo no se podían almacenar datos. Dependiendo del momento en que esto ocurriera se evaluó si es que era necesario o no repetir ciertos ensayos.

Producto de la cantidad de ensayos formales realizados se hace necesario presentar la nomenclatura de Tabla 4.1 para cada condición explorada.

**Tabla 4.1 Denominación ensayos formales con las condiciones del sistema y la pulpa exploradas**

Denominación ensayo	$C_p$ nominal [%]	Pendiente del sistema $t_s$ [%]
<b>E.F.1</b>	65	20
<b>E.F.2</b>	65	15
<b>E.F.3</b>	65	10
<b>E.F.4</b>	65	5
<b>E.F.5</b>	60	20
<b>E.F.6</b>	60	15
<b>E.F.7</b>	60	10
<b>E.F.8</b>	60	5
<b>E.F.9</b>	55	20
<b>E.F.10</b>	55	15
<b>E.F.11</b>	55	10
<b>E.F.12</b>	55	5

A modo de resumen, el procedimiento de ensayo fue el siguiente:

1. Medición de puntos de referencia en coordenadas reales (aplica para E.F.1)
2. Preparación de muestra de pulpa a  $C_p$  nominal requerido (aplica para E.F.1, E.F.5 y E.F.9)
3. Medición de  $C_p$  real de la muestra preparada (aplica para E.F.1, E.F.5 y E.F.9)
4. Conexión a electricidad de iluminación, celulares, notebook y *wifi* móvil
5. Ajuste de maqueta de ensayo y tubo de iluminación LED en ángulo requerido
6. Posicionamiento de lámpara en vista transversal para poder detectar interfaz
7. Conexión mediante aplicaciones DroidCam e iVCam de los celulares al notebook
8. Captura de imágenes del patrón plano utilizado para calibración y rectificación de la cámara dispuesta para capturar la vista longitudinal del ensayo
9. Carga de la muestra de pulpa preparada en el tubo de ensayo



10. Homogenización de la muestra en el tubo de ensayo a través del método de agitación indicado en Figura 3.12
11. Posicionamiento del tubo de ensayo en la maqueta
12. Ejecución del código de captura y almacenamiento de imágenes durante 15 [h]
13. Extracción de muestras desde la cara transversal aguas abajo del tubo para análisis granulométrico
14. Descarga del tubo y medición de  $C_p$  (aplica para E.F.4, E.F.8 y E.F.12)

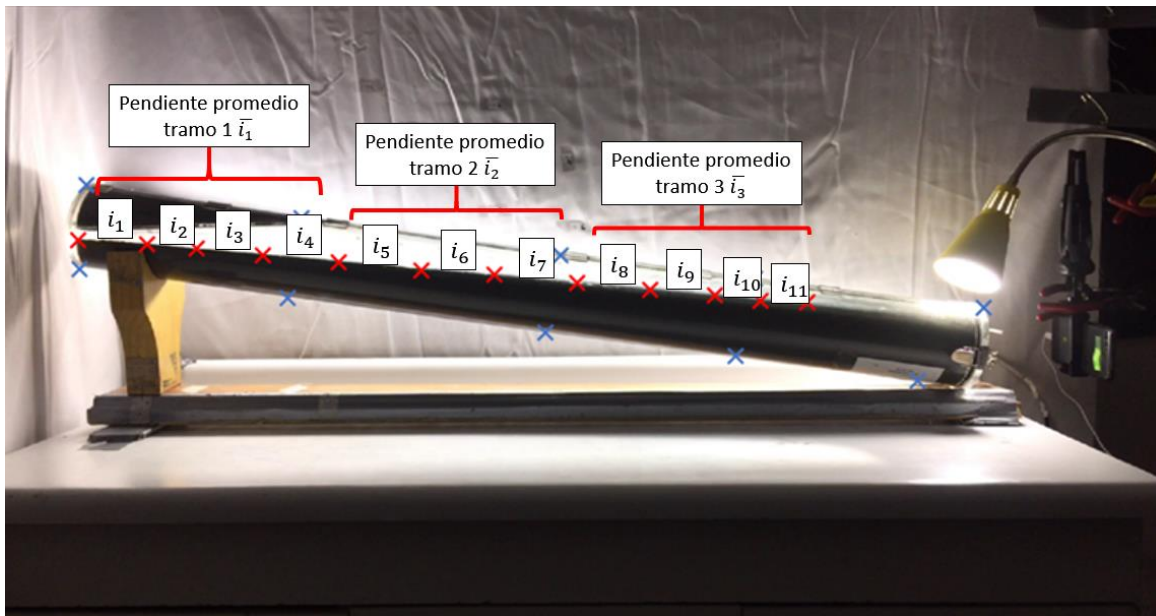
En primer lugar, se debe tener en cuenta que, se presentarán los resultados asociados a las mediciones de la interfaz sólido-líquido tanto de la vista transversal como de la vista longitudinal de cada ensayo, agrupados por concentración de sólidos. Para ambas vistas se capturaron y almacenaron imágenes cada 15 [min], sin embargo, para la medición de la altura libre se extrajeron datos de las imágenes tomadas cada 1 [h] desde el inicio del ensayo (16 imágenes) y para la vista longitudinal cada 0.5 [h] desde que había transcurrido 1 [h] de ensayo (29 imágenes). Esta selección se realizó con el objetivo de optimizar el proceso de extracción y procesamiento de datos.

A continuación, se describen algunas variables medidas o calculadas junto con su proceso de cálculo si es que corresponde.

**Atura libre:** esquematizada en Figura 3.2 y medida según lo presentado en Figura 3.25.

**Interfaz sólido-líquido:** construida a partir de los 12 puntos extraídos sobre la interfaz de las 29 imágenes analizadas en cada ensayo, tal como se indicó en Figura 3.23 y su posterior conversión a coordenadas reales y transformación a los ejes señalados en Figura 3.24.

**Pendiente promedio de la interfaz  $i_p$ :** con las mediciones realizadas en la vista longitudinal del tubo fue posible calcular la pendiente de la interfaz y observar su variación en el tiempo. El proceso de cálculo fue el siguiente: con los 12 puntos extraídos de cada imagen de la vista longitudinal se calcularon 11 pendientes, pero como en los ensayos exploratorios se observó que la interfaz podría estar descrita hasta por tres pendientes, se realizó una división de la interfaz en tres tramos, en consecuencia la pendiente promedio del tramo 1 corresponde al promedio de las 4 primeras pendientes (1-4), la pendiente promedio del tramo 2 al promedio de las 3 pendientes siguientes (5-7) y la pendiente promedio del tramo 3 al promedio de las 4 últimas pendientes (8-11). Tal como se esquematiza en Figura 4.1. Es importante aclarar que en los casos en que el tubo se tapó, no se tomaron puntos en la zona donde se encontraba el tapón (zona con pendiente 0%).

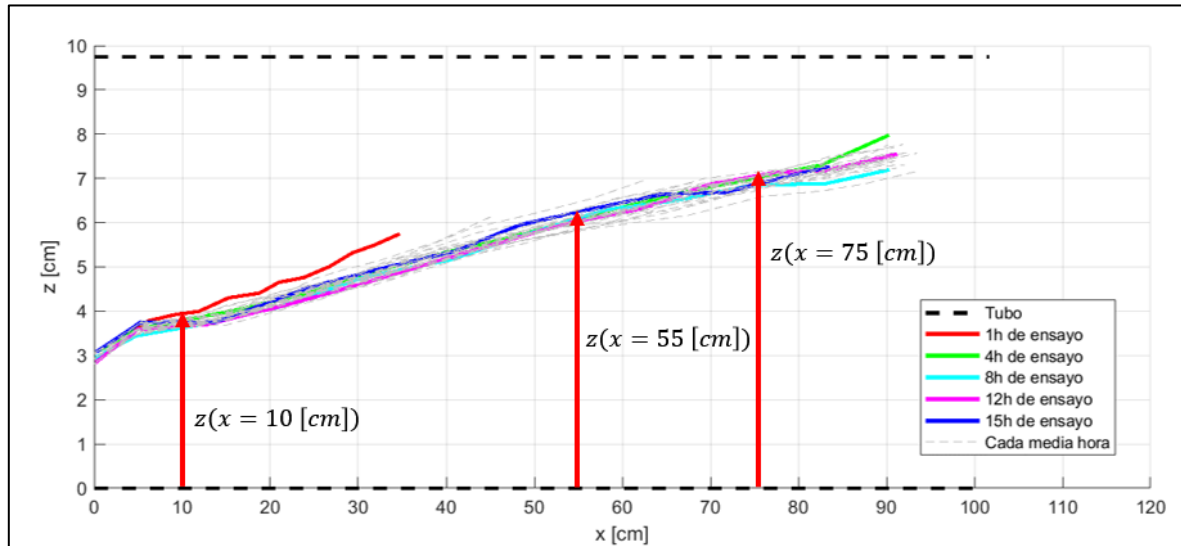


**Figura 4.1** Esquemización del proceso de cálculo de la pendiente promedio de los tramos 1, 2 y 3 de la tubería.

Por otra parte, se calculó una pendiente promedio de las 11 pendientes calculadas entre puntos. Este procedimiento se efectuó con todas las imágenes analizadas obteniendo una serie de tiempo asociada a la pendiente. Para definir las longitudes de los tramos, como el proceso de extracción de puntos de la interfaz era manual, se calculó el promedio de la ubicación en  $x$  del primer punto (inicio tramo 1), del quinto punto (final tramo 1) y así consecutivamente. En el cálculo de la pendiente final  $i_p$  lo que se efectuó fue calcular el promedio de la pendiente promedio a partir de 9 [h] hasta el final de cada ensayo. Las 9 [h] fueron seleccionadas por ser el mayor tiempo de estabilización de la interfaz de todos los ensayos formales.

**Atura de la interfaz en función de  $x$  ( $z(x)$ ) y construcción de su serie temporal  $z(t)$ :** otra medición significativa corresponde a la variación de la altura de la interfaz en el tiempo para distintas coordenadas  $x$ , dado que aporta a la descripción de la dinámica del proceso migratorio. Un estudio anterior indica que la forma de la interfaz se puede describir a través de la función  $h(x) \sim x^a$  con  $a \leq 1$  (Kapoor & Acrivos, 1995), en 2016 Palma encontró un buen ajuste con  $a = 1$ , es decir, una ecuación lineal (Palma et al., 2016). Para poder medir  $z(x)$  entre los puntos extraídos de cada imagen se realizó un ajuste lineal de la interfaz, producto de que en la mayoría de los ensayos se observó que la interfaz tomaba una forma aproximadamente lineal. Se contempló realizar 3 evaluaciones representadas en el esquema de Figura 4.2. Entonces, en cada una de las imágenes analizadas se extrajo un valor para  $z(x = 10 [cm])$  en la zona aguas arriba del tubo, un valor para  $z(x = 55 [cm])$  en el centro del tubo, y un valor para  $z(x = 75 [cm])$  en la zona aguas abajo del tubo. Luego, con estos valores extraídos de todas las imágenes de cada ensayo, se construyó la serie temporal  $z(t)$  de cada una de las ubicaciones del tubo. Las coordenadas  $x$  se definieron en  $x = 10 [cm]$ , a modo de evitar la condición de borde al inicio del tubo, donde el lecho de sólidos se orienta aproximadamente paralelo a la superficie libre del líquido claro. En  $x = 55 [cm]$ , correspondiente a la zona central del tubo, por ser una referencia geométrica y al final del tubo como el mínimo valor detectado para el

valor final del tramo 3, dado que según lo visto en las imágenes no sería correcto extrapolar más allá de los puntos medidos.



**Figura 4.2 Esquematización de las mediciones de la altura de la interfaz a lo largo del tubo de ensayo. Esta figura no se encuentra a escala**

## 4.2. Resultados

Ahora se expondrán los resultados y cálculos descritos en el acápite anterior para todos los ensayos formales agrupados por concentración de sólidos.

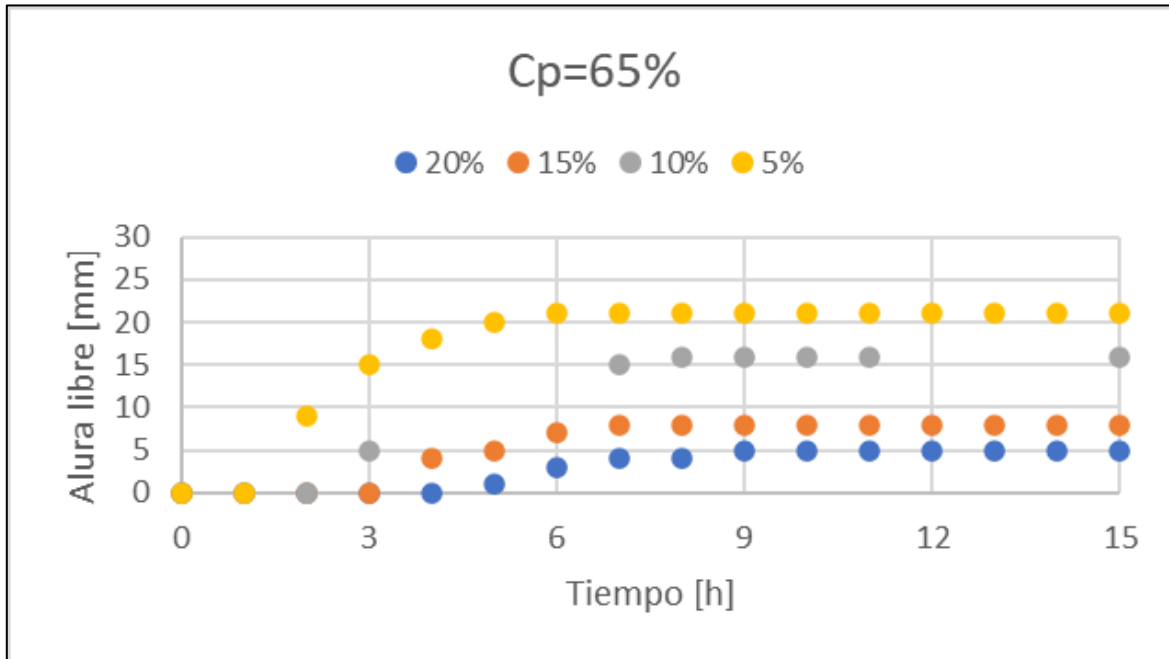
### 4.2.1 Ensayos a $C_p = 65\%$ (E.F.1-E.F.4)

En primer lugar, para verificar si la muestra quedó bien preparada, se realizaron mediciones de concentración en peso ( $C_p$ ) justo antes de cargar el tubo de ensayo para E.F.1 y posterior a la descarga del tubo al finalizar E.F.4. En Tabla 9.1 y Tabla 9.2 del capítulo Anexos se encuentran dichas mediciones. Los datos de Tabla 9.1 demuestran que la muestra quedó bien preparada logrando una concentración en peso muy cercana al valor nominal.

Al comparar las concentraciones en peso de Tabla 9.1 y Tabla 9.2 se puede notar un aumento en este parámetro luego de haber ejecutado los 4 ensayos a  $C_p = 65\%$  nominal. Pudiendo atribuir este cambio a la extracción de muestras para ensayos granulométricos (3 muestras por ensayo), sin embargo, esta diferencia no altera significativamente las propiedades de la pulpa.

Aclarado lo anterior. A continuación, se presentan los resultados de las mediciones realizadas durante la ejecución de los ensayos.

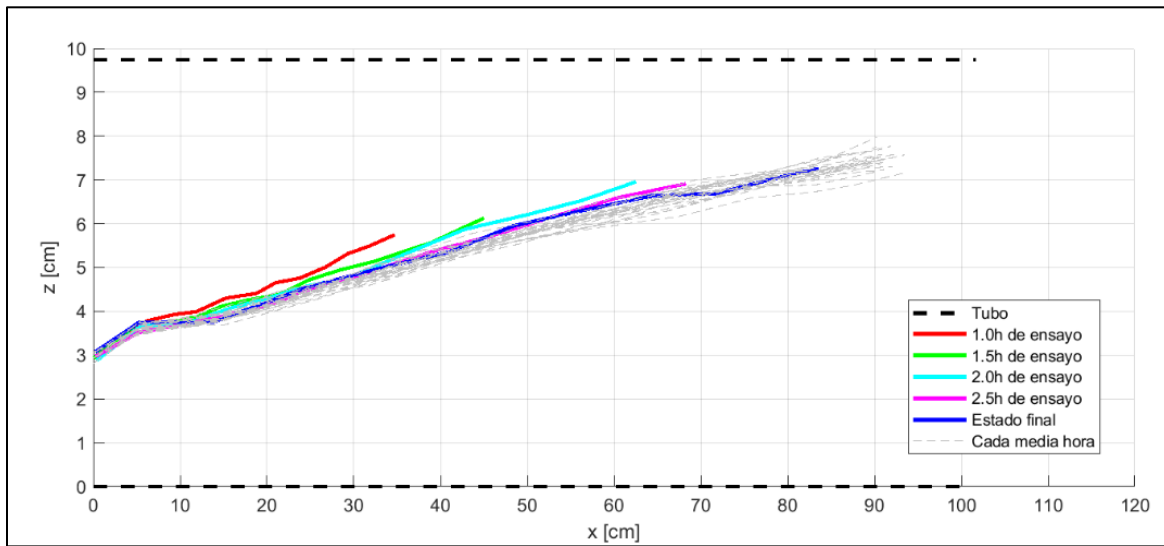
A partir de las mediciones de altura libre realizadas en la cara transversal aguas abajo del tubo, se obtuvieron los resultados expuestos en Figura 4.3.



**Figura 4.3 Registros de la altura libre en función del tiempo para concentración de sólidos  $C_p = 65\%$  y pendiente del sistema variable**

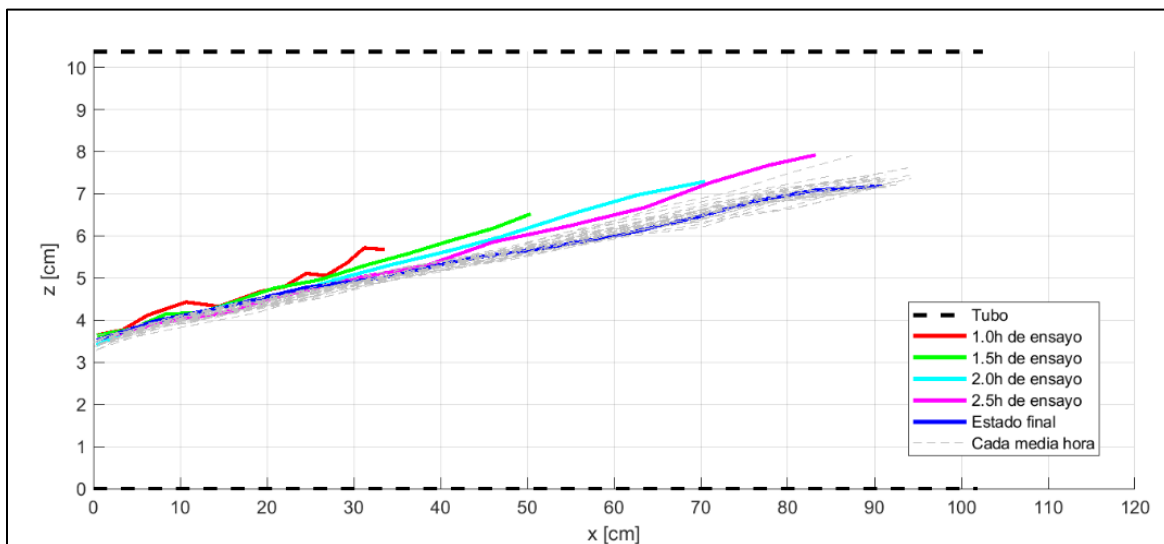
En Figura 4.3 se observa que, para una misma concentración, a medida que aumenta la pendiente del sistema, la altura libre en la cara transversal inferior es menor. Por otra parte, se desprende que al aumentar  $i_s$ , transcurre más tiempo para poder comenzar a ver altura libre, esta observación se justifica por medio de que como la pendiente es mayor, las partículas poseen mayor energía potencial y posteriormente cinética para ser transportadas, en consecuencia, las partículas más pequeñas que anteriormente no tenían energía suficiente para llegar aguas abajo del tubo, ahora si lo pueden lograr, aportando mayor contenido de sólidos a la zona aguas abajo del tubo y se necesitará más tiempo para poder visualizar producción de fluido claro en esta zona. Respecto del tiempo de estabilización de la interfaz, en promedio corresponde a 7.5 [h].

En la Figura 4.4 se incluye la evolución de la ubicación de la interfaz en el tiempo. Es importante notar que en las figuras presentadas los ejes vertical y horizontal no se encuentran a escala, esto para poder visualizar de mejor manera el fenómeno.

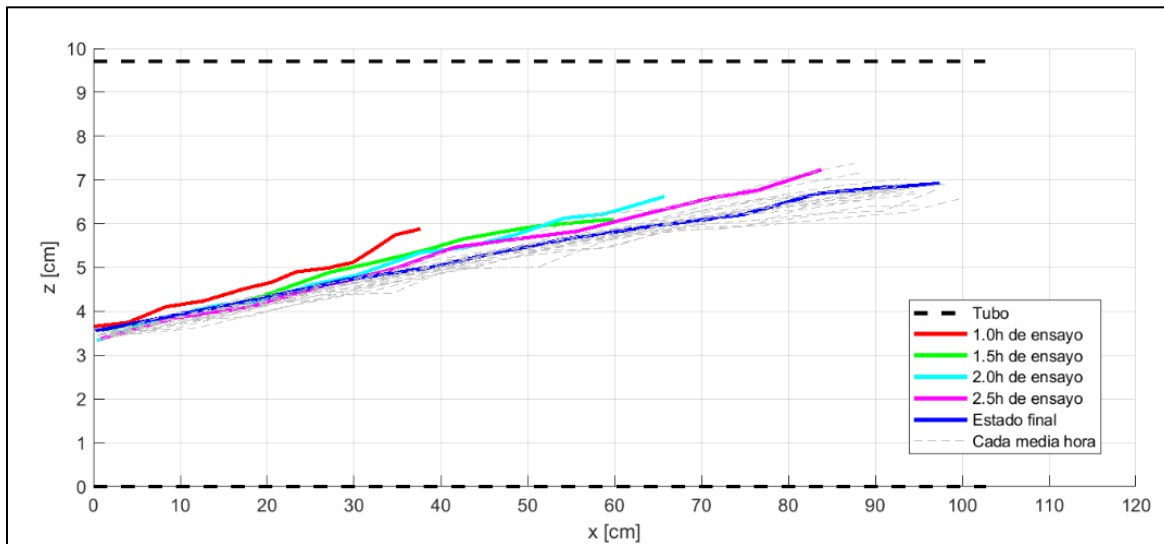


**Figura 4.4** Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.1

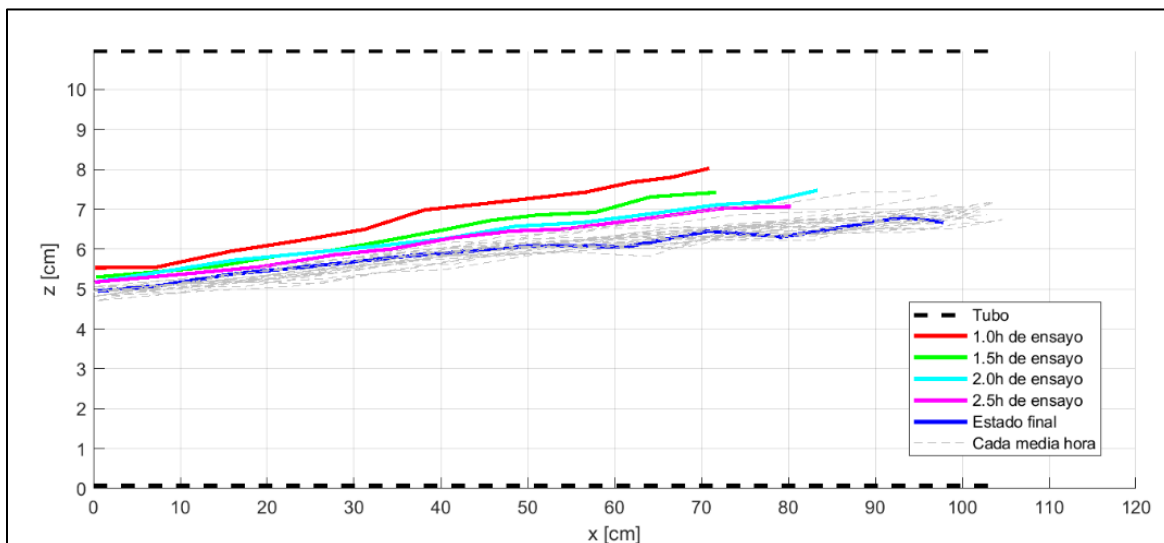
De forma análoga, se presenta la evolución de la interfaz durante la ejecución de E.F.2, E.F.3 y E.F.4 en Figura 4.5, en Figura 4.6 y Figura 4.7, respectivamente.



**Figura 4.5** Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.2

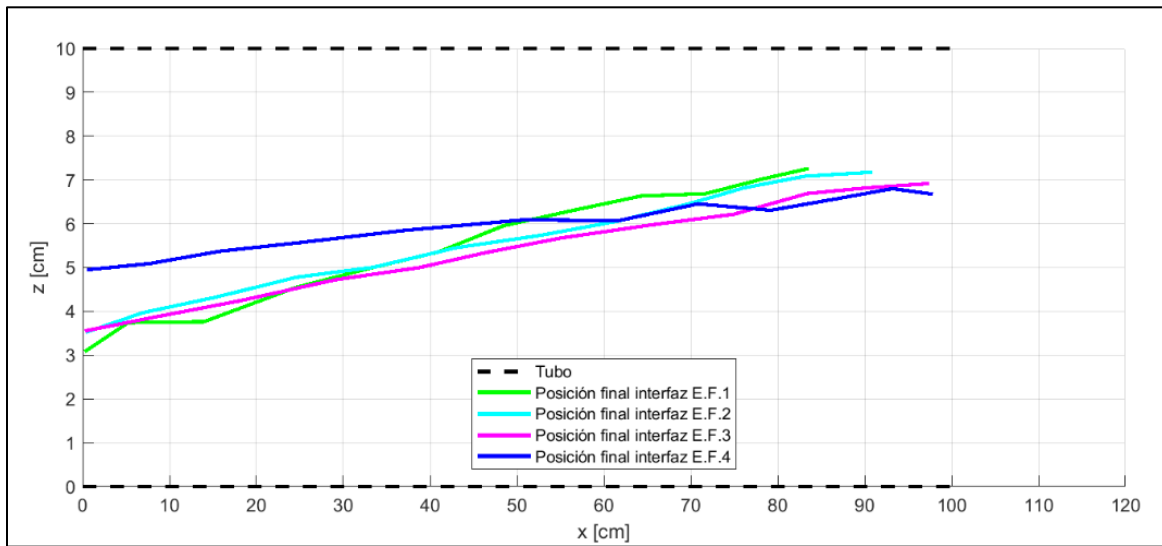


**Figura 4.6** Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.3



**Figura 4.7** Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.4

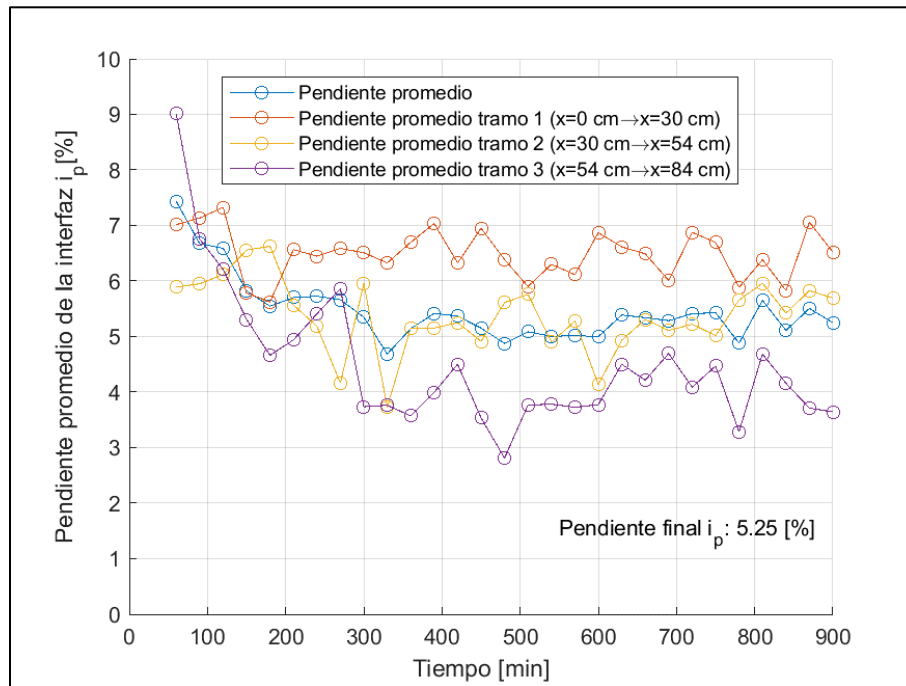
La primera observación importante de los 4 gráficos anteriores es que efectivamente la interfaz al final del ensayo se podría aproximar con un ajuste lineal. Luego, al visualizar la evolución de la posición de la interfaz en el tiempo, por una parte, se puede inferir que después de 1 [h] de ejecución del ensayo, en la zona aguas arriba del tubo este descenso es más lento y en la zona aguas abajo más rápido, consecuentemente, en la zona aguas arriba del tubo la interfaz se estabiliza primero que en la zona aguas abajo del tubo. Por otra parte, se aprecia como las alturas al inicio y final del tubo aumentan y disminuyen, respectivamente a medida que se disminuye la pendiente del sistema. Para notar esta tendencia, se generó el gráfico presentado en Figura 4.8.



**Figura 4.8 Comparación de la posición final de interfaz sólido líquido de los ensayos a  $C_p = 65\%$**

Al analizar la Figura 4.8, queda claro que para pendientes más altas existe mayor acumulación de sólidos aguas abajo del tubo y es por ello que se visualiza un aumento en la pendiente de la interfaz sólido-líquido ( $i_p$ ) a medida que se aumenta la pendiente del sistema ( $i_s$ ). Si bien las curvas se cruzan a diferentes distancias, a partir de 80 [cm] es claro que el orden de las curvas se invierte por completo. Al final del ensayo E.F.1 se aprecia un posible cambio de pendiente en la interfaz aproximadamente a 50 [cm] del inicio. Para poder realizar un análisis cuantitativo de lo descrito se procedió a calcular y graficar la pendiente de la interfaz en función del tiempo.

La serie temporal construida a partir del cálculo de la pendiente de la interfaz sólido-líquido del ensayo E.F.1 se presenta en Figura 4.9. En el caso de los ensayos E.F.2, E.F.3 y E.F.4 se presenta en Figura 9.1, Figura 9.2 y Figura 9.3 del capítulo Anexos, respectivamente.



**Figura 4.9 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido  $i_p$  en función del tiempo para E.F.1**

Dichos gráficos evidencian lo detectado a partir del seguimiento de la interfaz en el tiempo. En Figura 4.9 se aprecia que, para pendiente del sistema de 20% existen diferencias entre las pendientes de los tramos 1, 2 y 3, lo mismo ocurre para los demás ensayos a  $C_p = 65\%$ . Al comparar las pendientes finales de la interfaz en cada ensayo se aprecia que descienden a medida que la pendiente del sistema también lo hace con valores de 5.3%, 4.2%, 3.5% y 2.0% para pendientes del sistema de 20%, 15%, 10% y 5%, respectivamente.

Además, se puede notar que la pendiente va disminuyendo cuando se empieza a ejecutar cada ensayo hasta su estabilización. Esto tiene relación con la observación de que la zona aguas arriba del tubo se estabiliza antes que la zona aguas abajo del tubo. Para visualizar de mejor forma lo anterior, se realizaron gráficos que muestran los resultados del cálculo de la altura de la interfaz en el tiempo en diferentes posiciones en  $x$ . Los resultados para E.F:1 y E.F.2, a modo de ejemplo, se presentan en Figura 4.10 y Figura 4.11, los demás resultados se pueden visualizar en Figura 9.10 y Figura 9.11 del capítulo Anexos.

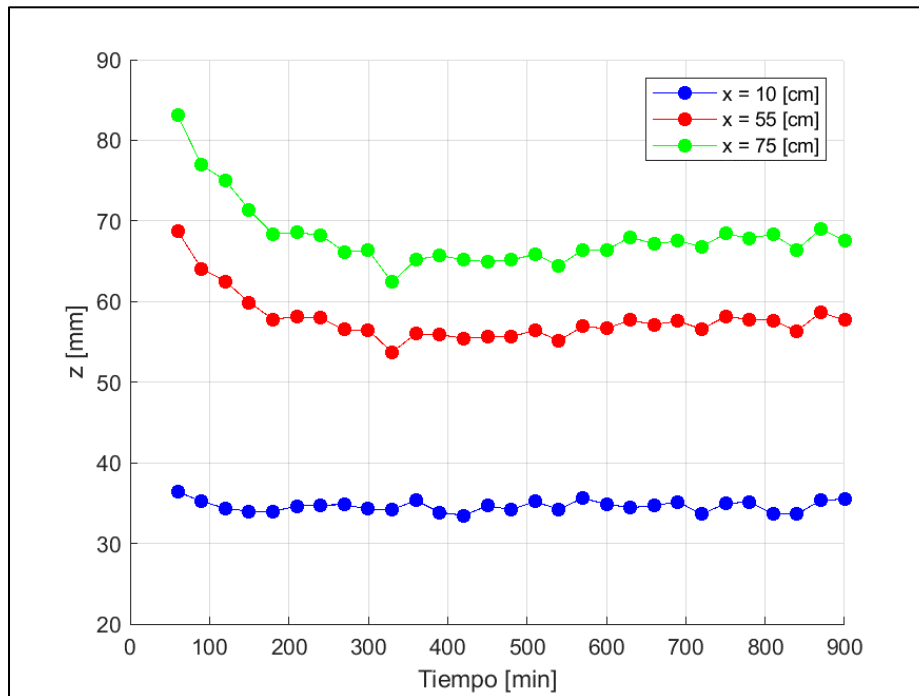


Figura 4.10 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.1

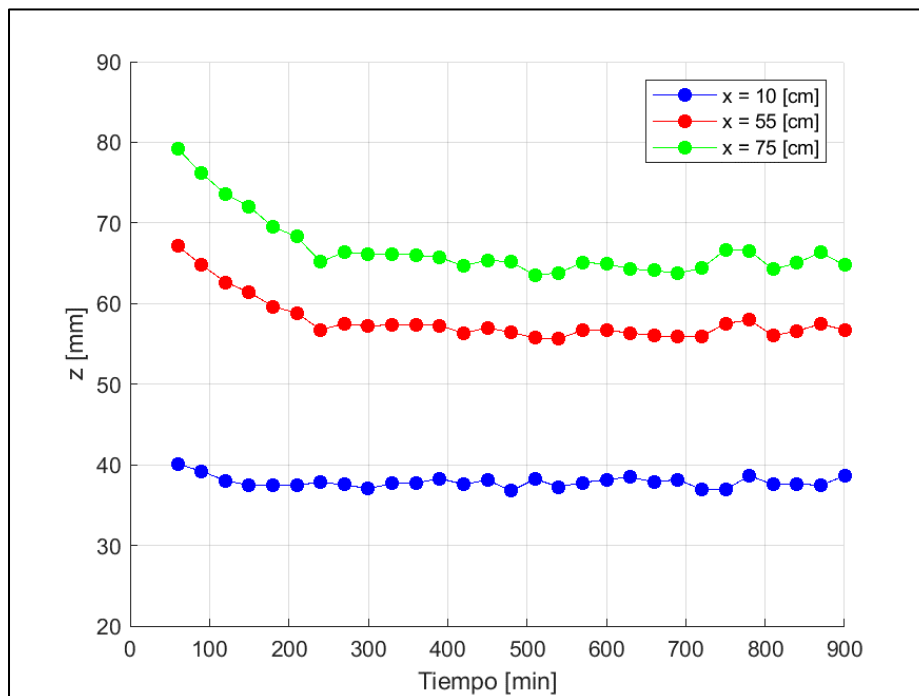
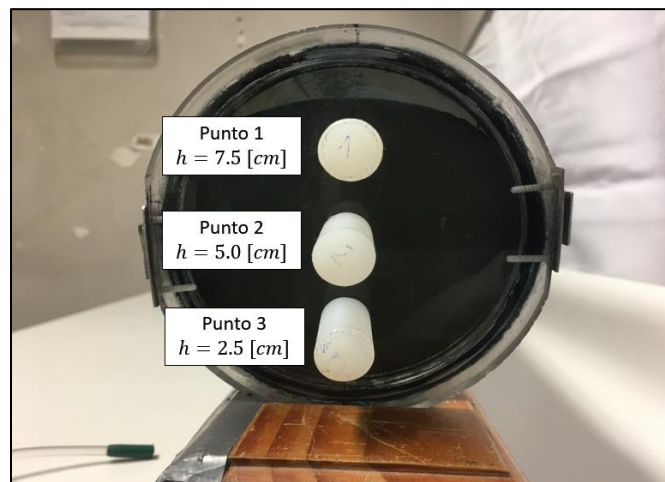


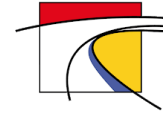
Figura 4.11 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.2

Si bien las alturas presentadas en los gráficos de Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 9.10 y Figura 9.11 fueron calculadas a partir de ajustes lineales, permiten detectar que las velocidades descenso de la altura de la interfaz son mayores en la zona de aguas abajo del tubo que en la zona de aguas arriba. Incluso siendo casi nula para  $x = 10$  [cm] en algunos casos. Se debe tener en cuenta que el procesamiento de datos se realizó a partir de 1 [h] de ejecución de los ensayos porque antes de ese tiempo no se podía detectar la interfaz con claridad tal como se muestra en el capítulo Anexos desde la Figura 9.16 a la Figura 9.50.

Como se mencionó anteriormente, al finalizar cada ensayo se extrajeron muestras de los puntos 1, 2 y 3 indicados en Figura 4.12 y se realizaron pruebas de granulometría láser de donde se extrajeron los diámetros característicos D10, D50 y D80. A continuación, en Tabla 4.2, se indican los resultados de dichos ensayos.



**Figura 4.12** Puntos 1, 2 y 3 definidos a diferentes alturas en la cara transversal aguas abajo del tubo



**Tabla 4.2 Resultados de granulometría láser de las muestras extraídas al terminar cada ensayo a  $C_p = 65\%$**

Ensayo	Punto	Altura h [cm]	D10 [ $\mu\text{m}$ ]	D50 [ $\mu\text{m}$ ]	D80 [ $\mu\text{m}$ ]
<b>E.F.1 (<math>i_s = 20\%</math>)</b>	1	7.5	3.55	20.9	50.72
	2	5	3.5	22.24	59.06
	3	2.5	4.6	40.55	133.8
<b>E.F.2 (<math>i_s = 15\%</math>)</b>	1	7.5	3.58	17.19	39.66
	2	5	3.41	19.84	51.73
	3	2.5	3.46	21.38	55.45
<b>E.F.3 (<math>i_s = 10\%</math>)</b>	1	7.5	3.86	17.05	36.56
	2	5	3.76	18.09	42.98
	3	2.5	4.54	35.95	115.2
<b>E.F.4 (<math>i_s = 5\%</math>)</b>	1	7.5	-	-	-
	1	5	3.74	21.18	56.11
	2	2.5	3.9	22.17	61.12
<b>Granulometría muestra completa</b>	-	-	3.75	25.3	66.1

Al analizar la Tabla 4.2 se puede notar que en D10 no existe mayor segregación de los sólidos sedimentados dentro del tubo, en D50 tampoco se ve una segregación muy marcada, solo una leve tendencia en E.F.1 y E.F.3, sin embargo, en D80 esta tendencia es un poco más marcada producto de que para E.F.1, E.F.2, E.F.3 y E.F.4 se distingue la presencia de material más grueso hacia el fondo del lecho de sólidos. Que D10 sea aproximadamente constante en la altura del lecho de sólidos puede estar fundamentado por el mecanismo de percolación de finos en el lecho durante la sedimentación de partículas polidispersas (Cotroneo, 2015). Cabe mencionar que en la última fila de la tabla se incluyeron los diámetros característicos obtenidos de la granulometría realizada para caracterizar la muestra completa, al comparar los resultados granulométricos de estos ensayos se visualiza que sus diámetros característicos son levemente más finos que los de la granulometría completa.

#### **4.2.2 Ensayos a $C_p = 60\%$ (E.F.5-E.F.8)**

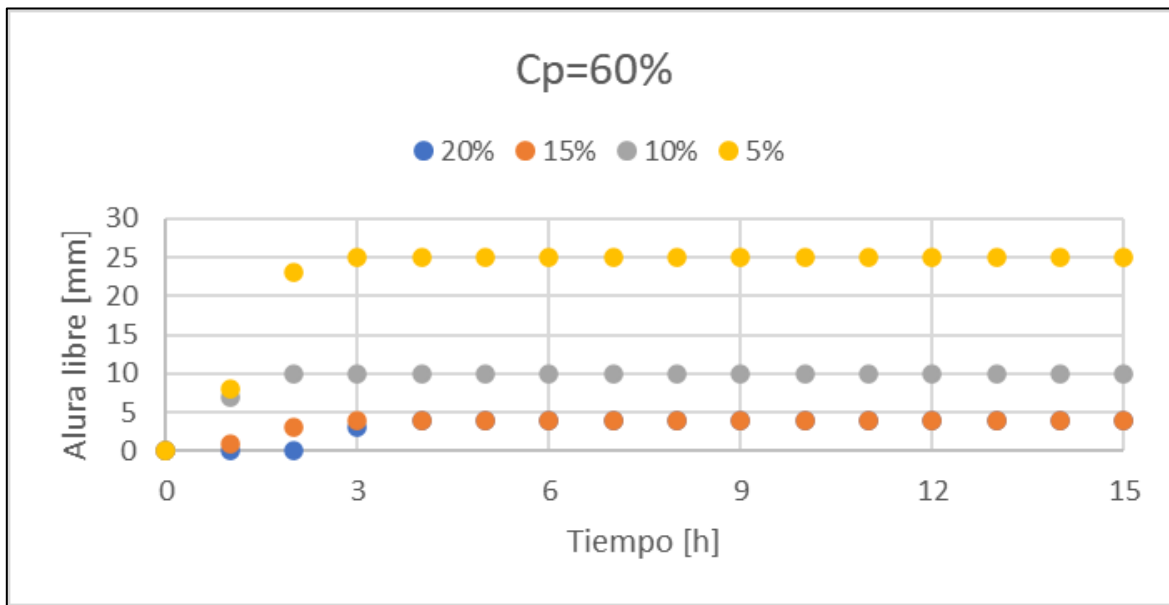
De igual manera que en el acápite anterior, en Tabla 9.3 y Tabla 9.4 del capítulo Anexos se encuentran las mediciones de concentración en peso real al inicio del ensayo E.F.5 y al término del ensayo E.F.8, respectivamente.

En Tabla 9.3 se indica que la medición del  $C_p$  real de la muestra preparada fue 58.65%, valor que no es tan cercano a la concentración nominal de 60%, pero se consideró como aceptable, producto de que mientras más baja la concentración de partículas, más se dificulta la preparación de la muestra porque la sedimentación es más rápida (ver Figura 2.13).

Posterior a la ejecución de los 4 ensayos a  $C_p$  nominal de 60% la medición del  $C_p$  real fue de 58.36% tal como se muestra en Tabla 9.4, por lo tanto, contrario a lo que ocurrió en el caso anterior, el  $C_p$

disminuyó levemente. Se podría inferir que como a  $C_p = 65\%$  existió mayor altura libre para todos los ángulos del sistema, a excepción de  $5\%$ , en comparación con los ensayos a  $C_p = 60\%$  fue más fácil que ingresara agua por el sistema de extracción de muestras, ya que el método de extracción fue el mismo.

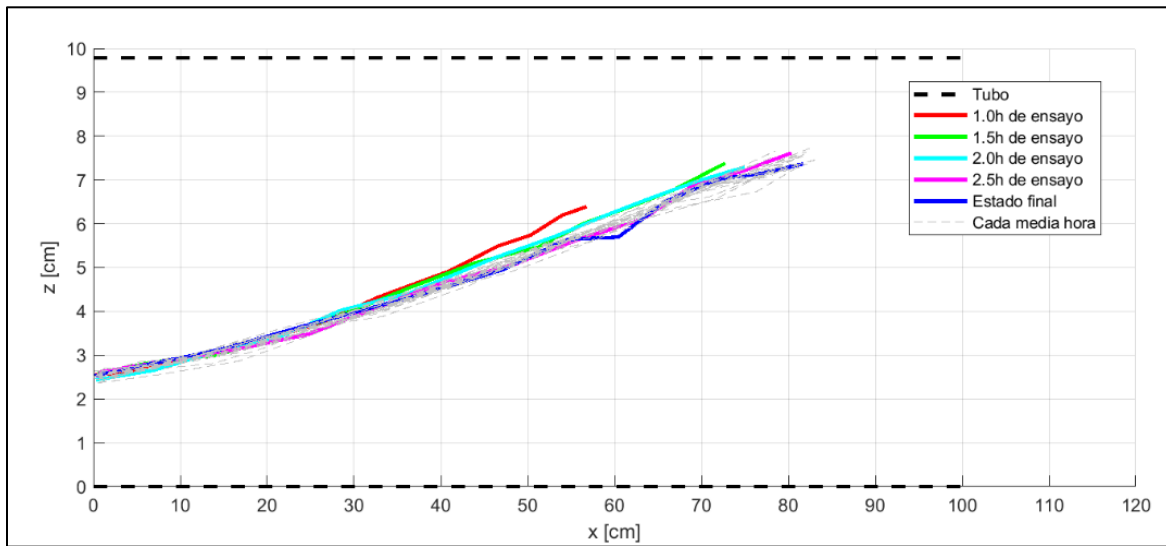
Dicho esto, de manera análoga a lo descrito y presentado en 4.2.1 se expondrán los resultados de las mismas mediciones y cálculos ya indicados, para los ensayos a  $C_p = 60\%$ . En primer lugar, se presentan las mediciones de altura libre en función del tiempo en Figura 4.13.



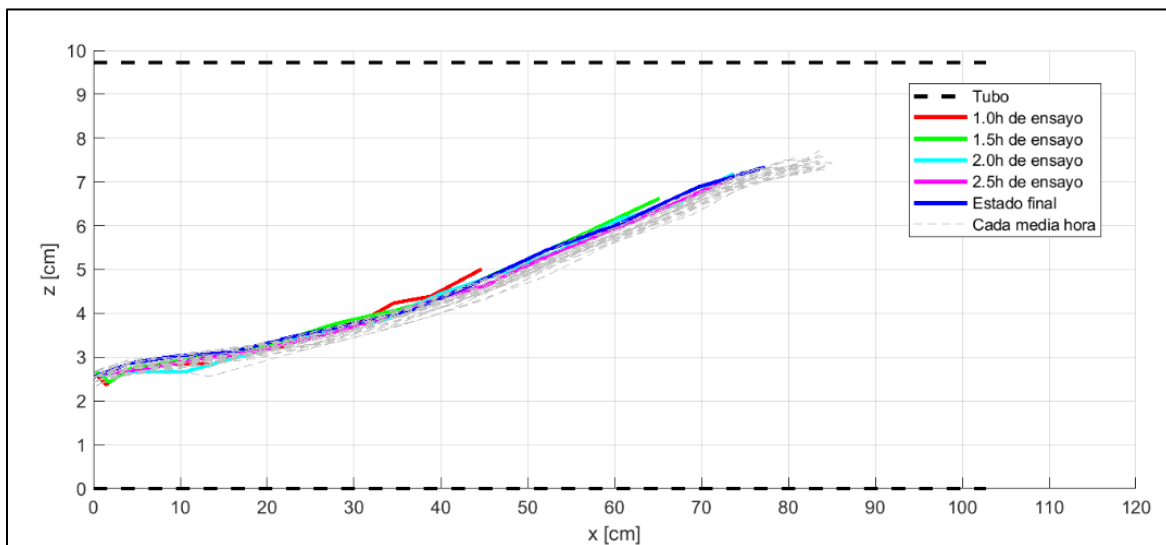
**Figura 4.13 Registros de la altura libre en función del tiempo para concentración de sólidos  $C_p = 60\%$  y pendiente del sistema variable**

Al igual que en los ensayos a  $C_p = 65\%$  existe una tendencia al aumento de la altura libre a medida que se disminuye la pendiente del sistema  $i_s$ , en este caso a partir de 1 [h] ya se visualiza altura libre para todas las pendientes del sistema, a excepción del 20% que su visualización comienza a la 3 [h] de ejecución del ensayo. Respecto del tiempo promedio de estabilización de la interfaz corresponde a 3 [h]. Es relevante señalar que las alturas libres registradas al final de los ensayos E.F.5 y E.F.6 fueron las mismas.

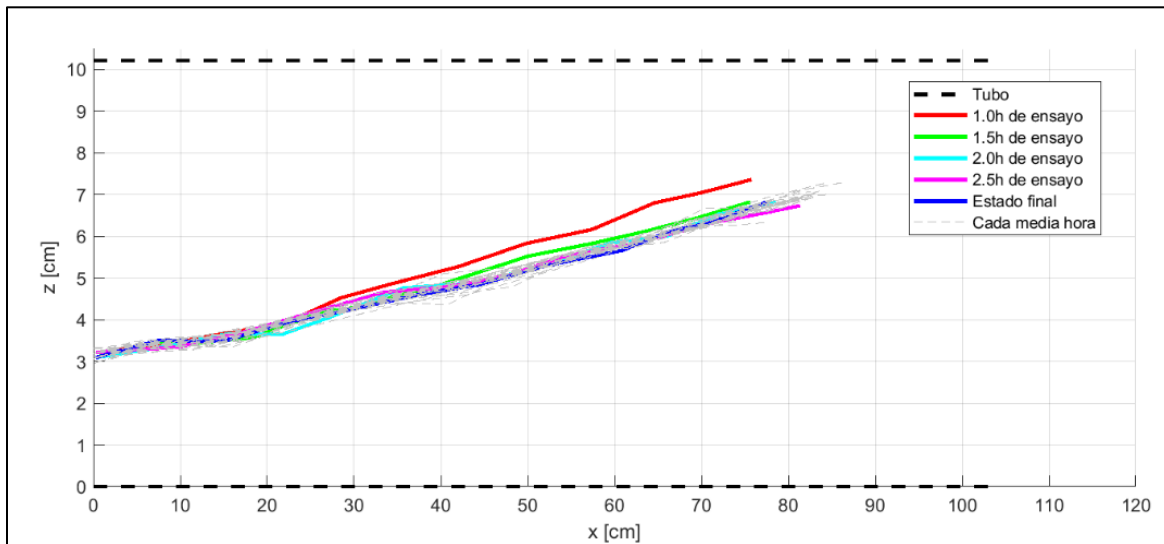
La evolución de la interfaz construida a partir de los 12 puntos extraídos de cada imagen durante cada ensayo se incluye en Figura 4.14 para E.F.5, en Figura 4.15 para E.F.6, en Figura 4.16 para E.F.7 y Figura 4.17 para E.F.8. Es importante notar que las figuras presentadas no se encuentran a escala para poder visualizar de mejor manera el fenómeno.



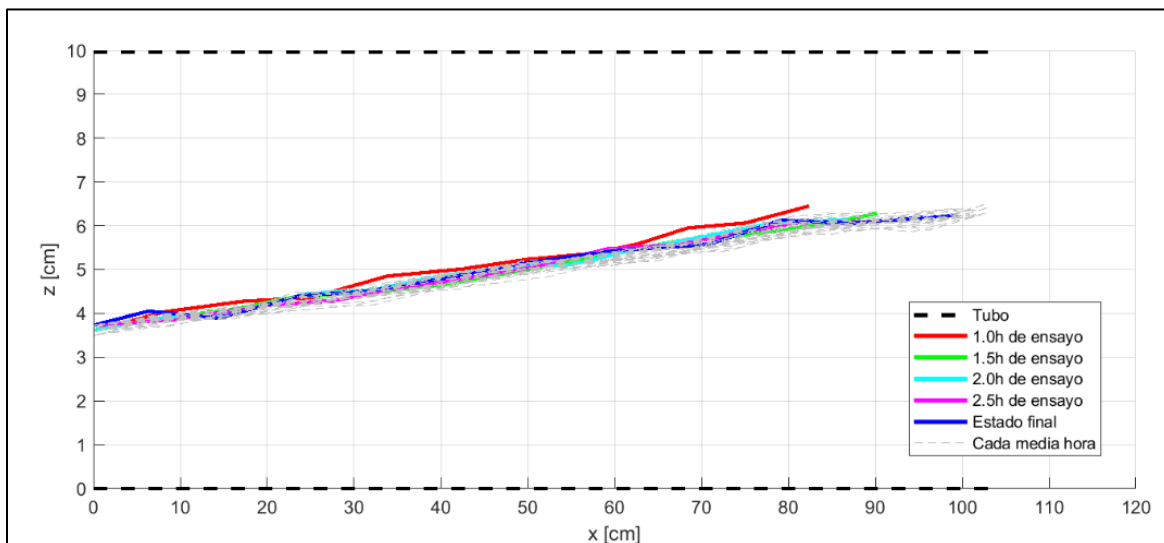
**Figura 4.14** Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.5



**Figura 4.15** Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.6



**Figura 4.16** Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.7

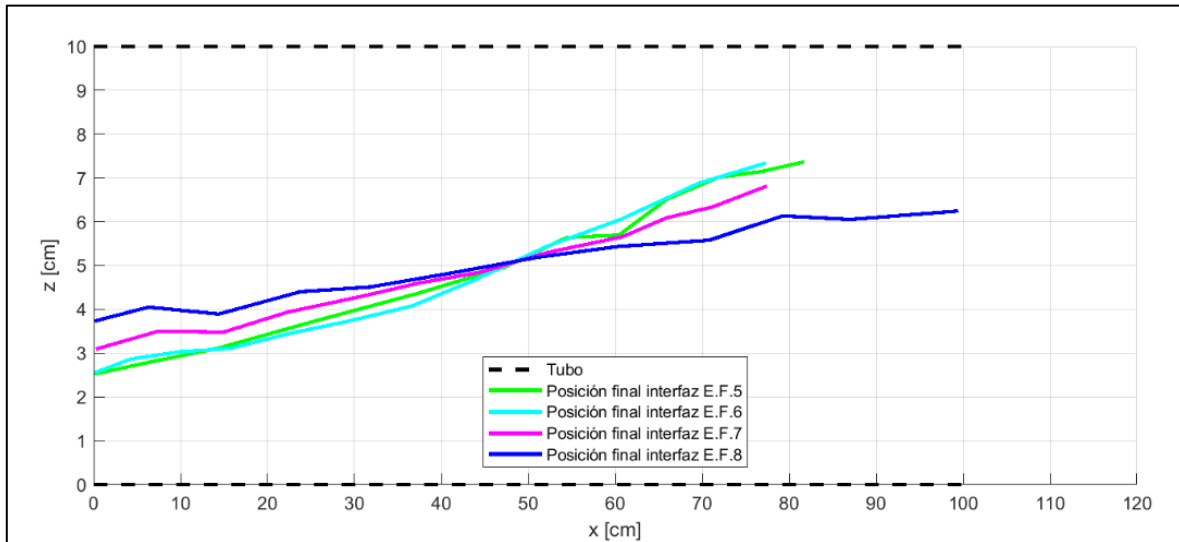


**Figura 4.17** Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.8

Al comparar la evolución de la posición de la interfaz en los ensayos a  $C_p = 60\%$  es claro que la pendiente final de la interfaz sólido-líquido va disminuyendo a medida que se disminuye la pendiente del sistema, además de que la altura final de la interfaz aguas arriba del tubo va aumentando y aguas abajo va disminuyendo, esta observación se complementa con las alturas libres registradas señaladas en Figura 4.13 y es la misma tendencia detectada en los ensayos a  $C_p = 65\%$ . Respecto de la forma que tomó la interfaz en cada medición, al igual que para  $C_p = 65\%$  se puede detectar una tendencia lineal, aunque en los casos de E.F.5 y E.F.6 podría ser discutible con una tendencia potencial. Otro aspecto que llama la atención de estos ensayos es que la posición inicial de la interfaz en estos ensayos

(1 [h]) no difiere tan notoriamente de la posición final como en el caso anterior, disminuyendo el tiempo de estabilización de los ensayos.

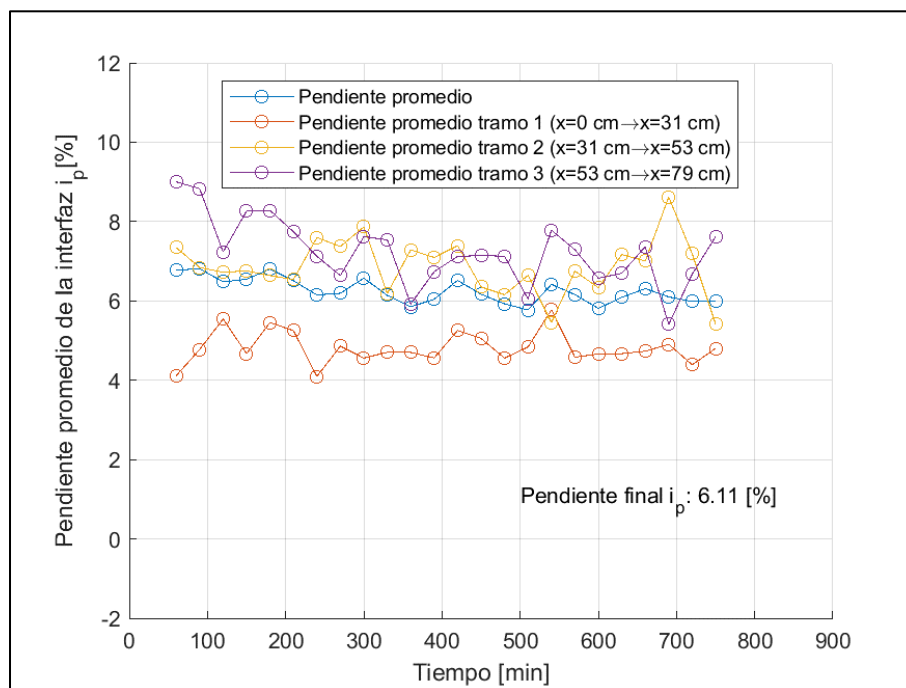
Para poder comparar fácilmente la posición final de la interfaz se generó el gráfico presentado en Figura 4.18.



**Figura 4.18 Comparación de la posición final de interfaz sólido líquido de los ensayos a  $C_p = 60\%$**

En Figura 4.18 se evidencia el aumento de pendiente en la posición final de la interfaz  $i_p$  a medida que se aumenta la pendiente del sistema  $i_s$  y a diferencia del caso anterior ocurre que todas las curvas se cruzan a una misma distancia invirtiendo su orden por completo, esto ocurre en aproximadamente  $x = 48 [cm]$ . Otra característica destacable es la gran similitud que existe en la posición final de la interfaz de los ensayos E.F.5 y E.F.6, incluso las alturas libres registradas al final de estos ensayos fueron las mismas (ver Figura 4.13), se pudo apreciar que estas dos curvas poseen un cambio de pendiente en aproximadamente  $x = 35 [cm]$ .

Del mismo modo que se explicó en el acápite anterior, se calculó la pendiente promedio de la interfaz, cuyos resultados para E.F.5 se exponen en Figura 4.19. En el caso de los ensayos E.F.6, E.F.7 y E.F.8 se presenta en Figura 9.4, Figura 9.5 y Figura 9.6 del capítulo Anexos, respectivamente.

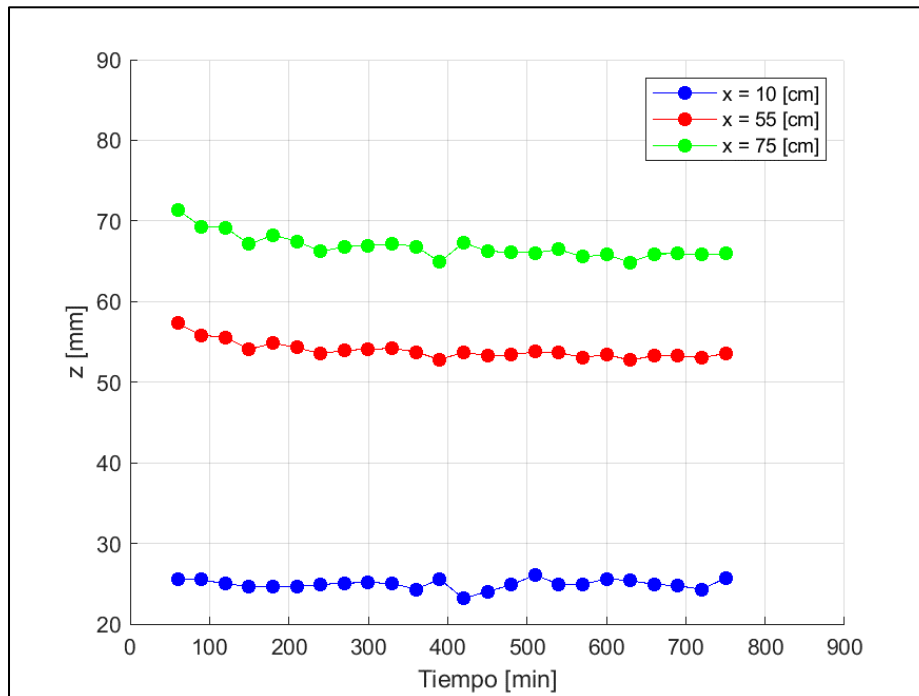


**Figura 4.19 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido  $i_p$  en función del tiempo para E.F.5**

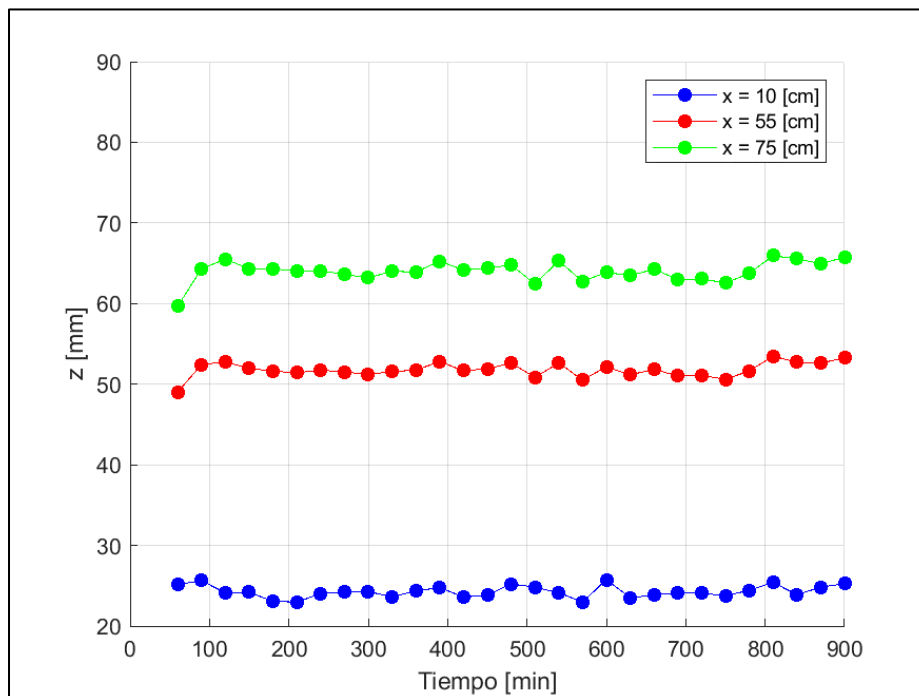
La primera observación del análisis de dichos gráficos es que tanto en E.F.5 como en E.F.6 existe una notoria diferencia entre las pendientes de los tramos definidos, en E.F.7 esta diferencia disminuye y en E.F.8 prácticamente no existe. Los cálculos de las pendientes promedio finales de la interfaz en cada ensayo resultaron en 6.1%, 5.8%, 4.6%, 2.6% para E.F.5, E.F.6, E.F.7 y E.F.8, respectivamente, demostrando gran similitud entre las pendientes de los ensayos E.F.5 y E.F.6 y manteniendo la tendencia del aumento de la pendiente de la interfaz  $i_p$  a medida que se aumenta la pendiente del sistema  $i_s$ .

Una diferencia detectada con respecto al análisis a  $C_p = 65\%$  es que prácticamente no se percibe una disminución de la pendiente a lo largo del ensayo, por lo que probablemente antes de 1 [h] de ensayo fue cuando más evolución hubo en este parámetro, si se examinan Figura 9.27, Figura 9.30, Figura 9.33 y Figura 9.36 del Anexo, donde se muestra el inicio de los ensayos E.F.5, E.F.6, E.F.7 y E.F.8, respectivamente, es posible notar que a partir de 30 [min] de ensayo ya había comenzado la evolución de la interfaz. Probablemente el aumento de pendiente que se aprecia al inicio de E.F.6 corresponda a un error de medición (Ver Figura 9.4) ya que no tiene relación con lo que se visualiza en Figura 9.30.

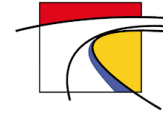
La variación de la altura de la interfaz en el tiempo para las distintas coordenadas  $x$  ya definidas para los ensayos E.F.5 y E.F.6 se presenta en Figura 4.20, Figura 4.21, los resultados de lo anterior en los ensayos E.F.7 y E.F.8 se muestran en Figura 9.12 y Figura 9.13 del capítulo Anexos, respectivamente.



**Figura 4.20** Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.5



**Figura 4.21** Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.6



En Figura 4.20 y Figura 4.21 se puede notar que entre 60 [min] y 120 [min] si se alcanzó a captar parte de la evolución de la posición de la interfaz durante los ensayos E.F.5 y E.F.6, respectivamente, después de 120 [min] se ve que las alturas permanecieron estables. Lo mismo ocurrió para los ensayos E.F.7 y E.F.8 cuyos resultados se muestran en Figura 9.12 y Figura 9.13 del capítulo Anexos. Debido al corto periodo de tiempo en que se registraron cambios en la posición de la interfaz no es posible detectar diferencias en las velocidades de descenso de la interfaz en cada uno de los puntos seleccionados. Tal como se mencionó en el análisis a  $C_p = 65\%$ , las alturas calculadas para los diferentes  $x$  presentan mayores diferencias para pendientes del sistema más altas.

Siguiendo con los resultados asociados a  $C_p = 60\%$ , en Tabla 4.3 se presentan los diámetros característicos asociados a los ensayos de granulometría láser realizados a las muestras extraídas de la cara transversal aguas abajo del tubo al término de los ensayos E.F.5, E.F.6, E.F.7 y E.F.8.

**Tabla 4.3 Resultados de granulometría láser de las muestras extraídas al terminar cada ensayo a  $C_p = 60\%$**

Ensayo	Punto	Altura h [cm]	D10 [ $\mu\text{m}$ ]	D50 [ $\mu\text{m}$ ]	D80 [ $\mu\text{m}$ ]
E.F.5 ( $i_s = 20\%$ )	1	7.5	4.14	24.23	60.47
	2	5	3.94	25.05	63.41
	3	2.5	4.02	26.04	63.47
E.F.6 ( $i_s = 15\%$ )	1	7.5	5.08	27.92	60.28
	2	5	3.83	25.01	62.65
	3	2.5	5.77	41.26	105.9
E.F.7 ( $i_s = 10\%$ )	1	7.5	5.03	26.2	63.12
	2	5	4.14	22.4	54.85
	3	2.5	4.56	29.07	77.29
E.F.8 ( $i_s = 5\%$ )	-	7.5	-	-	-
	1	5	4.18	28.84	77.49
	2	2.5	3.75	23.2	62.18
<b>Granulometría muestra completa</b>	-	-	3.75	25.3	66.1

En este caso también ocurre que no hay mayor diferencia en el diámetro característico D10 a lo largo de la altura del lecho sedimentado, pudiendo inferir que también ocurrió percolación de las partículas más finas en las capas más inferiores del estrato de sólidos. Respecto de D50 no existe diferencia significativa entre los puntos 1 y 2 pero si un leve engrosamiento de las partículas hacia el punto 3. Por último, es evidente que hubo segregación al menos en D80 donde el análisis granulométrico arrojó que en el fondo del estrato existía material más grueso, sin embargo, en varios casos, el punto 2 se visualiza más fino que el punto 1.

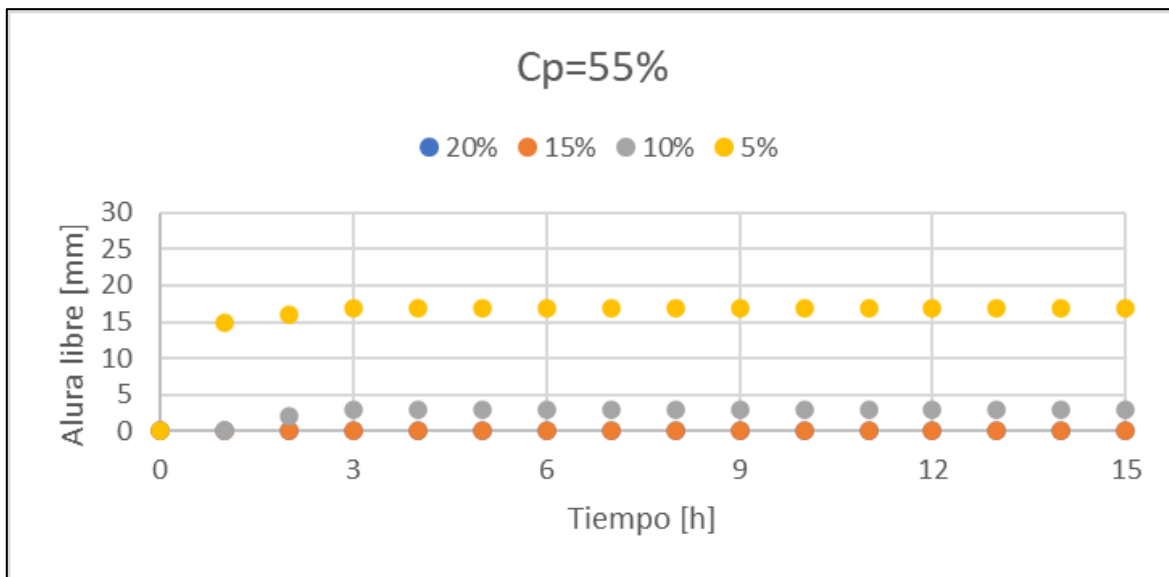
Respecto de la comparación de los resultados con los diámetros característicos de la muestra completa, se aprecia que se encuentran muy cercanos tanto en D10 como en D50 y D80.

### 4.2.3 Ensayos a $C_p = 55\%$ (E.F.9-E.F.12)

Análogamente, en Tabla 9.5 y Tabla 9.6 del capítulo Anexos se exponen las mediciones de concentración de sólidos efectuadas al inicio y final de los ensayos a  $C_p = 55\%$

La similitud de los resultados presentados en Tabla 9.5 y Tabla 9.6 demuestra que la muestra quedó bien preparada y que la concentración en peso se mantuvo casi constante incluso luego de extraer las muestras necesarias para granulometría. Es importante aclarar que como en la preparación de la muestra a  $C_p = 60\%$  se detectó que, posiblemente, la pulpa estaba sedimentando más rápido, durante esta última preparación se tuvo mayor cuidado en este aspecto.

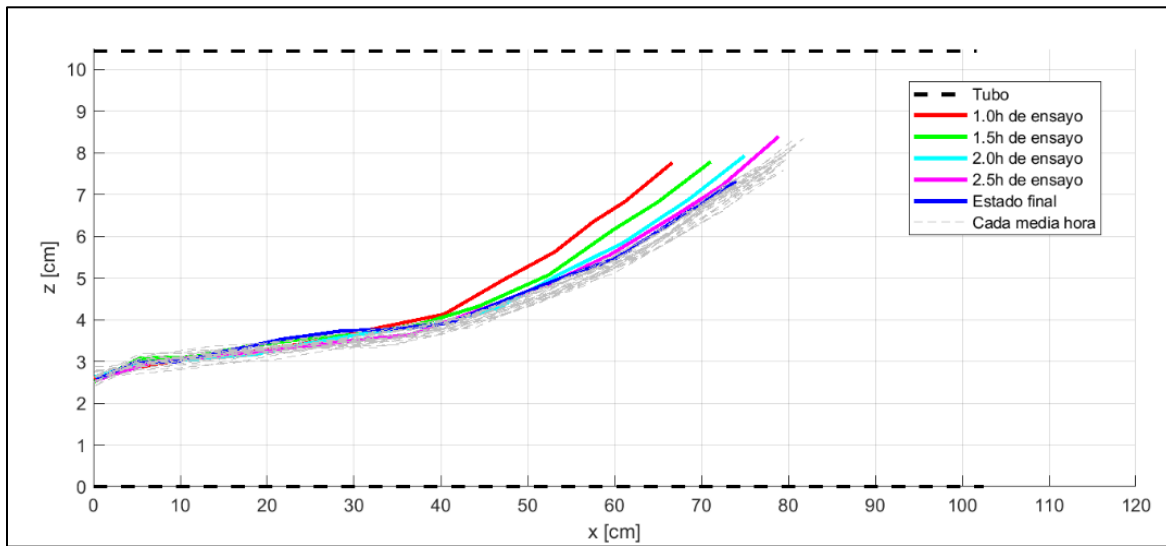
Del mismo modo que se estructuraron los capítulos anteriores, en Figura 4.22 se exponen los resultados para altura libre en función del tiempo medida durante los ensayos a  $C_p = 55\%$ .



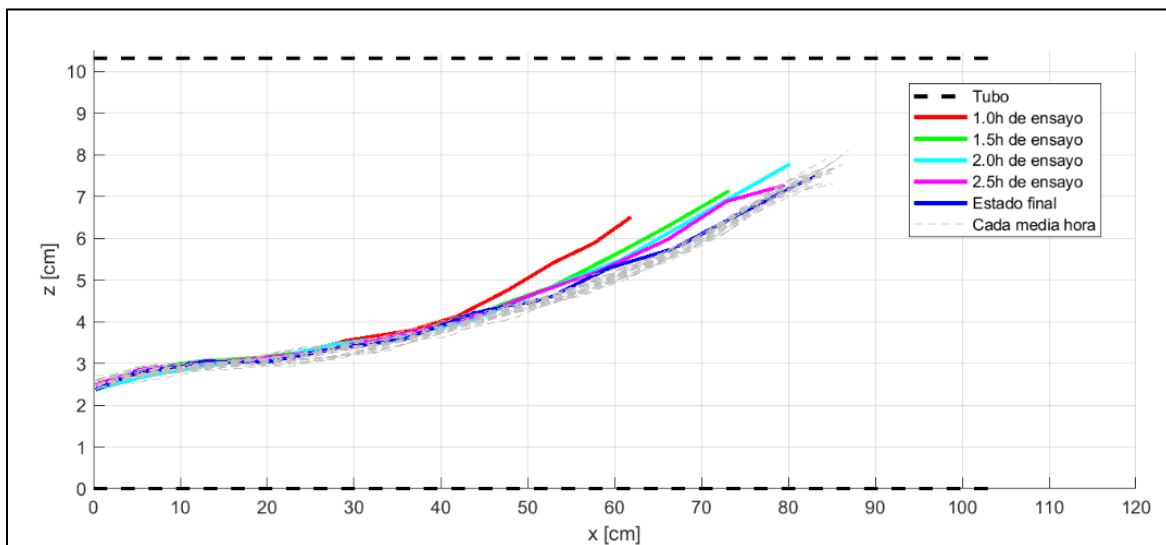
**Figura 4.22 Registros de la altura libre en función del tiempo para concentración de sólidos  $C_p = 55\%$  y pendiente del sistema variable**

Al observar la Figura 4.22 en primer lugar se nota que hubo 2 ensayos en que no se registró altura libre aguas abajo del tubo, específicamente E.F.9 y E.F.10, con pendientes de sistema de 20% y 15%, respectivamente. Además, se aprecia que se mantiene la relación entre pendiente y altura libre detectada para las concentraciones de sólidos anteriormente analizadas. El tiempo de estabilización promedio de estos últimos 4 ensayos efectuados fue de 2.6 [h]. Respecto del tiempo transcurrido antes de ver altura libre aguas abajo del tubo se puede mencionar que para E.F.11 fue de 2 [h] y para E.F.12 de 1 [h], es decir, a pendiente de sistema más baja la altura libre se tardó menos en aparecer, tal como ocurrió en los ensayos anteriores.

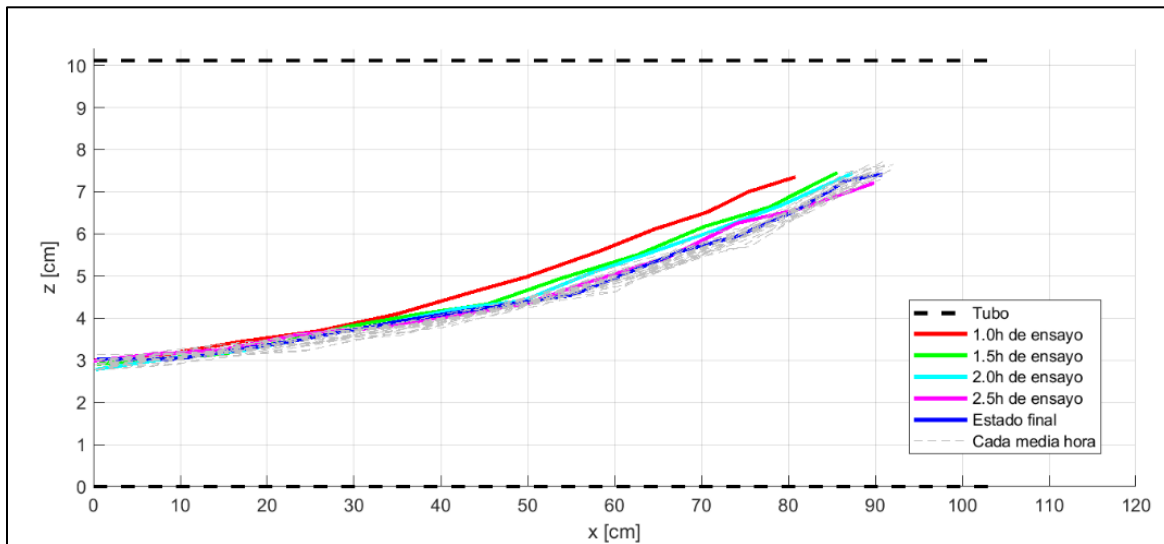
La evolución de la posición de la interfaz en el tiempo para los ensayos E.F.9, E.F.10, E.F.11 y E.F.12 se muestra en Figura 4.23, Figura 4.24, Figura 4.25 y Figura 4.26, respectivamente.



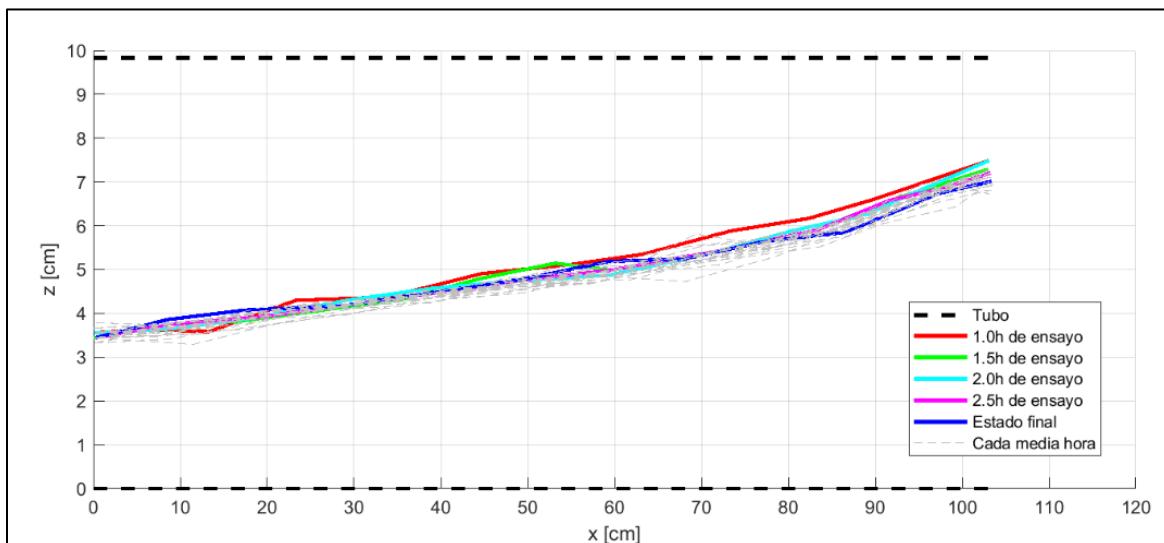
**Figura 4.23** Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.9



**Figura 4.24** Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.10



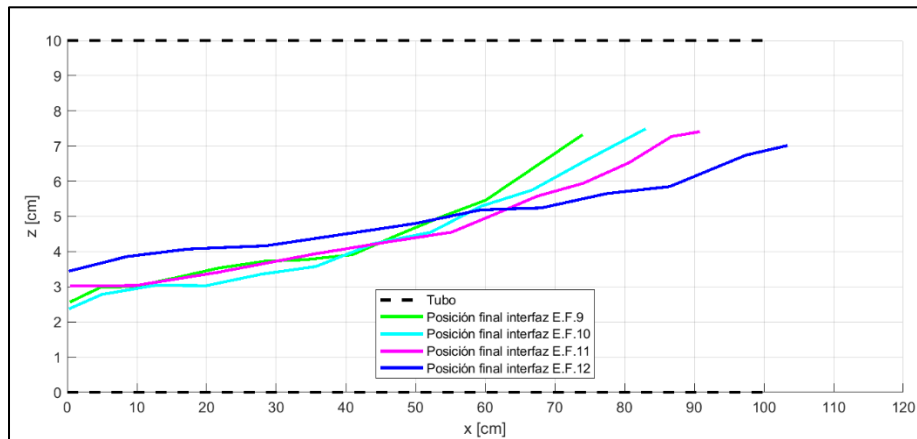
**Figura 4.25** Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.11



**Figura 4.26** Evolución de la interfaz en el tiempo destacando las primeras 2.5 [h] de ensayo, se incluye además el estado final de la interfaz en E.F.12

La primera observación cualitativa que se puede realizar a partir del seguimiento de la interfaz sólido-líquido en el tiempo a concentración de sólidos en peso de 55% es que en los ensayos en que no se registró altura libre (E.F.9 y E.F.10) la forma de la interfaz se podría ajustar de mejor forma a una función potencial y para los casos en que si se registró se seguiría proponiendo el ajuste lineal como el más cercano a las mediciones.

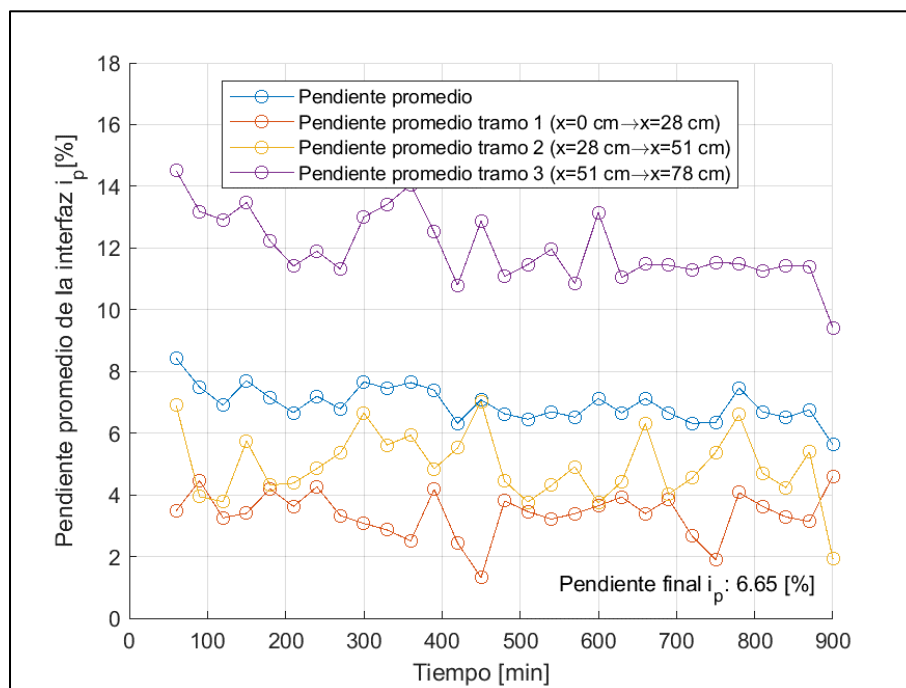
A modo comparativo de las posiciones finales de la interfaz en cada ensayo se construyó el gráfico presentado en Figura 4.27.



**Figura 4.27 Comparación de la posición final de interfaz sólido líquido de los ensayos a  $C_p = 55\%$**

En Figura 4.27, del mismo modo que para las concentraciones anteriores, cualitativamente ocurre que a medida que se va disminuyendo la pendiente del sistema  $i_s$ , la pendiente promedio final de la interfaz también disminuye. Respecto de la altura de la interfaz en la zona aguas arriba y aguas abajo del tubo también se observa que las curvas se cruzan a una distancia aproximadamente de 55 [cm], muy similar a lo que ocurrió con los ensayos a  $C_p = 60\%$ , sin embargo, los ensayos E.F.9 y E.F.10 no se ajustan exactamente a la tendencia producto de que sus curvas son muy parecidas y probablemente porque en ambos ensayos no hubo altura libre. Por último, se ve que al parecer tanto en E.F.9 como en E.F.10 existen 3 pendientes y en E.F.11 y E.F.12, 2 pendientes.

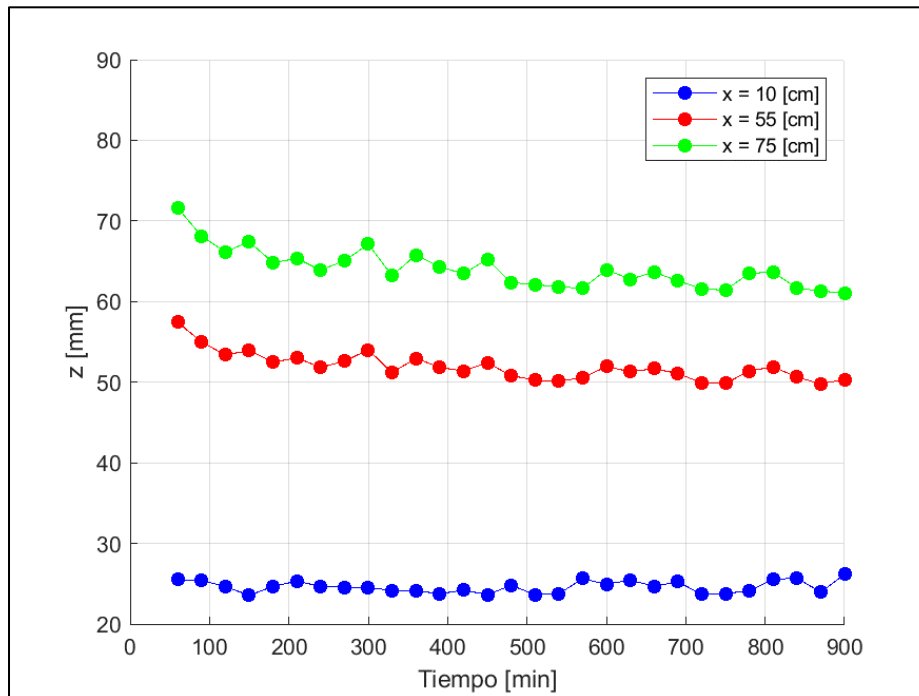
De igual forma que para los ensayos anteriores, se construyó una serie de tiempo para la pendiente de la interfaz, el resultado de ello para E.F.9 se expone en Figura 4.28. Los resultados de los ensayos E.F.10, E.F.11 y E.F.12 se muestra en, Figura 9.7, Figura 9.8 y Figura 9.9 del capítulo Anexos, respectivamente.



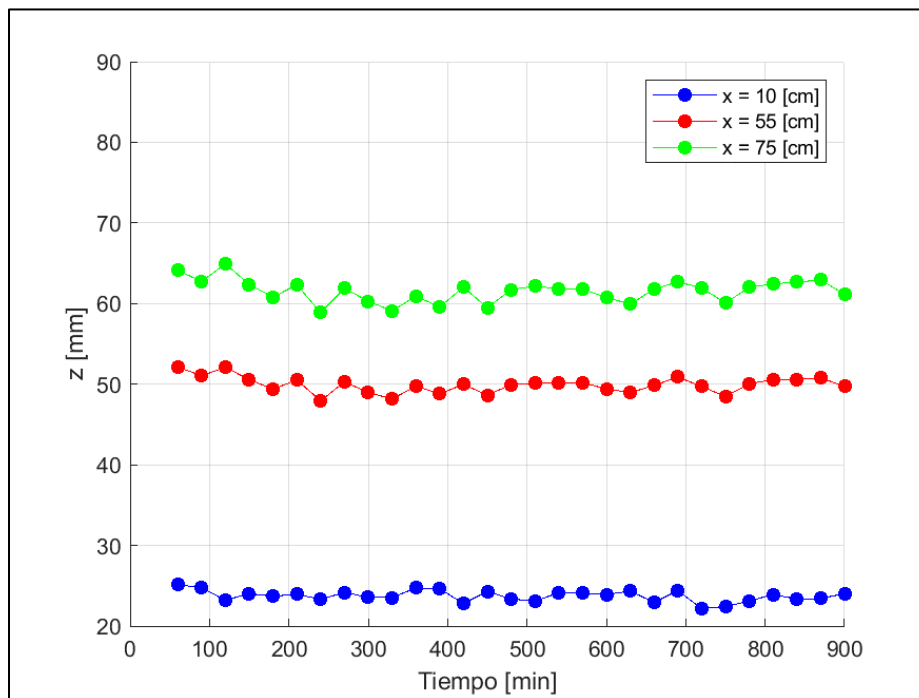
**Figura 4.28 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido  $i_p$  en función del tiempo para E.F.9**

A partir del análisis de la Figura 4.28 y sus análogas presentada en el capítulo Anexos (Figura 9.7, Figura 9.8 y Figura 9.9) se desprende que durante todos los ensayos a  $C_p = 55\%$  las pendientes de la interfaz de los tres tramos definidos en cada caso se diferenciaron bastante, siendo más pronunciada la diferencia entre ellas en pendientes del sistema altas. El cálculo de la pendiente promedio final de la interfaz  $i_p$  arrojó valores de 6.7%, 6.4%, 5.4% y 3.5% para E.F.9, E.F.10, E.F.11 y E.F.12, respectivamente. Sobre la variación de la pendiente de la interfaz a lo largo del ensayo se distingue una leve disminución de  $i_p$  al inicio de los ensayos E.F.9 y E.F.10 y en E.F.11 y E.F.12 se mantiene aproximadamente constante, al menos a partir de 1 [h], que fue cuando se comenzó el análisis. De hecho, en Figura 9.39, Figura 9.42, Figura 9.45 y Figura 9.48 del Anexo, donde el tercer cuadro corresponde a la imagen capturada luego de 30 [min] de ejecución del ensayo es posible notar que ya existen cambios en la interfaz.

La variación de la altura de la interfaz en el tiempo para las distintas coordenadas  $x$  ya definidas se presenta en Figura 4.29 y Figura 4.30 para E.F.9 y E.F.10, respectivamente. En el caso de, E.F.11 y E.F.12 se pueden revisar sus resaltos en Figura 9.14 y Figura 9.15 del capítulo Anexos, respectivamente.



**Figura 4.29** Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.9



**Figura 4.30** Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.10



En Figura 4.29, Figura 4.30 y Figura 9.14 (ver capítulo Anexos), tal como en los ensayos a  $C_p = 65\%$ , es posible notar que la velocidad de descenso de la interfaz aguas arriba del tubo fue mayor que el mismo parámetro en la zona aguas abajo del tubo, en el caso de E.F.12 (Figura 9.15 del capítulo Anexos) el cálculo de la altura de la interfaz en el tiempo fue aproximadamente constante durante todo el período de análisis.

**Tabla 4.4 Resultados de granulometría láser de las muestras extraídas al terminar cada ensayo a  $C_p = 55\%$**

Ensayo	Punto	Altura h [cm]	D10 [ $\mu\text{m}$ ]	D50 [ $\mu\text{m}$ ]	D80 [ $\mu\text{m}$ ]
<b>E.F.9 (<math>i_s = 20\%</math>)</b>	1	7.5	6.54	64.14	150.5
	2	5	9.03	86.01	177.1
	3	2.5	7.84	64.92	133.8
<b>E.F.10 (<math>i_s = 15\%</math>)</b>	1	7.5	8.42	55.88	117.4
	2	5	9.86	77.91	166.1
	3	2.5	10.1	109.8	206.8
<b>E.F.11 (<math>i_s = 10\%</math>)</b>	1	7.5	4.81	28.68	62.53
	2	5	9.62	65.96	139.2
	3	2.5	5.57	58.22	154.5
<b>E.F.12 (<math>i_s = 5\%</math>)</b>	1	7.5	2.56	9.85	20.2
	2	5	4.12	25.38	55.27
	3	2.5	9.88	85.02	178.3
<b>Granulometría muestra completa</b>	-	-	3.75	25.3	66.1

La primera observación general del análisis granulométrico efectuado durante los ensayos a  $C_p = 55\%$  es que existió mucha más segregación en los tres diámetros característicos en comparación a los demás ensayos. Sin embargo, en D10 esta segregación fue leve probablemente debido al mecanismo de percolación ya mencionado en los análisis anteriores. En el caso de D50 ocurrieron 2 comportamientos diferentes, por una parte, E.F.10 y E.F.12 presentaron diámetros más pequeños en el punto 1 (zona superior de la capa de sólidos) y diámetros mayores en el punto 3 (zona inferior de la capa de sólidos), por otra parte, las muestras de E.F.9 y E.F.11 mostraron que el punto más fino era el 1 y el punto más grueso el 2. El análisis de D80 entregó estos mismos dos comportamientos como resultado de los mismos ensayos.

En este caso, se observan diámetros característicos mayores a los resultantes de la granulometría completa.



## 5. Análisis y discusión de resultados

Tal como se mencionó anteriormente en los resultados de los ensayos por  $C_p$  existe una tendencia a la disminución del tiempo de estabilización de los ensayos a medida que se disminuye la concentración. Teóricamente, existen dos parámetros que afectan el tiempo de sedimentación de mezclas concentradas: en primer lugar, la concentración de sólidos de la pulpa y por otra parte la viscosidad, que en este caso se modifica producto de modificar la concentración. En cuanto a la viscosidad, un estudio anterior dice que ésta controla la escala de tiempo sobre la cual se establece la morfología de la interfaz (Palma et al., 2016): una menor viscosidad va a provocar que el ensayo llegue más rápido a su condición estacionaria. En cuanto a la concentración de sólidos, está comprobado que una concentración de partículas más baja produce que la sedimentación de partículas sólidas sea más rápida (ver Figura 2.13), dado que las partículas tienen más libertad para moverse. Como al disminuir la concentración, la viscosidad de la pulpa disminuye y teóricamente la sedimentación de partículas es más rápida se esperaba que el tiempo de estabilización de los ensayos también disminuyera, lo que efectivamente ocurrió. Por ejemplo, si se observa la evolución de los ensayos en la curva roja de cada ensayo, correspondiente a 1 [h] de ejecución, junto con la imagen capturada en ese momento, tanto a  $i_s = 20\%$  (Figura 5.1) como  $i_s = 15\%$  (Figura 5.2),  $i_s = 10\%$  (Figura 5.3) e  $i_s = 5\%$  (Figura 5.4) se ve que la producción de fluido claro fue mucho mayor en el ensayo a  $C_p = 55\%$ , y más baja a  $C_p = 65\%$ , obteniendo una condición intermedia en el ensayo a  $C_p = 60\%$ . En las mismas 4 figuras se puede notar que la forma de la interfaz evoluciona de una tendencia más lineal a una potencial, acorde a lo que se señaló al inicio de este capítulo.

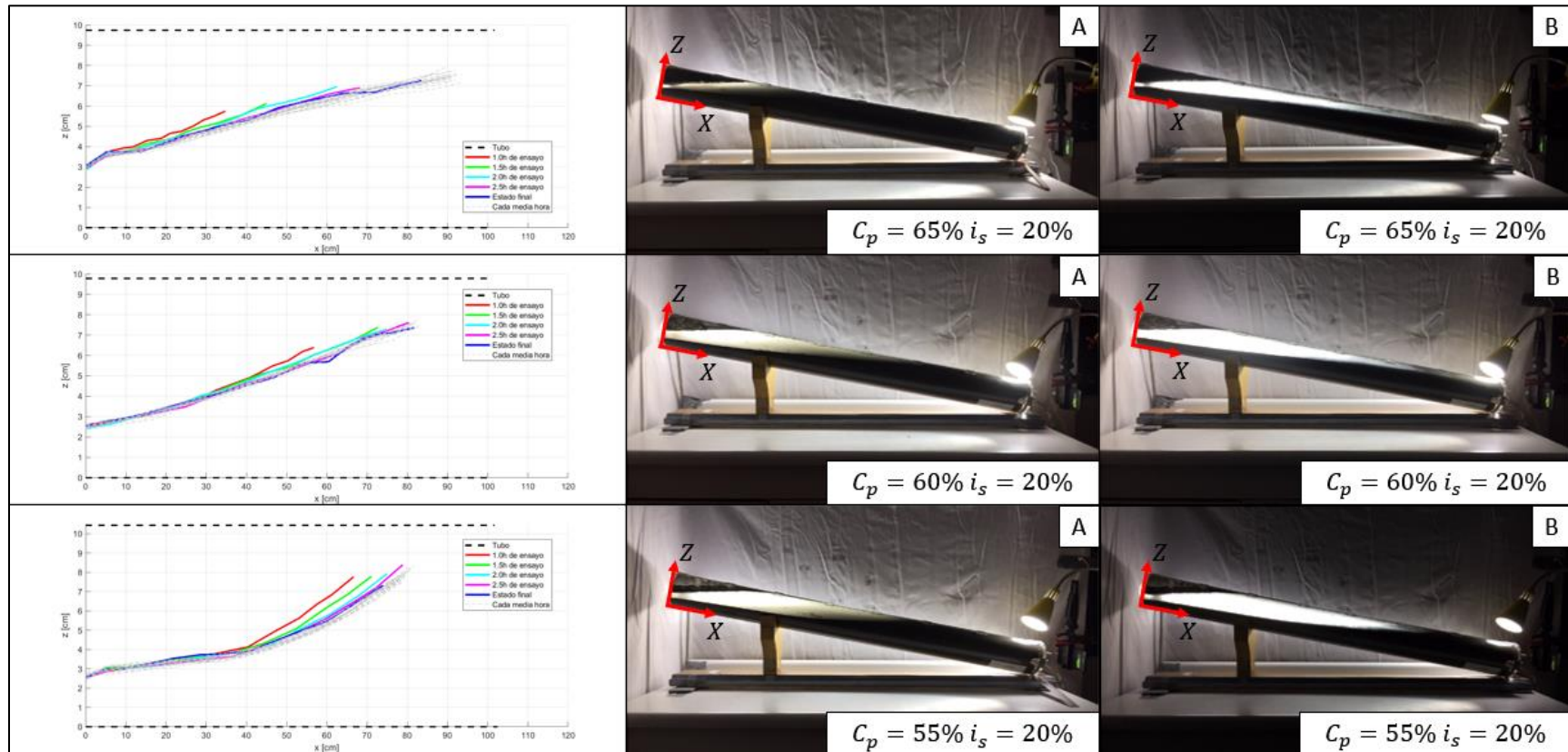


Figura 5.1 Producción de líquido clarificado a 1 [h] de ensayo (A) para E.F.1, E.F.5 y E.F.9 y estado final de los mismos ensayos (B)

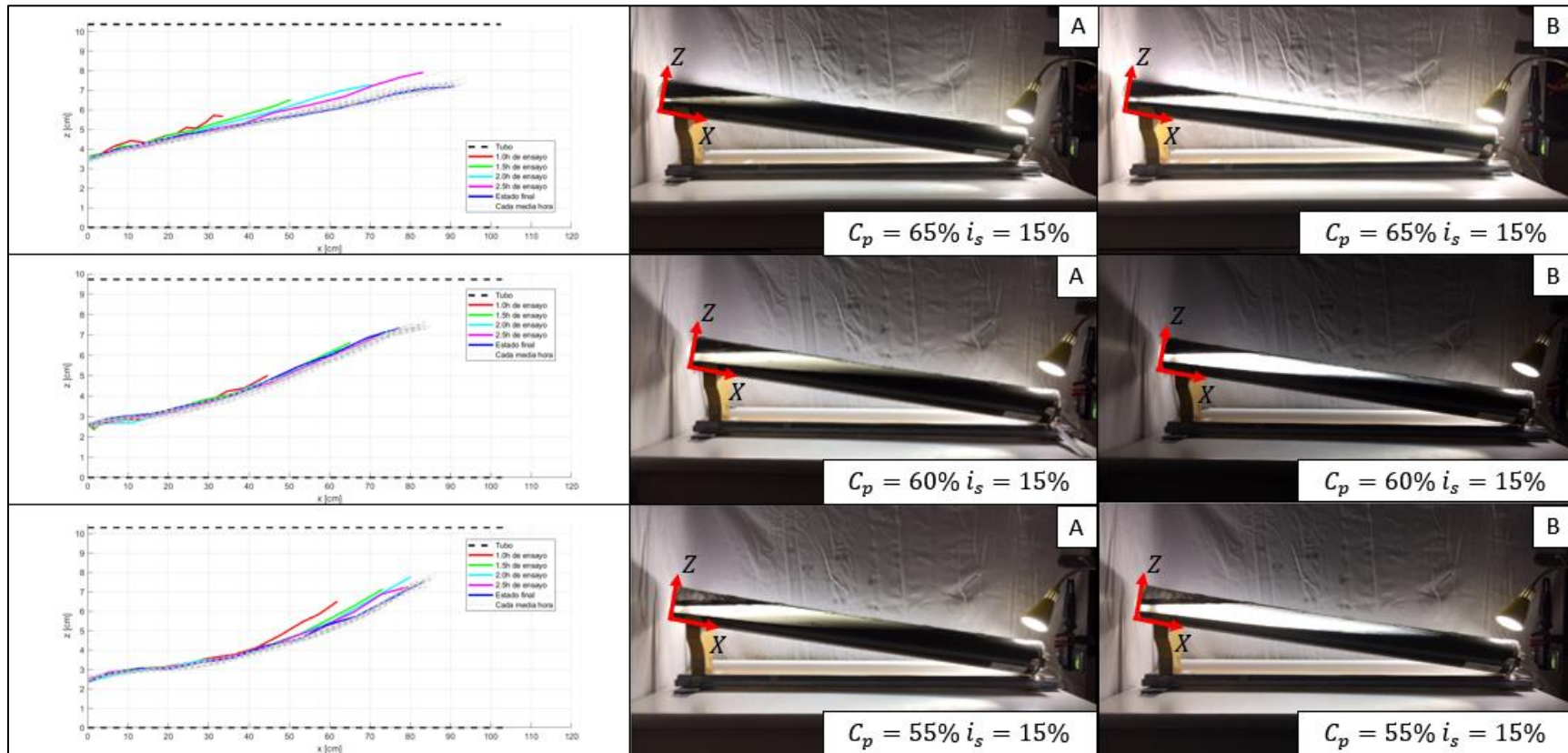


Figura 5.2 Producción de líquido clarificado a 1 [h] de ensayo (A) para E.F.2, E.F.6 y E.F.10 y estado final de los mismos ensayos (B)

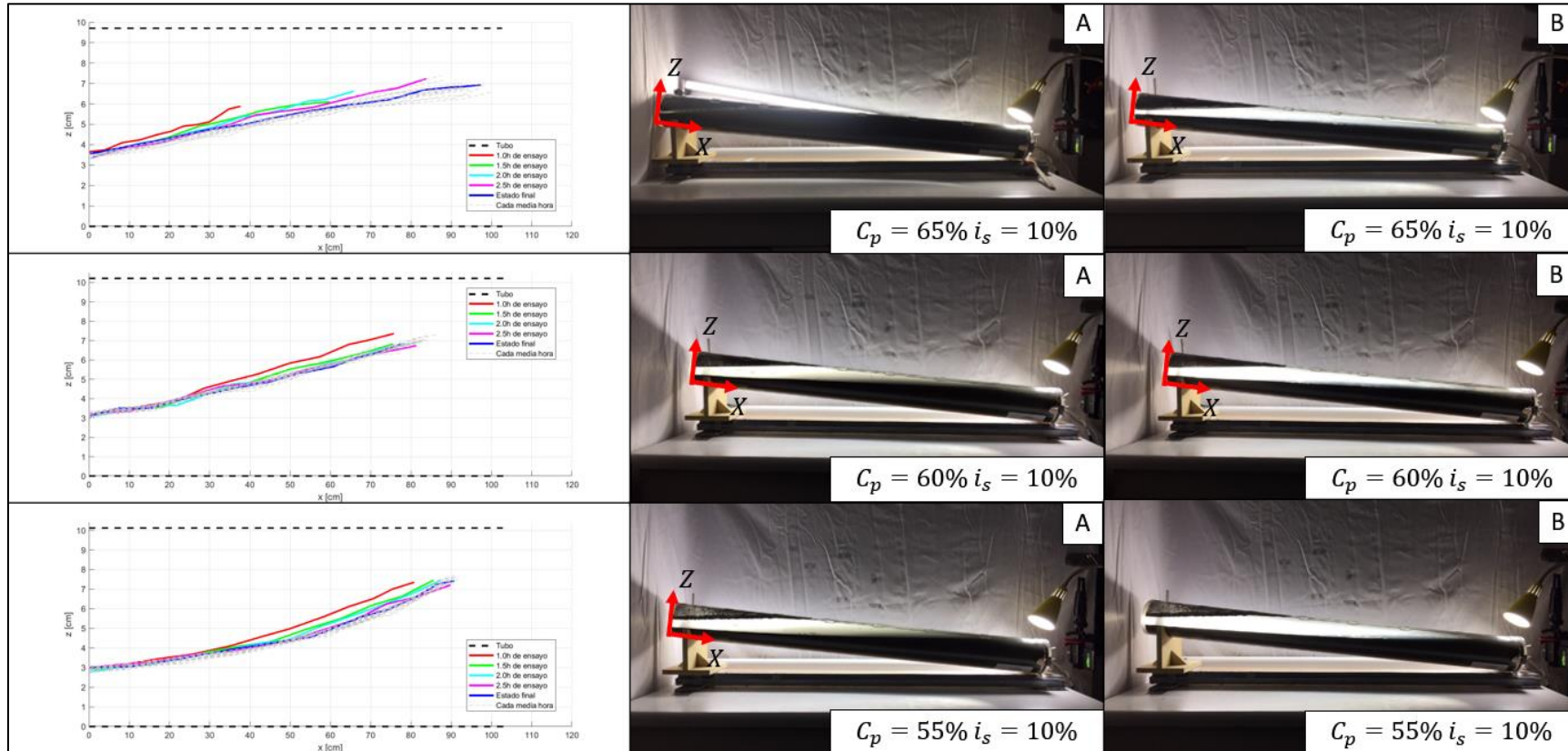


Figura 5.3 Producción de líquido clarificado a 1 [h] de ensayo (A) para E.F.3, E.F.7 y E.F.11 y estado final de los mismos ensayos (B)

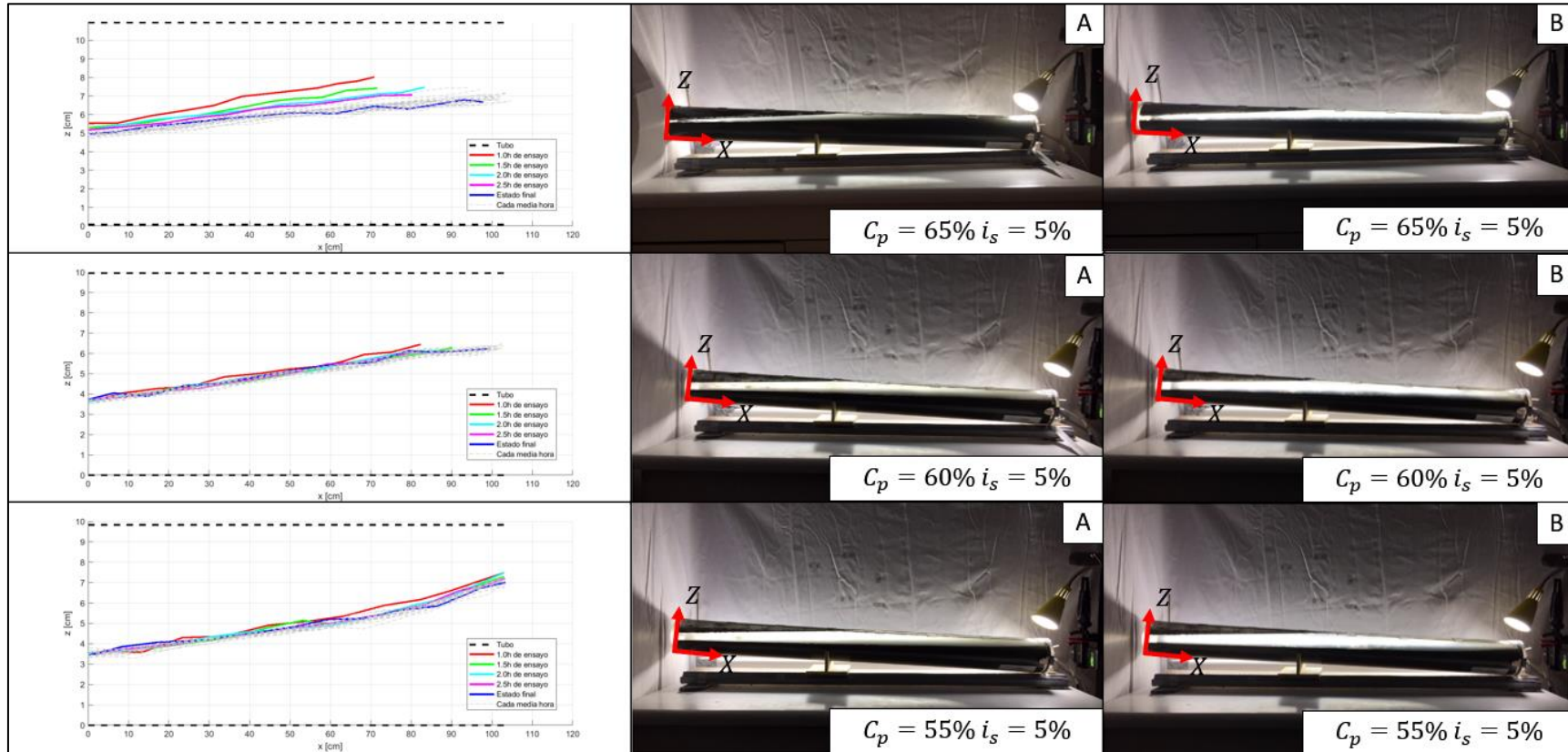
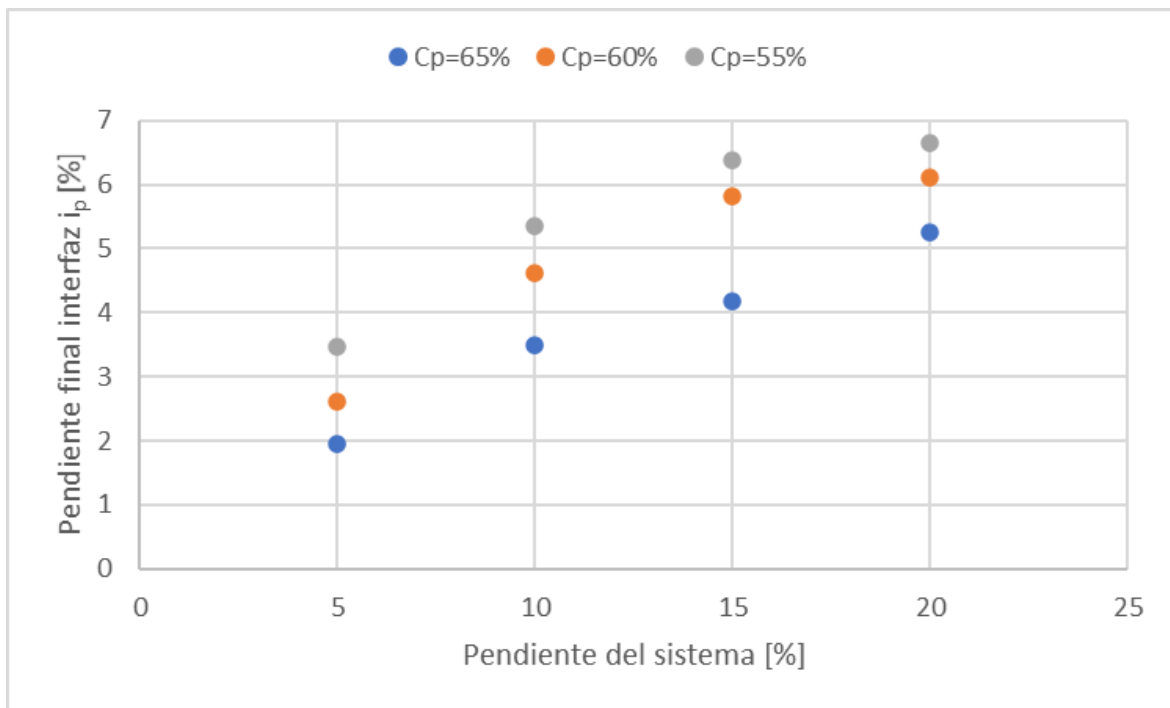


Figura 5.4 Producción de líquido clarificado a 1 [h] de ensayo (A) para E.F.4, E.F.8 y E.F.12 y estado final de los mismos ensayos (B)

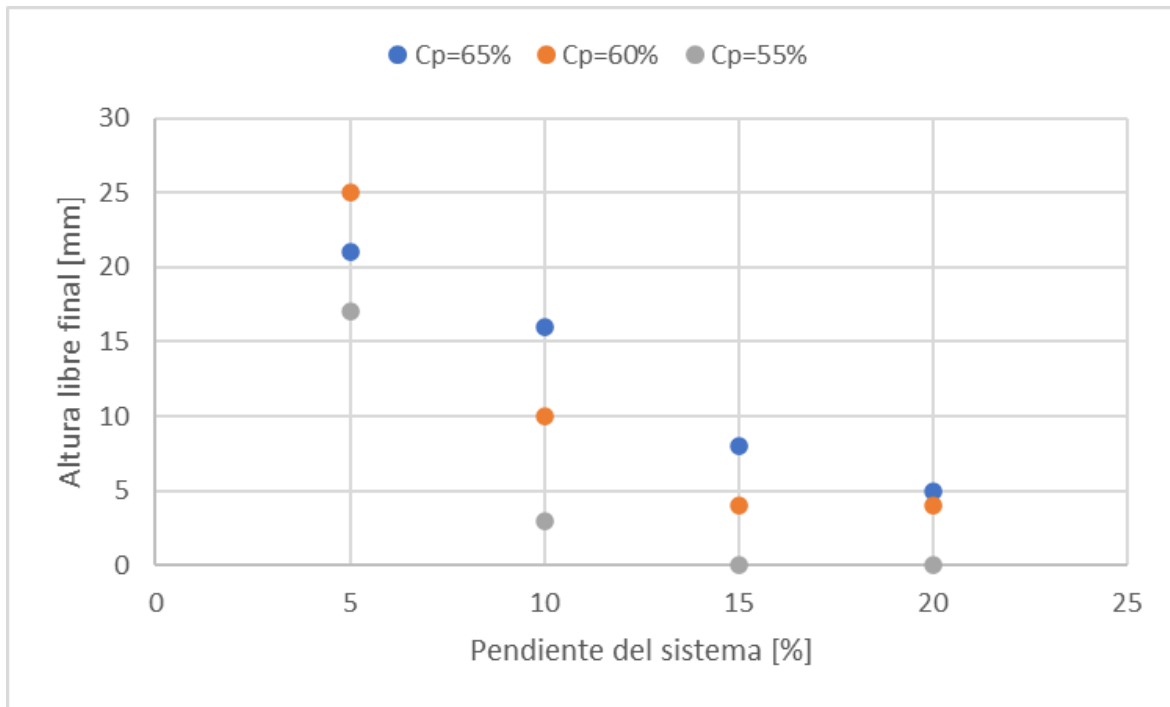
El análisis granulométrico de las 3 muestras extraídas en cada ensayo no permitió detectar claramente cuáles eran las características del material que estaba migrando hacia la zona aguas abajo del tubo, pero si se pudieron apreciar algunas características. Tomando como referencia la granulometría de la muestra completa, es fácil ver que a medida que la concentración de sólido disminuye, la granulometría de las muestras, en general, se hace más gruesa.

Otra característica compartida en los resultados granulométricos de las 3 concentraciones en peso analizadas es que no se observó mayor segregación del diámetro característico  $D_{10}$  en toda la altura del lecho de sólidos. Como ya se mencionó, esta observación concuerda con el mecanismo de sedimentación de partículas polidispersas investigado por Cotroneo (Cotroneo, 2015), donde el fenómeno de percolación de finos se encuentra presente y más claro en pendientes inclinadas. Si se piensa en sedimentación de partículas en contenedores verticales, se esperaría encontrar una distribución de partículas más fina en la zona superior del estrato sedimentado y más gruesa en la zona inferior. Esto ocurre aproximadamente para todos los diámetros característicos a  $C_p = 65\%$  y a  $C_p = 55\%$  en  $i_s = 5\%$ . Sin embargo, a  $C_p = 55\%$  y pendientes altas se ve que el material más grueso se encuentra en los puntos 2 y 3 del lecho de sólidos, es decir en la zona central y/o inferior. Una hipótesis respecto de esta distribución es que el aporte de material sólido desde aguas arriba del tubo generó una alteración en esta distribución y al poseer mayor energía para moverse desde aguas arriba a aguas abajo que las partículas finas, llegó primero aguas abajo y generó esta particularidad.

Una visión general de los resultados y cálculos efectuados a partir de los 12 ensayos presentados en esta investigación se resume en Figura 5.5 y Figura 5.6.



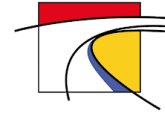
**Figura 5.5** Pendiente final de la interfaz  $i_p$  en función de la pendiente del sistema  $i_s$  para las concentraciones analizadas



**Figura 5.6** Altura libre final en función de la pendiente del sistema  $i_s$  para las concentraciones analizadas

Las dos tendencias principalmente detectadas respecto de la variación de la pendiente del sistema y de la concentración son:

- Pendiente del sistema  $i_s$ :** como ya se vislumbró anteriormente, en todos los ensayos al aumentar la pendiente del sistema  $i_s$  también aumentó la pendiente de la interfaz sólido-líquido con respecto al fondo del tubo. Por lo tanto, aumentar la pendiente del sistema genera una situación más desfavorable en concentraductos ante detenciones, como la pendiente final de la interfaz corresponde a un promedio, es conveniente analizar lo que ocurrió con las alturas libres finales medidas directamente al finalizar cada ensayo. Estas mediciones mantienen la tendencia señalada, dado que para todas las concentraciones al aumentar  $i_s$  la altura libre, en términos generales, disminuye. Por otra parte, en Figura 5.5 se aprecia un aumento más rápido de la pendiente de la interfaz para pendientes del sistema entre 5% y 15% y más suave entre 15% y 20%. La tendencia general encontrada se debe a que al imponer una pendiente más alta al sistema, se provee de mayor energía potencial a las partículas en la zona aguas arriba del tubo, que posteriormente se transformará en la energía cinética que les permite transportarse hacia aguas abajo (migración). Por otra parte, la disminución de la tasa de aumento de la pendiente de la interfaz puede ser debida a que cuando aguas abajo del tubo se registra nula o casi nula altura libre, producto de las limitaciones físicas que imponen las paredes del tubo, se genera una cuña que tiene cada vez menos capacidad de recibir aporte de material sólido desde aguas arriba.
- Concentración de sólidos en peso  $C_p$ :** respecto de este parámetro la tendencia detectada fue que al aumentar el  $C_p$ , la pendiente final de la interfaz disminuyó y la altura libre medida al



final de cada ensayo aumentó. En consecuencia, aumentar la concentración en peso de la pulpa, genera una situación más favorable en conductos, desde el punto de vista de la migración de partículas. Los resultados obtenidos concuerdan con lo informado por diversos autores referente al fenómeno de sedimentación obstruida que se presentó en el capítulo de Revisión Bibliográfica, donde se expuso que la teoría indica que una concentración de sólidos más baja genera sedimentaciones más rápidas, es decir, es más fácil para las partículas sedimentar y por lo visto en los resultados de estas experimentaciones también migrar.

Una particularidad detectada en la variación de la altura final con la pendiente del sistema (Figura 5.6) es que a la pendiente del sistema de 5% no se respeta por completo la tendencia descrita respecto de la concentración de sólidos. En sedimentación de partículas en conductos verticales ocurre que se genera mayor altura libre a concentraciones de sólidos más bajas, dado que hay menos partículas sólidas, para la pendiente del sistema más baja (5%) se podría esperar un comportamiento parecido al descrito, dado que el valor de la pendiente es casi nulo y no se pensaría que ocurriera migración. No obstante, los resultados muestran que no es así, esto queda comprobado con la pendiente que toma la interfaz al finalizar el ensayo E.F.12 que fue  $i_p = 3.48\%$ , es decir, hubo una leve acumulación de material sólido hacia aguas abajo del tubo.

En Tabla 5.1, donde se procedió a ordenar los resultados de los ensayos desde el caso más favorable al más desfavorable en cuanto a migración, de acuerdo con el criterio de la altura libre medida al final de cada ensayo, se puede ver que E.F.12 corresponde al tercer ensayo más favorable categorizado de acuerdo con dicho criterio, por lo tanto, se podría inferir que bajo estas condiciones el riesgo operacional sería bastante bajo.

**Tabla 5.1 Resultados ensayos formales ordenados desde la mayor altura libre final a la menos altura libre final**

Ensayo	$C_p$ [%]	Pendiente del sistema $i_s$ [%]	Pendiente final de la interfaz $i_p$ [%]	Altura libre final [mm]
E.F.8	60	5	2.61	25
E.F.4	65	5	1.96	21
E.F.12	55	5	3.48	17
E.F.3	65	10	3.49	16
E.F.7	60	10	4.63	10
E.F.2	65	15	4.18	8
E.F.1	65	20	5.25	5
E.F.6	60	15	5.83	4
E.F.5	60	20	6.11	4
E.F.11	55	10	5.36	3
E.F.10	55	15	6.38	0
E.F.9	55	20	6.65	0

A partir de la Tabla 5.1 se desprende que el comportamiento más desfavorable frente a migración de partículas dentro del rango de pendientes del sistema y concentraciones exploradas se encuentra dominado por la concentración de sólidos más baja (últimas tres filas) y la condición más favorable por la pendiente del sistema más baja (primeras tres filas).



## 6. Conclusiones

En este trabajo se estudió experimentalmente el fenómeno de migración de partículas sólidas, utilizando concentrado de cobre de un yacimiento minero. Específicamente se analizó el efecto de variar la concentración de la pulpa y la pendiente del sistema en la disposición final de las partículas sólidas de la pulpa.

En primer lugar, se implementó un sistema de almacenamiento y procesamiento de datos para poder visualizar de buena manera el fenómeno de migración de partículas de concentrado de cobre dentro del ensayo de ángulo de reposo, pero adaptable a otros escenarios.

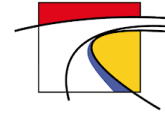
A partir de los 12 ensayos ejecutados se determinó que, tanto la pendiente del sistema como la concentración de sólidos, influyen en la morfología de la capa de sedimento formada al finalizar el proceso de sedimentación en pendiente inclinada, tal como ya se había vislumbrado en trabajos anteriores. Dentro de las características de ensayo estudiadas, considerando como parámetro de control la altura libre final, se encontró que la condición más desfavorable se encuentra dominada por la concentración de sólidos más baja, mientras que la condición más favorable por la pendiente del sistema más baja.

Las posibilidades de modificar estas dos variables en un concentrado son limitadas, dado que la concentración de sólidos es una variable operacional que busca ser maximizada para manejar el recurso agua, pero que si permite hacer ajustes con el fin de limitar la concentración mínima. En cuanto a la pendiente del sistema, por ser una variable de diseño, una vez que el concentrado está construido es muy difícil de modificar, principalmente por el tiempo y costo que eso conllevaría. En consecuencia, a la hora de diseñar concentrados se debe tener especial cuidado con la pendiente del trazado como variable de diseño.

El seguimiento de los ensayos con captura de imágenes y su posterior procesamiento, permitieron realizar una descripción del mecanismo de migración. Se pudo apreciar que luego de agitar la pulpa de concentrado de cobre dentro del tubo de ensayo, en la zona aguas arriba del tubo es donde primero se ve producción de líquido claro, ya que mientras las partículas sedimentan verticalmente, una parte de ellas se desplaza en forma paralela por la interfaz sólido-líquido hacia aguas abajo producto de la pendiente del sistema. Debido al aporte de material sólido que existe desde aguas arriba hacia aguas abajo, la producción de líquido claro aguas abajo del tubo comienza en forma retardada.

El análisis granulométrico no permitió detectar una tendencia clara respecto de qué tipo de material es el que se desplaza hacia aguas abajo de la tubería. Sin embargo, permitió visualizar 2 aspectos: el primero, que la granulometría se va haciendo más gruesa a medida que disminuye la concentración de sólidos; y el segundo corresponde a la alteración de la granulometría que se esperaría en sedimentación en contenedores verticales, producto del aporte de material desde aguas arriba del tubo. Que la granulometría sea más gruesa implica que se requerirá mayor energía para poder refluidizar este material, en consecuencia, en conjunto con menores alturas libres registradas a concentraciones más bajas, hace que estos escenarios operacionales sean aún más riesgosos.

El escalamiento de estos resultados a nivel industrial no es posible con la cantidad y características de los ensayos efectuados, principalmente por la geometría del tubo, dado que a nivel industrial hay



dos variables que se deben tomar en cuenta: la longitud de la zona con pendiente alta y el diámetro de la tubería. Sin embargo, pensando en la mecánica del fenómeno se podría inferir que aumentar el diámetro y/o largo del tubo aumentaría el tiempo de estabilización de la interfaz, dado que tanto el diámetro como el largo del tubo forman parte de la trayectoria que recorren las partículas que migran hacia el fondo de la tubería. En los ensayos efectuados, el tiempo de estabilización registrado fue entre 2.6 [h] y 7 [h]. En consecuencia, para mayores dimensiones de un concentrado se esperaría que los tiempos registrados fueran mayores a los mencionados.

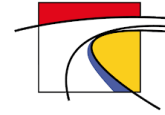
Además, en el capítulo 9.5 del Anexo, donde se incluye la evolución del ensayo en su vista transversal, se puede notar que la forma que toma la interfaz se ve influenciada por la condición de borde de la cañería, condición más influenciada para los casos en que la altura libre es pequeña, y menos influenciada (superficie más horizontal) para los casos en que la altura libre aumenta. A gran escala, no se tiene certeza de que esta influencia de los bordes siga siendo notoria.

Por último, al aumentar el largo del tubo, existe la posibilidad de que la pendiente que tome la interfaz sólido-líquido en un tubo más grande sea la misma o mayor, dado que existe la limitación física que imponen las paredes del tubo, en cuyo caso correspondería a una situación más desfavorable, porque al aumentar la longitud de material aportante hacia la zona aguas abajo del tubo, la longitud donde no se encontraría altura libre sería mayor, por lo tanto, se generaría un tapón de material. Con el paso del tiempo, este tapón podría tender a compactarse y aumentar las posibilidades de generar un embanque. No obstante, esto se contrarresta con el hecho de que los ensayos efectuados consideran la condición de borde de no flujo aguas debajo de la tubería (por restricción física), que contribuye a mayor acumulación de sólidos en dicho punto (Palma et al., 2018). En condiciones operacionales normales esta restricción no existiría.

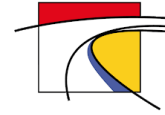
Con la cantidad de ensayos efectuados no es posible proponer una expresión que determine la pendiente máxima de un concentrado a partir de las características de la pulpa, pero en caso de que se pudieran agregar ensayos a este estudio, se debería incluir como mínimo la concentración de sólidos de la pulpa, que impactará directamente tanto en la reología de la pulpa como en su velocidad de sedimentación y además incluir la geometría del tubo por las razones ya expuestas. Otras variables que no fue posible evaluar en este estudio, son la granulometría de las partículas de concentrado y la gravedad específica de sólidos, que también influyen en la velocidad de sedimentación de la pulpa. No obstante, variar estas propiedades físicas implicaría contar con concentrado de cobre proveniente de diferentes yacimientos mineros. No obstante, se podrían hacer estudios similares con otro tipo de pulpas, por ejemplo: relaves gruesos, relaves finos o con arcillas, concentrados de hierro, etc. con el fin de ver cómo afectan sus diferentes granulometrías y gravedades específicas en las tendencias detectadas en este estudio.

Respecto de la recomendación de pendiente máxima utilizada actualmente, bajo las condiciones empleadas en estos ensayos no parece ser muy conservadora, dado que a  $C_p = 55\%$  e  $i_s = 15\%$  no se registró altura libre aguas abajo del tubo. Pero tal como se mencionó anteriormente, los resultados de este trabajo tienen varias limitaciones en cuanto a la geometría y la pulpa empleada, en consecuencia, este análisis debería ser complementado con estudios tales como los que se describieron.

Finalmente, como conclusión general, este estudio más que responder a los cuestionamientos que había en torno a la migración de partículas, entregó algunas herramientas para comprender mejor el



fenómeno y abrió más interrogantes muy interesantes de estudiar y relevantes para la operación minera. Tales como la importancia de la definición de una concentración crítica para la pendiente máxima del trazado y la necesidad de estudiar el escalamiento de estos resultados a nivel industrial, aspecto que se describe con mayor detalle en el capítulo Recomendaciones.



## 7. Recomendaciones

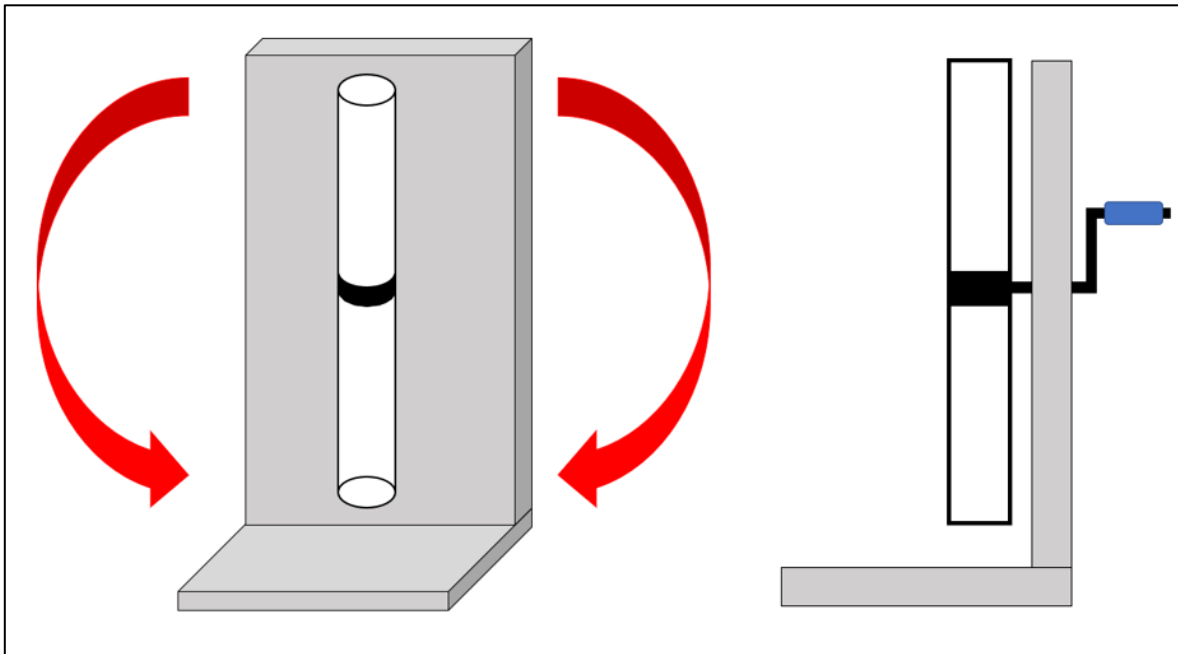
Las conclusiones obtenidas permiten identificar algunas oportunidades para futuros trabajos, así como también algunas mejoras en el método de ensayo utilizado actualmente.

El escalamiento de estos resultados a nivel industrial constituye una oportunidad para futuros estudios del fenómeno migratorio, producto de que no sería necesario evaluar a mayor escala, todas las combinaciones de pendiente del sistema y concentración de sólidos ya presentadas para poder extrapolar los resultados. Por ejemplo, ya que para pendientes del sistema entre 10% y 20% la tendencia en cuanto a altura libre y pendiente de la interfaz se mantuvo, se podría probar evaluar las pendientes extremas de este rango (10% y 20%) y ver si la tendencia es la misma, en caso de que existieran dudas se tendría que evaluar la pendiente intermedia de 15%. Respecto de la concentración de sólidos también propondría considerar las dos concentraciones extremas de este estudio para verificar si se generan bandas de resultados como las de Figura 5.5 y Figura 5.6.

No obstante, se debe tener en cuenta que la metodología de ensayo existente, si bien entrega el resultado final de la altura libre que permite concluir si el resultado del ensayo es favorable o desfavorable según la bibliografía y procedimiento de ensayo actual, se podría mejorar. Primero, pensando en los mismos materiales que se utilizan actualmente, a modo de hacer más eficiente el procedimiento de ensayo, se podría disminuir el tiempo de ejecución de cada prueba, dado que las condiciones exploradas mostraron estabilizarse mucho antes de 24 [h]. Con base en los resultados presentados, el tiempo de ejecución de los ensayos se podría disminuir a 8 [h], dentro de los parámetros estudiados.

Se recomienda modificar el método de agitación del tubo, fundamentalmente por el grado de riesgo que representa (masa del tubo cargado de aproximadamente 15 [kg]) el proceso de agitación actual y el grado de variabilidad, dado que como es un proceso manual, depende de la fuerza que aplique la persona que manipula el tubo. Además, con el fin de describir de mejor forma el fenómeno migratorio de partículas se podría implementar un sistema de monitoreo automatizado del ensayo, tal como el presentado en este trabajo o incluso más sofisticado.

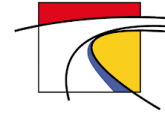
Para modificar el método de agitación actual de la pulpa, considerando el tubo de ensayo que se emplea actualmente, se podría implementar un mecanismo de anclaje del tubo a una plataforma fija, tal como se indica en Figura 7.1.



**Figura 7.1 Esquematización de un posible nuevo mecanismo de agitación del tubo de ensayo ángulo de reposo y re suspensión**

En el escenario ideal este mismo ensayo se debería realizar a escala industrial o con dimensiones intermedias (por ejemplo, en *loops* de pilotaje), de modo de escalar los resultados a nivel industrial y poder comprobar si los escenarios planteados antes, efectivamente ocurrirían en la detención de un concentrado de cobre. Si esta propuesta se concretara sería muy fructífero que las condiciones emularan la operación minera en cuanto al nivel de agitación que se requiere para mantener homogéneas las propiedades de la pulpa impulsada.

Otra arista que se puede estudiar dentro del mismo campo corresponde a la capacidad de los equipos de bombeo empleados en concentrados, generalmente bombas de desplazamiento positivo, es decir, se podría pensar en la presión máxima que debe entregar un equipo de bombeo para poder remover un tapón de sólidos de una longitud específica, en caso de que una detención sea prolongada y la consecuente migración de partículas sea inevitable. En esta situación, la resistencia friccional al movimiento de la zona donde hay tapones es mayor a la fricción presente en operación normal. Es decir, en primer lugar, se debería calcular el esfuerzo de corte que ejerce el tapón sobre las paredes del tubo que dependerá tanto de la geometría como de las propiedades físicas del tapón, y a partir de ello calcular la fuerza o presión necesaria en la cara del tapón para que pueda deslizarse respecto de las paredes del tubo. Luego, esta presión se podría comparar con la presión que entregaría una bomba de desplazamiento positivo comúnmente utilizada en concentrados. Sin embargo, esto se debería complementar con un análisis económico de las alternativas.

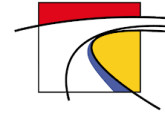


## 8. Referencias

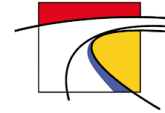
- Abulnaga, B. (2002). *Slurry Systems Handbook*. McGraw Hill Professional.
- Acrivos, A., & Herbolzheimer, E. (1979). Enhanced sedimentation in settling tanks with inclined walls. *Journal of Fluid Mechanics*, 92(3), 435–457.
- Alger, G., & Simons, D. (1968). Effect of Shape on the Fall Velocity of gravel particles. *Journal of the Hydraulics Division*, 94(3), 721–738.
- Ancey, C. (2005). *Notebook Introduction to Fluid Rheology*. Laboratoire Hydraulique Environnementale, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Barnea, E., & Mizrahi, J. (1973). A generalized approach to the fluid dynamics of particulate systems. Part 1. General correlation for fluidization and sedimentation in solid multiparticle systems. *The Chemical Engineering Journal*, 5(2), 171–189.
- Batchelor, G. K. (1967). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1960). *Transport Phenomena, Cap. 3* (J. Wiley (ed.); Vol. 3, Número 2). <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Bouguet, J.-Y. (2013). *Camera calibration toolbox for Matlab (Computer software)*. [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/index.html](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html)
- Boycott, A. E. (1920). Sedimentation of Blood Corpuscles. *Nature*, 532.
- Bragança, A. C., & Silva, T. A. (2007). Alternative to Lime as a Rheology Modifier in the Transport of Iron Ore Slurry by the Samarco Pipeline. *HYDROTRANSPORT 17 - The 17th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids*, 29–38.
- Bürguer, R., & Wendland, W. L. (2001). Sedimentation and suspension flows: Historical perspective and some recent developments. *Journal of Engineering Mathematics*, 41, 101–116.
- Carrasco, C., & Vega, P. (2011). *Una Aproximación a las Condiciones de Trabajo en la Gran Minería de Altura* (C. LÓPEZ (ed.)). Dirección del Trabajo, Gobierno de Chile.
- Centro de Investigación JRI S. A. (2019). *Ensayo Ángulo de Reposo-Re Suspensión*. Sistema de Gestión.
- Centro de Investigación JRI S. A. (2020). *Penetrometría*.
- COCHILCO. (2019). *Producto Interno Bruto por Clase de Actividad Económica*. <http://www.cochilco.cl:4040/boletin-web/pages/tabla13/buscar.jsf>
- Corey, A. (1949). *Influence of shape on the fall velocity of sand grains*. Colorado State University.
- Cotroneo, J. (2015). *Estudio experimental de la sedimentación de mezclas sólidos-líquida polidispersas en planos inclinados*. Universidad de Chile.
- Davis, R. H., & Acrivos, A. (1985). Sedimentation of noncolloidal particles at low Reynolds numbers. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 17, 91–118.



- Fernández, B. (2013). *Introducción a la Mecánica de Fluidos* (cuarta edi). Ediciones UC.
- Fuentes, R. (2011). *Curso Reología de Pulpas*.
- García, M., & Maza, J. A. (1998). Origen y Propiedades de los Sedimentos. En *Manual de Ingeniería de Ríos*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
- Guazzelli, É., & Hinch, J. (2011). Fluctuations and instability in sedimentation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 43, 97–116.
- Happel, J., & Brenner, H. (1983). *Low Reynolds Number hydrodynamics* (R. J. MOREAU (ed.)). Martinus Nijhoff Publishers.
- Herbolzheimer, E., & Acrivos, A. (1981). Enhanced sedimentation in narrow tilted channels. *Journal of Fluid Mechanics*, 108, 485–499.
- Heywood, H. (1938). Measurement of the Fineness of Powdered Materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 140(1), 257–347.
- Hill, W. D., Rothfus, R. R., & Li, K. (1977). Boundary-enhanced sedimentation due to settling convection. *International Journal of Multiphase Flow*, 3(6), 561–583.
- Ihle, C. F. (2014). Should Maximum Pressures in Ore Pipelines be Computed Out of System Startups or Power Outages? *Minerals Engineering*, 55, 57–59. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.006>
- Ihle, C., Tamburino, A., Ulloa, H., & Betinol, R. (2010). Pruebas de Laboratorio para Determinar Factores de Riesgo en Repartidas de Mineroducto. *VII Congreso de Concentraductos, Mineroductos, Relaveductos y Acueductos FLUIMIN*.
- Jaeger, H. M., Nagel, S. R., & Behringer, R. P. (1996). Granular solids, liquids, and gases. *Reviews of Modern Physics*, 68(4), 1259–1273.
- Kapoor, B., & Acrivos, A. (1995). Sedimentation and sediment flow in settling tanks with inclined walls. *Journal of Fluid Mechanics*, 290, 39–66.
- Krieger, I. M. (1972). Rheology of Monodisperse Latices. *Advances in Colloid and Interface Science*, 3(2), 111–136.
- Kynch, G. J. (1952). A theory of sedimentation. *Transactions of the Faraday Society*, 48, 166–176.
- Muñoz, J. (2019). *Clase 3: Hidráulica de Transporte de Pulpas*. “Proyecto Hidráulico”.
- Nakamura, N., & Kuroda, K. (1937). La cause de l’acceleration de la vitesse de sedimentation des suspensions dans les recipients inclines. *Keijo J. Med*, 8, 256–296.
- Oliver, D. R. (1961). The sedimentation of suspensions of closely-sized spherical particles. *Chemical Engineering Science*, 15(3–4), 230–242.
- Palma, S., Ihle, C. F., & Tamburrino, A. (2018). Characterization of a sediment layer of concentrated fluid-solid mixtures in tilted ducts at low Reynolds numbers. *Powder Technology*, 325, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.10.053>
- Palma, S., Ihle, C. F., Tamburrino, A., & Dalziel, S. B. (2016). Particle organization after viscous sedimentation in tilted containers. *Physics of Fluids*, 28(7).



- Phillips, R. J., Armstrong, R. C., Brown, R. A., Graham, A. L., & Abbott, J. R. (1992). A Constitutive Equation for Concentrated Suspensions that Accounts for Shear-Induced Particle Migration. *Physics of Fluids A*, 4(1), 30–40.
- PSI, P. S. I. (2007). *Technical Standard Laboratory Procedure Angle Slide and Angle of Repose*. PSI.
- Rayo, J. (2008). Manejo de Embanques en Largas Tuberías de Pulpas. *V Congreso de Concentraductos, Mineroductos, Relaveductos y Acueductos FLUIMIN*.
- Rayo, J., & Vásquez, P. (2013). Debilidades y Fortalezas del Transporte de Pulpas: Análisis actualizado. *X Congreso de Concentraductos, Mineroductos, Relaveductos y Acueductos FLUIMIN*.
- Richardson, J. F., & Zaki, W. N. (1954). *Sedimentation and Fluidisation: Part I*. [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8762\(97\)80006-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8762(97)80006-8)
- Sampaio, D. A., & Brandao, P. R. G. (2004). Rheological Properties of Iron Ore Concentrates Produced by Samarco Mineração S.A. (Samarco) and their Effect on the Potential of Plug Formation of the Pipeline. *HYDROTRANSPORT 16 - The 16th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids*, 231–243.
- Schlichting, H., & Gersten, K. (2017). *Boundary-Layer Theory*. En *McGraw-Hill* (9th ed.). Springer.
- Shook, C. A., Rollins, J., & Vassie, G. S. (1974). Sliding in inclined slurry pipelines at shutdown. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 52(3), 300–305.
- Slatter, P. T., & Wasp, E. J. (2002). The Bingham Plastic Rheological Model: Friend or Foe? *HYDROTRANSPORT 15 - The 15th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids, I*, 315–328.
- Steinour, H. H. (1944). Rate of Sedimentation Nonfloculated Suspensions of Uniform Spheres. *Portland Cement Association*. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie50415a005>
- Truesdell, C. A. (1966). *The Mechanical Foundations of Elasticity and Fluid Dynamics-International Science Review Series*. Gordon and Breach Science Publishers.
- Truesdell, C., & Noll, W. (2013). *The Non Linear Field Theories of Mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Truesdell, C., & Rajagopal, K. R. (2009). An Introduction to the Mechanics of Fluids. En *The Mathematical Gazette* (Vol. 85, Número 504). Birkhauser.
- Valencia, P. (2017). *Efecto del Tiempo de Detención en la Seguridad Operacional en Concentraductos: Hacia la Determinación de un Tiempo Máximo*. Universidad de Chile.
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330–1334.



## 9. Anexos

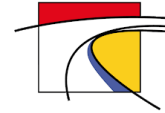
### 9.1. Medición de $C_p$ durante la preparación y descarga de muestras

Tabla 9.1 Concentración de sólidos de la muestra preparada para ejecutar los ensayos a  $C_p = 65\%$  medida justo antes de cargar el tubo de ensayo para E.F.1

Muestra	Vidrio Reloj Vacío [g]	Vidrio Reloj con Muestra [g]	Vidrio reloj con Muestra Seca [g]	Muestra [g]	Muestra Seca [g]	$C_p$ [%]	$C_p$ Promedio [%]	CV [%]
E.F.1 $C_p$ inicial original	54.09	94.93	80.87	40.84	26.78	65.57	65.51	0.1
E.F.1 $C_p$ inicial duplicado	54.06	93.37	79.79	39.31	25.73	65.45		

Tabla 9.2 Concentración de sólidos de la muestra preparada para ejecutar los ensayos a  $C_p = 65\%$  medida posterior a la descarga del tubo de ensayo al término de E.F.4

Muestra	Vidrio Reloj Vacío [g]	Vidrio Reloj con Muestra [g]	Vidrio reloj con Muestra Seca [g]	Muestra [g]	Muestra Seca [g]	$C_p$ [%]	$C_p$ Promedio [%]	CV [%]
E.F.4 $C_p$ final original	54.10	75.79	68.67	21.69	14.57	67.17	67.10	0.1
E.F.4 $C_p$ final duplicado	54.07	74.12	67.51	20.05	13.44	67.03		

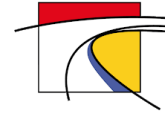


**Tabla 9.3 Concentración de sólidos de la muestra preparada para ejecutar los ensayos a  $C_p = 60\%$  medida justo antes de cargar el tubo de ensayo para E.F.5**

Muestra	Vidrio Reloj Vacío [g]	Vidrio Reloj con Muestra [g]	Vidrio reloj con Muestra Seca [g]	Muestra [g]	Muestra Seca [g]	$C_p$ [%]	$C_p$ Promedio [%]	$CV$ [%]
E.F.5 $C_p$ inicial original	55.12	76.26	67.50	21.14	12.38	58.56	58.65	0.2
E.F.5 $C_p$ inicial duplicado	61.45	81.57	73.27	20.12	11.82	58.75		

**Tabla 9.4 Concentración de sólidos de la muestra preparada para ejecutar los ensayos a  $C_p = 60\%$  medida posterior a la descarga del tubo de ensayo al término de E.F.8**

Muestra	Vidrio Reloj Vacío [g]	Vidrio Reloj con Muestra [g]	Vidrio reloj con Muestra Seca [g]	Muestra [g]	Muestra Seca [g]	$C_p$ [%]	$C_p$ Promedio [%]	$CV$ [%]
E.F.8 $C_p$ final original	56.82	78.84	69.60	22.02	12.78	58.04	58.36	0.6
E.F.8 $C_p$ final duplicado	63.57	83.83	75.46	20.26	11.89	58.69		



**Tabla 9.5 Concentración de sólidos de la muestra preparada para ejecutar los ensayos a  $C_p = 55\%$  medida justo antes de cargar el tubo de ensayo para E.F.9**

Muestra	Vidrio Reloj Vacío [g]	Vidrio Reloj con Muestra [g]	Vidrio reloj con Muestra Seca [g]	Muestra [g]	Muestra Seca [g]	$C_p$ [%]	$C_p$ Promedio [%]	$CV$ [%]
E.F.9 $C_p$ inicial original	61.46	91.48	78.06	30.02	16.60	55.30	55.00	0.5
E.F.9 $C_p$ inicial duplicado	54.09	83.37	70.11	29.28	16.02	54.71		

**Tabla 9.6 Concentración de sólidos de la muestra preparada para ejecutar los ensayos a  $C_p = 60\%$  medida posterior a la descarga del tubo de ensayo al término de E.F.12**

Muestra	Vidrio Reloj Vacío [g]	Vidrio Reloj con Muestra [g]	Vidrio reloj con Muestra Seca [g]	Muestra [g]	Muestra Seca [g]	$C_p$ [%]	$C_p$ Promedio [%]	$CV$ [%]
E.F.12 $C_p$ final original	63.50	89.00	77.60	25.50	14.10	55.29	55.26	0.1
E.F.12 $C_p$ final duplicado	55.12	79.08	68.35	23.96	13.23	55.22		

## 9.2. Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido $i_p$ en función del tiempo

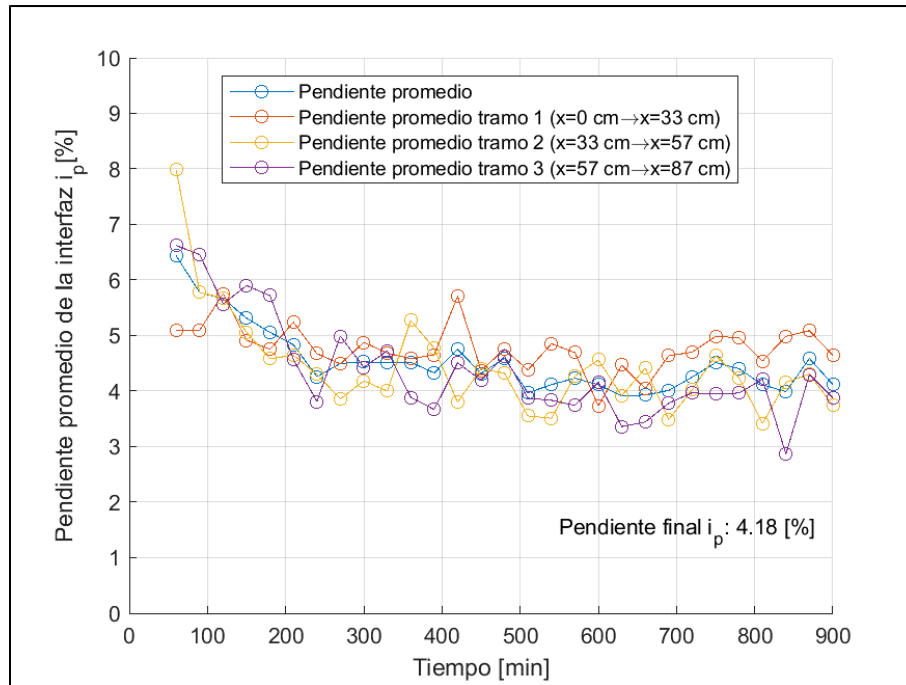


Figura 9.1 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido  $i_p$  en función del tiempo para E.F.2

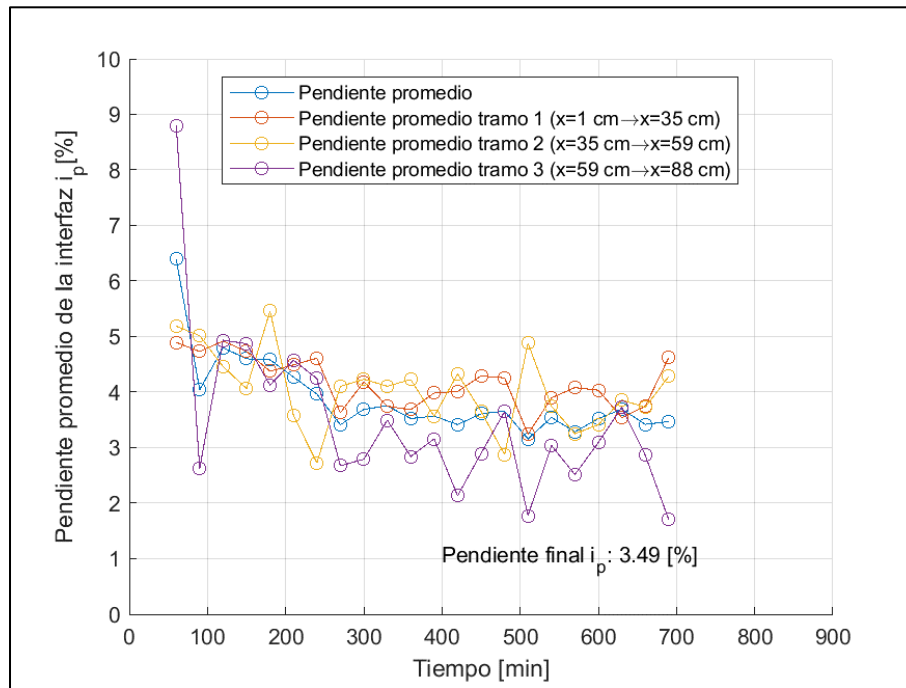


Figura 9.2 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido  $i_p$  en función del tiempo para E.F.3

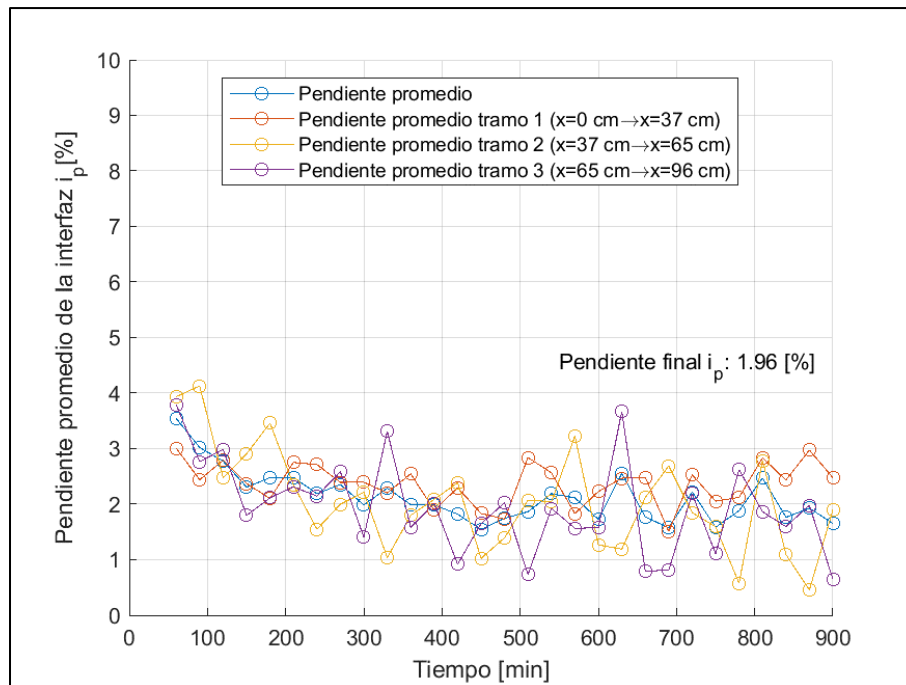


Figura 9.3 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido  $i_p$  en función del tiempo para E.F.4

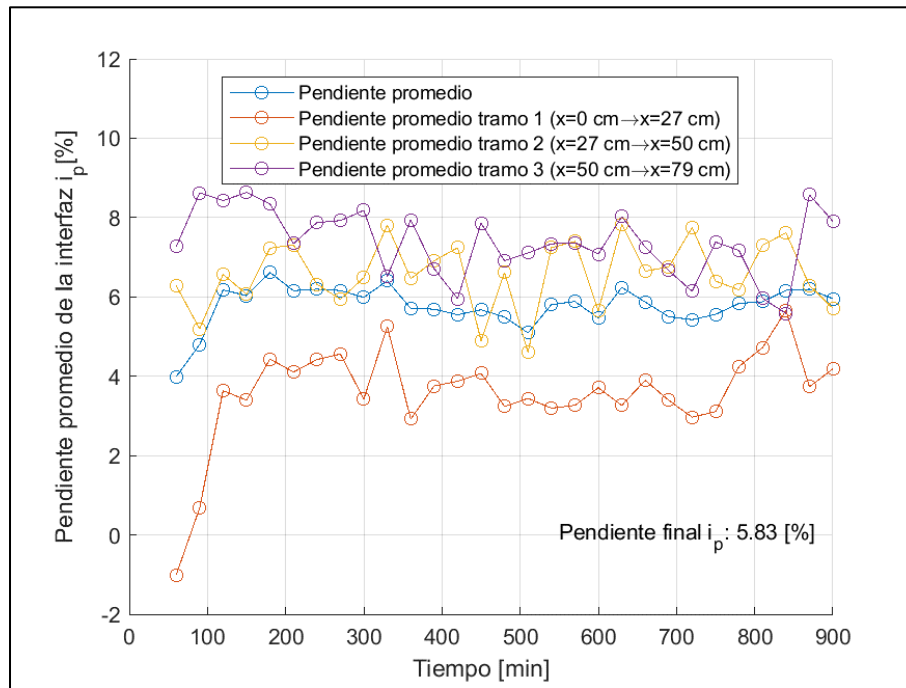


Figura 9.4 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido  $i_p$  en función del tiempo para E.F.6

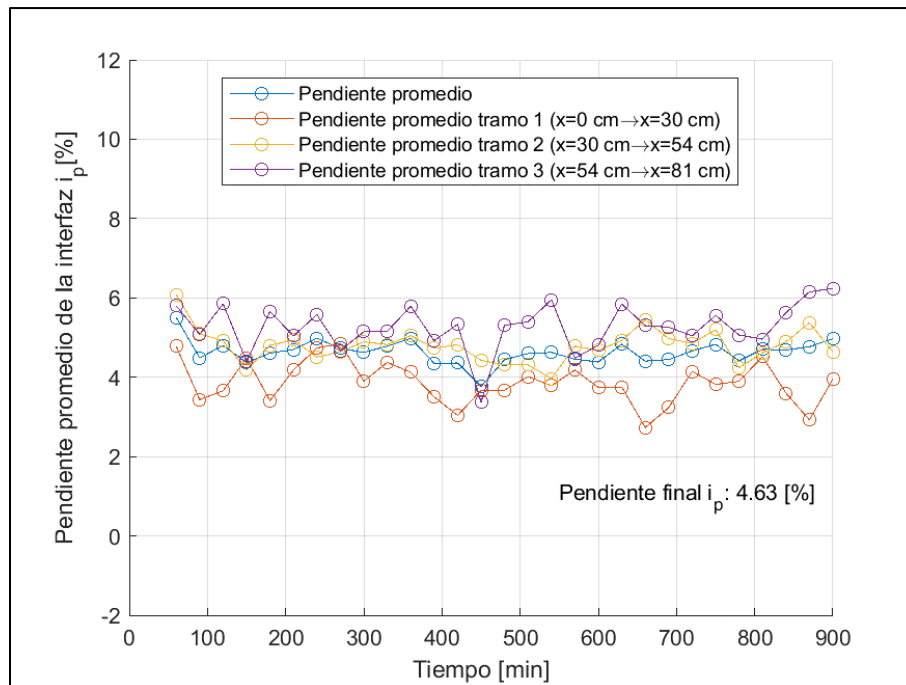


Figura 9.5 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido  $i_p$  en función del tiempo para E.F.7

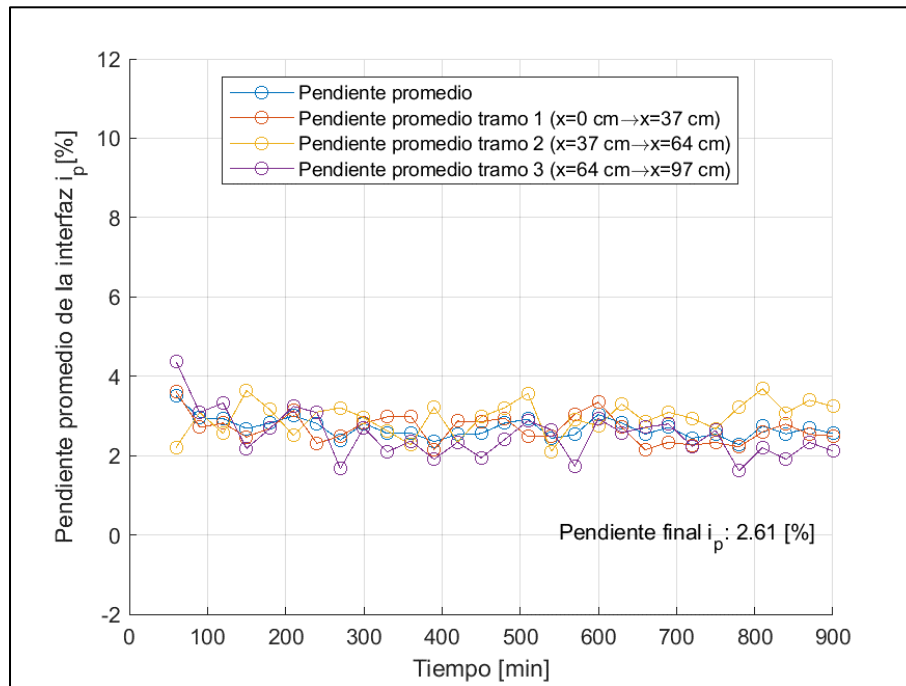


Figura 9.6 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido  $i_p$  en función del tiempo para E.F.8

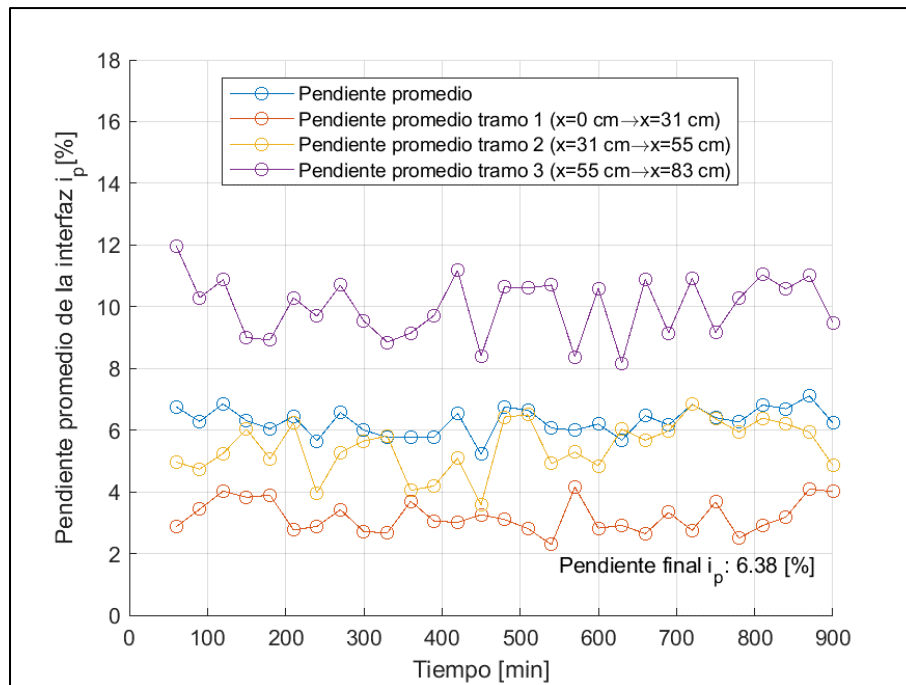


Figura 9.7 Evolución de la pendiente de la interfaz sólido-líquido  $i_p$  en función del tiempo para E.F.10



### 9.3. Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido-líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de los ensayos

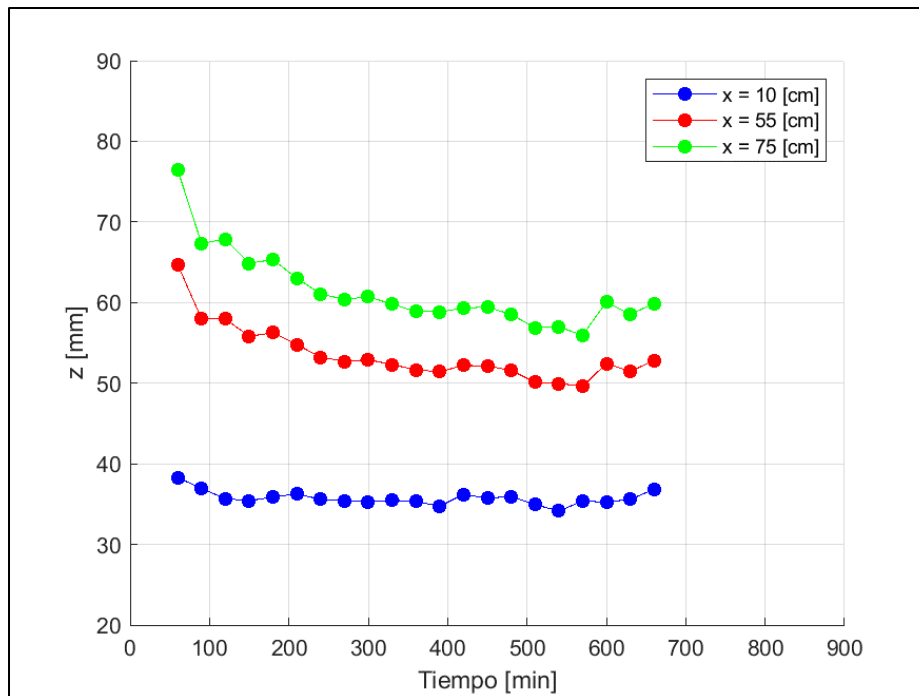
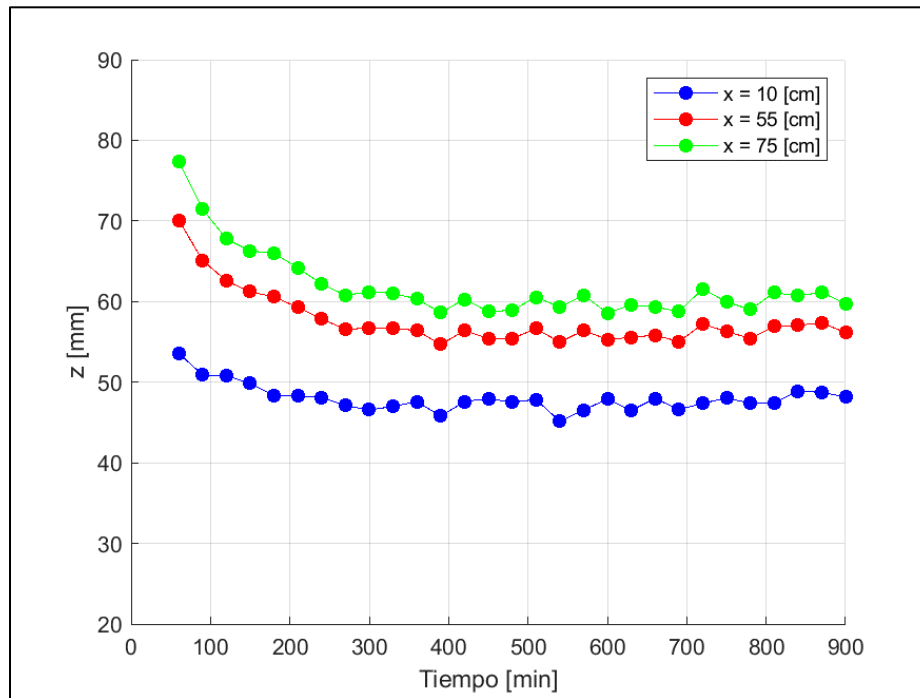
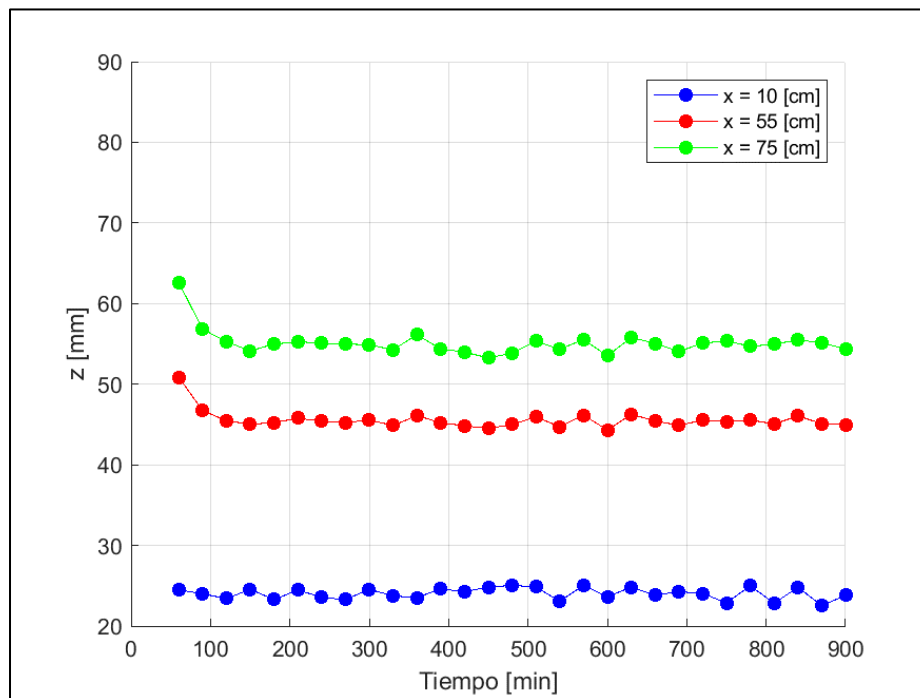


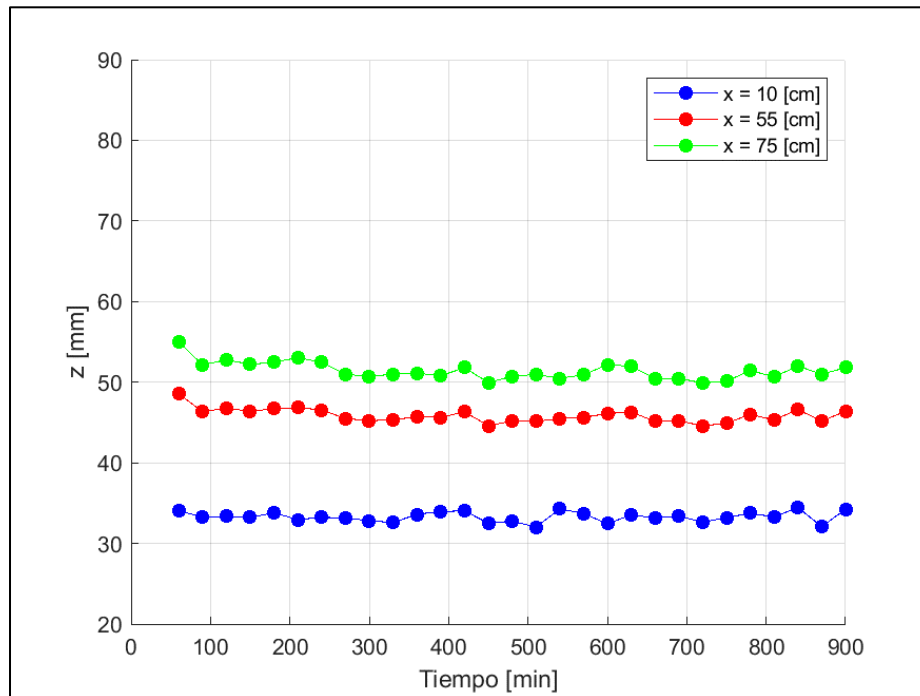
Figura 9.10 Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.3



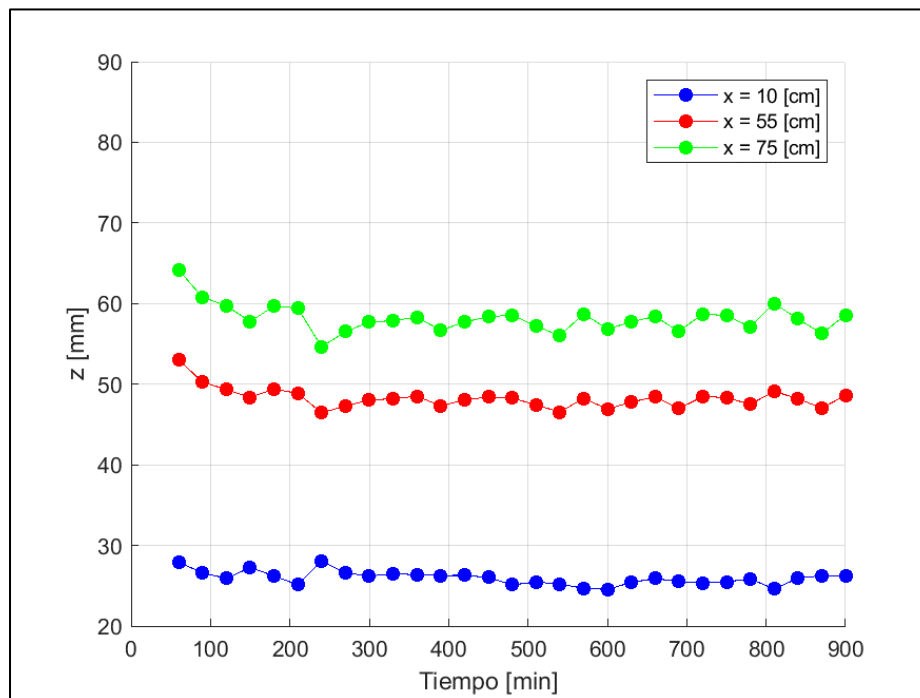
**Figura 9.11** Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.4



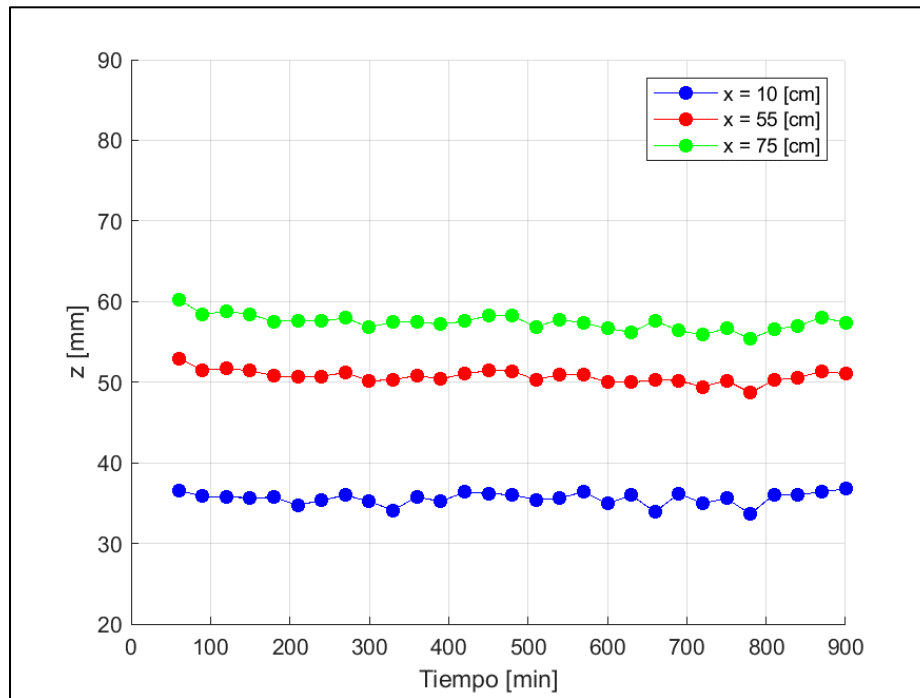
**Figura 9.12** Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.7



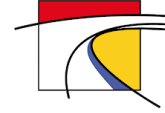
**Figura 9.13** Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.8



**Figura 9.14** Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.11



**Figura 9.15** Variación de la altura de 3 puntos ubicados sobre la interfaz sólido líquido distribuidos a lo largo del tubo durante la ejecución de E.F.12



## **9.4. Imágenes capturadas de la vista longitudinal en cada ensayo**



Figura 9.16 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.1 (1)



Figura 9.17 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.1 (2)



**Figura 9.18** Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.1 (3)

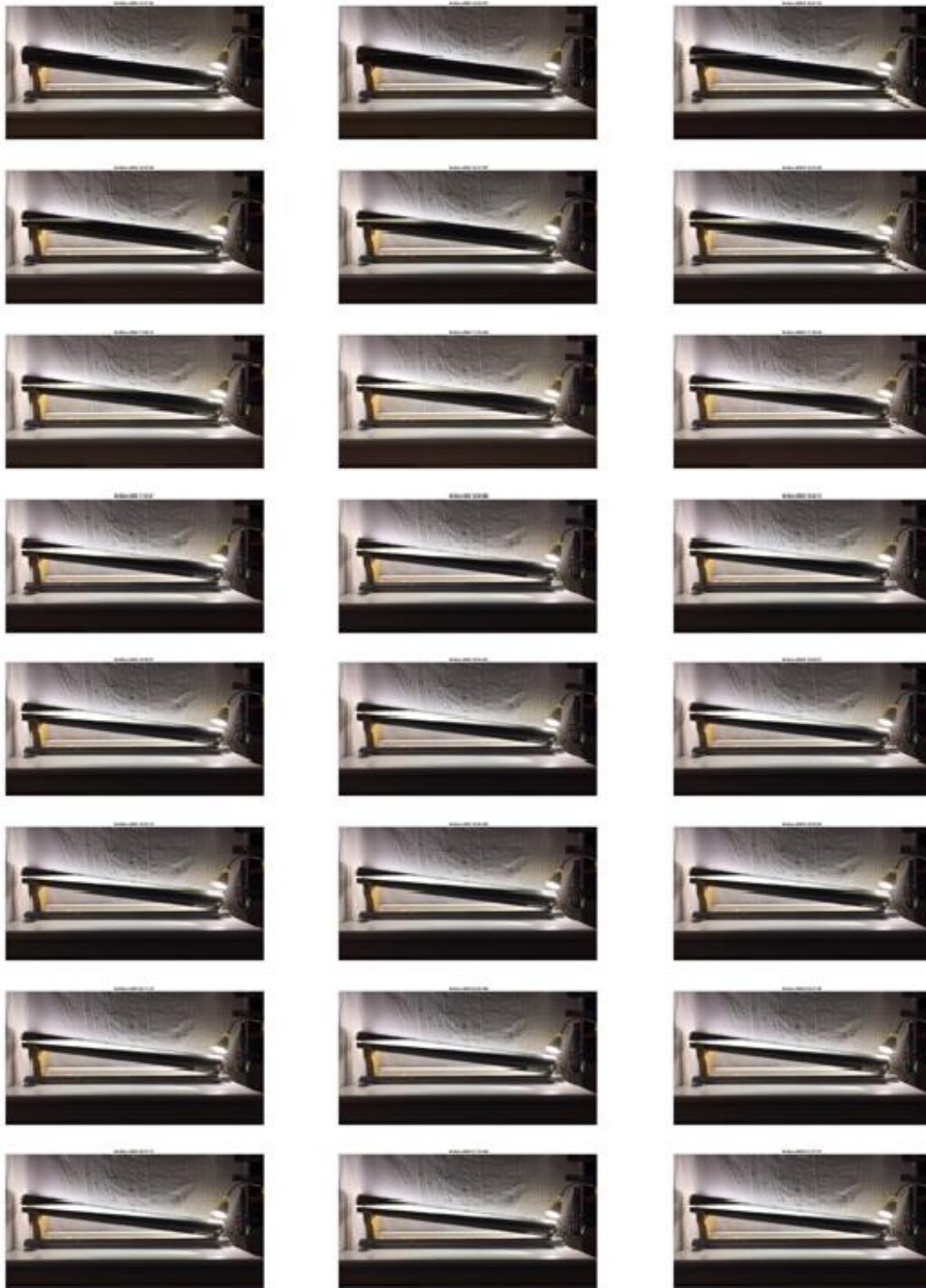


Figura 9.19 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.2 (1)

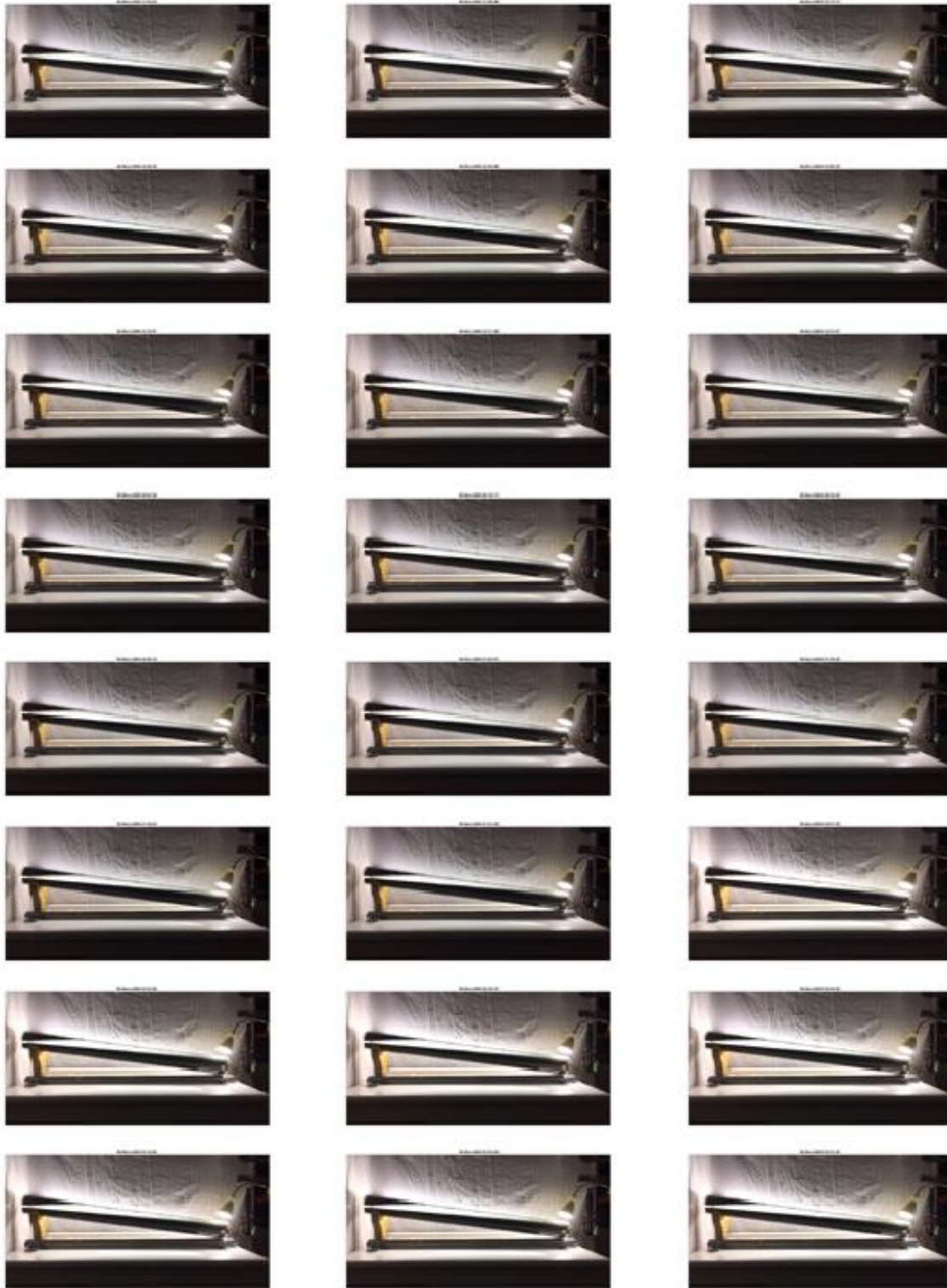


Figura 9.20 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.2 (2)

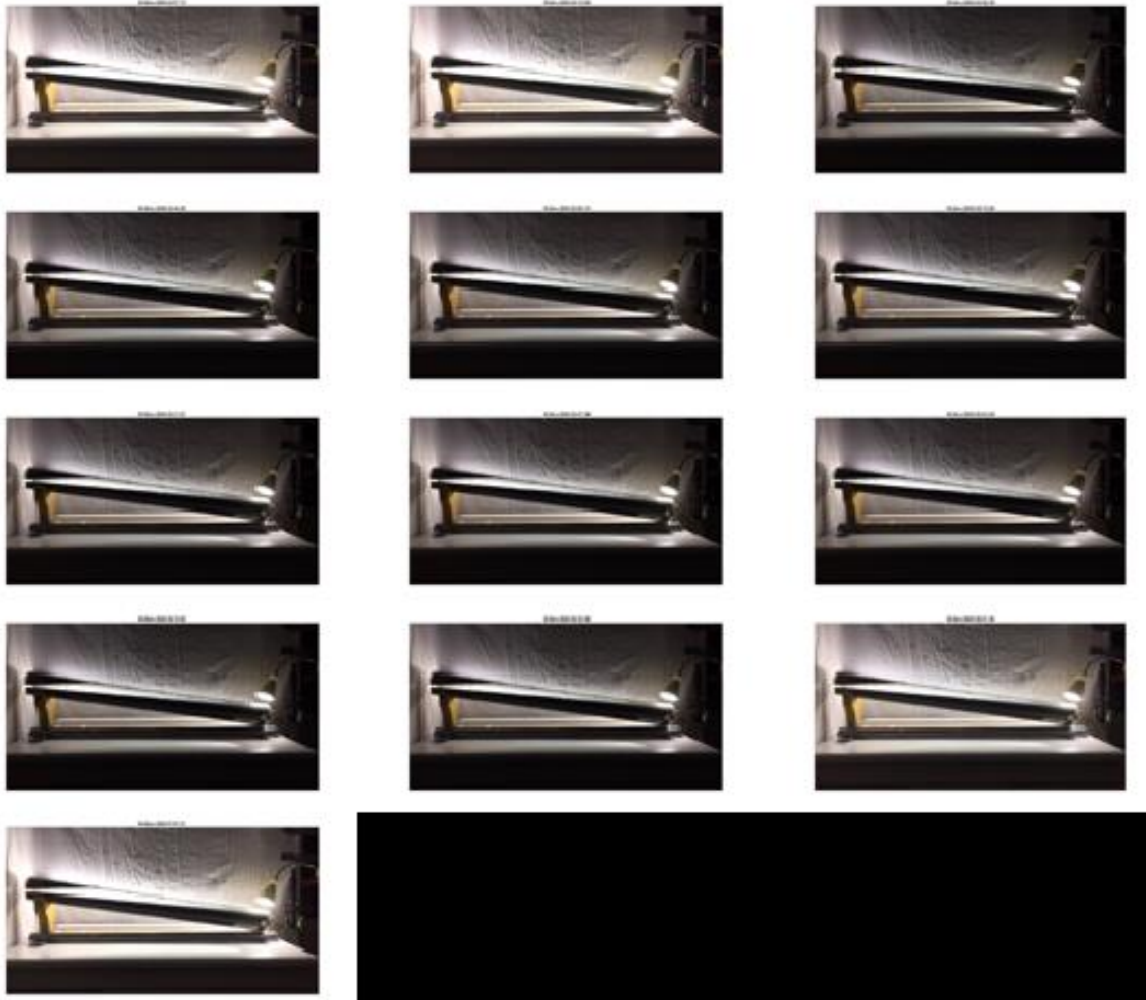


Figura 9.21 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.2 (3)

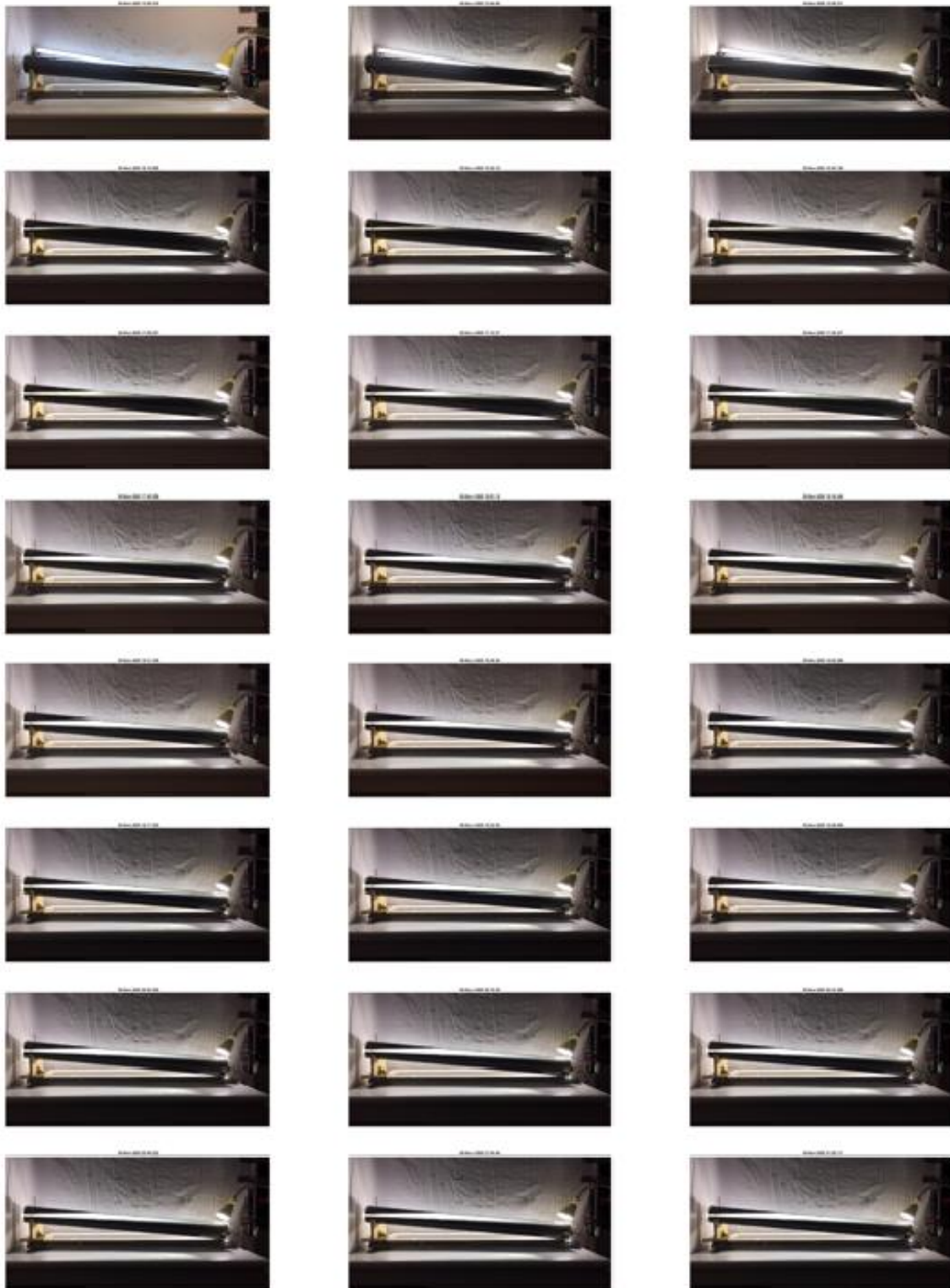


Figura 9.22 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.3 (1)

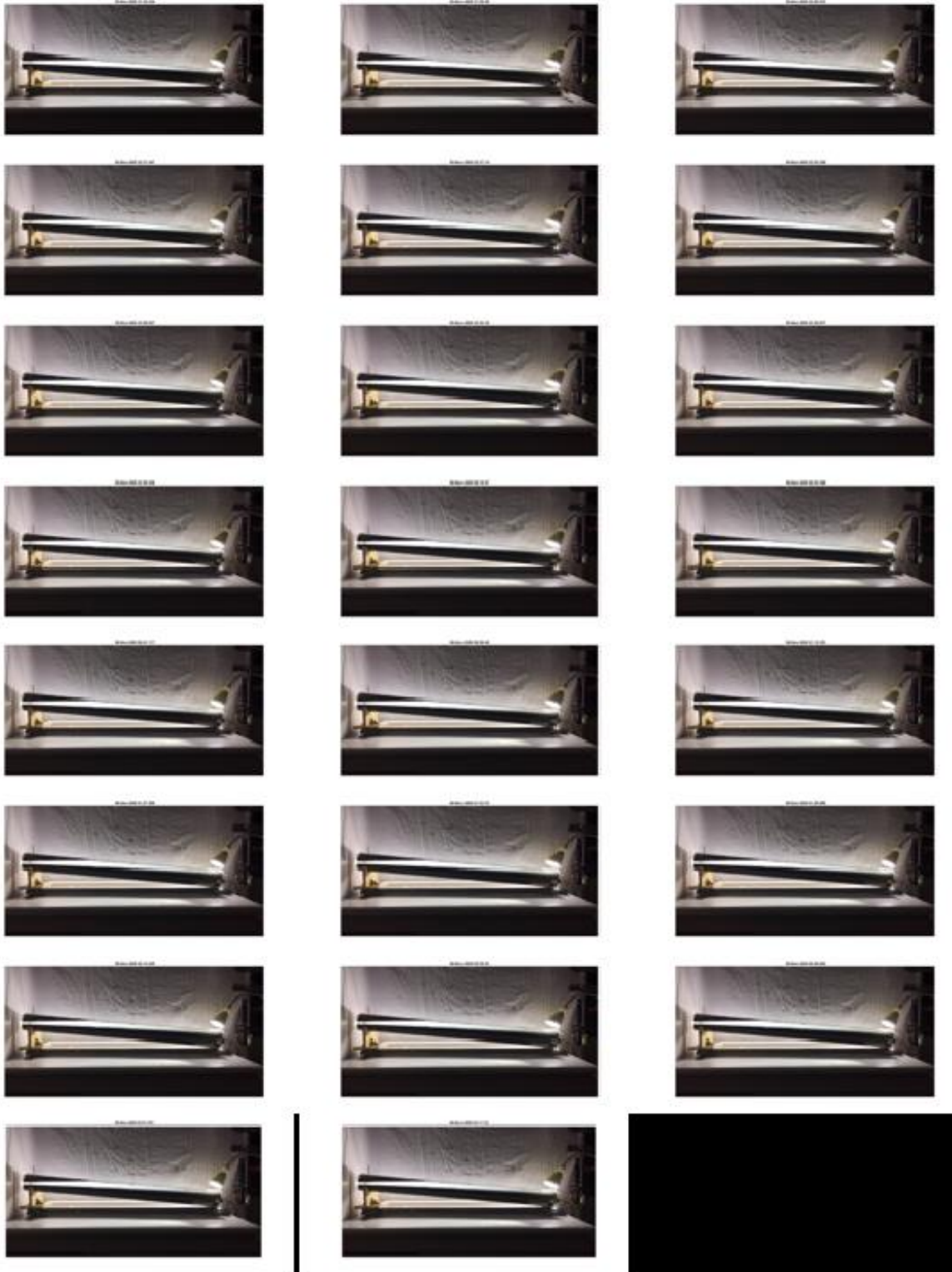


Figura 9.23 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.3 (2)

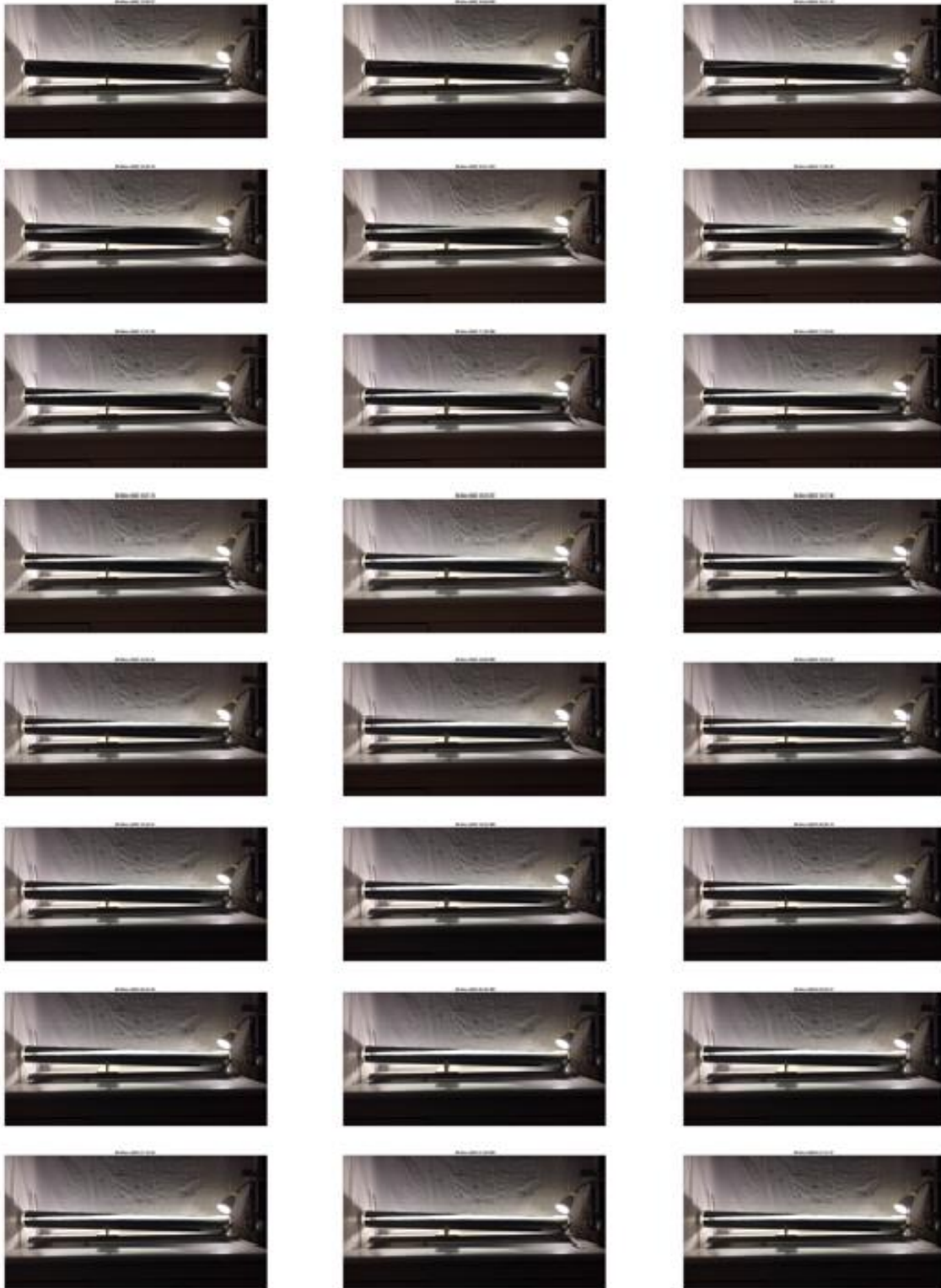


Figura 9.24 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.4 (1)



Figura 9.25 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.4 (2)



**Figura 9.26** Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.4 (3)



Figura 9.27 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.5 (1)



Figura 9.28 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.5 (2)



**Figura 9.29** Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.5 (3)



Figura 9.30 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.6 (1)



Figura 9.31 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.6 (2)



**Figura 9.32** Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.6 (3)

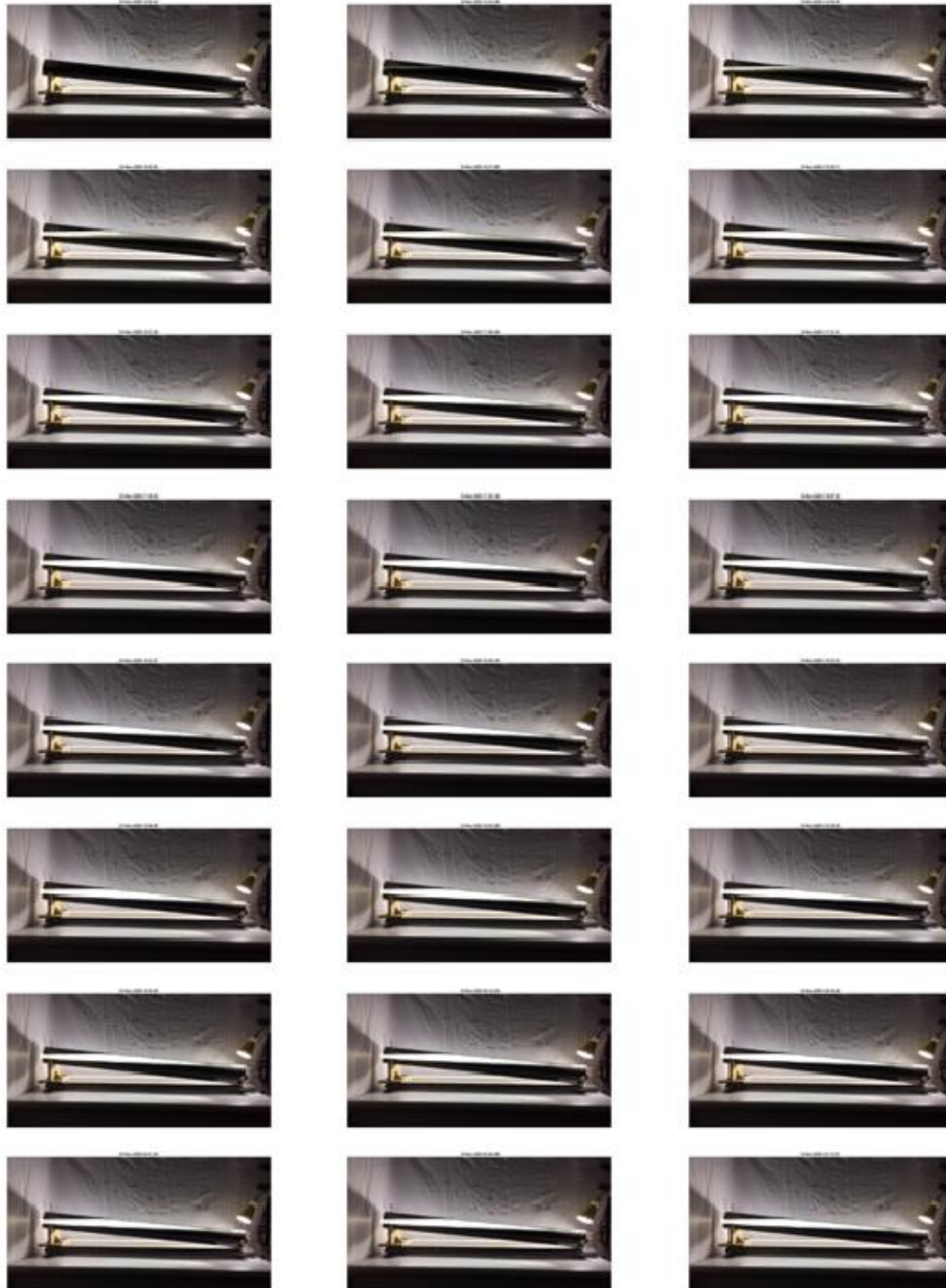


Figura 9.33 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.7 (1)



Figura 9.34 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.7 (2)

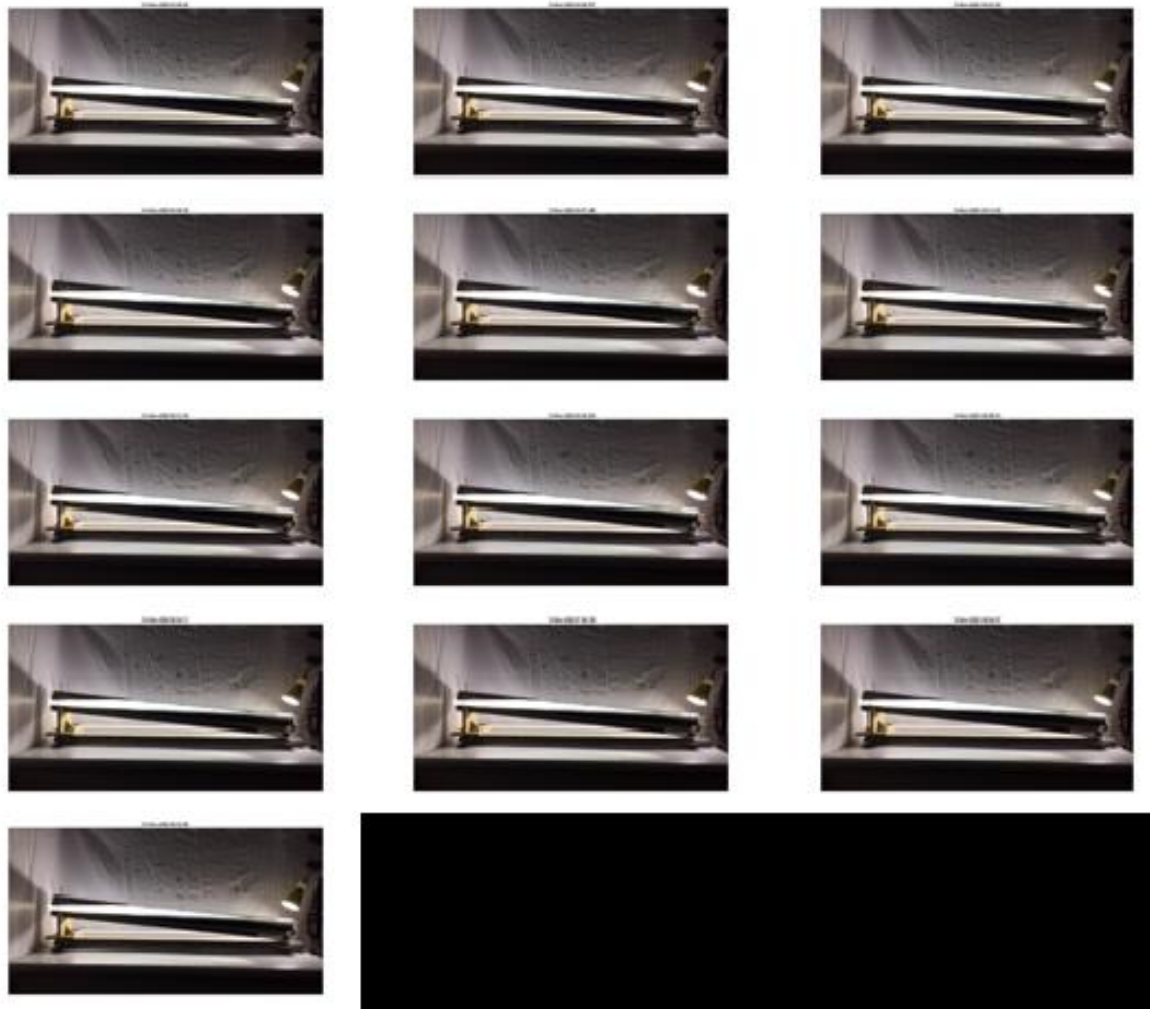


Figura 9.35 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.7 (3)

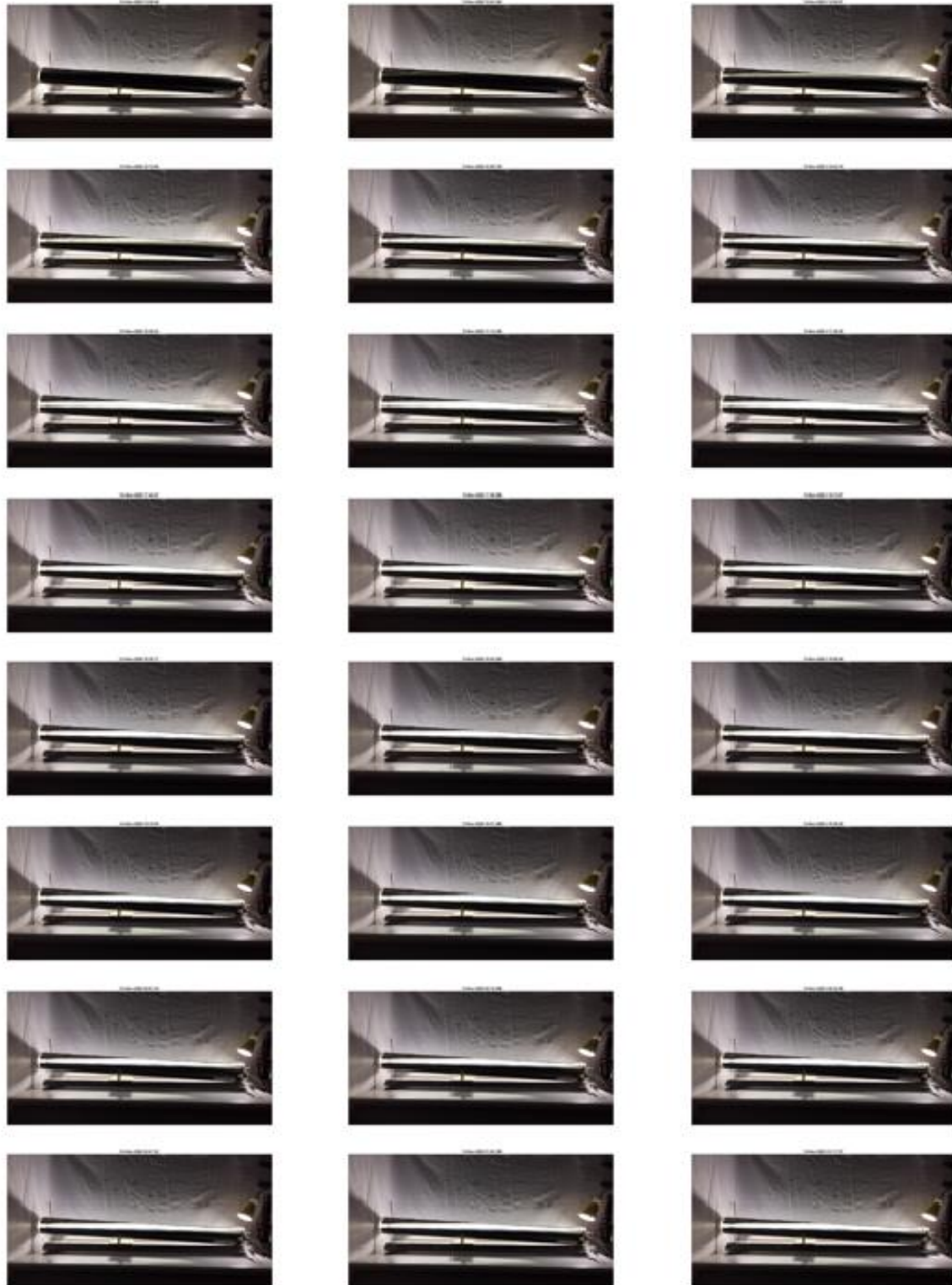


Figura 9.36 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.8 (1)

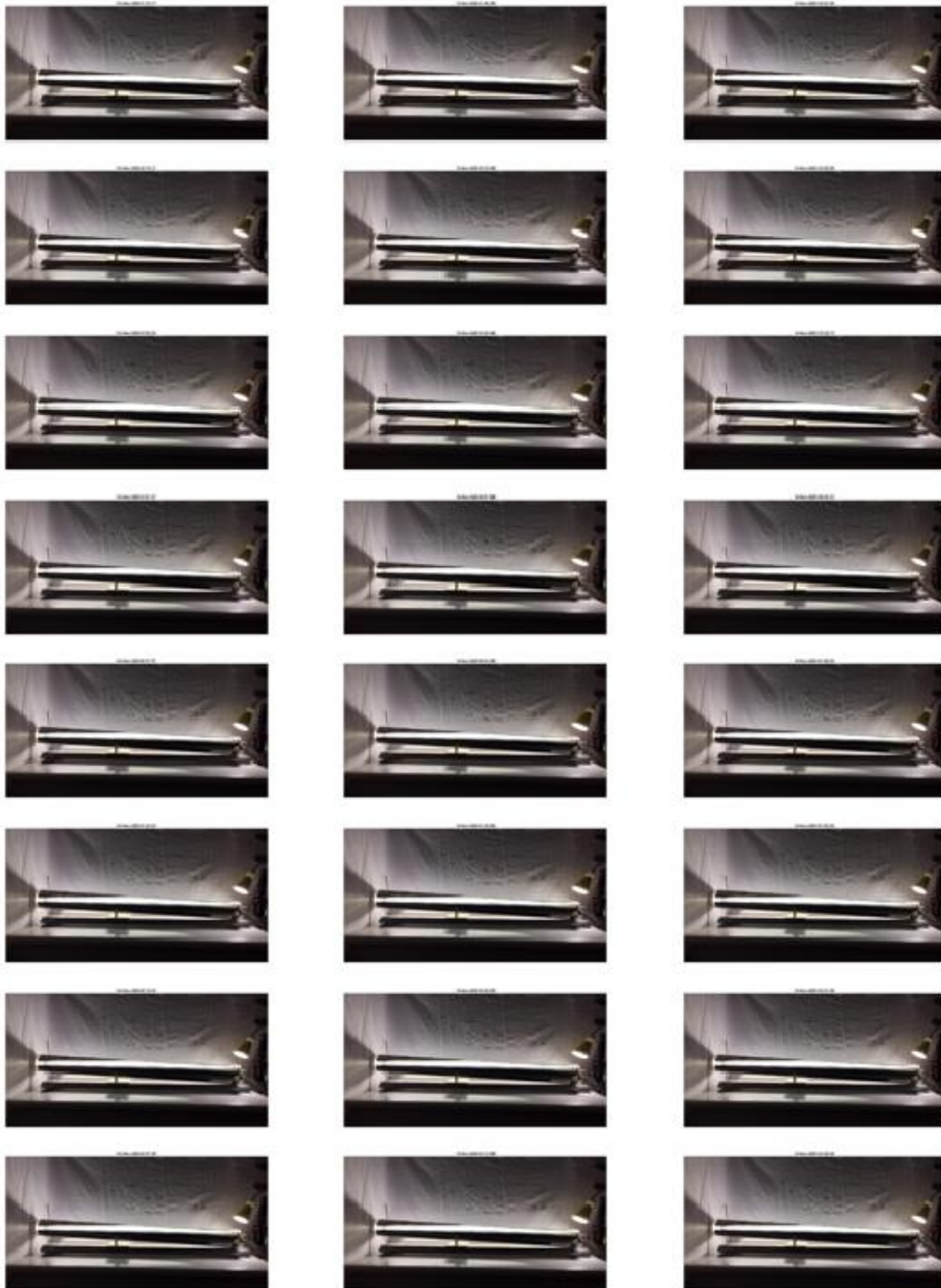


Figura 9.37 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.8 (2)

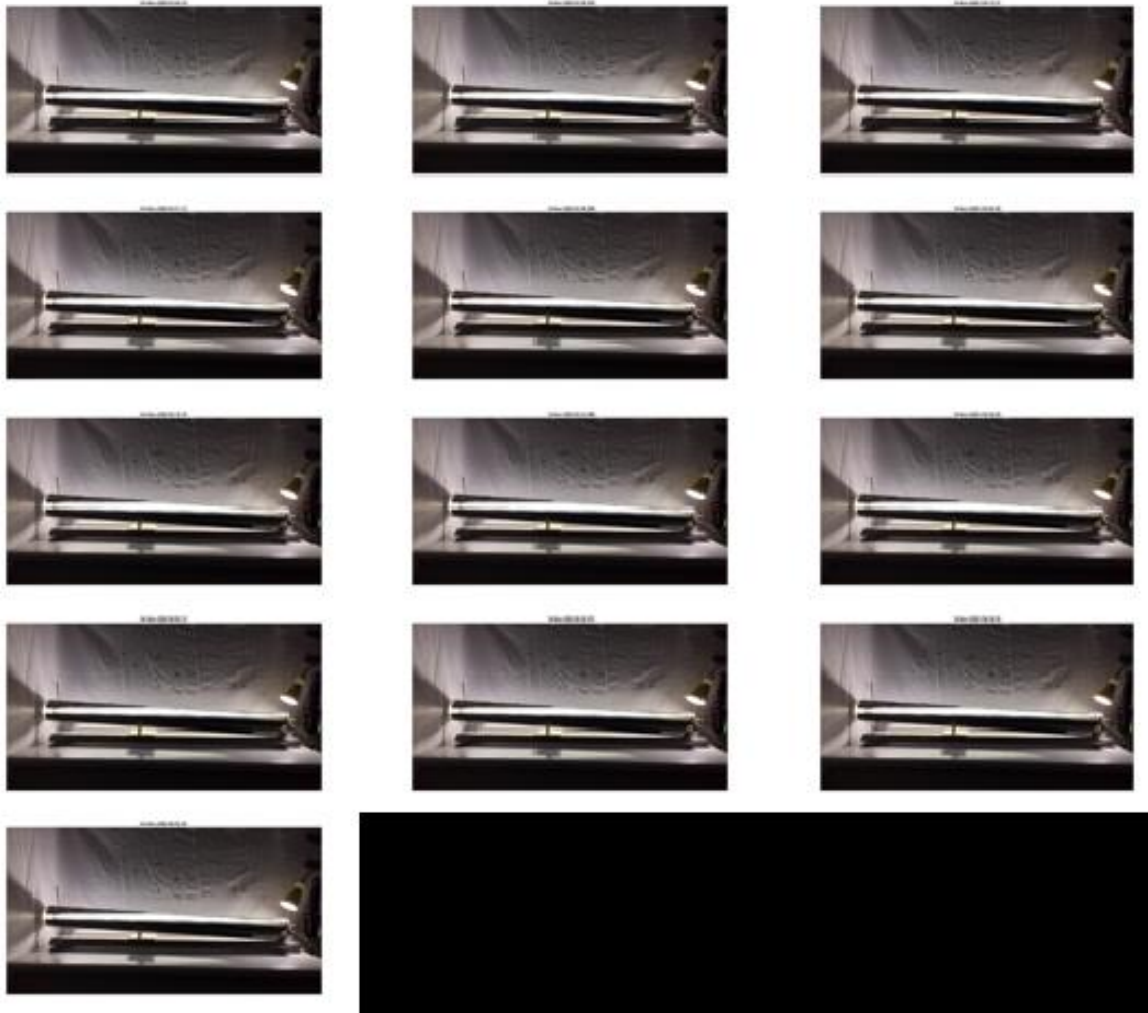


Figura 9.38 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.8 (3)



Figura 9.39 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.9 (1)



Figura 9.40 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.9 (2)



Figura 9.41 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.9 (3)



Figura 9.42 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.10 (1)



Figura 9.43 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.10 (2)



Figura 9.44 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.10 (3)

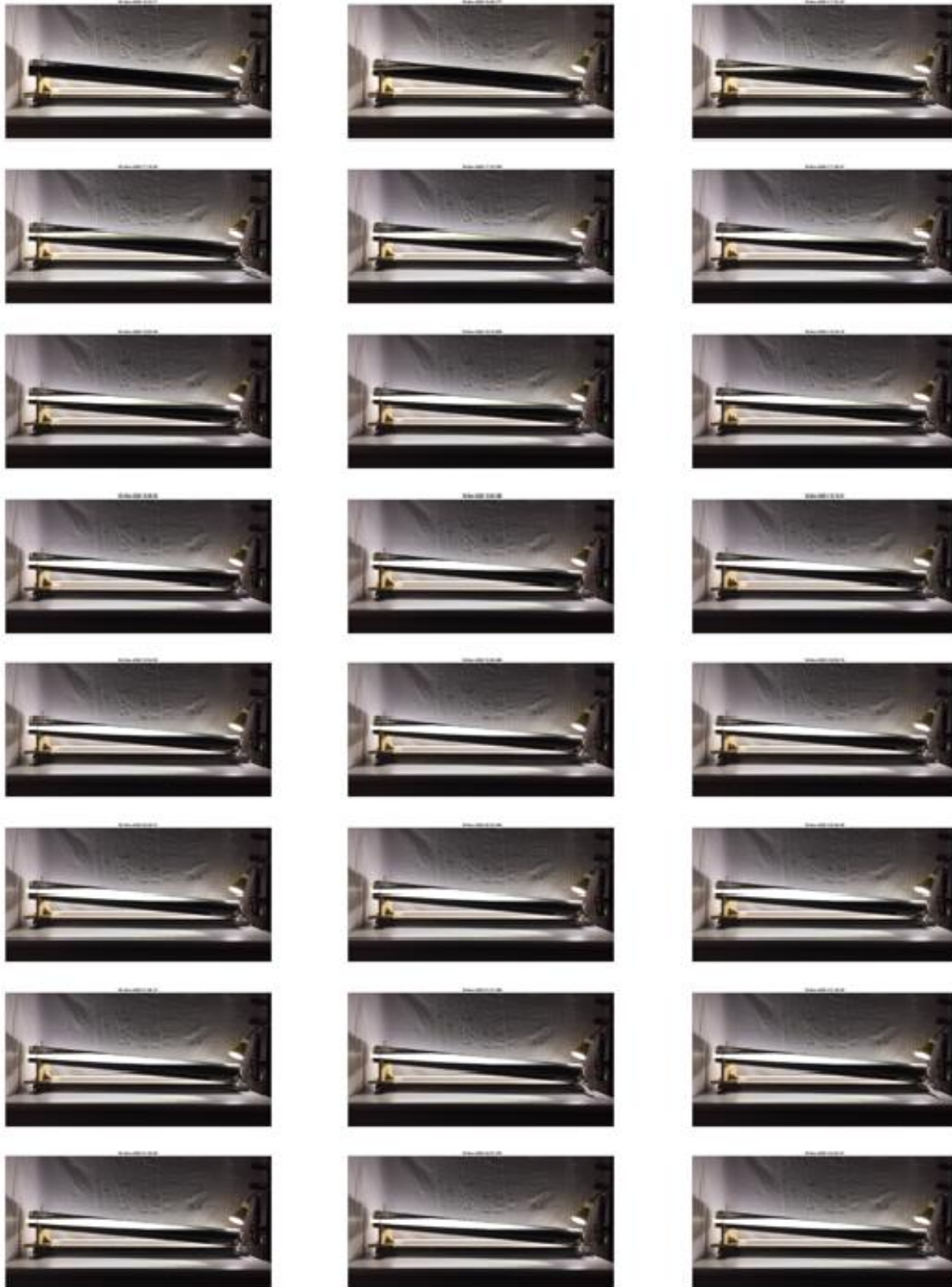


Figura 9.45 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.11 (1)



Figura 9.46 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.11 (2)



**Figura 9.47** Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.11 (3)



Figura 9.48 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.12 (1)



**Figura 9.49** Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.12 (2)

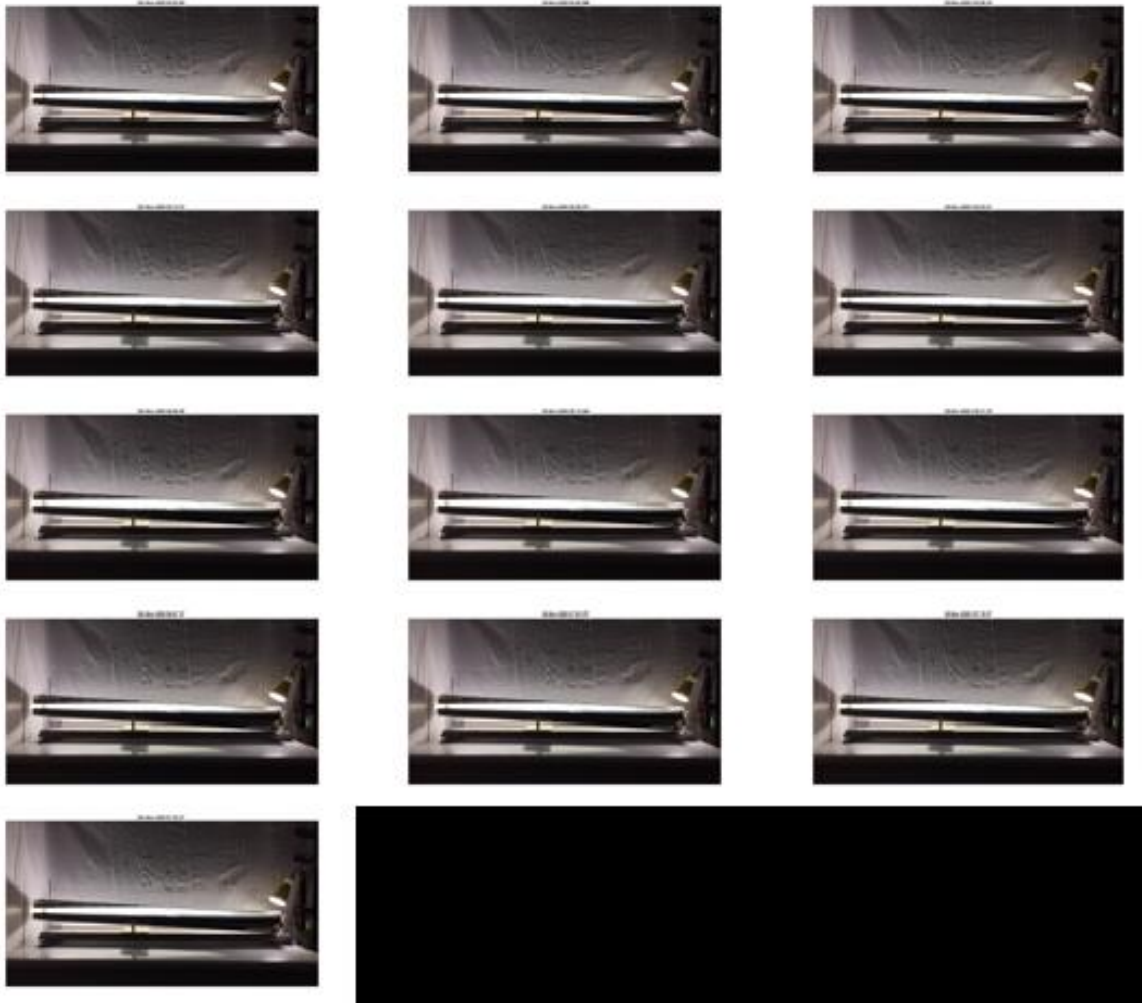


Figura 9.50 Captura de imágenes de la vista longitudinal durante la ejecución de E.F.12 (3)

## 9.5. Imágenes capturadas de la vista transversal en cada ensayo



Figura 9.51 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.1 (1)



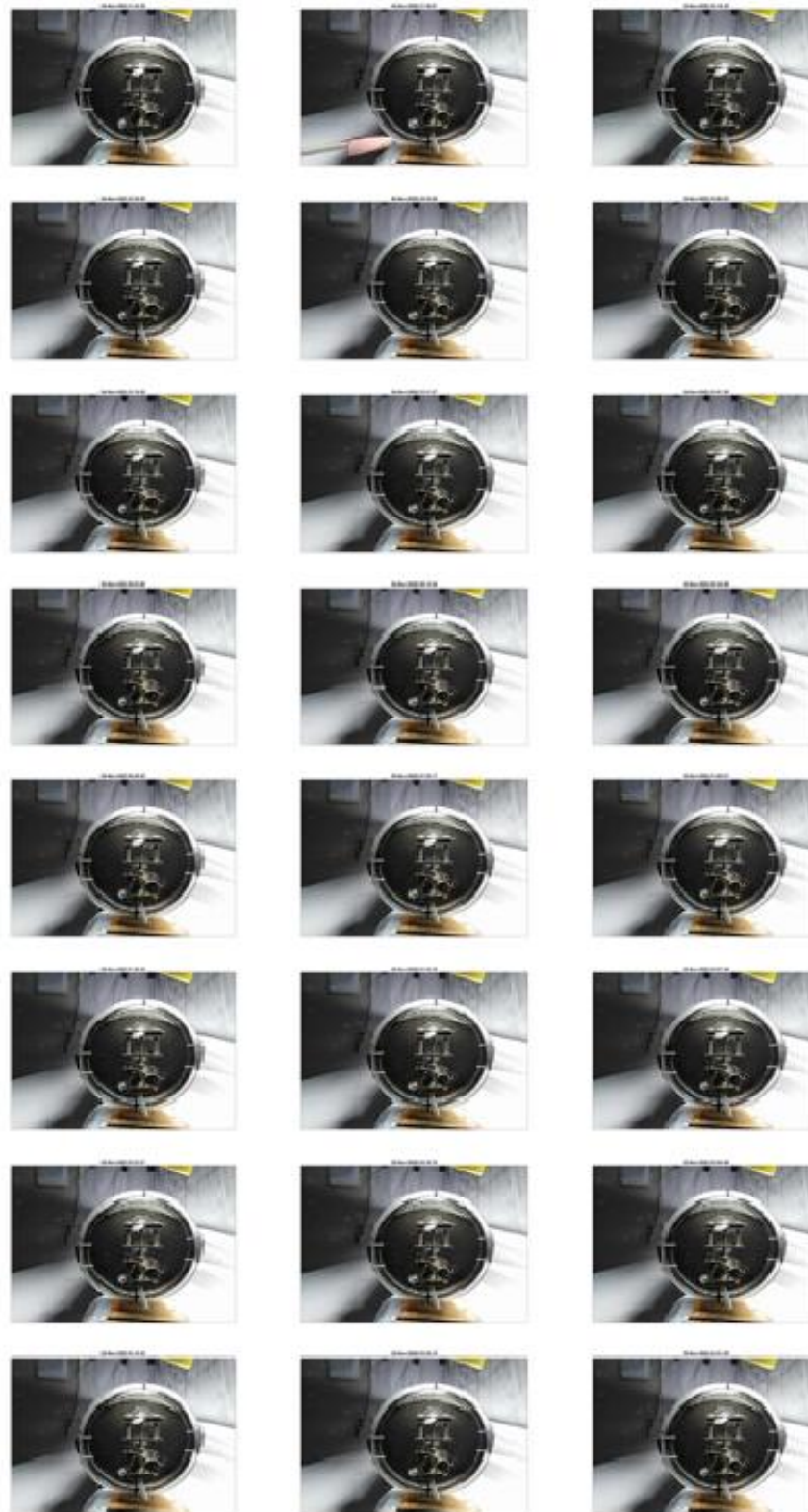
**Figura 9.52** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.1 (2)



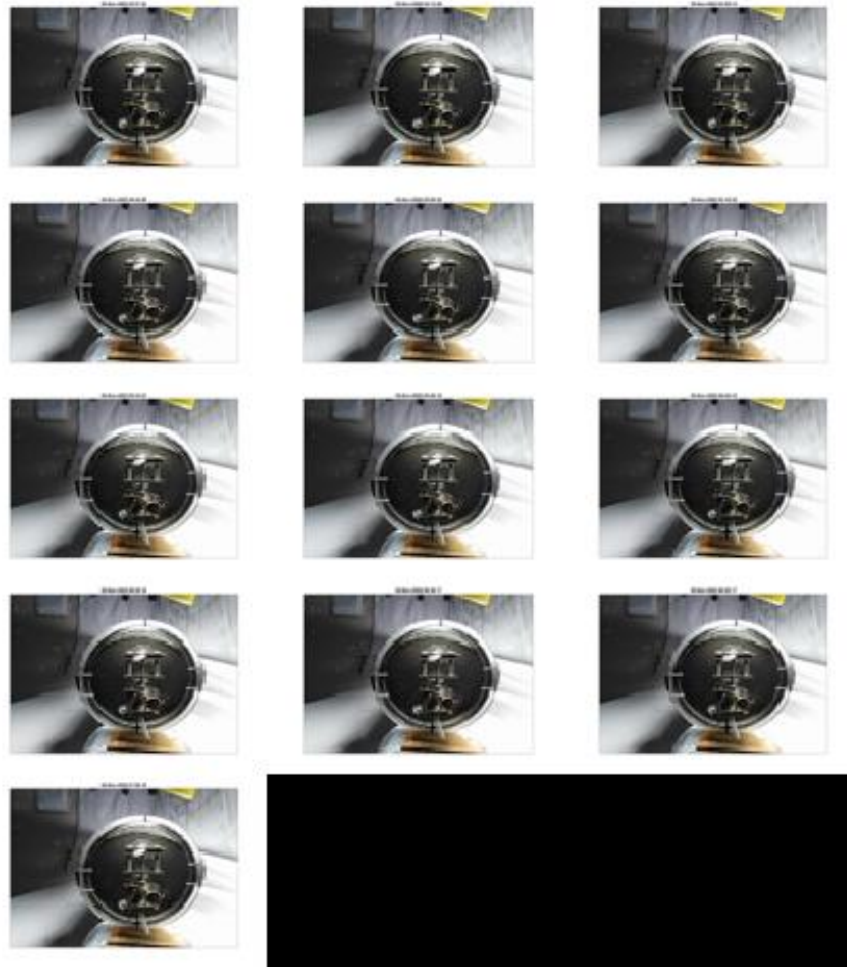
**Figura 9.53** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.1 (3)



Figura 9.54 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.2 (1)



**Figura 9.55** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.2 (2)



**Figura 9.56** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.2 (3)



Figura 9.57 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.3 (1)



Figura 9.58 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.3 (2)



**Figura 9.59** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.4 (1)



**Figura 9.60** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.4 (2)

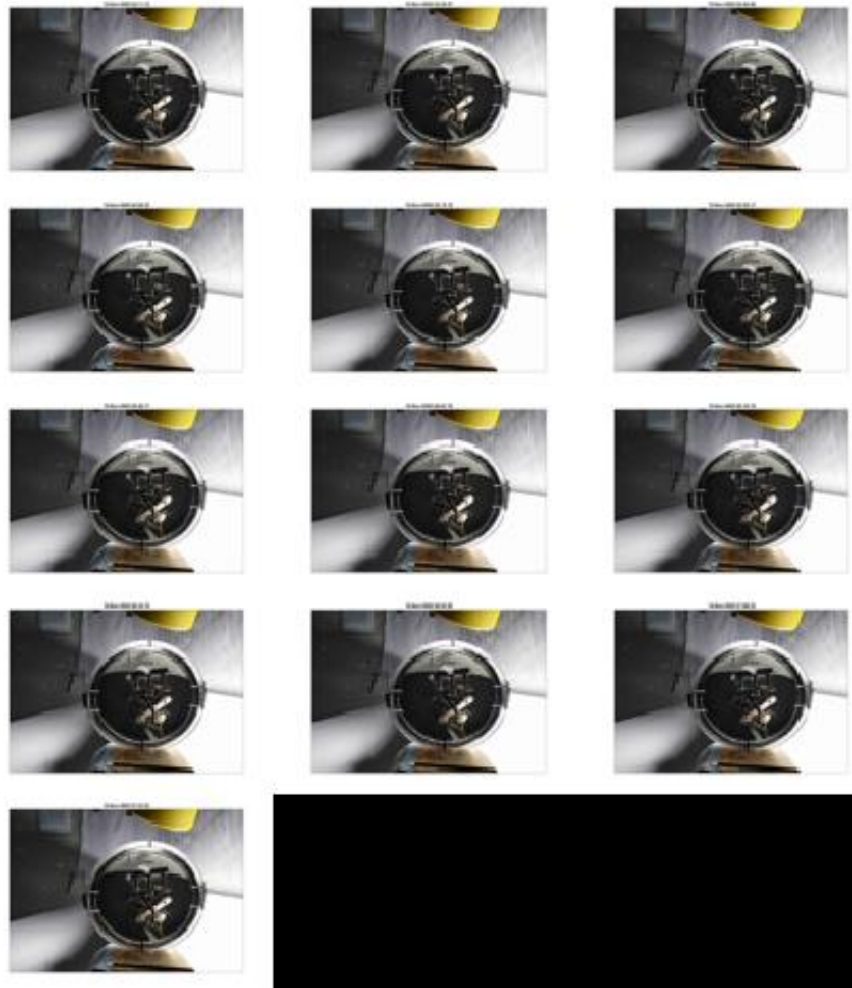


Figura 9.61 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.4 (3)



Figura 9.62 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.5 (1)



**Figura 9.63** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.5 (2)



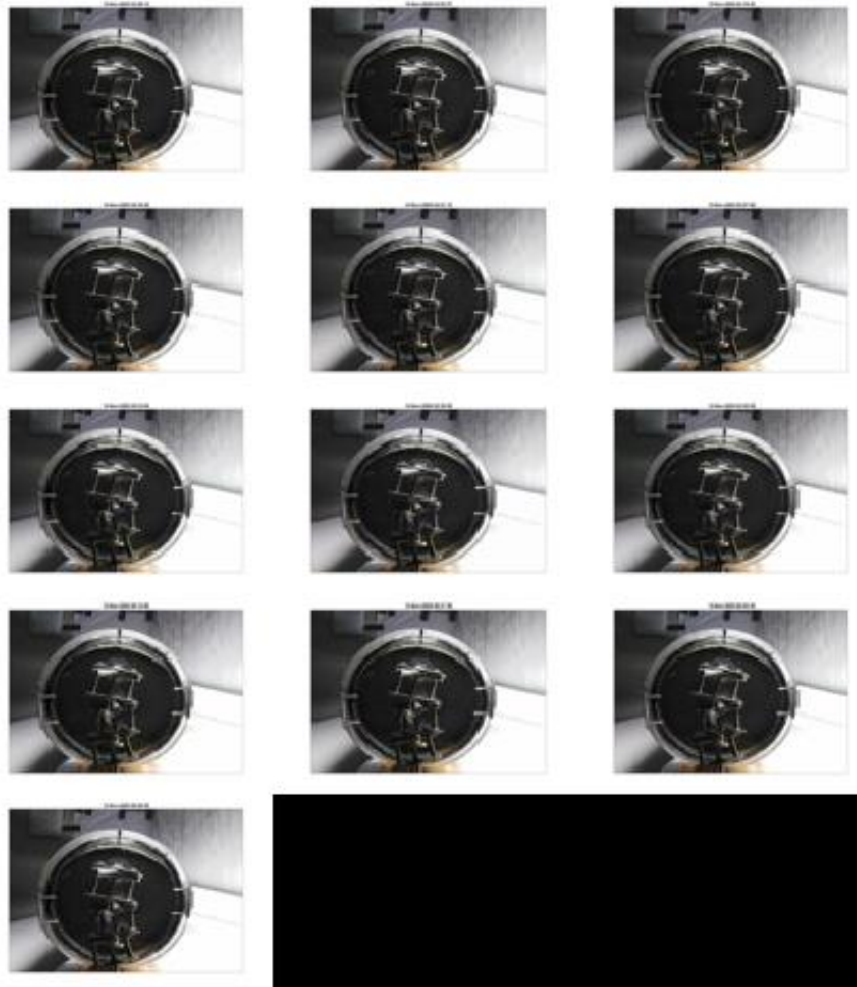
**Figura 9.64** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.5 (3)



**Figura 9.65** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.6 (1)



**Figura 9.66** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.6 (2)



**Figura 9.67** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.6 (3)



Figura 9.68 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.7 (1)

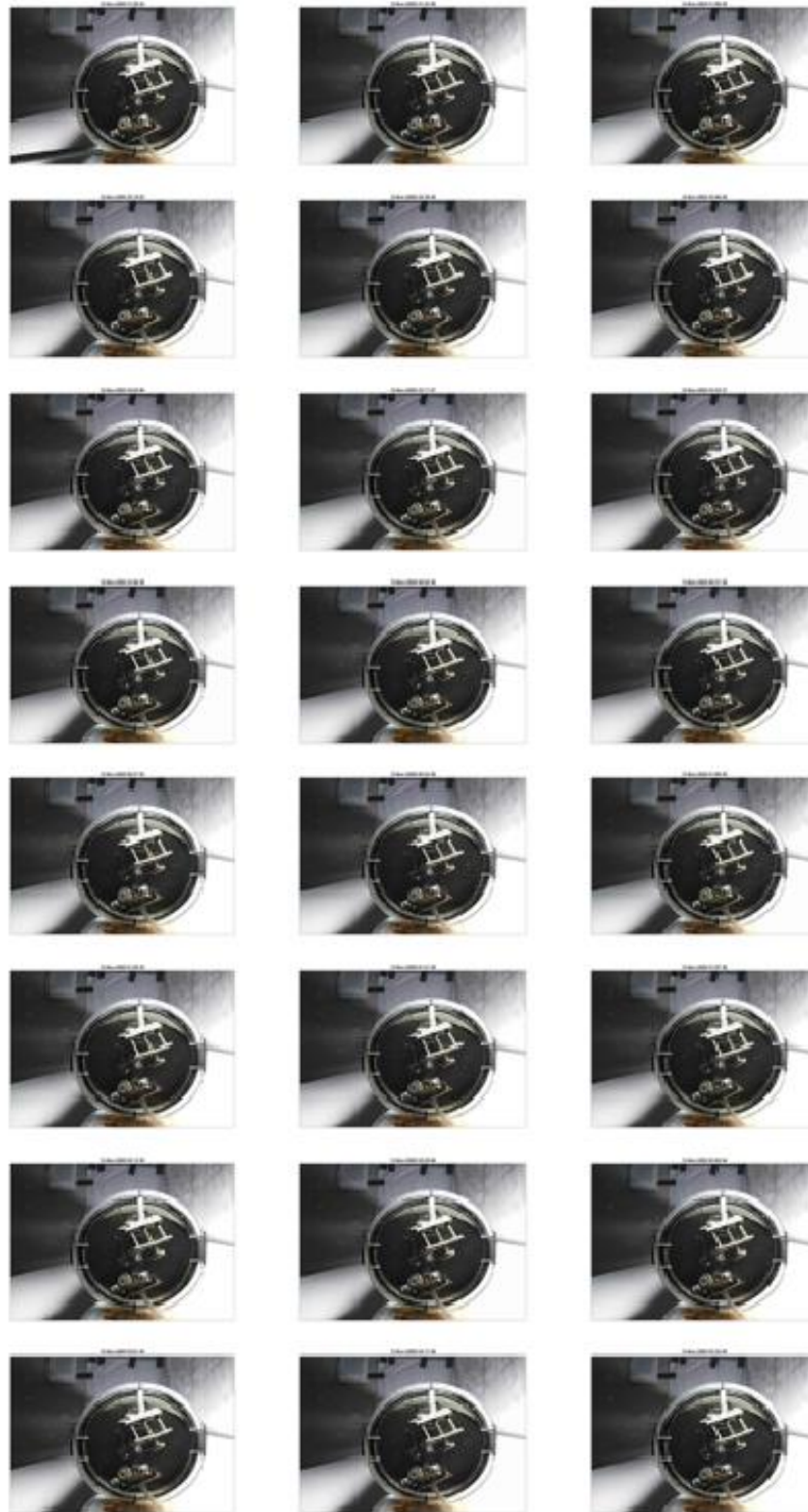
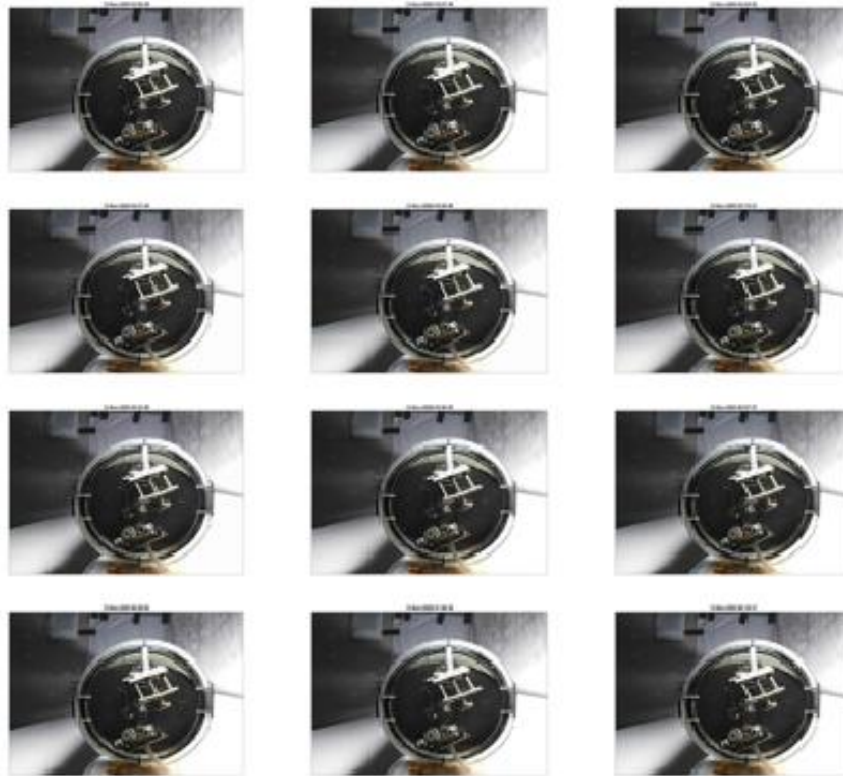


Figura 9.69 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.7 (2)



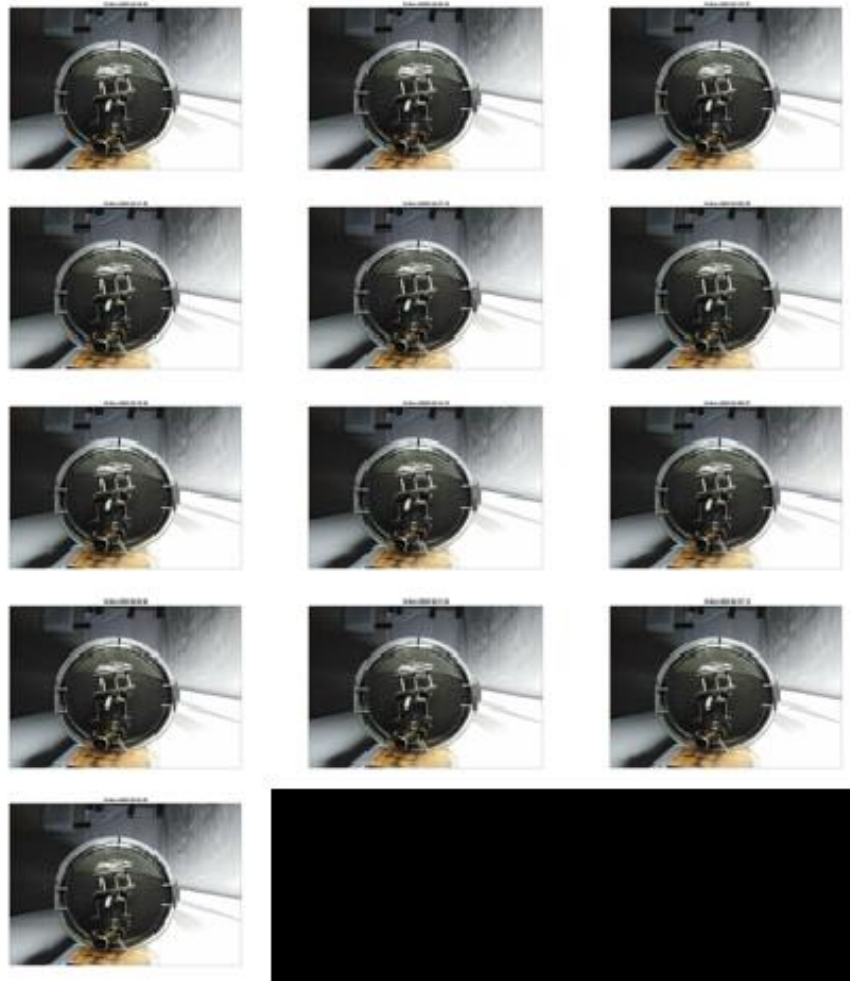
**Figura 9.70** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.7 (3)



**Figura 9.71** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.8 (1)



Figura 9.72 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.8 (2)



**Figura 9.73** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.8 (3)



**Figura 9.74** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.9 (1)



**Figura 9.75** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.9 (2)

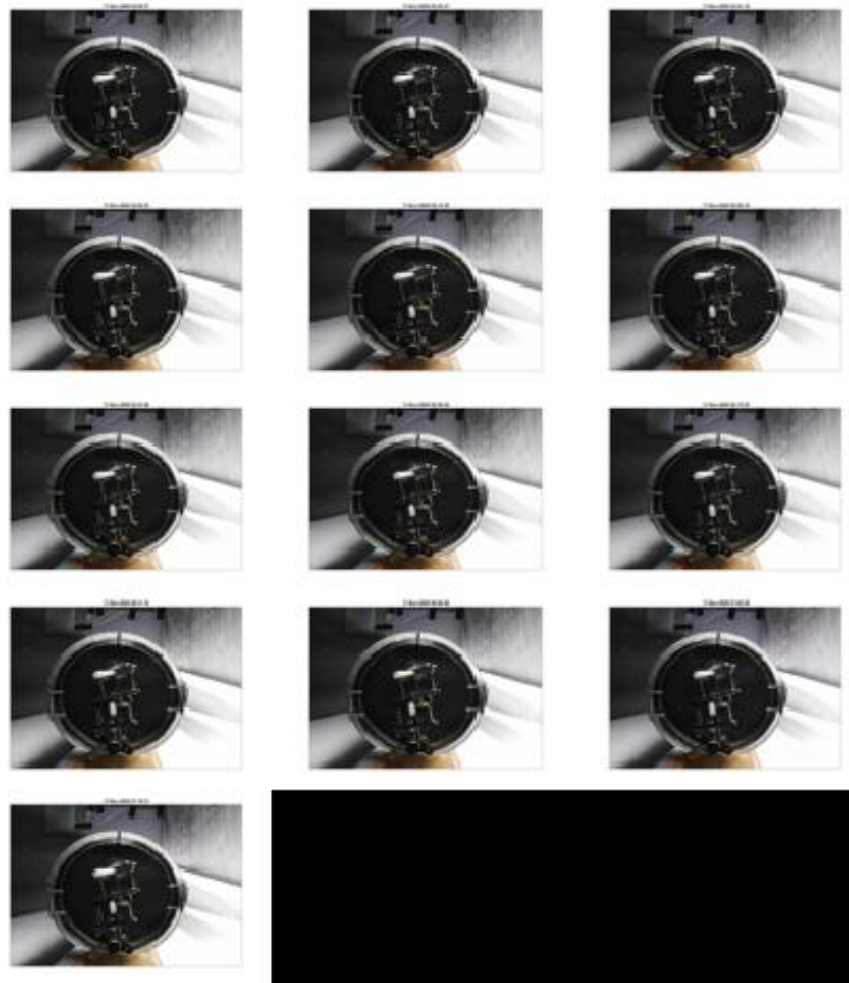


Figura 9.76 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.9 (3)



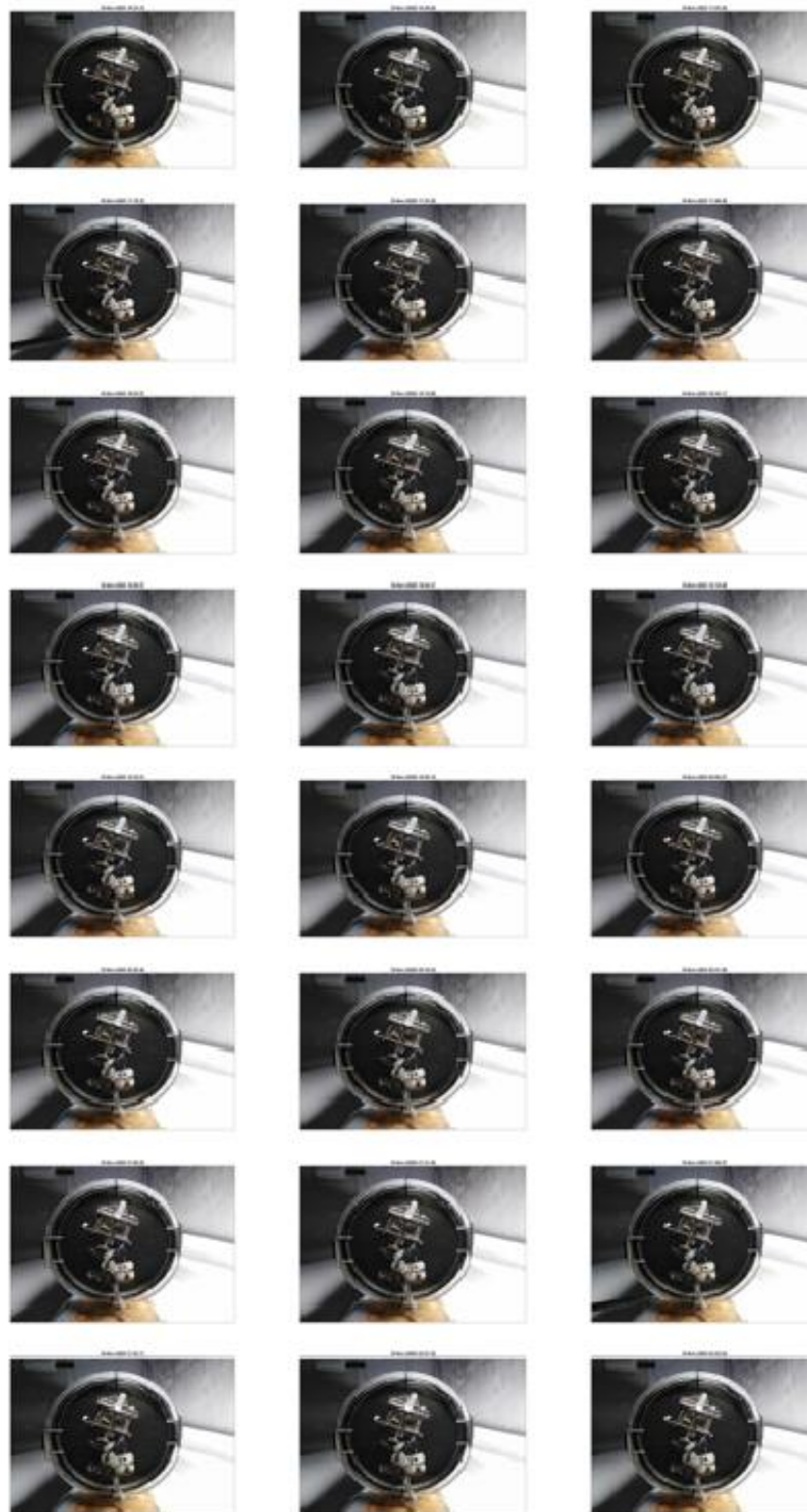
Figura 9.77 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.10 (1)



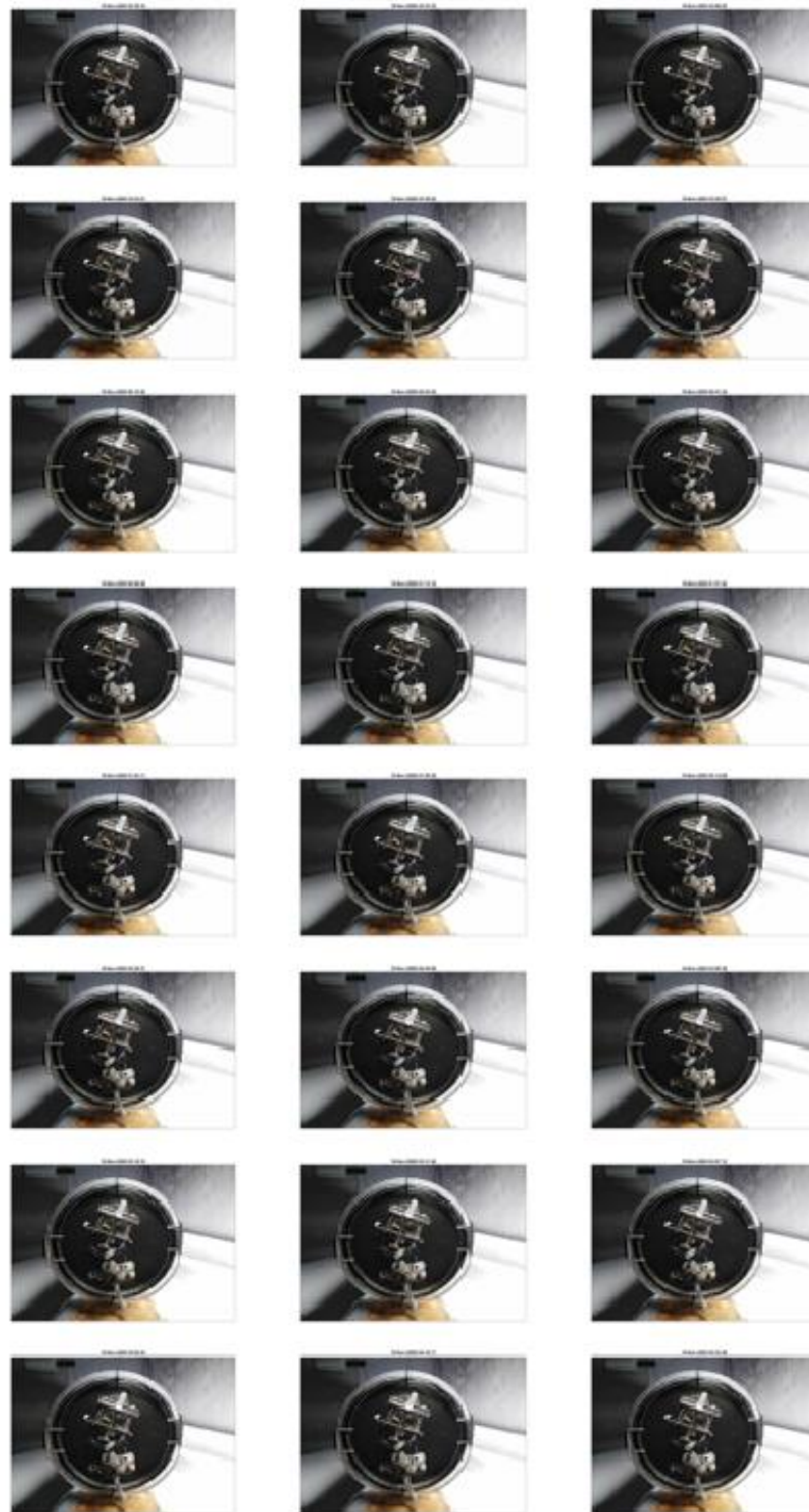
Figura 9.78 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.10 (2)



**Figura 9.79** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.10 (3)



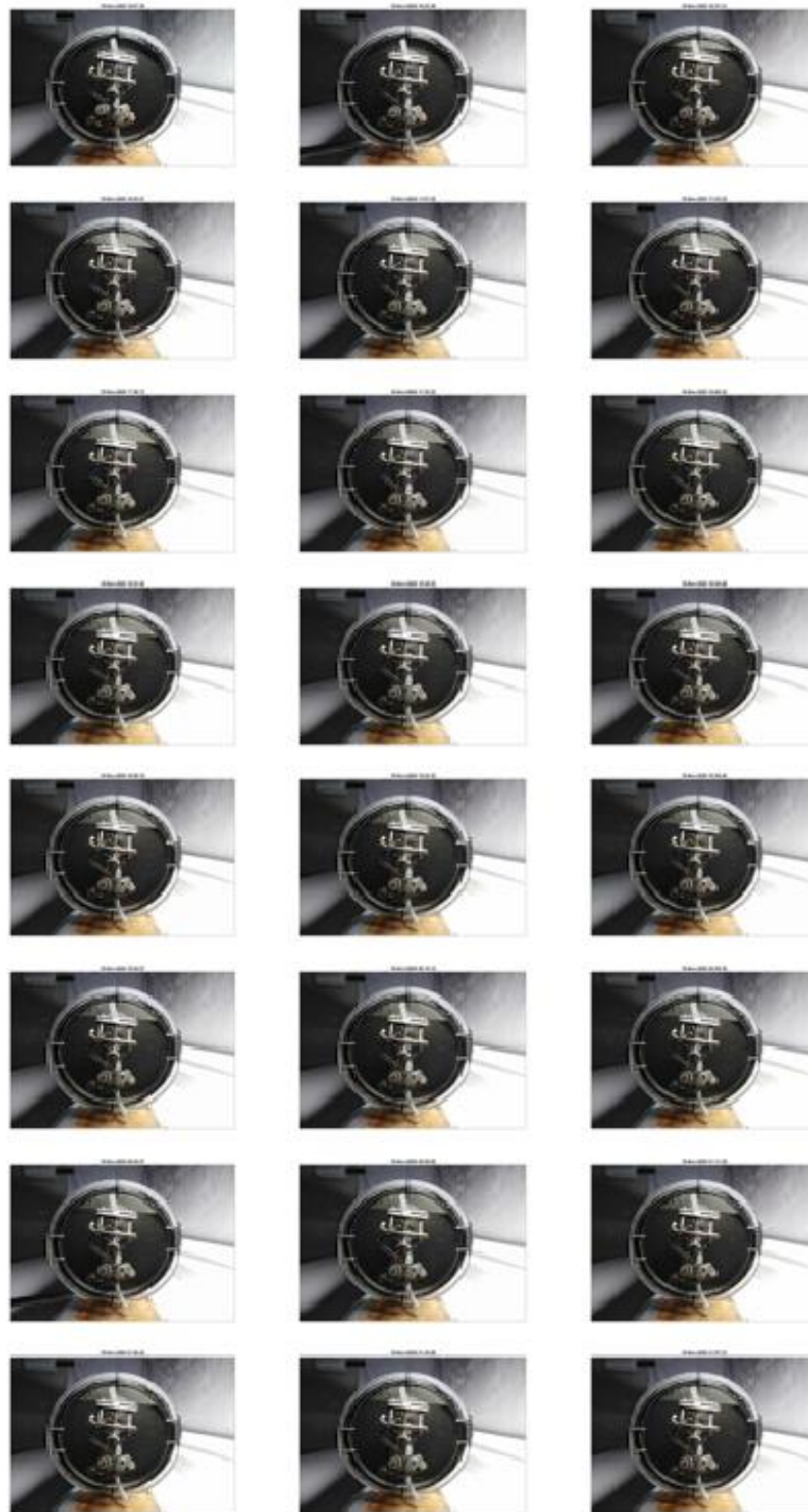
**Figura 9.80** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.11 (1)



**Figura 9.81** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.11 (2)



**Figura 9.82** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.11 (3)



**Figura 9.83** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.12 (1)

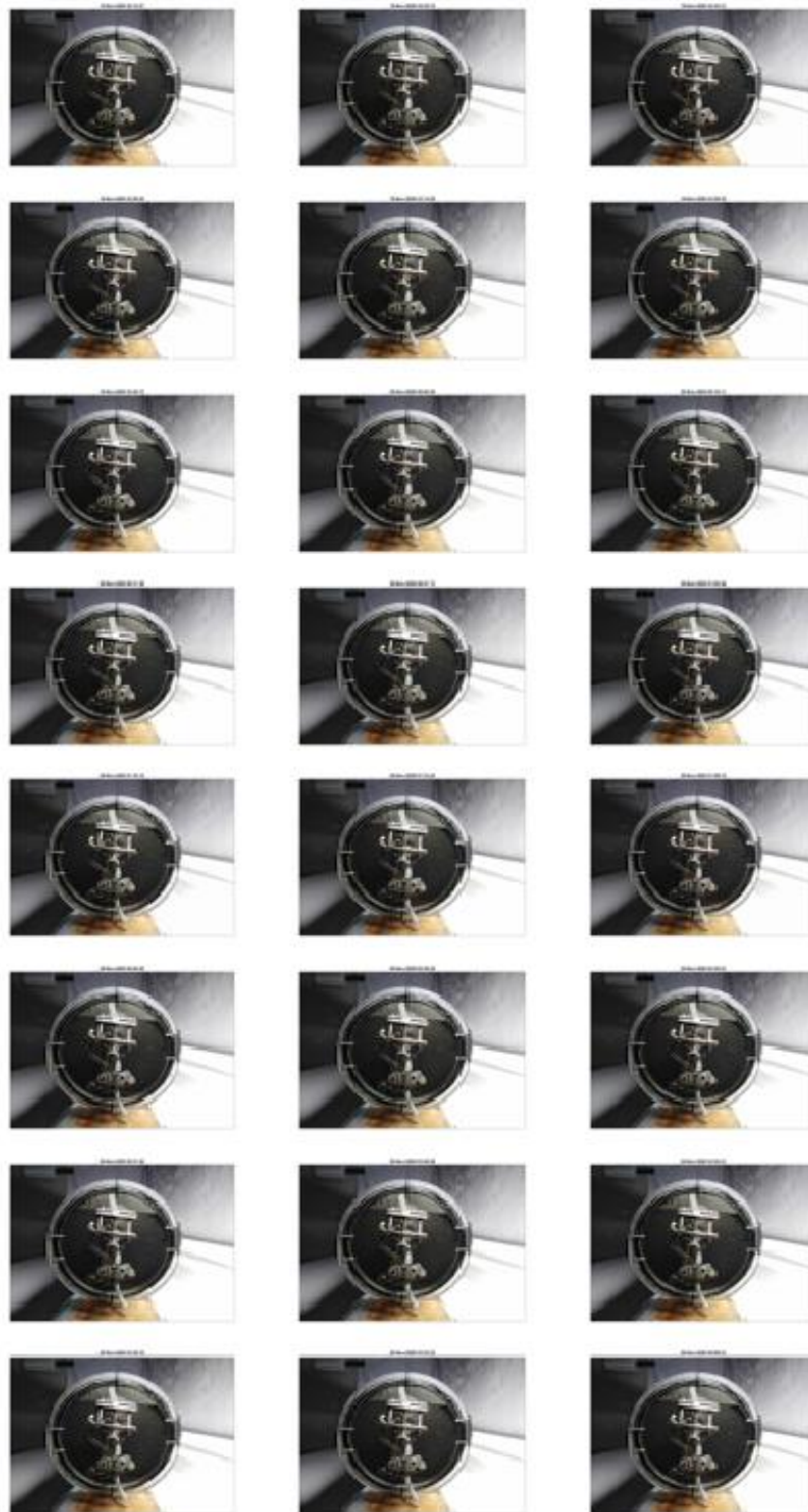
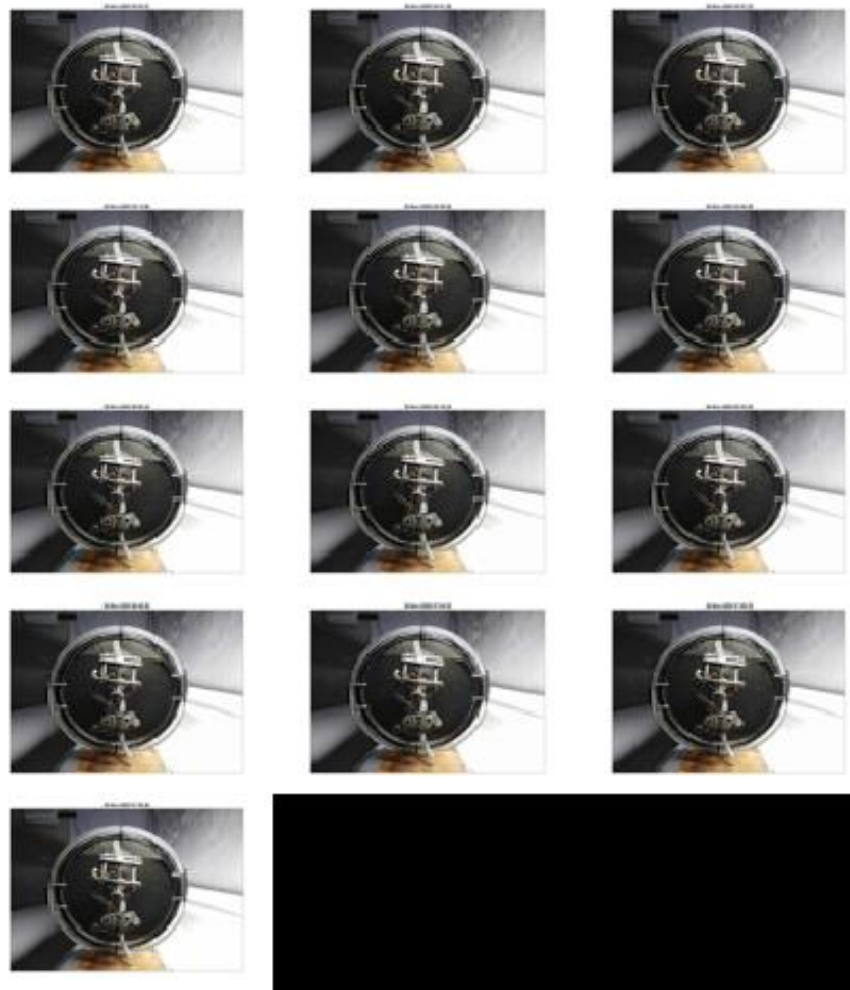


Figura 9.84 Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.12 (2)



**Figura 9.85** Captura de imágenes de la vista transversal durante la ejecución de E.F.12 (3)