

2016

*Comportamiento de flujo de lodos  
mineros de la presa denominada Peña  
del Águila.*

*Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia, España)*

Trabajo fin de Grado  
Grado en Recursos Minerales y Energía.



E.T.S. de Ingeniería de Caminos, Canales y  
Puertos Y de Ingeniería de Minas  
Universidad Politécnica de Cartagena

Autor: Ortega Belda, Pedro Antonio

Director: García García, Cristóbal

Codirector: Alcolea Rubio, Luis Alberto



## INDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	7
INDICE FIGURAS.....	9
INDICE DE FOTOS .....	10
INDICE DE TABLAS.....	10
INDICE DE GRÁFICOS.....	12
CAÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	15
1.1. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	15
1.1.1. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	15
1.2. OBJETIVOS.....	17
1.3. ANTECEDENTES EN LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE RELAVES..	19
CAPITULO 2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	23
2.1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA .....	23
2.2. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA DEL SUSTRATO DE LAS BALSAS DE LODOS DE PEÑA DEL ÁGUILA .....	27
2.3. ESTUDIO GEOTÉCNICO.....	34
2.3.1. CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS GEOTÉCNICOS .....	34
2.3.1.1. TEXTURA .....	35
2.4. ESTUDIO GEOQUÍMICO .....	35
2.4.1. CONTENIDIO DE METALES.....	35
2.4.1.1. pH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA .....	36
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
3.1. TRABAJO DE CAMPO .....	39
3.2. TRABAJO DE LABORATORIO .....	40
CAPÍTULO 4. ENSAYOS DE LABORATORIO.....	47

4.1. ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE DISPERSIÓN DE LONGITUD DE ONDA.....	47
4.2. ANÁLISIS DE TAMAÑO DE PARTÍCULA POR DIFRACCIÓN LÁSER.....	48
4.3. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO .....	49
4.4. REOMETRÍA .....	51
4.5. DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE POLVO .....	53
4.6. TEST DE LIXIVIADO .....	55
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....	59
5.1. ANÁLISIS DE TAMAÑO DE PARTÍCULA POR DIFRACCIÓN LÁSER.....	59
5.2. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO .....	61
5.3. DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE POLVO .....	63
5.4. TEST DE LIXIVIADO .....	64
5.5. ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE DISPERSIÓN DE LONGITUD DE ONDA.....	65
5.5.1. PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	65
5.6. REOMETRÍA .....	68
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES .....	83
7. BIBLIOGRAFÍA.....	86

## AGRADECIMIENTOS:

Agradecer en primer lugar a Cristóbal García García por su propuesta, motivación, paciencia y seguimiento durante estos meses que hemos estado realizando el trabajo fin de grado sobre la caracterización de lodos mineros (relaves) de la presa de relaves Peña del Águila.

A Luis Alberto Alcolea Rubio por su constante implicación y ayuda durante el periodo de preparación y análisis de muestras en el laboratorio (SAIT).

A Ana Vanessa Caparrós Ríos y Vicente Muñoz Martínez por su ayuda y motivación en el análisis y explicación de los ensayos realizados en laboratorio.

A Roberto Rodríguez Pacheco por explicarme y darme a conocer las diferentes características de las balsas mineras, así como los factores más importantes que influyen en su estabilidad.

A Jorge Martínez Moreno, compañero del trabajo fin de grado por el tiempo que le hemos dedicado juntos a este trabajo.

Y por último a mis padres y mis hermanos por su confianza, ayuda, comprensión y paciencia durante toda la etapa de mis estudios y en especial durante estos meses del trabajo fin de grado.



## RESUMEN

El objetivo de este trabajo fin de grado es determinar las características físico-químicas de los lodos de la balsa minera (presa) llamada Peña del Águila, la cual se localiza en la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia).

Conociéndose estas características, se podrá determinar el comportamiento de esta balsa minera y en consecuencia poder entender y evitar posibles roturas y desprendimientos de estos lodos.

Para determinar estas características se han utilizado distintos métodos que incluyen la cartografía, recogida de distintas muestras de lodos en la balsa Peña del Águila, disgregación y tamizado en húmedo y seco de las muestras, análisis reológicos, difracción láser, termogravimetría, difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X.

De acuerdo a los resultados los materiales se clasifican de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS) como limo baja plasticidad arenoso ML, grado de curvatura 0.96, coeficiente de uniformidad 1.66, índice de plasticidad 2.7%, su composición química es silicato de Fe, Mg y Al mayoritariamente, además de otros componentes en menos proporciones. Presentan un pH 7.95 y una conductividad eléctrica de 11.08 mS/Cm. De acuerdo a los resultados del ensayo reológico el comportamiento de estos lodos muestra que al aumentar la concentración de sólidos aumenta la tensión de cedencia, siendo este aumento más significativo a partir del 60% de concentración de sólidos.



## ABSTRACT

The main objective of this work is to determine the physico-chemical characteristics of sludge from the tailings pond called Peña del Águila, which is located in Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia).

Once you know these characteristics you can determine the behavior of this tailing pond so as to be able to understand and avoid any possible sludge breakage of slide which may occur.

In order to determine these characteristics some different methods have been used. These methods include mapping, collecting different samples of sludge on the tailing pond Peña del Águila, disintegration and sieving of wet and dry samples, rheological analysis, thermogravimetry, XRD, and XRF.

Taking the results into account materials are classified according to the Unified System of Soil Classification (USCS) as low sandy loam plasticity ML, which 0.96 degree of curvature, uniformity coefficient 1.66 and plasticity index 2.7%. Its chemical composition is mainly silicate Fe, Mg and Al, and other components in lower proportions. They have a pH 7.95 and an electrical conductivity of 11.08 mS / cm. According to the results of rheological testing the behavior of these sludges shows that increasing the solids concentration increases stress yield point. This increase becomes most significant from 60% solids concentration upwards.



## ÍNDICE FIGURAS

FIGURA 1 MAPA 978-1-4 (IGN). ESCALA 1:25000 .....	23
FIGURA 2 SITUACIÓN Y ACCESOS BALSAS PEÑA DEL ÁGUILA (GOOGLE EARTH).....	25
FIGURA 3 MAPA GOOGLE EARTH SITUACIÓN GEOGRÁFICA PEÑA DEL ÁGUILA .....	26
FIGURA 4 MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE PEÑA DE ÁGUILA, CON LA UBICACIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE LODOS.....	28
FIGURA 5 LEYENDA MAPA GEOLÓGICO DE LA FIGURA 4 .....	28
FIGURA 6 ESPECTRÓMETRO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X BRUKER S4 PIONNER.....	47
FIGURA 9 REÓMETRO .....	53
FIGURA 11 MEDICIÓN PH.....	55
FIGURA 12 CONDUCTÍMETRO.....	56
FIGURA 13 RESULTADO ENSAYO ANÁLISIS DE TAMAÑO DE PARTÍCULA .....	59
FIGURA 14 CLASIFICACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS LODOS PEÑA DEL ÁGUILA.....	60
FIGURA 15 RESULTADOS ANÁLISIS GRAVIMÉTRICOS .....	61
FIGURA 16 CURVAS DE PERDIDA DE MASA DE LA MUESTRA DE LODOS DE LA Balsa PEÑA DEL ÁGUILA .....	62
FIGURA 17 PROBETAS CON SUSPENSIONES PARA ENSAYOS REOLÓGICOS. ....	70
FIGURA 18 GRÁFICO DE ANÁLISIS DE MUESTRA DE BARRIDO DE TENSIÓN DE CIZALLA EN CONTINUO DE UN 55% P/P DE SUSPENSIÓN DE LA MUESTRA DE LODOS <50 MICRAS DE LA PEÑA DEL ÁGUILA. ....	71
FIGURA 19 GRÁFICO DE ANÁLISIS DE BARRIDO DE TENSIÓN DE CIZALLA EN ESTADO ESTACIONARIO DE UNA SUSPENSIÓN DEL 55 % P/P DE LA MUESTRA DE LODOS <50 MICRAS DE LA Balsa PEÑA DEL ÁGUILA. ....	71
FIGURA 20 GRÁFICO DE ANÁLISIS DE VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN DE CIZALLA DE UNA SUSPENSIÓN DEL 55 % P/P DE LA MUESTRA DE LODOS < 50 MICRAS DE LA Balsa PEÑA DEL ÁGUILA .....	72
FIGURA 21 GRÁFICO DE ANÁLISIS DE VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN DE CIZALLA EN CONTINUO DE UNA SUSPENSIÓN DEL 50 % P/P DE LA MUESTRA DE LODOS < 50 MICRAS DE LA PEÑA DEL ÁGUILA .....	73
FIGURA 22 CURVA REPRESENTATIVA DE LAS DIFERENTES SUSPENSIONES ANALIZADAS.....	79
FIGURA 23 CURVA REPRESENTATIVA DE LAS DIFERENTES SUSPENSIONES ANALIZADAS.....	84

FIGURA 24 GRÁFICO EXPERIMENTAL REPRESENTATIVO DE CURVAS DE COMPORTAMIENTO REOLÓGICO INCLUYENDO LA CURVA DE LOS RESULTADOS REOLÓGICOS DEL PRESENTE ESTUDIO. ....	85
---	----

## ÍNDICE DE FOTOS

FOTO 1 DIQUES FORMADOS EN LAS BALSAS DE LA PEÑA DEL ÁGUILA .....	29
FOTO 2 OBSÉRVESE COMO EL DIQUE DE ARENA ASCIENDE ATRAVESANDO TODAS LAS CAPAS DE LODO HASTA LLEGAR A LA SUPERFICIE. ....	30
FOTO 3 ESTRUCTURAS MORFOLÓGICAS FORMADAS POR LA EROSIÓN DEL AGUA Y AIRE ....	31
FOTO 4 ESTRUCTURAS MORFOLÓGICAS FORMADAS POR LA EROSIÓN DEL AGUA Y AIRE ....	31
FOTO 5 ESTRUCTURA DE CARGA .....	32
FOTO 6 DETALLE DE LA FOTO 5.....	32
FOTO 7 ESTRATIFICACIÓN CRUZADA EN MATERIAL ARENOSO (COLOR MAS OSCURO).....	33
FOTO 8 SITUACIÓN GEOGRÁFICA DE LA MUESTRA.....	39
FOTO 9 RECOGIDA DE MUESTRA DE LODOS EN LA PRESA PEÑA DE ÁGUILA.....	40
FOTO 10 DISGREGACIÓN DE LA MUESTRA DE LODOS EN EL LABORATORIO.....	41
FOTO 11 TAMIZADO EN HÚMEDO DE LA MUESTRA DE LODOS.....	42
FOTO 12 BANDEJA PORTA-MUESTRAS EN EL HORNO (ESTUFA) DONDE SE HAN SECADO LAS MUESTRAS DE LODOS A 60°C.....	42
FOTO 13 MUESTRA DE LODOS SECA, DONDE SE APRECIA EL AGRIETAMIENTO DEL MATERIAL .....	43
FOTO 14 PH METRO ANALIZANDO LA MUESTRA DE LODOS PEÑA DEL ÁGUILA.....	64
FOTO 15 CONDUCTÍMETRO Y MUESTRA PEÑA DEL ÁGUILA.....	64
FOTO 16 PASTILLA PARA ANALIZAR EN EL ENSAYO.....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 COORDENADAS U.T.M. DE LAS BALSAS PEÑA DEL ÁGUILA ESTUDIADAS. ....	26
TABLA 2 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS (FAZ ET AL. 2006).....	34

TABLA 3 CONCENTRACIÓN DE METALES .....	35
TABLA 4 TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE LA MUESTRA.....	41
TABLA 5 VALORES EN % VOLUMEN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LA PARTÍCULA ..	60
TABLA 6 RESULTADOS ENSAYO DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE POLVO.....	63
TABLA 7 RESULTADOS ENSAYOS DE DIFRACCIÓN X .....	66
TABLA 8 ELEMENTOS .....	67
TABLA 9 CONCENTRACIONES DE MG, AL Y SI .....	68
TABLA 10 SUSPENSIONES ANALIZADAS. ....	69
TABLA 11 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LA SUSPENSIÓN DEL 65 % EN PESO, DE SÓLIDO. VELOCIDAD DE CIZALLA. ....	74
TABLA 12 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LA SUSPENSIÓN DEL 60 % EN PESO DE SÓLIDO.. VELOCIDAD DE CIZALLA. ....	74
TABLA 13 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LA SUSPENSIÓN DEL 55 % EN PESO DE SÓLIDO. VELOCIDAD DE CIZALLA. ....	75
TABLA 14 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LA SUSPENSIÓN DEL 52 % EN PESO DE SÓLIDO. VELOCIDAD DE CIZALLA. ....	76
TABLA 15 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LA SUSPENSIÓN DEL 50 % EN PESO DE SÓLIDO. VELOCIDAD DE CIZALLA. ....	76
TABLA 16 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LA SUSPENSIÓN DEL 47 % EN PESO DE SÓLIDO. VELOCIDAD DE CIZALLA. ....	77
TABLA 17 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LA SUSPENSIÓN DEL 45 % EN PESO DE SÓLIDO. VELOCIDAD DE CIZALLA. ....	77
TABLA 18 ENSAYOS REALIZADOS EN EL REÓMETRO Y ANALIZADOS EN TRIOS.....	78
TABLA 19 TABLA COMPARATIVA DE LAS TENSIONES DE CIZALLA (PA) OBTENIDAS POR TRES ENSAYOS DE FLUJO DIFERENTES.....	79
TABLA 20 TABLA COMPARATIVA DE LAS TENSIONES DE CIZALLA (PA) OBTENIDAS POR TRES ENSAYOS DE FLUJO DIFERENTES.....	84

## ÍNDICE DE GRÁFICOS.

GRÁFICO 1 GRÁFICO EXPERIMENTAL REPRESENTATIVO DE CURVAS DE COMPORTAMIENTO REOLÓGICO. ....	19
GRÁFICO 2 TEXTURAS PREDOMINANTES EN LAS MUESTRAS A,B,C,D,E .....	35

# CAPÍTULO 1

---



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

La extracción de los recursos minerales ha generado grandes beneficios que, en algunos casos, ha supuesto el desarrollo industrial y social de su entorno. Asociado a la explotación de las menas beneficiables se generan gran cantidad de residuos minero-metalúrgicos, derivados tanto del proceso extractivo como del de transformación. Estos residuos suponen un impacto y riesgo para el medio ambiente. La falta de una legislación adecuada en su momento, la permisividad de las administraciones y la falta de sensibilidad medioambiental de las empresas, ha contribuido a que los residuos no se hayan tratado adecuadamente en el momento de su generación y no se evitaren sus efectos negativos.

Los términos impacto y riesgo ambiental se han generalizado ampliamente en la literatura relativa al medio ambiente, para evaluar o designar las actuaciones antrópicas sobre el medio natural y sus ecosistemas. Las relaciones fundamentales entre el medio físico y las actividades antrópicas que en él se desarrollan pueden analizarse estableciendo el efecto que las actividades humanas desarrolladas en el pasado, las que se efectúan en el presente o previstas para el futuro (potenciales) han producido, producen o producirán en el medio ambiente.

En este trabajo fin de grado se realiza la caracterización física, química, mineralógica y reológica de los lodos de las balsa minera de Peña del Águila, situada en La Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia), para entender el comportamiento de estos lodos bajo diversas situación climáticas y geológicas y poder así evitar un mayor impacto ambiental y la posibilidad de desastres que pueden ocasionar estas balsas en nuestro entorno.

#### 1.1.1. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

La balsa Peña del Águila ha sido estudiada en diferentes épocas y por distintos organismos y personas, tal y como se expone en el anterior apartado y que se resumen en el cuadro 1.

Cuadro 1 Referencias cronológicas de las balsas Peña del Águila.

<b>Depósito: PEÑA DEL AGUILA</b>
No. Inventario (fichas) IGME-1990: P45,46,47,49 / P48 / sin nº / sin nº
No. Inventario (fichas) IGME-1999: 283910045,46,47,49 / 283910048 / sin nº / 283910021
No. Inventario (fichas) IGME-2002: 0978-1-20,21,22,24 / 0978-1-0023 / 0978-1-0025 / 0978-1-0019
No. Inventario TESIS-CGG-2004: C-F1; C-F2; C-F4; B-F1 (La Rosa)
<p><b>Trabajo realizado por la UPCT para la Dirección General de Industria, Energía y Minas de la CARM. Peña del Águila tailings dams</b></p> <p>Título: Evaluación de riesgo y definición de medidas correctoras en depósitos de lodos abandonados procedentes de procesos de actividad extractiva en la Región de Murcia. Aplicación al grupo de depósitos “Peña del Águila” (Nº 0978-1-0019; 0978-1-0020; 0978-1-0021; 0978-1-0022; 0978-1-0023; 0978-1-0024; 0978-1-0025). Technical University of Cartagena. 141 pp</p> <p>Autores: Faz Cano, A., et all., 2006.</p>
Coordenada UTM X (m) (punto medio): 691200
Coordenada UTM Y (m) (punto medio): 4164300
Cota Z (m): 195
Volumen: 1.100.000 m <sup>3</sup>

Los objetivos del último estudio del año 2006 fueron los siguientes:

1.-Estudio geofísico y evaluación de riesgos medioambientales, tanto geoquímicos como de estabilidad estructural.

2.-Estudio geotécnico y evaluación de riesgos medioambientales de estabilidad estructural.

3.-Estudio físico-químico y evaluación de riesgos de movilidad geoquímica de los contaminantes.

4.-Estudio hidrológico, hidrogeológico y geológico y evaluación de riesgos geológicos y de dispersión hídrica de los contaminantes.

5.-Estudio ecológico de las especies vegetales presentes en los depósitos de lodos, estableciendo los factores edáficos limitantes para su crecimiento y, por lo tanto, las posibilidades de restauración vegetal.

6.-Análisis integral de riesgos, propuesta y valoración de medidas correctoras. (Faz et al. 2006)

## 1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es caracterizar el comportamiento Reológico y determinar las características físico-químicas de los depósitos de lodos denominados “Peña del Águila”

### *INTRODUCCIÓN A LA REOLOGÍA*

La reología es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir.

Las propiedades mecánicas estudiadas por la reología se pueden medir mediante reómetros, aparatos que permiten someter al material a diferentes tipos de deformaciones controladas y medir los esfuerzos o viceversa. Algunas de las propiedades reológicas más importantes son:

- Viscosidad aparente (relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte)
- Coeficientes de esfuerzos normales
- Viscosidad compleja (respuesta ante esfuerzos de corte oscilatorio)
- Módulo de almacenamiento y módulo de pérdidas (comportamiento viscoelástico lineal)
- Funciones complejas de viscoelasticidad no lineal.

El problema básico de la reología es determinar la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida en un material de naturaleza físico-química dada.

Esta relación es ya conocida para sólidos elásticos sometidos a pequeñas deformaciones (Ley de Hooke) y para líquidos sencillos y gases (Ley de Newton de la Viscosidad).

Sin embargo, no siempre existe una relación lineal entre esfuerzo y deformación debido a complejidades en la estructura y morfología de algunos materiales. Pero tanto en los casos sencillos como en los casos complejos se tienen las mismas variables fundamentales.

Características físicas de dichas variables:

**Esfuerzo:**

Un elemento de una porción de materia continua, el cual tomaremos como sistema, puede estar sometido a fuerzas de origen diversos: gravedad, fuerzas internas y distribución de presiones externas aplicadas al sistema.

**Deformación:**

Un material se deforma en cierta dirección si la velocidad de todos los puntos (vista desde un marco de referencia fijo) no es la misma en dicha dirección.

**Reometría (Rt) :**

Es la parte experimental de la Reología; para esto se emplea un Reómetro con el que se mide y cuantifican las microestructuras invisibles a simple vista de materiales y fluidos.

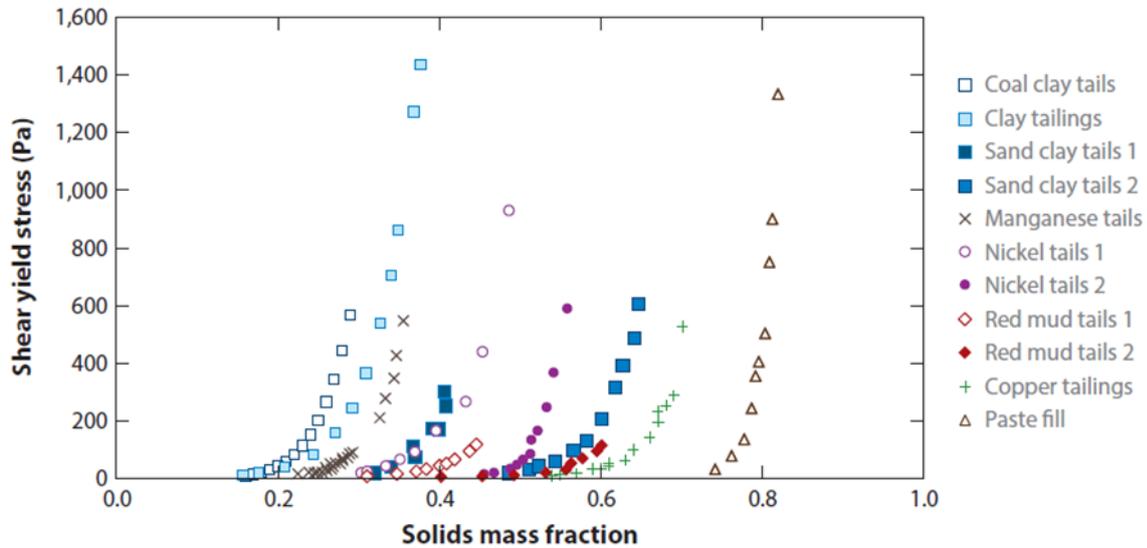


Gráfico 1 Gráfico experimental representativo de curvas de comportamiento reológico.

El gráfico 1 muestra de forma clara el comportamiento de distintos fangos mineros. En el eje X se representa los sólidos de la fracción de la masa, es decir, el mismo fango pero a distintas concentraciones de sólidos. En el eje Y se representa el límite de elasticidad de cizallamiento, de manera que cada curva está representando la tensión máxima a la que el fluido se deforma dependiendo de la concentración de sólidos que contenga.

### 1.3. ANTECEDENTES EN LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE RELAVES

El gráfico 1 muestra el límite de elasticidad como una función de la concentración para once concentraciones diferentes de relaves procedentes de procesos metalúrgicos de extracción de minerales.

Todos ellos exhiben un aumento exponencial de la tensión de cizalladura con la concentración, con el límite elástico que suele comenzar a elevarse rápidamente para el rendimiento de tensiones superiores a 200 pascales.



# CAPÍTULO 2

---



## CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 2.1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

La balsa Peña del Águila se sitúa en la hoja nº 978 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) figura nº 1

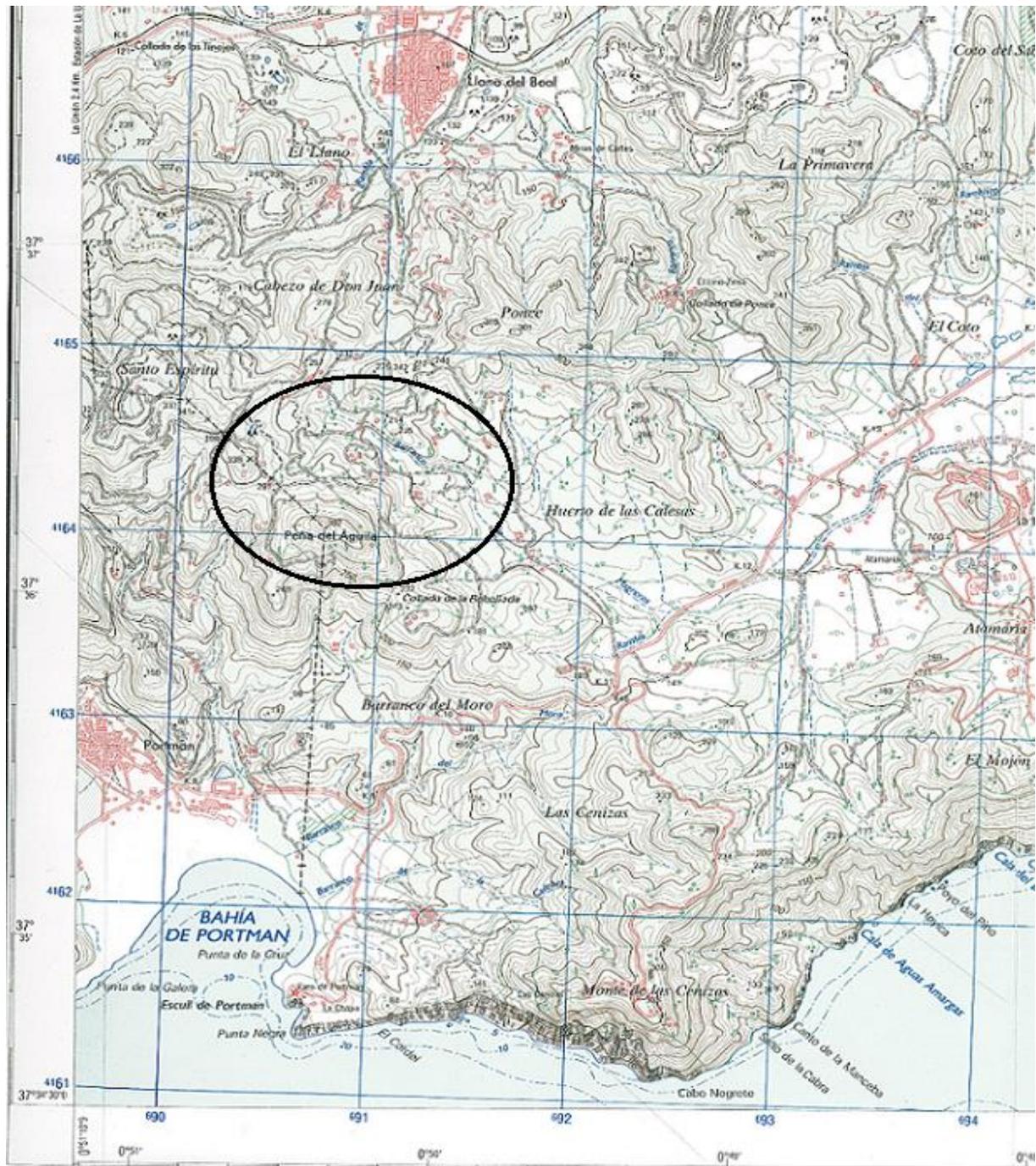


Figura 1 Mapa 978-1-4 (IGN). Escala 1:25000

Estos depósitos se encuentran apoyados sobre la parte inferior de la ladera noroeste del macizo Peña del Águila, al borde del barranco de Magreros.

El acceso (figuras 1 y 2) se puede realizar desde la población del Llano del Beal en dirección al campo de Golf, y al llegar al alto del collado de los mosquitos se toma el camino de tierra que sale a la derecha, y desde donde es visible parcialmente la balsa.

Otra vía de acceso es partiendo de la población del Portman hacia el campo de golf y la población de Los Belones, al llegar a un alto se toma el camino de tierra que sale a la izquierda y nos lleva a la parte baja de la balsa.



Figura 2 Situación y accesos balsas Peña del Águila (google earth)

Esta balsa se ha formado con los estériles procedentes del lavadero denominado “La Pinada”, actualmente desaparecido. Originalmente el lavadero correspondía a la mina Secretaria, situada en la falda noreste de la Peña del Águila. En dicha mina se explotaron varios filones de galena, blenda y pirita, con predominio de la blenda, que armaban en los mármoles nevado-filábrides.

La actividad del lavadero de flotación La Pinada fue posterior al cierre de la mina, que tuvo lugar antes de la guerra civil española, por lo que todo el volumen de

lodos de flotación existentes en el área, proceden del lavado de las numerosas terreras de gravimetría, de etapas anteriores, que existían de la zona, así como de minerales marginales cedidos por la empresa Peñarroya. (Faz et al., 2006)

La balsa Peña del Águila objeto del presente estudio comprende las cinco balsas situadas en la figura 3, cuyas coordenadas U.T.M. se pueden ver en la Tabla 1.

Tabla 1 Coordenadas U.T.M. de las balsas Peña del Águila estudiadas.

Clave	X	Y	Z	Huso
0978-1-0020	691110	4164370	195	30
0978-1-0021	691000	4164430	202	30
0978-1-0022	691200	4164300	195	30
0978-1-0023	691400	4164430	180	30
0978-1-0024	691300	4164280	190	30



Figura 3 Mapa google Earth situación geográfica Peña del Águila

## 2.2. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA DEL SUSTRATO DE LAS BALSAS DE LODOS DE PEÑA DEL ÁGUILA

La zona ocupada por estas balsas de estériles está constituida por materiales del Complejo Alpujárride, que más hacia el este, aparecen recubiertos por materiales del Mioceno.

La balsa Peña del Águila descansa sobre una delgada formación de coluviones y aluviones cuaternarios, que a su vez están recubriendo filitas en su parte suroeste y un delgado paquete de calizas en la parte noreste.

El importante espesor de filitas en la zona donde están asentados los depósitos, indica que no habrá una percolación vertical de lixiviados bajo éstos, sino que la eliminación de los lixiviados se producirá por escorrentía superficial, a lo largo del barranco de Magreros en dirección a Atamaría, que vierte en la rambla de La Carrasquilla, la cual desemboca en el Mar Menor. Es decir que pese a su situación en la vertiente sur de la sierra, la posible influencia contaminante de estos depósitos mineros incide sobre el Mar Menor.

En el mapa geológico de la zona (figura 4) se puede ver la posición de los depósitos de lodos, en el barranco de Magreros, al noreste de los relieves de Peña del Águila. La falla de Magreros, sensiblemente coincidente con dicho barranco, separa dos dominios geomorfológicos: Al oeste los fuertes relieves de la Peña del Águila formados por materiales alpujárrides (calizas, dolomías y filitas), y al este los relieves menos abruptos formados por materiales del Mioceno (areniscas, limolitas y margas). (Faz et al., 2006).

### **Fallas**

La falla más importante de la zona es la falla de la Peña del Águila, o falla de San Marcelino, que es una de las fallas importantes del sistema N-130°. Existen además otras fallas paralelas pero de menos desarrollo, una de las cuales, falla Magreros, paralela al barranco del mismo nombre, pasa bajo la balsa de estudio. (Faz et al. 2006)

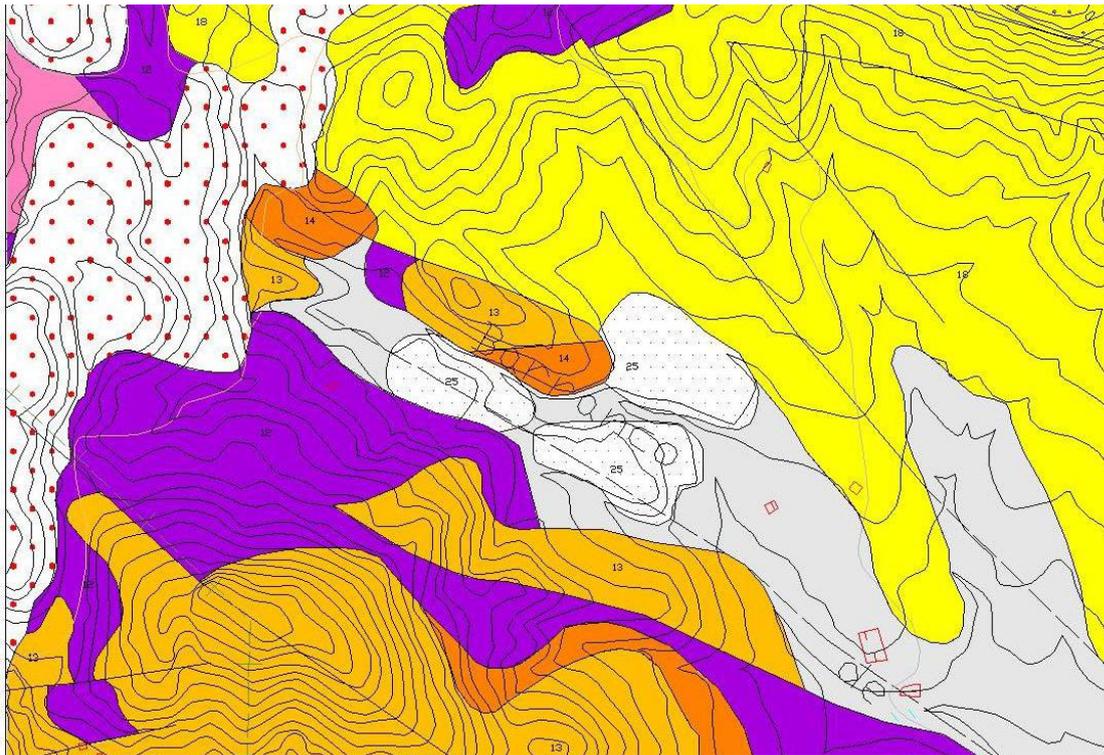


Figura 4 Mapa geológico de la zona de Peña de Águila, con la ubicación de los depósitos de lodos

LEYENDA				
Balsas de estériles	26	CUATERNARIO		
Escombreras	24			
Dunas fósiles	23b			
Gravas, arenas, limos, fondos de valle	23			
Manto oxidado y gossan	22	MINERALIZACIONES		
Manto mineral	20			
Basaltos alcalinos	10	PLIOCENO		
Dacitas dominantes y andesitas	19	MIOCENO Superior		NEÓGENO
Conglomerados	19b	MIOCENO medio		
Margas y areniscas micáceas. Niveles de brechas sedimentarias	18			
Dolomías, calizas	17	TRIAS	U. DE LOS SANCOS- QUERZAS	BÉTICO DE MÁLAGA
Pelitas y areniscas, rojo achocolatado		(PERMO)-TRIAS		
Dolomías marrones	15	TRIAS Superior	UNIDAD DE PORTMAN	UNIDADES TECTÓNICAS O MANTOS DEL COMPLEJO ALPUJARRIDE
Calizas en bancos	14			
Dolomías grises marrones	13	(PERMO)-TRIAS	UNIDAD DE SAN GINÉS	
Filitas y cuarcitas rojo violáceas	12			
Doleritas, sill y diques	11	TRIAS Medio	UNIDAD DE SAN GINÉS	
Dolomías negras	9b			
Calizas margosas con Myophoria baética		(PERMO)-TRIAS		
Calizas en bancos				
Dolomías marrones				
Filitas y cuarcitas azuladas y blancas	7			
Micaesquistos y cuarcitas azuladas y blancas		"FALSO MURO" -PALEOZOICO		

Figura 5 Leyenda mapa geológico de la figura 4

### **Estructuras en balsas**

En la balsa Peña del Águila aparecen diques de arenas naturales formados por movimientos internos de la balsa de lodos debido a presiones y diferentes composición y granulometría de estos. Los diques de las fotos 1 y 2 son unas estructuras que destacan por su forma definida en las balsas de lodos.



Foto 1 Diques formados en las balsas de la Peña del Águila



Foto 2 Obsérvese como el dique de arena asciende atravesando todas las capas de lodo hasta llegar a la superficie.

También se pueden ver estructuras morfológicas que se han formado debido a la erosión del agua y del aire como se muestra en la foto 3 y 4.

Algunas zonas del área de estudio describen de forma precisa el recorrido y dirección que siguen las escorrentías que producen las escasas lluvias del clima semi-árido que caracteriza a la Región de Murcia.

Esto provoca que se formen socavones arrastre de material como se pueden ver en las fotos 3 y 4 la cual es muy representativo de la morfología de la balsa.



Foto 3 Estructuras morfológicas formadas por la erosión del agua y aire



Foto 4 Estructuras morfológicas formadas por la erosión del agua y aire

El tipo de estructura de deformación (fotos 5 y 6) es indicativo de que cuando la balsa se encontraba en estado fluido en ese punto hubo algún elemento que provocó una presión puntual superior a la presión de las capas de alrededor, provocando así un hundimiento que se consolidó al solidificar las capas externas de la balsa de lodos.



Foto 5 Estructura de carga

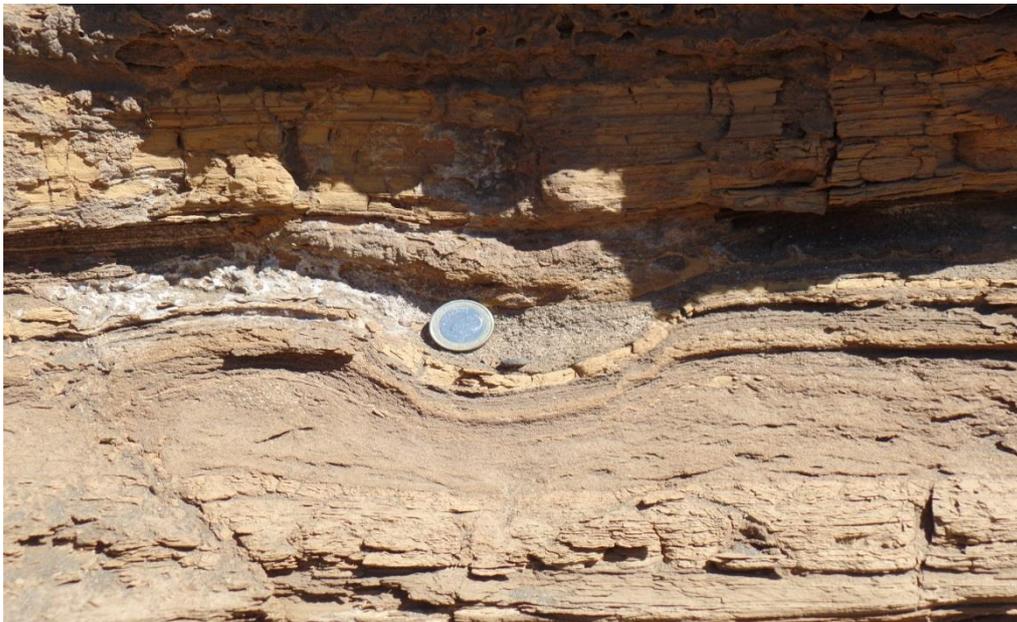


Foto 6 Detalle de la foto 5



Foto 7 Estratificación cruzada en material arenoso (color más oscuro)

## 2.3. ESTUDIO GEOTÉCNICO.

### 2.3.1. CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS GEOTÉCNICOS

En el estudio hecho en el 2006 (Faz et al. 2006) se obtuvieron las siguientes conclusiones respecto a las características geotécnicas de la balsa Peña del Águila: En cuanto a la granulometría se analizó la muestra con los tamices 2.00; 0.05; 0.002 y 0.0002 mm. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2 Análisis de las muestras obtenidas (Faz et al. 2006)

Muestra	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)
	<2 $\mu$	2-50 $\mu$	50-2000 $\mu$
1	0,87	17,37	81,77
2	3,15	14,80	82,05
3	2,17	13,44	84,38
4	1,62	13,52	84,86
5	4,1	13,75	82,16
6	3,13	16,20	80,67
7	2,76	15,25	81,99

Según los resultados obtenidos, las muestras tienen un porcentaje superior al 50 % de material retenido entre 50 y 2000 micras. Por lo tanto, estos valores indican un tipo de estructura equivalente a suelo de grano grueso.

Para determinar el índice de plasticidad recurrieron a depósitos similares situados cerca de éste donde pudieron efectuar un sondeo. Estos resultado se encuentran del orden de 2,7 para un tipo de material ML. (Faz et al., 2006).

### 2.3.1.1. TEXTURA

En cuanto a la textura predomina el tipo franco-arenoso. Lo que permite concluir que el depósito presenta, en términos generales, textura moderadamente gruesa, lo cual facilita la infiltración de agua en los primeros centímetros (Faz et al. 2006).

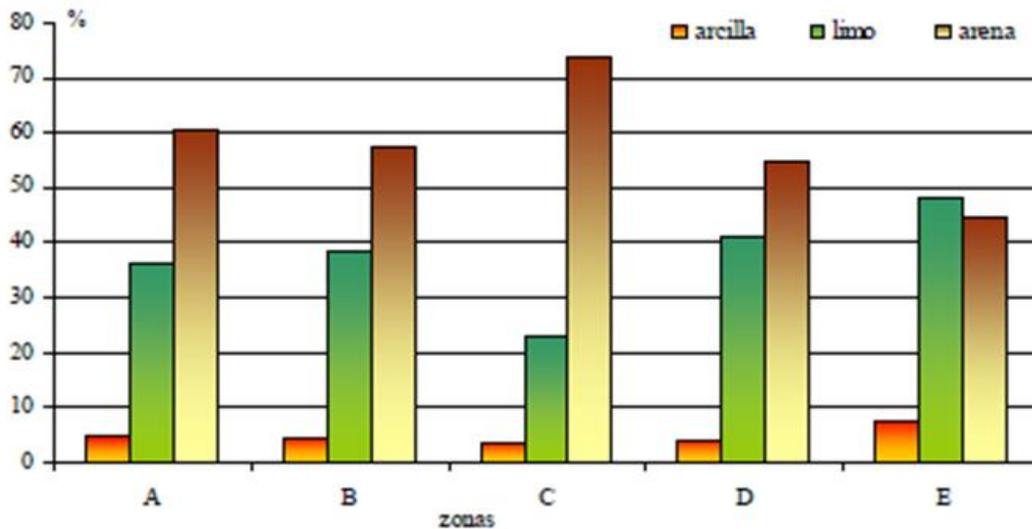


Gráfico 2 Texturas predominantes en las muestras a,b,c,d,e

## 2.4. ESTUDIO GEOQUÍMICO

### 2.4.1. CONTENIDO DE METALES:

El contenido medio de metales obtenido en el análisis de las diferentes muestras es el que se muestra en la tabla 3. (Faz et al. 2006).

Tabla 3 Concentración de metales

Balsas Peña del Águila	Zn	Pb	Cu	Cd
A	0.47%	0.17%	0.016%	20 ppm
B	0.55%	0.34%	0.007%	22 ppm

#### 2.4.1.1. pH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La determinación de pH se realizó en una solución 1:1, utilizando en cada uno de los casos agua (pH real) y KCl (pH potencial). Estas medidas se llevaron a cabo utilizando un potenciómetro provisto de un electrodo de pH combinado (pH-meter Basic 20 CRISON). Este método determina el pH, midiendo el potencial generado (en milivoltios) por el electrodo de vidrio que es sensible a la actividad del ión H<sup>+</sup>.

Este potencial es comparado con un electrodo de referencia, que produce un potencial constante e independiente del pH. En cuanto a los valores de pH obtenidos en el estudio se han obtenido unos valores medios de 7.17, por lo que pueden ser clasificados como neutros y ligeramente alcalinos.

En cuanto a la conductividad eléctrica, esta varía entre 2.15 y 11.79 mS/Cm, dependiendo de la zona en la que se ha cogido la muestra.

# CAPÍTULO 3

---



## CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. TRABAJO DE CAMPO

Para la caracterización físico-química del depósito de lodos “Peña del Águila” se tomó una muestra representativa de todo el depósito como se muestra en el detalle de la foto 8.



Foto 8 Situación geográfica de la muestra

En la foto 8 se puede ver el lugar exacto dentro de la balsa de lodos de la Peña del Águila donde se tomó la muestra que posteriormente trataremos y analizaremos en el laboratorio cuyas coordenadas UTM del punto de muestreo son:

X: 691.273

Y: 4.164.325

La muestra, de unos 3 kg, fue recogida con una paleta de jardinería y depositada en bolsa de plástico para llevarla al laboratorio.

### 3.2. TRABAJO DE LABORATORIO

En primer lugar se ha tamizado en seco toda la muestra recogida en la Peña del águila de aproximadamente 3 kg.



Foto 9 Recogida de muestra de lodos en la presa Peña de Águila

El tamizado se ha realizado a mano dividiendo la muestra en tres partes; una parte con la muestra que no pasó el tamiz de 2000 micras, esta parte la utilizaremos en procesos posteriores para obtener el pH y la conductividad eléctrica. Una segunda parte es la clasificada entre 50 y 2000 micras, cuya finalidad es hacer ensayos de reología con un sensor adecuado para analizar esa granulometría; y por último la parte de la muestra inferior a 50 micras con la que se ha hecho gran parte de este estudio y todos los ensayos relacionados con la reología, ya que el sensor actualmente disponible no nos permitía trabajar con granulometrías superiores a 50 micras. (Ver tabla nº 4).

Tabla 4 Tamaño de partículas de la muestra

Porción de muestra	Tamaño en micras
1-muestra	>2000
2-muestra	2000-50
3-muestra	<50

En primer lugar se ha disgregado la muestra para poder clasificarla en los distintos tamaños granulométricos de la que está compuesta (foto 10)



Foto 10 Disgregación de la muestra de lodos en el laboratorio.

Una vez separada la muestra en las tres partes anteriormente descritas se ha hecho necesario la obtención de una mayor cantidad de muestra por debajo de 50 micras, para lo cual se ha vuelto a tamizar la parte de muestra de entre 50 y 2000 micras, pero esta vez se ha utilizado la técnica de tamizado en húmedo (foto 11)



Foto 11 Tamizado en húmedo de la muestra de lodos

Esta técnica ha consistido en tamizar dicha muestra, en los mismo tamices utilizados en seco, pero aplicando una cantidad de agua tipo II con una presión constante.

Una vez obtenida muestra en húmedo se ha dejado secar en un horno a 60°C (foto 12) obteniéndose la cantidad de muestra por debajo de 50 micras deseada (foto 13)



Foto 12 Bandeja porta-muestras en el horno (estufa) donde se han secado las muestras de lodos a 60°C



Foto 13 Muestra de lodos seca, donde se aprecia el agrietamiento del material

En la foto 13 se ve como ha quedado la muestra después del secado en el horno. Siendo la más oscura la muestra que se quería obtener (< 50 micras) y la más clara la muestra entre 50 y 2000 micras.

El total de la muestra <50 micras se ha utilizado para obtener diferentes suspensiones (para reología y difracción láser), mezclas (para difracción y fluorescencia de rayos x y termogravimetría).

Para la técnica de lixiviado se ha preparado una muestra disgregando en un molino una fracción del todo-uno (muestra completa sin tamizar) de la muestra inicial.

En cuanto a las proporciones y técnicas de los diferentes ensayos se detallara en los capítulos posteriores.



# CAPÍTULO 4

---



## CAPÍTULO 4. ENSAYOS DE LABORATORIO

### 4.1. ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE DISPERSIÓN DE LONGITUD DE ONDA.

La fluorescencia de rayos X es una técnica de espectrometría atómica basada en la detección de la radiación X emitida por átomos excitados. Los fotones fluorescentes son característicos de cada elemento en cuestión y su intensidad determina la concentración del mismo. Se utiliza con fines cualitativos y cuantitativos, tanto en muestras sólidas como líquidas. Es de gran aplicación en análisis de residuos, polímeros, minerales, aleaciones y compuestos orgánicos.

En nuestro caso para analizar las muestras de la “Peña del Águila” hemos utilizado el Espectrómetro de fluorescencia de rayos X Bruker S4 Pioneer»



Figura 6 Espectrómetro de fluorescencia de rayos X Bruker S4 Pioneer

Tiene las siguientes características:

#### Espectrómetro

- Goniómetro equipado con dos motores independientes de alta precisión, con codificadores ópticos para el ajuste automático de los ángulos en el instrumento.
- Estabilización térmica en la cabina de muestreo, con una precisión de  $\pm 0'05$  °C.
- Generador de rayos X, con un rango de 20-60 kV y 5-150 mA, programables en pasos de 1 kV y 1 mA.

- Potencia máxima de salida: 4 kW.
- Rotación de la muestra a 30 rpm para compensar los efectos de su posible orientación
- Cambiador de filtros de haz primario programable, de 10 posiciones, con una configuración de filtros optimizada (Cu: 0.2 y 0.3 mm; Al: 0.8, 0.2, 0.5, 0.1 mm y 0.0125 mm), para conseguir la mejor la relación pico fondo.
- Cristales analizadores instalados: LiF200, LiF220, Ge, PET y XS-55.
- Detector de centelleo y contador proporcional de flujo de gas
- Tubo de rayos X de ventana frontal y ánodo de rodio
- Sistema cambiador de muestras de 60 posiciones

#### 4.2. ANÁLISIS DE TAMAÑO DE PARTÍCULA POR DIFRACCIÓN LÁSER

La difracción láser determina el tamaño de partícula según el principio básico de que las partículas grandes dispersan la luz a ángulos bajos y las partículas pequeñas dispersan la luz a altos ángulos. El instrumento mide la energía de la luz dispersada sobre un rango de ángulos y traduce esta información en la distribución de tamaño de partícula. Para ello es necesario utilizar un modelo de dispersión y conocer las propiedades ópticas del material. Por su rapidez y automatización, es el método más extendido para el análisis de tamaño de partícula en su rango de trabajo. Es de gran aplicación para conocer la textura de un suelo, pudiendo ser utilizado para el estudio granulométrico de cualquier material en polvo, tanto seco como disperso en un fluido.



*Figura 7* analizador Mastersizer 2000LF de Malvern instruments

Este aparato permite medir el tamaño de partícula en un rango de 0.02 a 2000  $\mu\text{m}$ .

Tiene las siguientes características:

#### **Banco óptico**

- Láser de He-Ne combinado con una fuente de luz azul de estado sólido de baja longitud de onda para la medida de partículas submicrónicas.
- Compensación por la solución de Mie.
- Alineamiento automático de láser.
- 5 segundos de tiempo de análisis.

#### **Unidades de dispersión**

- "Hydro 2000G" para dispersión en agua. Cuenta con ultrasonidos, agitación y caudal controlados (utilizado en nuestro análisis de muestras)
- "Scirocco 2000" para dispersión seca. Cuenta con presión y vibración controladas.
- "Hydro 2000SM" para dispersantes diferentes al agua, corrosivos, de alto valor económico, o con altas tasas de sedimentación.

### **4.3. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO**

Es una técnica de análisis térmico que mide la masa de una muestra en función de la temperatura o el tiempo. Permite realizar estudios de evaporación de constituyentes volátiles, descomposiciones en atmósfera inerte u oxidante, así como estudios de oxidación y ferromagnetismo. Resulta de aplicación en el análisis de polímeros, muestras geológicas, alimentos, etc. Analizador termogravimétrico «TGA/DSC 1HT» de Mettler-Toledo

Cuenta con las siguientes características:

- Horno horizontal, con un rango de temperatura desde ambiente hasta 1600  $^{\circ}\text{C}$ .
- Exactitud térmica de  $\pm 0'5$   $^{\circ}\text{C}$ .
- Reproducibilidad térmica de  $\pm 0'3$   $^{\circ}\text{C}$ .
- Carga máxima de 1 g, tras el tarado.
- Registro simultáneo de la señal de flujo de calor
- Resolución de 0'1  $\mu\text{g}$

- Deriva de la línea de base <math><2\ \mu\text{g}</math>
- Robot automuestreador de 34 posiciones



Figura 8 Analizador termogravimétrico

Controlador automático de gases de purga, de 0 a 200 ml/min.

El analizador puede acoplarse a un detector para el análisis de los gases desprendidos

Es una técnica de utilidad en la identificación de todo tipo de compuestos orgánicos e inorgánicos, en la determinación de grupos funcionales en matrices orgánicas, así como en el estudio de la composición molecular de superficies. Tiene amplia aplicación en el estudio de materiales poliméricos, combustibles, minerales.

### **Espectrofotómetro «Thermo Nicolet 5700»**

El sistema óptico utiliza el principio del interferómetro de Michelson de barrido continuo con conducción de espejo móvil mediante colchón neumático y dispone de una bancada óptica monobloque, construida con fundición de aleación de aluminio bajo presión, lo que le confiere una estabilidad excepcional, característica imprescindible en un sistema IRTF de altas prestaciones.

Cuenta con las siguientes características:

- Interferómetro tipo Michelson de geometría en  $45^\circ$ , de colchón de aire generado por el propio mecanismo interferométrico, de modo que no necesita fuente externa de gas para trabajar.
- Alineamiento automático y autoalineamiento dinámico continuo asistido por láser.
- Resolución mejor de  $0,5 \text{ cm}^{-1}$
- Velocidad de barrido del espejo móvil comprendida entre  $0,158$  y  $5,06 \text{ cm/s}$ .
- Precisión en longitud de onda mejor de  $0,01 \text{ cm}^{-1}$  para cada punto de dato, medida a  $2000 \text{ cm}^{-1}$  y controlada por el láser.
- Precisión en ordenadas mejor del  $0,07 \%$  de desviación, medida a  $4 \text{ cm}^{-1}$  con lámina de poliestireno de  $8 \mu\text{m}$ .
- Divisor de haz de Ge/KBr, con un intervalo espectral de  $7400$  a  $350 \text{ cm}^{-1}$ .
- Detector DTGS/KBr, con un intervalo espectral de  $12500$  a  $350 \text{ cm}^{-1}$ .
- Fuente infrarroja cerámica, operando a  $1525 \text{ K}$ , con un intervalo espectral de  $9600$  a  $15 \text{ cm}^{-1}$ .
- Láser de referencia de helio-neón, operando a  $15798 \text{ cm}^{-1}$ , prealineado y de alta capacidad.
- Generador de gas de purga, para eliminar la contribución espectral ambiental.
- Programa «Omic», para la evaluación y manipulación de espectros.
- Accesorio «Smart Orbit», para el análisis por reflexión total atenuada de sólidos y líquidos.
- Accesorio de acoplamiento al analizador termogravimétrico, para el análisis de los gases desprendidos por la muestra en el horno del mismo.

#### 4.4. REOMETRÍA

Es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. Las propiedades mecánicas estudiadas por la reología se pueden medir mediante aparatos que permiten someter al material a diferentes tipos de deformaciones controladas y medir los esfuerzos, o viceversa. Es posible caracterizar reológicamente dispersiones, fluidos complejos, alimentos y polímeros, así como realizar estudios de viscoelasticidad en sólidos.

## CARACTERÍSTICAS DEL REÓMETRO AR-G2 DE TA INSTRUMENTS

Sistema de cojinete axial magnético, que permite un control muy preciso de torque, eliminando cualquier perturbación de ruido o señal de vibración causada por turbulencias de aire en los reómetros habituales de cojinetes de aire.

### Características y especificaciones

- Capacidad de realizar experimentos a velocidad controlada y a esfuerzo controlado
- Capaz de realizar estudios de viscoelasticidad de materiales, comportamiento cinético de reacciones de polimerización y curado.
- Amplio rango de control de fuerza normal: 0,01 - 50 N.
- Rango de par de fuerzas en oscilación:  $3 \cdot 10^{-6}$  – 200 mN.m
- Rango de par de fuerzas en cizalla:  $10^{-5}$  – 200 mN.m
- Resolución del par de fuerzas: 0,1 nN.m
- Inercia del motor: 18  $\mu$ N.m.s
- Rango de velocidad angular en esfuerzo controlado: 0 - 300 rad/s
- Rango de velocidad angular en deformación controlada:  $1,4 \cdot 10^{-9}$  - 300 rad/s
- Rango de frecuencias:  $7,5 \cdot 10^{-7}$  - 628 rad/s
- Resolución en el desplazamiento: 25 nrad.
- Tiempo necesario para cambio en la velocidad: 7 ms.
- Tiempo necesario para cambio en la deformación: 30 ms.
- Rango de temperatura con plato peltier: -20 a 200 °C.
- Rango de temperatura con platos calientes: 30-400 °C.

Se cuenta con los siguientes accesorios.

- Sensores cono-placa de 20, 40 y 60 mm de diámetro.
- Sensores de placas paralelas de 8, 20, 40 y 60 mm de diámetro.
- Platos desechables de 25 y 40 mm de diámetro.
- Platos rugosos de 20,40 y 60 mm de diámetro
- Trampa de disolventes para evitar la desecación de la muestra
- Accesorio interfacial para análisis superficial de sustancias tensoactivas
- Accesorio de torsión para muestras sólidas
- Célula para el análisis de almidones
- Célula presurizada con gas, para evitar la fricción, de hasta 138 bar, utilizable de -10 a 150 °C.



Figura 9 Reómetro

#### 4.5. DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE POLVO

La difracción de rayos X es una técnica analítica versátil para examinar sólidos cristalinos, lo que incluye a materiales cerámicos, metales, minerales y compuestos orgánicos. Estos materiales pueden estar en forma de polvo, monocristales, láminas delgadas, fibras o formas



Figura 10 Difractómetro de rayos X

irregulares, dependiendo de la medida a realizar. Los difractómetros de polvo se utilizan de forma rutinaria en la identificación de las fases cristalinas de una muestra, así como en su análisis cuantitativo. Resulta de gran utilidad en la identificación de sustancias desconocidas, así como en el control de calidad de procesos.

## CARACTERÍSTICAS DEL DIFRACTÓMETRO DE RAYOS X DE POLVO "BRUKER D8 ADVANCE"

Este aparato dispone de una carcasa de protección total contra la radiación de rayos X, estando homologado por el Ministerio de Industria y Energía. Consta de las siguientes partes:

### **Goniómetro theta/theta**

- Vertical con círculo de medida ajustado a 435 mm de diámetro
- Amplitud de paso mínimo:  $0,0001^\circ$
- Rango de medida en  $2\theta$ :  $0-168^\circ$
- Tubo cerámico de emisión de rayos X tipo KFL-Cu-2K, de 2,2 kW, ánodo de Cu y foco fino largo
- Portatubos con indicación luminosa de estado del obturador de la ventana
- Portarendijas de haz incidente para alojar una rendija fija de apertura y otra Soller de  $2^\circ$
- Portamuestras rotatorio
- Portarendijas de haz difractado para alojar una rendija fija antidispersiva, otra receptora y otra para el monocromador secundario; así como un filtro de Ni y una rendija Soller de  $2^\circ$
- Monocromador secundario de grafito, para la eliminación de la radiación de fluorescencia de fondo y de la radiación  $K\beta$
- Detector de centelleo de NaI(Tl), con conteo lineal de hasta  $2 \cdot 10^6$  cps

### **Generador de rayos X "Kristallofex K 760-80F"**

- 3000 W de potencia
- Tensión regulable de forma continua entre 20 y 60 kV
- Corriente regulable de forma continua entre 5 y 80 mA
- Estabilidad:  $\pm 0,001\%$

## 4.6. TEST DE LIXIVIADO

### MEDIDAS DE pH



Figura 11 Medición pH

El pH-metro es un sensor utilizado en el método electroquímico para medir el pH de una disolución.

La determinación de pH consiste en medir el potencial que se desarrolla a través de una fina membrana de vidrio que separa dos soluciones con diferente concentración de protones. En consecuencia se conoce muy bien la sensibilidad y la selectividad de las membranas de vidrio durante el pH.

Una celda para la medida de pH consiste en un par de electrodos, uno de calomel (mercurio, cloruro de mercurio) y otro de vidrio, sumergidos en la disolución de la que queremos medir el pH.

La varita de soporte del electrodo es de vidrio común y no es conductor, mientras que el bulbo sensible, que es el extremo sensible del electrodo, está formado por un vidrio polarizable (vidrio sensible de pH).

Se llena el bulbo con la solución de ácido clorhídrico 0.1M saturado con cloruro de plata. El voltaje en el interior del bulbo es constante, porque se mantiene su pH constante (pH 7) de manera que la diferencia de potencial solo depende del pH del medio externo.

El alambre que se sumerge al interior (normalmente Ag/AgCl) permite conducir este potencial hasta un amplificador.

## MEDIDAS DE LA CONDUCTIVIDAD



Figura 12 Conductímetro

El conductímetro mide la conductividad eléctrica de los iones en una disolución. Para ello aplica un campo eléctrico entre dos electrodos y mide la resistencia eléctrica de la disolución. Para evitar cambios en las sustancias, efectos de capa sobre los electrodos, etc. se aplica una corriente alterna.

# CAPÍTULO 5

---



## CAPÍTULO 5. RESULTADOS

### 5.1. ANÁLISIS DE TAMAÑO DE PARTÍCULA POR DIFRACCIÓN LÁSER.

#### Result Analysis Report

<b>Sample Name:</b> PA mezcla compuesta - Average	<b>SOP Name:</b>	<b>Measured:</b> viernes, 08 de julio de 2016 13:34:25
<b>Sample Source &amp; type:</b>	<b>Measured by:</b> SIT	<b>Analysed:</b> viernes, 08 de julio de 2016 13:34:27
<b>Sample bulk lot ref:</b>	<b>Result Source:</b> Averaged	

---

<b>Particle Name:</b> suelo	<b>Accessory Name:</b> Hydro 2000G (A)	<b>Analysis model:</b> General purpose	<b>Sensitivity:</b> Normal
<b>Particle RI:</b> 1.580	<b>Absorption:</b> 0.2	<b>Size range:</b> 0.020 to 2000.000 um	<b>Obscuration:</b> 7.29 %
<b>Dispersant Name:</b> Water	<b>Dispersant RI:</b> 1.330	<b>Weighted Residual:</b> 0.671 %	<b>Result Emulation:</b> Off

---

<b>Concentration:</b> 0.0093 %Vol	<b>Span :</b> 13.348	<b>Uniformity:</b> 4.08	<b>Result units:</b> Volume
<b>Specific Surface Area:</b> 0.228 m <sup>2</sup> /g	<b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b> 8.778 um	<b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b> 128.877 um	

**d(0.1): 3.642 um                      d(0.5): 29.022 um                      d(0.9): 390.970 um**

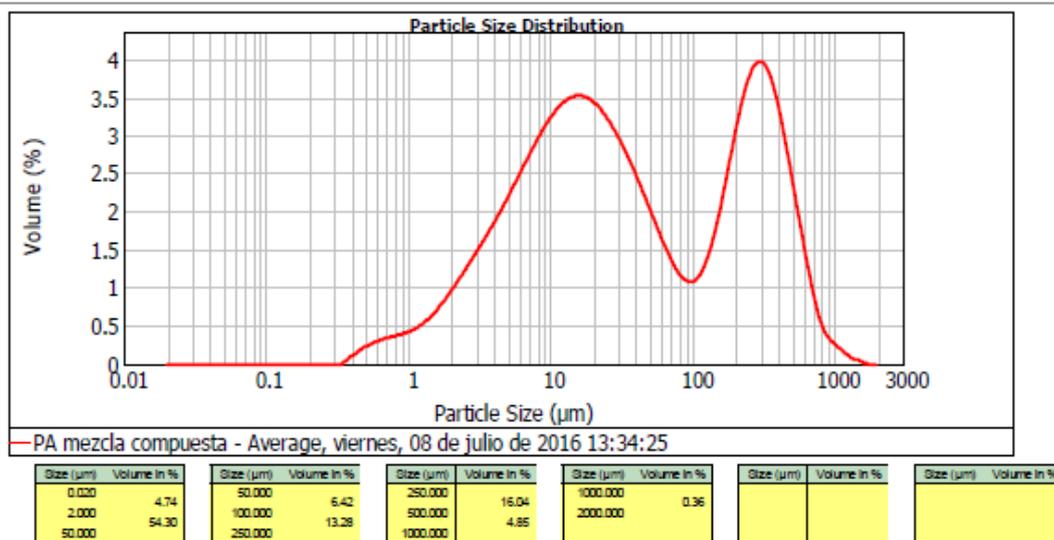


Figura 13 Resultado ensayo análisis de tamaño de partícula

Como muestra la figura 13 se puede ver que la muestra analizada es bimodal, es decir, tiene dos tipos de tamaño de partícula, predominando las partículas con un tamaño inferior a 50 micras.

Para determinar el tipo de partícula del que se trata se han introducido los valores de volumen de tamaño de partículas (Tabla 5) en una hoja de cálculo Excel según la norma (AN101104 SOIL texture Laser difracción):

Tabla 5 Valores en % volumen de la distribución del tamaño de la partícula

Arena	Arcilla	Limo
41%	5%	54%

Tras introducir estos datos en la hoja de cálculo Excel, en el triángulo siguiente nos ha dado un punto (punto rojo) indicando según las distintas proporciones en peso de qué tipo de material se trata, de acuerdo a la clasificación textural por el método triangular desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

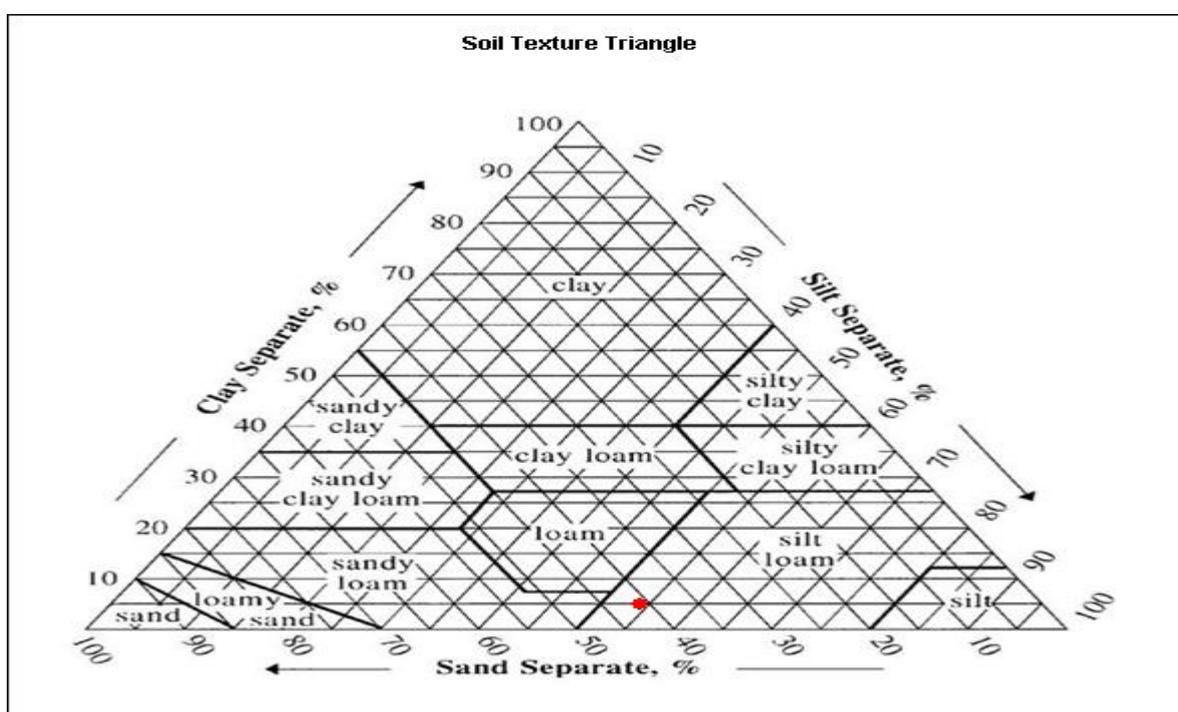


Figura 14 Clasificación granulométrica de los lodos Peña del Águila

En este caso tenemos que la mayor parte de los lodos de la balsa de la Peña del Águila se puede clasificar como clase textural franco-limoso, según se puede ver en la figura 14.

## 5.2. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

Resultados:

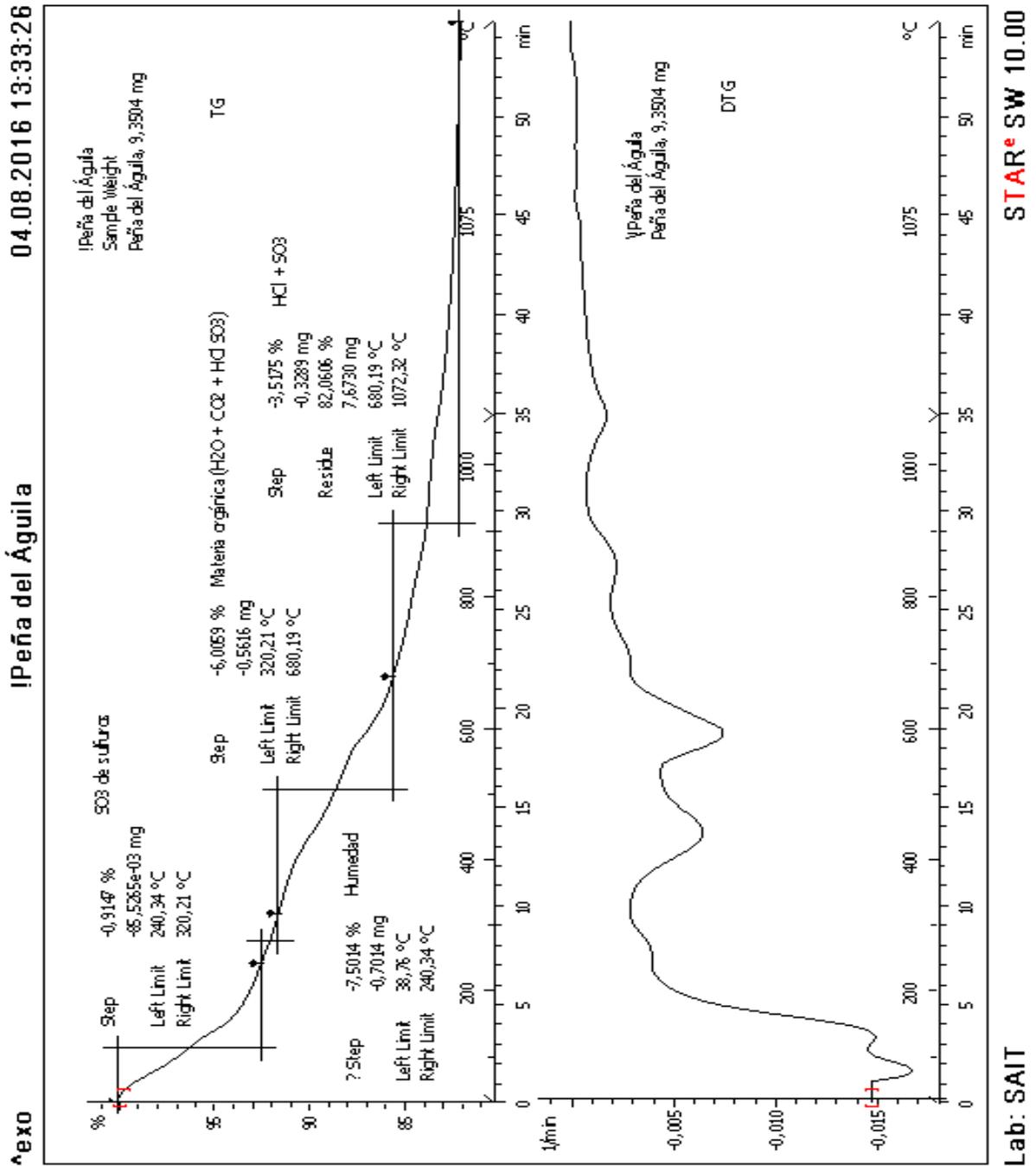


Figura 15 Resultados análisis gravimétricos

En la figura 15 se muestra el análisis térmico donde se observan los cambios en el flujo de calor acoplados a cada fase. En la gráfica se puede apreciar las fases en las que se descompone la muestra. En primer lugar se descompone

0,7014 mg de muestra que corresponde con la humedad de ésta, esto sucede entre 38 y 240 grados centígrados. En segundo lugar se descompone el  $85,5265 \cdot 10^{-3}$  mg de muestra que corresponde a  $\text{SO}_3$  de sulfuros en un rango de temperaturas de entre 240 y 320 grados centígrados. Ya entre 320 y 680 grados centígrados se descompone el 0,5616 mg de la muestra que corresponde a la materia orgánica ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$   $\text{SO}_3$ ). La última fase corresponde a un rango de temperatura de entre 680 y 1072 grados centígrados donde se produce la descomposición de  $\text{HCl}$  y  $\text{SO}_3$  correspondiendo al resto de muestra, 7,6730 mg

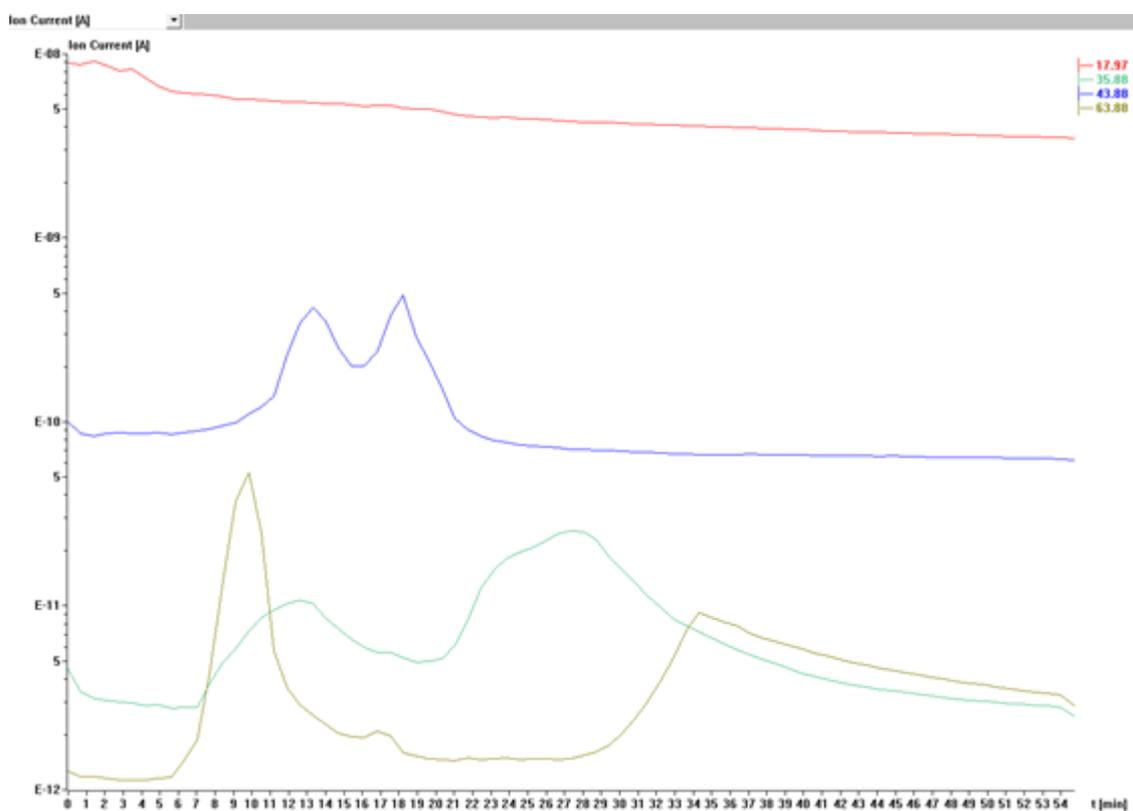


Figura 16 Curvas de pérdida de masa de la muestra de lodos de la balsa Peña del Águila

### 5.3. DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE POLVO

Tabla 6 Resultados ensayo difracción de rayos X de polvo.

76.8 % crystallinity	Show	Color	Scan	Name	Compound Name	Formula	I/Ic DB	I/Ic User	S-Q	System	Space Group
Yes	Red	Peña del Águila.raw #1	PDF 00-052-1044	<b>Chlorite-serpentine (NR)</b>	(Mg, Al) <sub>6</sub> (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>		-1	0.65	<b>67.5%</b>	Hexagonal	P(0)
Yes	Lime	Peña del Águila.raw #1	PDF 00-058-2035	<b>Muscovite-2M1</b>	KAl <sub>2</sub> (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>		-1	0.6	<b>16.6%</b>	Monodinic	C2/c(15)
Yes	Magenta	Peña del Águila.raw #1	PDF 00-005-0490	<b>Quartz, low</b>	SiO <sub>2</sub>		3.6	0	<b>5.0%</b>	Hexagonal	P3121(152)
Yes	Blue	Peña del Águila.raw #1	PDF 04-015-4421	<b>gypsum</b>	Ca(SO <sub>4</sub> )(H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>		10.35	0	<b>3.6%</b>	Monodinic	C2/m(12)
Yes	Yellow	Peña del Águila.raw #1	PDF 01-073-0147	<b>Talc-1A</b>	Mg <sub>3</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>		1.05	0	<b>2.3%</b>	Tridinic	C-1(2)
Yes	DarkOrange	Peña del Águila.raw #1	PDF 01-089-1305	<b>Calcite, magnesium, syn</b>	(Mg <sub>0.06</sub> Ca <sub>0.94</sub> )(CO <sub>3</sub> )		3.07	0	<b>2.2%</b>	Rhombo.H.axes	R-3c(167)
Yes	LightSteelBlue	Peña del Águila.raw #1	PDF 00-007-0330	<b>Illite-Montmorillonite, regular</b>	K·Al <sub>4</sub> (Si, Al) <sub>8</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub> ·xH <sub>2</sub> O		-1	0.7	<b>1.7%</b>		
Yes	DarkRed	Peña del Águila.raw #1	PDF 01-071-6449	<b>Magnetite, titanian</b>	Fe(Fe <sub>1.17</sub> Ti <sub>0.54</sub> )O <sub>4</sub>		4.32	0	<b>0.8%</b>	Cubic	Fd-3m(227)
Yes	Green	Peña del Águila.raw #1	PDF 01-082-9278	<b>Siderite, magnesian</b>	(Fe <sub>0.65</sub> Mg <sub>0.35</sub> )(CO <sub>3</sub> )		2.83	0	<b>0.3%</b>	Rhombo.H.axes	R-3c(167)
Yes	Cyan	Peña del Águila.raw #1	PDF 00-011-0515	<b>Chalcopyrite</b>	Cu <sub>17.6</sub> Fe <sub>17.6</sub> S <sub>32</sub>		-1	7.6	<b>0.1%</b>	Cubic	I-43m(217)

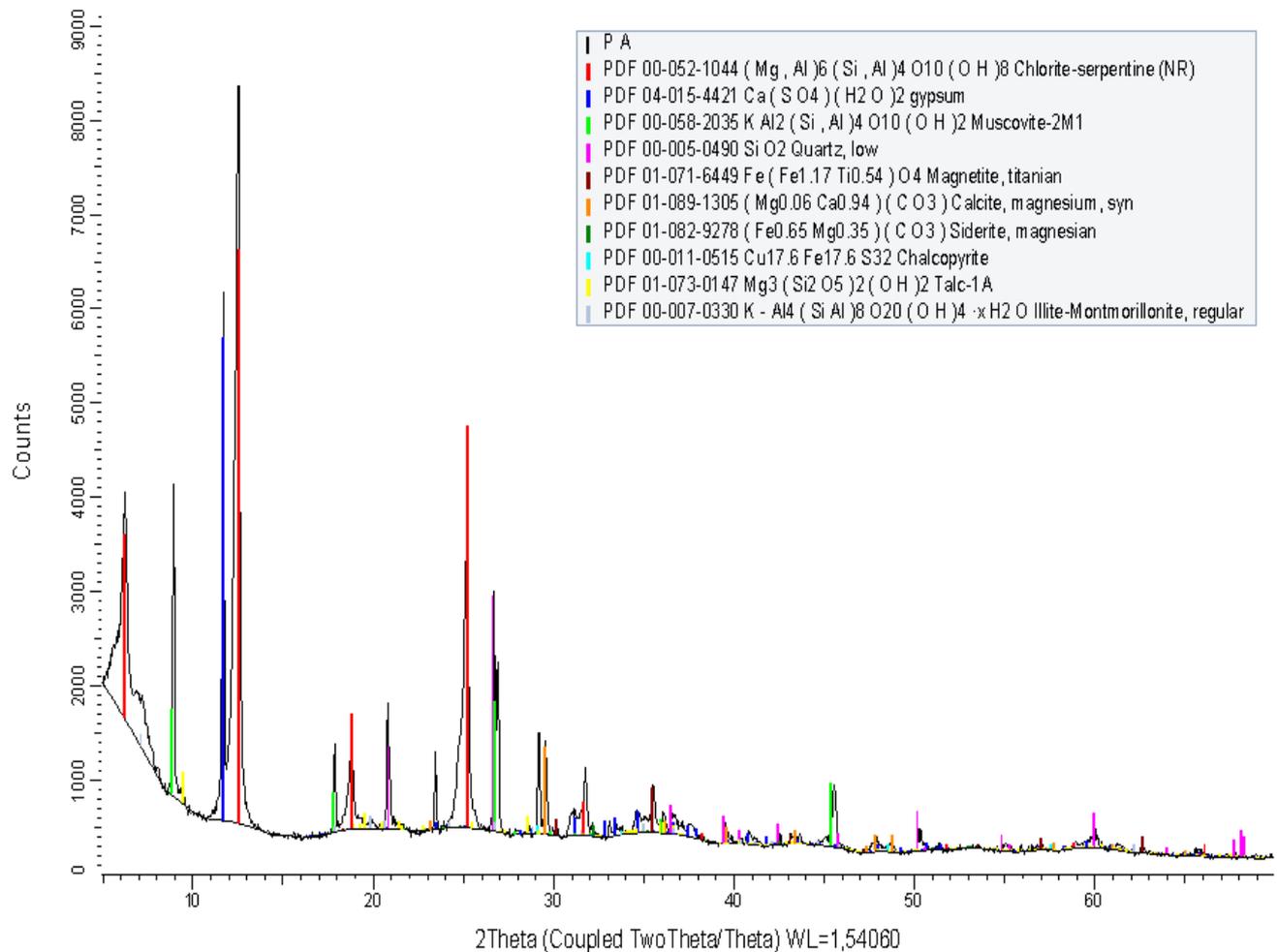


Gráfico 3 Resultados ensayos difracción de rayos X en polvo

#### 5.4. TEST DE LIXIVIADO

Para el análisis del pH y la conductividad se ha cogido una porción de la muestra todo-uno, se ha molido y se ha mezclado con agua tipo 2 en una proporción 1:10. Una vez obtenida la suspensión se ha analizado con la ayuda de un conductímetro y un pH metro como el de la foto 14



Foto 14 pH metro analizando la muestra de lodos Peña del Águila

En cuanto al pH se ha obtenido un valor de 7,95 de la muestra todo-uno de la Peña del Águila, por lo que podemos decir que se trata de un suelo alcalino.

En cuanto a la conductividad eléctrica nos ha dado un valor de 11,08 mS/Cm.

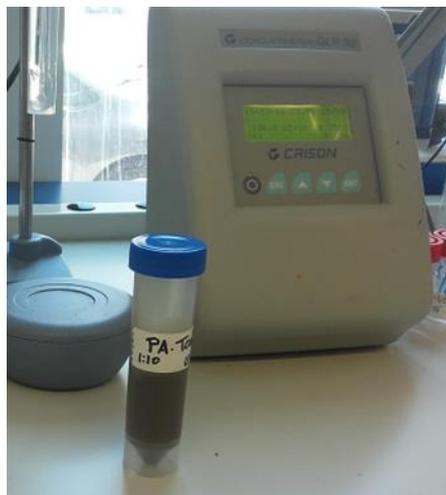


Foto 15 Conductímetro y muestra Peña del Águila

## 5.5. ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE DISPERSIÓN DE LONGITUD DE ONDA.

### 5.5.1. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Se ha molido en un mortero de ágata 10 gramos de la muestra todo-uno (sin tamizar) de la Peña del Águila. Posteriormente se ha sometido a secado en un horno durante 24 h a 60 °C.

Una vez que la muestra este bien molida se mezclan los 10 gramos de muestra de lodos seca con 8 gramos de elvacite en un mortero y se deja que se evapore el elvacite durante 15 minutos.

Por último, para obtener la pastilla que nos servirá para el ensayo de espectrometría colocamos dicha mezcla en un molde, y la introducimos en una prensa de 40 toneladas durante un minuto.

Como resultado obtenemos una pastilla, como se puede apreciar en la foto 16.



Foto 16 Pastilla para analizar en el ensayo

Tabla 7 Resultados ensayos de difracción X

Elementos	Peña del Águila Concentraciones (%)
PF	14.4200
O	31.6312
Na	0.7610
Mg	5.9130
Al	4.2160
Si	11.4600
P	0.0230
S	1.4350
Cl	6.3450
K	0.4600
Ca	2.9330
Ti	0.1600
V	0.0058
Cr	0.0051
Mn	0.5486
Fe	19.2800
Co	0.0033
Ni	n.d.
Cu	0.0092
Zn	0.1430
Ga	n.d.
As	0.0451
Br	0.0083
Rb	0.0015
Sr	0.0114
Y	n.d.
Zr	0.0065
Nb	n.d.
Ba	0.0350
Pb	0.1400

La pérdida al fuego (PF) procede del estudio termogravimétrico.

El oxígeno (O) es el estequiométrico correspondiente a los elementos analizados por FRX

n.d.: no detectado

Los valores de la tabla han sido corregidos de un blanco, para los siguientes elementos:

Tabla 8 Elementos

Elemento	Conc. (%)	Origen
Cr	0.0008	portamuestras
Cu	0.0011	colimador

Pastillas con 10 g de muestra + 0.8 g de Elvacite

Método de medida: MultiRes-Vac34

Modelo de evaluación: Oxides-Vac

Muestra molida a mano en mortero de ágata y desecada a 60 °C una noche

Intensidad mayor de 3\*fondo estadístico en los valores finales de concentración.

### **Conclusiones:**

Como se observa en la tabla 7, en la muestra analizada existe una gran diversidad de elementos químicos, destacando el hierro con un porcentaje de 19,28 %.

En cuanto a los principales elementos químicos que se extraían el porcentaje que se encuentra en las balsas mineras es bajo, de 0,14 Pb y 0,143 Zn.

En relación a elementos atípicos de las balsas de lodos, destaca la gran cantidad de cloro (6,345 %) que existe en estas balsas de la Peña del Águila, con respecto a otras balsas de lodos como la Peraleja. Esto se debe a que en el lavadero utilizaban agua de mar, para obtener el mineral.

También se han encontrado cantidades relativamente altas de Mg, Al y Si como se muestra en la tabla 9, esto se debe principalmente a la composición de los residuos originales.

Tabla 9 Concentraciones de Mg, Al y Si

Elementos	Concentraciones %
Mg	5.9130
Al	4.2160
Si	11.4600

## 5.6. REOMETRÍA

Para realizar los diferentes ensayos en el reómetro se ha preparado la muestra siguiendo los cálculos para obtener la fracción de sólidos en volumen y el volumen de agua adecuado del artículo sobre reología de David V. Boger como se muestra en a continuación.

### Calculo de la concentración de sólidos.

La fracción sólida (X) de una suspensión se puede calcular de la siguiente manera:

$$x = \frac{m(\text{seca}) - m(\text{vacía})}{m(\text{mojada}) - m(\text{vacía})}$$

donde m(seca) es la masa de bandeja y la suspensión antes del secado, m(vacía) es la masa de la bandeja vacía, y m (mojada) es la masa de la bandeja y la suspensión después del secado.

La fracción de masa sólida (X) de la solución se puede convertir en la fracción de volumen sólido ( $\Phi$ ) si la densidad de la partícula ( $\rho_p$ ) y la densidad del líquido ( $\rho_t$ ) se conoce.

$$\Phi = \frac{1}{1 + \frac{\rho_p}{\rho_t} \left( \frac{1}{x} - 1 \right)}$$

La conversión de la fracción de volumen sólido ( $\Phi$ ) para la masa de fracción sólida (X) es como es:

$$X = \frac{1}{1 + \frac{\rho_t}{\rho_p} \left( \frac{1}{\Phi} - 1 \right)}$$

Y la densidad de la suspensión ( $\rho_s$ ) puede ser calculada de la siguiente manera:

$$\rho_s = \frac{1}{\frac{x}{\rho_p} + \frac{(1-x)}{\rho_t}}$$

Tras obtener dichos datos, y teniendo en cuenta que con una fracción de sólidos en peso mayor al 70%, la suspensión se vuelve tan espesa que impide hacer los ensayos deseados en el reómetro, se ha llegado a la conclusión de trabajar con concentraciones de suspensión en peso de un rango entre 40% y 70% cogiendo las siete más representativas ( 45%, 47%, 50%, 52%, 55% 60% y 65%), como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10 Suspensiones analizadas.

d suspensión	Fracción de sólidos	Fracción de sólidos	m sólido	V agua	V final
(g/mL)	(x, % p/p)	( $\Phi$ , % v/v)	(g)	(mL)	(mL)
1.76	65	38.24	45.88	24.71	40
1.67	60	33.33	40.00	26.67	40
1.58	55	28.95	34.74	28.42	40
1.53	52	26.53	31.84	29.39	40
1.50	50	25.00	30.00	30.00	40
1.46	47	22.82	27.38	30.87	40
1.43	45	21.43	25.71	31.43	40

A partir de obtener dichas proporciones como las que se muestran en la tabla 10, se han preparado siete probetas con suspensiones de diferentes proporciones de muestra, como se puede apreciar en la figura 17.

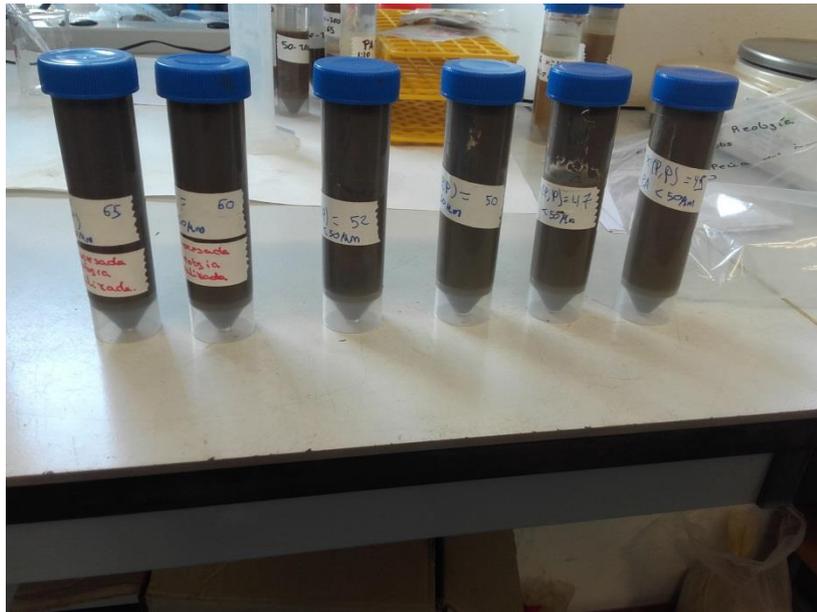


Figura 17 Probetas con suspensiones para ensayos reológicos.

Para analizar todas las muestras se han hecho tres modalidades de ensayos diferentes, buscando el mismo resultado, pero con la máxima precisión posible. Estos ensayos se basan en el método de tensión de cizallamiento tangente, el cual se ha utilizado para analizar todas las gráficas de los ensayos y es el mejor método para determinar la tensión de fluencia, por su alta precisión.

Estos ensayos son:

Barrido de tensión de cizalla en continuo.

Barrido de tensión de cizalla en estado estacionario.

Velocidad de deformación de cizalla en continuo.

Para obtener los resultados buscados se ha analizado un mínimo de cinco veces cada suspensión, para que los resultados sean más fiables y representativos. Obteniendo así a través del programa TRIOS\* gráficos como el de la figura 18 en tres modalidades diferentes.

\*TRIOS: SOFTWARE DE ANÁLISIS DE MUESTRAS. UTILIZADO PARA ANALIZAR TODAS LAS MUESTRAS DE REOLOGÍA EN ESTE ESTUDIO.

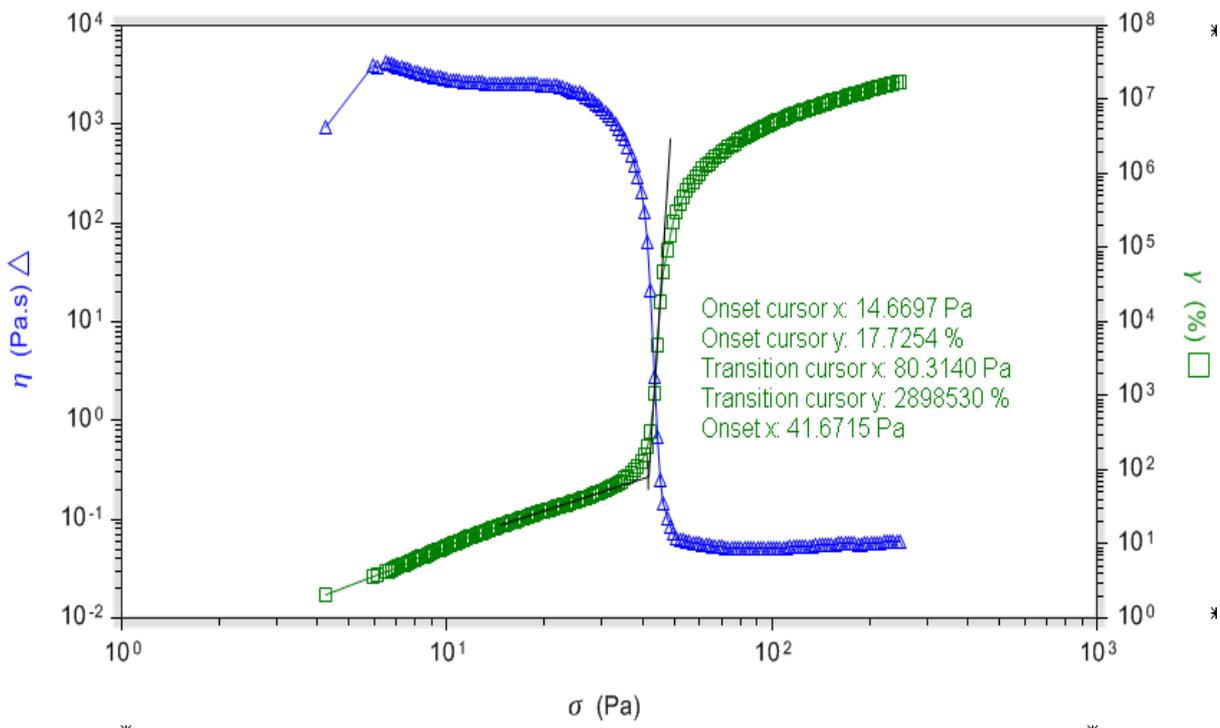


Figura 18 Gráfico de análisis de muestra de barrido de tensión de cizalla en continuo de un 55% p/p de suspensión de la muestra de lodos <50 micras de la Peña del Águila.

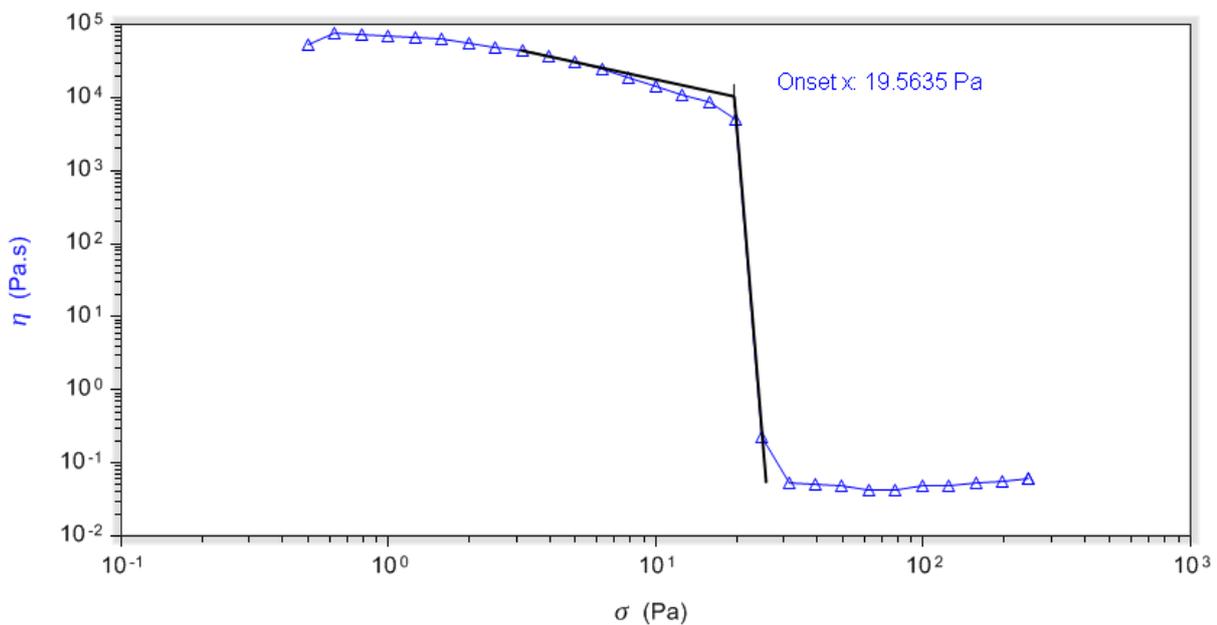


Figura 19 Gráfico de análisis de barrido de tensión de cizalla en estado estacionario de una suspensión del 55 % p/p de la muestra de lodos <50 micras de la balsa Peña del Águila.

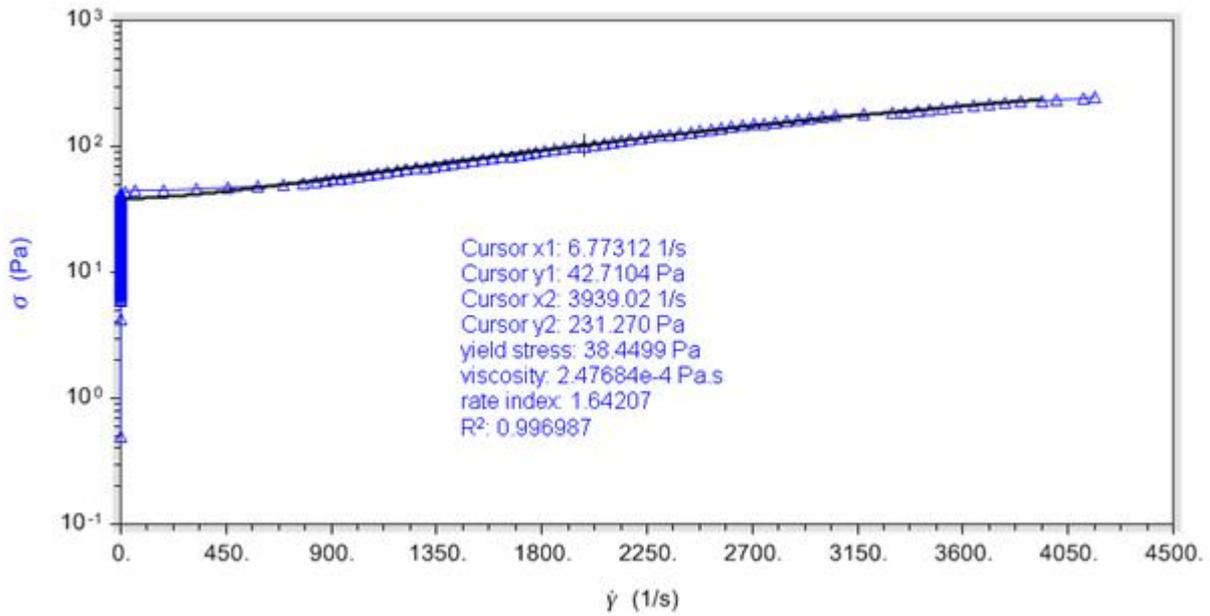


Figura 20 Gráfico de análisis de velocidad de deformación de cizalla de una suspensión del 55 % p/p de la muestra de lodos < 50 micras de la balsa Peña del Águila

En el caso de la figura 20 la ecuación que mejor se ajusta a la curva es la de Herschel-Bulkley (ecuación 1)

Ecuación 1

$$\sigma = \sigma_y + k \dot{\gamma}^n$$

For  $\sigma_y=0$  and  $n=1 \Rightarrow$  Newtonian fluid

For  $\sigma_y=0$  and  $n \neq 1 \Rightarrow$  Power Law fluid

For  $\sigma_y \neq 0$  and  $n=1 \Rightarrow$  Bingham fluid

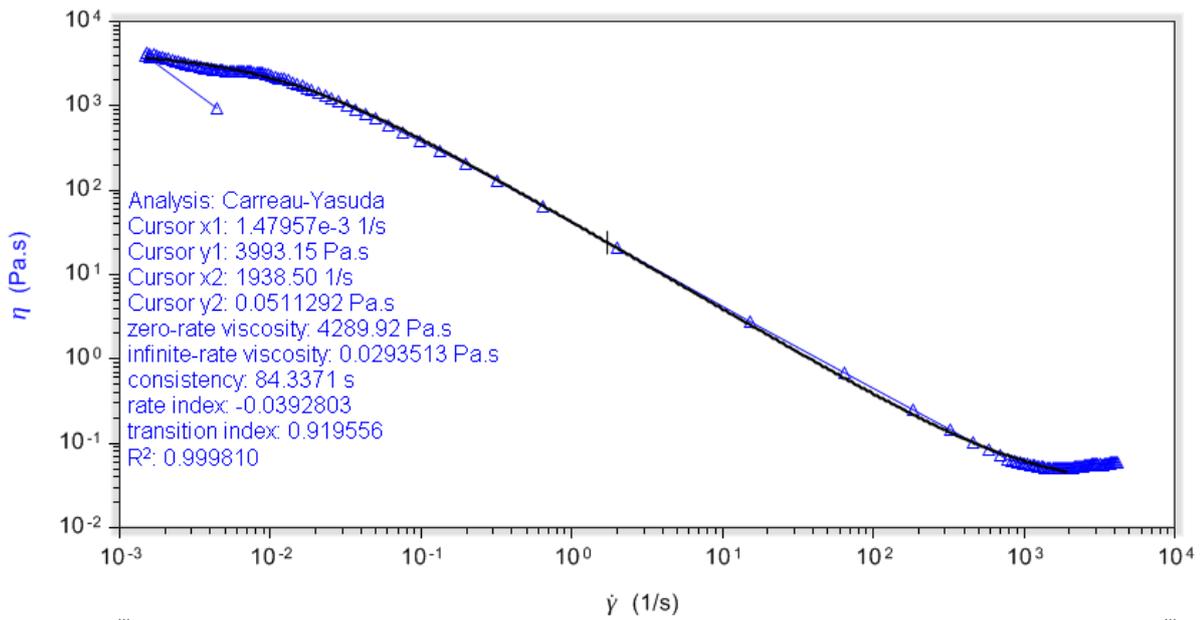


Figura 21 Gráfico de análisis de velocidad de deformación de cizalla en continuo de una suspensión del 50 % p/p de la muestra de lodos < 50 micras de la Peña del Águila

En el caso de la figura 21 la ecuación que mejor se ajusta a la curva es la de Carreau-Yasuda (ecuación 2)

Ecuación 2

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = [1 + (k\dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}}$$

Tabla 11 Resultados de los ensayos de la suspensión del 65 % en peso, de sólido.  
Velocidad de cizalla.

Test	Stress-rate model (Herschel-Bulkley)				Viscosity-rate model (Carreau-yasuda)					
	$\alpha$ (Pa)	k (Pa.s)	n	$R^2$	$\mu_0$ (pa.s)	$\mu_\infty$ (pa.s)	k (s)	n	$\alpha$	$R^2$
1	167.53	6.31	0.32	0.996	9390	0.075	73.41	0.038	3.12	0.999
2	136.76	15.86	0.22	0.996	9262	0.165	81.73	0.034	4.07	0.998
3	52.37	71.18	0.10	0.987	9184	0.187	82.97	0.019	4.07	0.997
4	108.85	12.10	0.28	0.984	8219	0.184	76.37	0.015	5.46	0.998
Promedio	116.37	26.36	0.23	0.990	9014	0.152	78.62	0.026	4.18	0.998
Desviación típica	48.94	30.13	0.09	0.006	536.7	0.052	4.50	0.011	0.96	0.00081
R.S.D.%	42.19	1.143	0.391	0.006	0.060	0.342	0.057	0.423	0.230	0.001

Tabla 12 Resultados de los ensayos de la suspensión del 60 % en peso de sólido..  
Velocidad de cizalla.

Test	Stress-rate model (Herschel-Bulkley)				Viscosity-rate model (Carreau-yasuda)					
	$\alpha$ (Pa)	k (Pa.s)	n	$R^2$	$\mu_0$ (pa.s)	$\mu_\infty$ (pa.s)	k (s)	n	$\alpha$	$R^2$
1	34.56	$9.75 \cdot 10^{-4}$	1.52	0.9985	3307	0.047	110.2	0.0118	1.55	0.9995
2	37.05	$9.15 \cdot 10^{-4}$	1.52	0.9988	3874	0.048	121.1	0.0112	1.37	0.9995
3	37.45	$6.73 \cdot 10^{-4}$	1.56	0.9988	3973	0.048	125.5	0.0102	1.39	0.9995
4	36.43	$7.33 \cdot 10^{-4}$	1.55	0.9986	3806	0.049	119.4	-0.0168	1.38	0.9994
5	36.48	$6.96 \cdot 10^{-4}$	1.56	0.9988	3799	0.048	116.1	-0.0160	1.35	0.9996
Promedio	36.39	$7.98 \cdot 10^{-4}$	1.54	0.9987	3752	0.048	118.4	-0.0132	1.41	0.9995
Desviación típica	1.108	$1.37 \cdot 10^{-4}$	0.019	$1.41 \cdot 10^{-4}$	258.3	0.0007	5.72	0.0029	0.08	$7.07 \cdot 10^{-5}$
R.S.D. %	0.030	0.172	0.012	$1.14 \cdot 10^{-4}$	0.069	0.015	0.048	-0.220	0.05	$7.07 \cdot 10^{-5}$

Tabla 13 Resultados de los ensayos de la suspensión del 55 % en peso de sólido.  
Velocidad de cizalla.

Test	Stress-rate model (Herschel-Bulkley)				Viscosity-rate model (Carreau-yasuda)					
	$\alpha$ (Pa)	$k$ (Pa.s)	$n$	$R^2$	$\mu_0$ (pa.s)	$\mu_\infty$ (pa.s)	$k$ (s)	$n$	$\alpha$	$R^2$
1	49.82	$9.55 \cdot 10^{-4}$	1.76	0.9995	2691	0.030	89.53	0.038	3.50	0.9945
2	24.88	$4.09 \cdot 10^{-4}$	1.59	0.9976	1858	0.030	105	0.025	1.95	0.9986
3	24.21	$3.8 \cdot 10^{-4}$	1.61	0.9977	1953	0.030	117	0.030	1.60	0.9988
4	23.37	$3.93 \cdot 10^{-4}$	1.60	0.9979	1926	0.030	113	0.024	1.63	0.9989
5	24.17	$3.73 \cdot 10^{-4}$	1.62	0.9979	1779	0.030	107	0.030	1.88	0.9986
6	23.75	$4.11 \cdot 10^{-4}$	1.60	0.9978	1893	0.030	112	0.027	1.76	0.9987
Promedio	24.08	$3.92 \cdot 10^{-4}$	1.60	0.9978	1882	0.030	111	0.027	1.76	0.9987
Desviación típica	0.57	$1.79 \cdot 10^{-4}$	0.011	$1.30 \cdot 10^{-4}$	67.60	0	4.90	0.00277	0.15	$1.30 \cdot 10^{-4}$
R.S.D. %	0.024	0.456	0.007	$1.30 \cdot 10^{-4}$	0.036	0.000	0.044	0.103	0.08	$1.30 \cdot 10^{-4}$

En la tabla 13 no se tiene en cuenta el ensayo 1 (rojo) debido a que salen valores atípicos, que pueden corresponder con un mal funcionamiento del reómetro o con algún parámetro que hizo que saliera un mal resultado.

Tabla 14 Resultados de los ensayos de la suspensión del 52 % en peso de sólido.  
Velocidad de cizalla.

Test	Stress-rate model (Herschel-Bulkley)				Viscosity-rate model (Carreau-yasuda)					
	$\alpha$ (Pa)	k (Pa.s)	n	$R^2$	$\mu_0$ (pa.s)	$\mu^\infty$ (pa.s)	k (s)	n	$\alpha$	$R^2$
1	39.57	$5.31 \cdot 10^{-4}$	1.57	0.9993	2194.4	0.0334	91.70	0.035	4.59	0.996
2	22.93	$7.96 \cdot 10^{-4}$	1.53	0.9989	1391.3	0.0279	102.2	0.045	2.54	0.998
3	21.67	$6.17 \cdot 10^{-4}$	1.56	0.9990	1383.8	0.0270	113.5	0.050	2.32	0.998
4	20.57	$6.05 \cdot 10^{-4}$	1.56	0.9990	1310.2	0.0277	105.7	0.041	2.29	0.998
5	21.27	$6.38 \cdot 10^{-4}$	1.55	0.9990	1363.5	0.0276	108.7	0.044	2.20	0.998
Promedio	25.20	$0.64 \cdot 10^{-4}$	1.55	0.99904	1528.6	0.0287	104.4	0.043	2.788	0.997
Desviación típica	8.08	$9.74 \cdot 10^{-5}$	0.01	$0.15 \cdot 10^{-4}$	373.5	0.0026	8.223	0.005	1.015	$8.95 \cdot 10^{-4}$
R.S.D. %	0.321	1.520	0.01	$0.15 \cdot 10^{-4}$	0.244	0.092	0.079	0.129	0.364	$8.95 \cdot 10^{-4}$

Tabla 15 Resultados de los ensayos de la suspensión del 50 % en peso de sólido.  
Velocidad de cizalla.

Test	Stress-rate model (Herschel-Bulkley)				Viscosity-rate model (Carreau-yasuda)					
	$\alpha$ (Pa)	k (Pa.s)	n	$R^2$	$\mu_0$ (pa.s)	$\mu^\infty$ (pa.s)	k (s)	n	$\alpha$	$R^2$
1	18.77	$2.98 \cdot 10^{-4}$	1.62	0.9963	1052.36	0.023	89.75	0.089	2.77	0.9980
2	18.83	$2.95 \cdot 10^{-4}$	1.62	0.9960	1109.16	0.022	90.87	0.031	2.44	0.9990
3	18.86	$2.99 \cdot 10^{-4}$	1.62	0.9963	1134.84	0.022	94.50	0.032	2.60	0.9980
4	18.84	$2.99 \cdot 10^{-4}$	1.62	0.9960	1121.90	0.022	92.22	0.031	2.62	0.9984
5	18.85	$3.34 \cdot 10^{-4}$	1.60	0.9960	1162.05	0.022	95.84	0.032	2.58	0.9984
Promedio	18.83	$0.3 \cdot 10^{-4}$	1.62	0.9961	1116.06	0.022	92.63	0.043	2.60	0.9983
Desviación típica	0.035	$0.16 \cdot 10^{-5}$	0.008	$0.16 \cdot 10^{-4}$	40.65	$4.47 \cdot 10^{-4}$	2.52	0.026	0.11	$0.41 \cdot 10^{-4}$
R.S.D. %	0.002	1.520	0.006	$0.15 \cdot 10^{-4}$	0.036	0.020	0.027	0.605	0.04	$8.95 \cdot 10^{-4}$

Tabla 16 Resultados de los ensayos de la suspensión del 47 % en peso de sólido.  
Velocidad de cizalla.

Test	Stress-rate model (Herschel-Bulkley)				Viscosity-rate model (Carreau-yasuda)					
	$\alpha$ (Pa)	k (Pa.s)	n	$R^2$	$\mu_0$ (pa.s)	$\mu^\infty$ (pa.s)	k (s)	n	$\alpha$	$R^2$
1	12.11	$5.25 \cdot 10^{-5}$	1.83	0.9970	2645.61	0.019	250.01	-0.0156	0.77	0.9999
2	12.14	$5.37 \cdot 10^{-5}$	1.82	0.9970	2835.11	0.019	261.72	-0.0164	0.76	0.9999
3	12.34	$4.60 \cdot 10^{-5}$	1.84	0.9970	2847.60	0.019	260.30	-0.0164	0.76	0.9999
4	12.34	$5.01 \cdot 10^{-5}$	1.83	0.9970	3101.60	0.019	274.07	-0.0192	0.73	0.9999
5	12.45	$4.21 \cdot 10^{-5}$	1.86	0.9968	2889.30	0.019	259.47	-0.0170	0.77	0.9999
Promedio	12.27	$0.49 \cdot 10^{-5}$	1.84	0.9970	2863.84	0.019	261.11	-0.0169	0.76	0.9999
Desviación típica	0.145	$4.80 \cdot 10^{-6}$	0.015	$8.95 \cdot 10^{-5}$	162.70	0	8.58	0.0013	0.01	0
R.S.D. %	0.012	0.98	0.008	$4.86 \cdot 10^{-5}$	0.057	0.000	0.033	-0.077	0.02	0.000

Tabla 17 Resultados de los ensayos de la suspensión del 45 % en peso de sólido.  
Velocidad de cizalla.

Test	Stress-rate model (Herschel-Bulkley)				Viscosity-rate model (Carreau-yasuda)					
	$\alpha$ (Pa)	k (Pa.s)	n	$R^2$	$\mu_0$ (pa.s)	$\mu^\infty$ (pa.s)	k (s)	n	$\alpha$	$R^2$
1	13.34	$8.24 \cdot 10^{-7}$	2.37	0.9983	$4.49 \cdot 10^{-9}$	0.0165	58535	-0.38	0.093	0.999
2	12.87	$8.51 \cdot 10^{-7}$	2.37	0.9997	-	-	-	-	-	-
3	10.61	$1.75 \cdot 10^{-9}$	1.97	0.9984	$1.28 \cdot 10^{-7}$	0.0173	609.80	-0.41	0.110	0.999
4	11.12	$8.79 \cdot 10^{-6}$	2.06	0.9986	4282140	0.0185	52.43	-0.58	0.117	0.999
5	11.50	$6.66 \cdot 10^{-6}$	2.10	0.9989	4833440	0.0177	1052.1	-0.38	0.137	0.999
Promedio	11.89	$0.69 \cdot 10^{-6}$	2.17	0.99878	4557790	0.0175	15062	-0.4375	0.114	0.999
Desviación típica	1.167	$6.88 \cdot 10^{-6}$	0.18	$0.563 \cdot 10^{-4}$	389827	$0.83 \cdot 10^{-4}$	28984	0.0960	0.018	$5 \cdot 10^{-5}$
R.S.D. %	9.81	99.7	8.51	$5.63 \cdot 10^{-3}$	8.553	$4.75 \cdot 10^{-3}$	192.43	-21.94	15.78	$5 \cdot 10^{-3}$

A través del análisis de las gráficas obtenidas como la de la figura 18 se han obtenido el promedio y la desviación estándar de las siete suspensiones analizadas en el reómetro, llegando a la conclusión de una curva, como se muestra en la figura 22.

Tabla 18 Ensayos realizados en el reómetro y analizados en TRIOS

%	1	2	3	4	5	Promedio	Desviación estándar	R.S.D. %
65	143.5	173.8	178.1	182.2	191.6	173.87	18.19	10.46
60	32.58	34.16	35.72	36.49	36.75	35.14	1.75	4.98
55	17.32	17.15	17.76	17.84	17.89	17.66	0.34	1.95
52	9.51	9.81	11.84	14.13	14.69	11.32	2.14	18.89
50	14.48	14.57	14.63	14.69	14.72	14.62	0.10	0.66
47	8.24	8.36	8.49	8.52	8.67	8.46	0.16	1.93
45	5.98	6.02	6.07	6.13	6.15	6.07	0.07	1.18

Tras realizar los tres ensayos reológicos descritos anteriormente y analizar sus resultados se ha llegado a la conclusión de que el más preciso y fiable es el de barrido de tensión en continuo (Tabla 18). A partir de los valores medios de los ensayos realizados a diferentes concentraciones (0.45, 0.47, 0.50, 0.52, 0.55, 0.60, 0.65) se ha determinado la curva de la Figura 22, la cual determina la tensión de cedencia de cada suspensión con diferentes concentraciones de sólido/líquido en concreto.

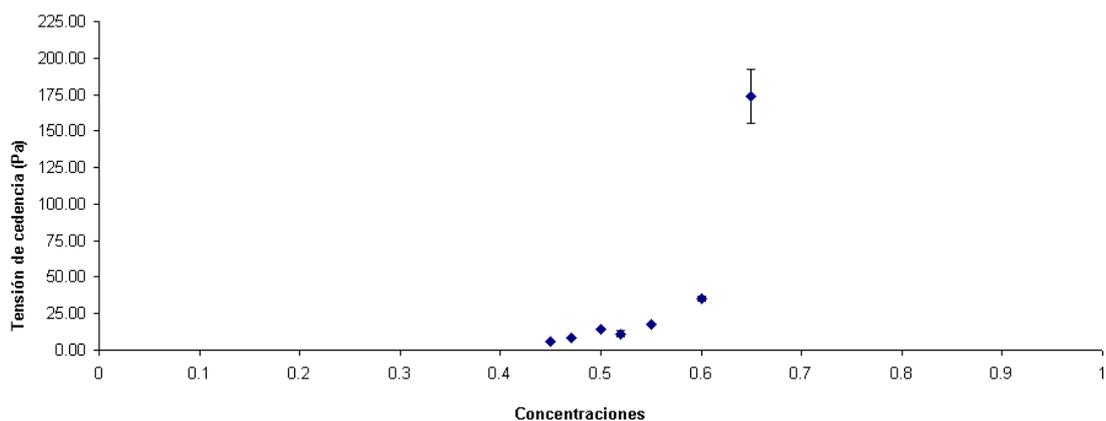


Figura 22 Curva representativa de las diferentes suspensiones analizadas

En la tabla 19, se pueden ver a modo de resumen las tensiones de cedencia obtenidas por los tres métodos diferentes de análisis de muestra de lodos de la Peña del Águila. Tomando como referencia, por su mayor precisión, el análisis de barrido de tensión en continuo, que es a partir del cual vamos a sacar las conclusiones finales de este estudio.

Tabla 19 Tabla comparativa de las tensiones de cizalla (Pa) obtenidas por tres ensayos de flujo diferentes.

Concentración (% p/p)	Barrido de tensión en continuo.	Barrido de tensión en estado estacionario.	Barrido de velocidad.
65	173.87	144.69	116.37
60	35.14	31.42	36.39
55	17.66	16.14	24.10
52	11.32	16.81	25.20
50	14.62	15.09	18.83
47	8.46	7.59	12.27
45	6.07	5.87	11.90

En la tabla 19 se muestra un resumen de los datos de la tensión de cedencia que se ha obtenido de los tres ensayos realizados por el método de tensiones.

Tras analizar las suspensiones por los tres métodos diferentes (barrido de tensión en continuo, barrido de tensión en estado estacionario y barrido de velocidad) se ha podido llegar a la conclusión de que la tensión de cizalladura más fiable y precisa es la obtenida por el método de barrido de tensión en continuo siguiendo la norma (Din, Technical report 143).

En color verde claro ( figura 23) aparece la curva Pb-Zn Peña del Águila, la cual se ha obtenido como resultado de los análisis reológicos descritos anteriormente y ha sido el objetivo principal de este trabajo.

En la distribución de dichos puntos se puede ver de forma clara que al aumentar la concentración de sólidos de la muestra aumenta significativamente la tensión de cedencia incrementándose este valor de forma brusca entre los puntos de 60 % de sólido y 65 % de sólido.

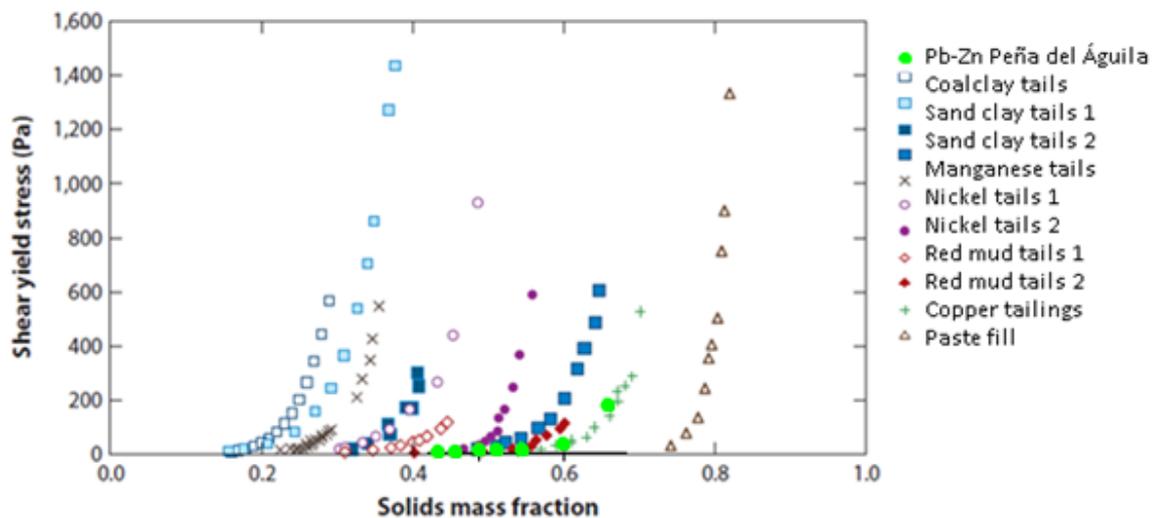


Figura 23 Gráfico experimental representativo de curvas de comportamiento reológico incluyendo la curva de los resultados reológicos del presente estudio.

# CAPÍTULO 6

---



## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

1.- El depósito 0978-1-0021 y 0978-1-0020 descansa sobre una delgada formación de coluviones y aluviones cuaternarios, que a su vez están recubriendo filitas en su parte suroeste y un delgado paquete de calizas en la parte noreste. Los depósitos 0978-1-0022, 0978-1-0023 y 0978-1-0024 descansan igualmente sobre una capa de coluviones y aluviones, que están recubriendo un sustrato formado por filitas, excepto el extremo noreste del depósito 0978-1-0023 donde el sustrato consiste en areniscas y limolitas del Mioceno (Faz et al., 2006).

2.-Debido a que nos encontramos en un área de climatología semiárida, con un régimen pluviométrico irregular, escasa vegetación, y elevados niveles de escorrentía superficial, el principal deterioro que sufren la estructura es la erosión.

3.- El pH real de las balsas puede ser clasificado como moderadamente alcalino, ya que tiene un valor de 7,95. En cuanto a la conductividad eléctrica que es de 11,08 mS/cm puede ser clasificada como moderadamente salina.

4.- En cuanto a la textura de la balsa objeto de estudio predomina la textura franco limoso con un porcentaje de 41% de arena, 5 % de arcilla y 54% de limo.

5.- De acuerdo a los resultados de los ensayos reológicos se han tenido en cuenta los datos obtenidos por el método del barrido de tensión de cizalla en continuo por varias razones:

Teniendo en cuenta los datos obtenidos se han tomado los resultados del barrido de tensión de cizalla en continuo por varias razones:

a) Como se puede ver en la tabla 19 abarca un mayor rango de tensiones de cedencia, y por lo tanto es más representativo de la muestra estudiada.

b) Dado que de los tres métodos obtenemos una desviación estándar menor en el método elegido, podemos asegurar que este es el más preciso y fiable.

c) El análisis de estudio de este método está normalizado (DIN, TECHNICAL REPORT 143), lo que supone una garantía internacional, garantizando así unos resultados fiables, óptimos y precisos.

Tabla 20 Tabla comparativa de las tensiones de cizalla (Pa) obtenidas por tres ensayos de flujo diferentes.

Concentración (% p/p)	<i>Barrido de</i>	<i>Barrido de tensión</i>	
	<i>tensión en continuo</i>	<i>en estado estacionario</i>	<i>Barrido de velocidad</i>
65	<b>173.87</b>	144.69	116.37
60	<b>35.14</b>	31.42	36.39
55	<b>17.66</b>	16.14	24.10
52	<b>11.32</b>	16.81	25.20
50	<b>14.62</b>	15.09	18.83
47	<b>8.46</b>	7.59	12.27
45	<b>6.07</b>	5.87	11.90

A partir de estos datos se ha obtenido la gráfica *tensión de cedencia-concentración* (Figura 23) determinando así la mínima tensión necesaria a partir de la cual los lodos comienzan a fluir.

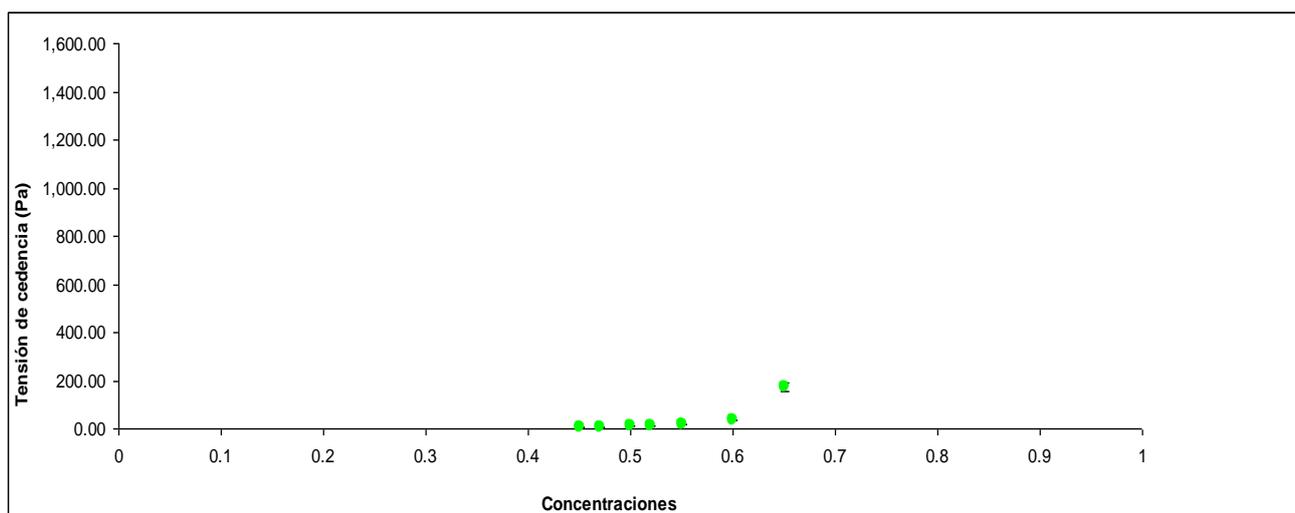


Figura 23 Curva representativa de las diferentes suspensiones analizadas

Como se muestra en la figura 23 con concentraciones de sólidos menores (entre 45% y 55%) la tensión de cedencia para que los lodos fluyan es muy baja. En cambio al aumentar la concentración de sólidos (55% hasta 65%) aumenta notablemente la tensión de cedencia.

La figura 24 se trata del gráfico experimental de estudios realizados a diferentes relaves en el cual se incluye por primera vez y en este trabajo fin de grado la curva representativa de los relaves Pb-Zn Peña del Águila.

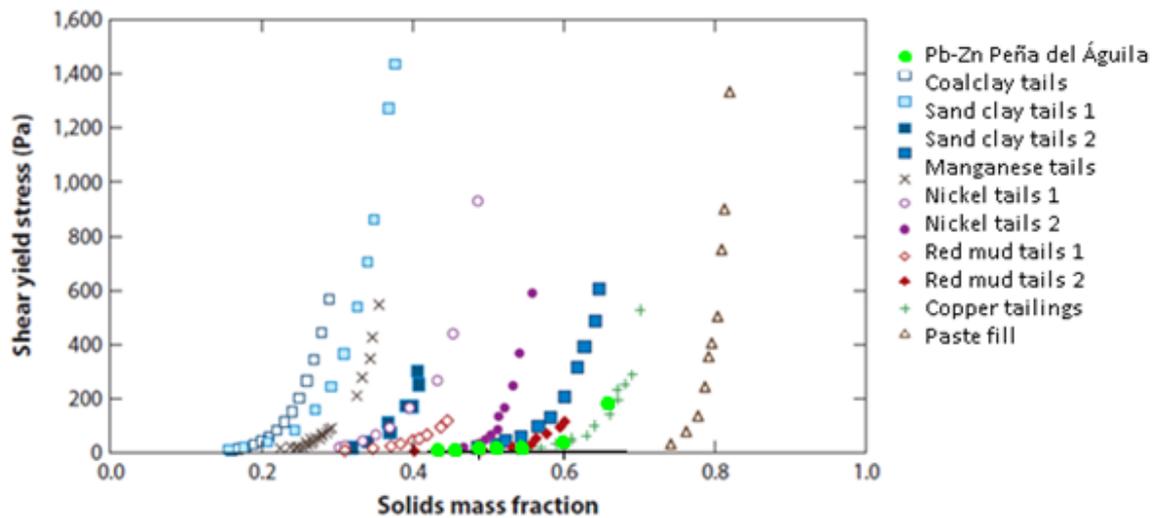


Figura 24 Gráfico experimental representativo de curvas de comportamiento reológico incluyendo la curva de los resultados reológicos del presente estudio.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

David V. Boger. Rheology of Slurries and Environmental Impacts in the Mining Industry .

ENADIMSA (Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Científicas, S.A.) (1988). Estudio de Restauración del Medio Ambiente Afectado por las Actividades Mineras en el Sureste de Murcia. Estudio Geotécnico. Balsas y Escombreras. Dirección General de Minas de la Comunidad Autónoma de Murcia. 102 pp

Faz, A., Aracil, E., Acosta, JA., Alcaráz, M., Conesa, H., García, G., **García, C.**, Manteca, JI., Martínez, I., Martínez, P., Martínez, MA., Peñas, JM., Rodríguez, T., Rodríguez, P. y Trigueros (2003a). Evaluación de riesgo y definición de medidas correctoras en depósitos de lodos abandonados procedentes de procesos de actividad extractiva en la Región de Murcia. Aplicación al depósito "El Lirio". Consejería de Economía, Industria e Innovación, de la Comunidad Autónoma de Murcia. Dirección General de Industria, Energía y Minas (contrato No 0978-1-0026). 243 pp.

Faz, A., Aracil, E., Acosta, JA., Alcaráz, M., Conesa, H., García, G., **García, C.**, Manteca, JI., Martínez, I., Martínez, P., Martínez, MA., Peñas, JM., Rodríguez, T., Rodríguez, P. y Trigueros (2003b). Evaluación de riesgo y definición de medidas correctoras en depósitos de lodos abandonados procedentes de procesos de actividad extractiva en la Región de Murcia. Aplicación al depósito "Brunita". Consejería de Economía, Industria e Innovación, de la Comunidad Autónoma de Murcia. Dirección General de Industria, Energía y Minas (contrato No 0978-1-0026). 250 pp.

Faz, A., Martínez-Martínez, S., Acosta, J.A., Peñas, J.M., Aracil, E., Alcaraz, M., Conesa, H., García, G., **García, C.**, Manteca, I., Martínez, P., Martínez, M.A., Rodríguez, T., Rodríguez, R. and Trigueros, E. (2004). Risk assesment and restoration posibiliteís of some abandoned mining silt ponds in the region de Murcia: study case "El Lirio". Fourth internacional conference on Land degradation. Cartagena. p 357.

**García, C.**, Manteca, J.I. y Queralt, I. (2003). Caracterización e inventariado de los depósitos de residuos mineros en la Sierra de Cartagena (Murcia). Actas del IV Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Utrillas (Teruel). 519-530 pp.

- García, C.**, (2004). Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia, España). Tesis de la Universidad Politécnica de Cartagena. 424 pp
- I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España) (1974). Mapa geológico de España a escala 1:50.000. Hojas n<sup>os</sup> 977 Cartagena y 978 Llano del Beal. Espinosa, J.; Martín, J.M. y Pérez Rojas, A.
- I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España) (1974b). Inventario Nacional de Balsas y Escombreras. Murcia. 151 pp.
- I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España) (1986a). Inventario Nacional de Balsas y Escombreras. Murcia. 162 pp.
- I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España) (1986b). Manual para el diseño y construcción de escombreras y presas de residuos mineros. 182 pp.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1999a). Inventario Nacional de Balsas. Región de Murcia. 270 pp.
- Quintana, H. (1998). Diques de estériles. *Industria y Minería*, 33, 52-56.
- Rodríguez, T., Manteca, J.I., **García, C.** y Queralt, I. (2003a). Aspectos geomorfológicos y estratigráficos de los pantanos de estériles mineros en la sierra de Cartagena: Un patrimonio geológico a considerar. III Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Cartagena Eds: Rábano, I., Manteca, I. y García, C. 87-96.
- S.M.M.P.E., S.A. (Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya-España, S.A.) (1970). Las explotaciones de plomo y cinc en la Sierra de Cartagena. (folleto divulgativo). 82 pp.
- S.M.M.P.E., S.A. (Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya-España, S.A.) (1980). Lavadero Roberto. Monografía 1980 (documento interno). 85 pp.
- S.M.M.P.E., S.A. (Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya-España, S.A.) (1985). Centro minero de la Sociedad Minera y Metalúrgica de Peñarroya-España, S.A. en Cartagena-La Unión (folleto divulgativo). 23 pp.
- Solano Oria, E (1990). Estudio minero-metalúrgico de los residuos de las explotaciones mineras de la Sierra de Cartagena. Tesis Universidad de Murcia. 203 pp.

Vera Torres, J.A. (1994). Estratigrafía. 806 p. Ed. Rueda. Madrid.