

Proyecto Fin de Carrera  
Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DE SEGURIDAD ANTE REMONTE  
DE UNA PRESA DE MATERIALES SUELTOS  
EJECUTADA CON RESIDUOS INDUSTRIALES  
PROCEDENTES DE LA COMBUSTIÓN DEL  
CARBÓN.**

Autor: Carmen Colchero Martínez

Tutor: Manuel Vázquez Boza

**Dpto. Estructuras de Edificación e Ingeniería del  
Terreno**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2023





Proyecto Fin de Carrera  
Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DE SEGURIDAD ANTE REMONTE  
DE UNA PRESA DE MATERIALES SUELTOS  
EJECUTADA CON RESIDUOS INDUSTRIALES  
PROCEDENTES DE LA COMBUSTIÓN DEL  
CARBÓN.**

Autor:

Carmen Colchero Martínez

Tutor:

Manuel Vázquez Boza

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Proyecto Fin de Carrera: ANÁLISIS DE SEGURIDAD ANTE REMONTE DE UNA PRESA DE  
MATERIALES SUELTOS EJECUTADA CON RESIDUOS INDUSTRIALES PROCEDENTES DE LA  
COMBUSTIÓN DEL CARBÓN.

Autor: Carmen Colchero Martínez

Tutor: Manuel Vázquez Boza

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

*A mis padres.*



# Agradecimientos

---

Dejo atrás estos años con sentimiento agridulce. Ha sido un camino, nunca mejor dicho, duro y difícil, pero a la vez reconfortante por la recompensa que hay detrás de todo esto.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres el apoyo desde que tengo uso de razón. Según mi madre, no me conformaba con otra carrera y me metí en esta, que hace cosas a lo grande, según mi padre que seré capaz de ser todo lo que me proponga. Gracias por la paciencia, apoyo y dedicación en los peores y mejores momentos, por haberlo sufrido igual o más que yo, por guiarme siempre a ser mejor persona y darme los valores que hoy en día tengo. No fue fácil al principio, pero estoy segura que sin vosotros no hubiera sido posible. A mi hermana, por acompañarme en cada paso que doy, por darme luz en las noches mas oscuras, por ser mi compañera de mesa y de vida.

A Javi, por acompañarme en cada bache estos años, su infinita paciencia, que no ha sido poca, y sus palabras de ánimo cada vez que lo necesitaba. Por creer y sacar siempre lo mejor de mi y estar siempre a mi lado haciéndolo todo más fácil, pase lo que pase.

A mis amigos de la carrera, desde el primero hasta el último. Por hacer este paso por la ETSI mucho más ameno, por ayudar cuando hacía falta, por animar, secar lágrimas y sacar sonrisas, me siento afortunada de teneros a mi lado. Mención especial a mi EQUIPO, sabéis quienes sois y sin vosotras esto no hubiera sido lo mismo, el compañerismo en 6 personas diferentes pero muy iguales, que no se rinden y luchan un poquito más pero siempre juntas, estoy muy orgullosa de cada una de vosotras.

Por último, a mi tutor Manuel Vazquez Boza, por guiarme en este apasionante proyecto, por la dedicación y las enseñanzas en el mundo de la Geotecnia.

*Carmen Colchero Martínez*

*Sevilla, 2023*



# Resumen

---

Actualmente, la energía es uno de los puntos más importantes de la economía mundial a la vez que problemático por las consecuencias que pueden tener sobre el medio ambiente. Desde el punto de vista económico, aumentar la vida de las centrales térmicas es una buena opción, dándole una segunda oportunidad a aquellas que estén en desuso.

Este Trabajo de Fin de Grado se basa en el análisis de seguridad de una presa de materiales sueltos ejecutada con los residuos procedentes de una central térmica con el objetivo de que pueda seguir en funcionamiento. Para ello, es necesario seguir almacenando los materiales generados sobre el dique actual, por lo que hay que realizar un remonte de la altura del orden de las realizadas anteriormente.

Cabe destacar que el punto más importante de este proyecto es realizar la correcta caracterización de los materiales almacenados, ya que, gracias a ella, el análisis de seguridad se podrá realizar lo más similar posible a la realidad, que se realizará con el programa de elementos finitos Plaxis 2D.



# Abstract

---

Currently, energy is one of the most important aspects of the world economy, as well as problematic due to the consequences it can have on the environment. From an economic point of view, increasing the life of thermal power plants is a good option, giving those that are in disuse a second chance.

This Final Degree Project is based on the safety analysis of a loose materials dam built with waste from a thermal power plant with the aim of allowing it to continue operating. For this, it is necessary to continue storing the materials generated on the current dam, so it is necessary to carry out a lift of the order of height of those carried out previously.

It should be noted that the most important point of this project is to carry out the correct characterization of the stored materials, since, thanks to it, the security analysis can be carried out as similar as possible to reality, which will be carried out with the elements program finite Plaxis 2D.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>21</b>
<b>2 Objetivos</b>	<b>23</b>
<b>3 Estado del conocimiento</b>	<b>25</b>
3.1. <i>Funcionamiento de una central térmica</i>	25
3.2. <i>Coficiente de seguridad</i>	25
3.1.1 Clasificación de las presas	26
3.1.2 Comprobación estructural.	26
3.2 <i>Modelado numérico</i>	27
<b>4 Caracterización geológico-geotécnica del emplazamiento</b>	<b>11</b>
4.1 <i>Antecedentes</i>	11
4.2 <i>Condiciones geológicas y geotécnicas</i>	12
4.3 <i>Geomorfología</i>	12
4.4 <i>Tectónica</i>	13
4.5 <i>Hidrogeología</i>	14
4.6 <i>Caracterización geotécnica</i>	16
4.6.1 Reconocimientos realizados	16
4.6.2 Niveles estratigráficos	17
4.7 <i>Resumen parámetros</i>	25
<b>5 Propuesta de remonte</b>	<b>26</b>
5.1 <i>Solución propuesta</i>	26
5.1.1 Geometría del modelo	26
5.2 <i>Factor de seguridad.</i>	37
5.3 <i>Solución final</i>	40
<b>Conclusiones</b>	<b>43</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>44</b>
<b>Anexos</b>	<b>46</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Coeficientes de seguridad mínimos relativos a la estabilidad de la presa.	25
Tabla 2. Resumen datos de los piezómetros.	17
Tabla 3. Valores de los parámetros geotécnicos del Nivel Geotécnico 1a.	18
Tabla 4. Valores de los parámetros geotécnicos del Nivel Geotécnico 1b.	20
Tabla 5. Valores de los parámetros geotécnicos del Nivel Geotécnico 1c.	21
Tabla 6. Resultados del ensayo SPT de los sondeos presentes.	22
Tabla 7. Valores de los parámetros geotécnicos del Nivel Geotécnico 2.	23
Tabla 8. Valores de los parámetros geotécnicos del Nivel Geotécnico 4.	24
Tabla 9. Características resistentes de las discontinuidades	25
Tabla 10. Resumen de parámetros resistentes para cada uno de los materiales.	25
Tabla 11. Resumen de parámetros resistentes para cada uno de los materiales.	27
Tabla 12. Desplazamientos de cada fase.	37
Tabla 13. Coeficientes de seguridad.	38



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Desglose del consumo de energía en España. [1]	21
Figura 2. Situación de la presa y la Central Térmica. Fuente: Google Maps	22
Figura 3. Vista en planta de la presa. Fuente: Google Maps.	22
Figura 4. Modelo elástico perfectamente plástico.	28
Figura 5. Superficie de fluencia del Modelo de Mohr-Coulomb.	29
Figura 6. Encuadre geológico del emplazamiento de la zona de estudio [7].	13
Figura 7. Leyenda de los materiales de la zona de estudio [7].	14
Figura 8. Cuenca de alimentación (morado). En azul las líneas que alimentan a la cuenca, en rojo las líneas divisorias.	15
Figura 9. Sección geotécnica.	18
Figura 10. Geometría y materiales asignados al modelo de Plaxis 2D.	28
Figura 11. Nivel freático en el modelo.	28
Figura 12. Mallado del modelo.	29
Figura 13. Fase 0 (Fase inicial). Dique de arranque.	29
Figura 14. Fase 1. Material de cenizas.	30
Figura 15. Fase 2. Aportación de yesos.	30
Figura 16. Fase 3. Colmatación de la capa anterior	31
Figura 17. Fase 4. Remonte de 6m.	31
Figura 18. Fase 5. Colmatación del remonte de 6m.	32
Figura 19. Desplazamientos en dirección X. Fase inicial. Dique de arranque.	32
Figura 20. Desplazamientos en dirección Y. Fase inicial. Dique de arranque.	33
Figura 21. Desplazamientos en dirección X. Fase 1. Material de cenizas.	33
Figura 22. Desplazamientos en dirección Y. Fase 1. Material de cenizas.	33
Figura 23. Desplazamientos en dirección X. Fase 2. Aportación de yesos.	34
Figura 24. Desplazamientos en dirección Y. Fase 2. Aportación de yesos.	34
Figura 25. Desplazamientos en dirección X. Fase 3. Colmatación de la capa anterior.	35
Figura 26. Desplazamientos en dirección Y. Fase 3. Colmatación de la capa anterior.	35
Figura 27. Desplazamientos en dirección X. Fase 4. Remonte de 6m.	35
Figura 28. Desplazamientos en dirección Y. Fase 4. Remonte de 6m.	36
Figura 29. Desplazamientos en dirección X. Fase 5. Colmatación del remonte de 6m.	36

Figura 30. Desplazamientos en dirección Y. Fase 5. Colmatación del remonte de 6m.	37
Figura 31. Coeficiente de seguridad fases 2 y 5.	38
Figura 32. Círculo de deslizamiento. FS_Fase5.	39
Figura 33. Plastificación de la fase 5.	39
Figura 34. Detalle plastificación remonte.	40
Figura 35. Geometría del modelo con berma.	40
Figura 36. Geometría del modelo con berma	41
Figura 37. Coeficiente de seguridad fases 2 y 5 con berma.	41
Figura 38. Círculo de deslizamiento FS_Fase5 (con berma).	42



# 1 INTRODUCCIÓN

La energía, hoy en día, es el motor del progreso de nuestra civilización, jugando un papel muy importante tanto a nivel social, económico, como ambiental. Es este último, la cuestión medioambiental, uno de los temas más importantes y a la vez más problemáticos por el deterioro del ecosistema mundial debido al uso de combustibles fósiles, entre otros.

En España, la principal fuente de energía primaria no renovable proviene de combustibles fósiles, concretamente petróleo, gas y carbón. Actualmente, se debe reducir su dependencia para alcanzar los objetivos establecidos por la Unión Europea, aumentando el uso de las energías renovables.

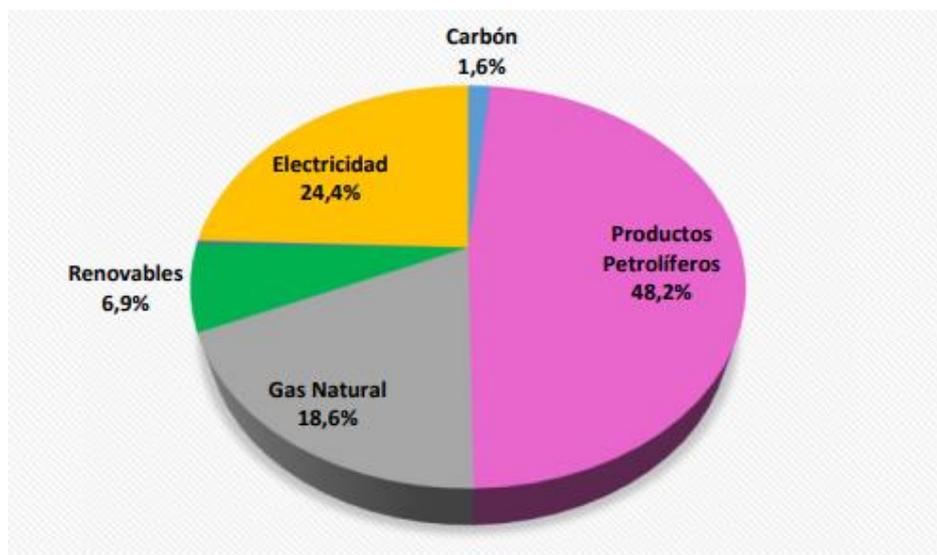


Figura 1. Desglose del consumo de energía en España. [1]

La producción actual de las energías verdes no es suficiente para abastecer al mercado, por lo que es necesario recurrir al uso de las energías no renovables. Estas son contaminantes porque favorecen las emisiones de gases de efecto invernadero, sin embargo, el control de este impacto medioambiental es posible gracias a la aprobación de una serie de leyes, al uso de normativas y a una política de concienciación de los ciudadanos.

La Guerra de Ucrania ha tenido graves consecuencias para la economía europea, y por ende para nuestro país, una de ellas ha sido el aumento descontrolado del precio de la luz. Esto está suscitando un gran debate en la sociedad, poniéndose sobre la mesa la conveniencia de aumentar la vida de las centrales térmicas como un recurso positivo a los efectos del encarecimiento del precio de la energía. Apostando de esta manera a utilizar las centrales térmicas que actualmente se encuentran en desuso, dándoles una segunda oportunidad con el objetivo de que España no pierda su capacidad térmica.

La zona de objeto de actuación se encuentra en el Término Municipal de Langreo, provincia de Asturias, concretamente, el depósito donde se almacenan cenizas y escorias con una superficie de 83200 m<sup>2</sup> se encuentra a unos 3 km de la Central Térmica de Lada



Figura 2. Situación de la presa y la Central Térmica. Fuente: Google Maps

El proyecto de construcción de dicha central surgió en los años 80 con el fin de aprovechar la producción carbonífera de hulla de la cuenca minera asturiana, siendo puesta en funcionamiento sobre 1982. Por el gran volumen de cenizas producido, se acumula el material procedente de la central sobre un dique de arranque al que se le han realizado varios recrecimientos sucesivos hasta llegar a la cota actual de +347m.

Actualmente, se quiere continuar con la producción de dicha central, por tanto, el objetivo de este estudio consiste en evaluar si se pueden continuar realizando más remotes y analizar tanto la altura admisible para su estabilidad como su factor de seguridad. Se propondrán distintas soluciones, que habrá que estudiar recurriendo al software de elementos finitos Plaxis2D con el objetivo de elegir la solución óptima.



Figura 3. Vista en planta de la presa. Fuente: Google Maps.

## 2 OBJETIVOS

---

El objetivo principal de este proyecto consiste en saber si la contuidad del funcionamiento de la central térmica permite seguir almacenando los materiales generados de forma segura.

Para ello, en primer lugar, se va a realizar una evaluación de la documentación existente, tales como planos y resultados de los ensayos realizados en la zona.

Además, será necesario identificar todos los materiales que aparezcan en la zona de estudio y realizar un análisis crítico sobre la caracterización de los materiales reflejados en el proyecto, en caso de que no sean coherentes, se obtendrán a partir de los resultados de los ensayos realizados y de manera que cumplan con las especificaciones recogidas en las normativas vigentes: CTE [2], CGOC [3] y ROM [4].

Por otro lado, se estudia la estabilidad del terreno donde se sitúa la presa, y siguiendo la Norma Técnica de Seguridad de Presas y Embalses [5] se determina el factor de seguridad mínimo que debe cumplir para que sea segura, en función de la situación y de la categoría de la misma.

A la vista de lo comentado, se va a realizar el análisis del remonte. El remonte que se va a tomar es de valor similar a los existentes, y mediante el programa de elementos finites Plaxis 2D se estudia su factor de seguridad. Por último, se elige y justifica la mejor alternativa.



## 3 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

España cuenta con una larga e intensa experiencia en normativa de presas, y en particular, sobre seguridad de presas y embalses, es por ello que, tras varias experiencias y revisiones, finalmente se aprobó el Real Decreto en el año 2021 [5] por el que se aprueban las normas técnicas de seguridad para las presas y sus embalses.

En este capítulo se va a tratar todo lo referente al análisis de seguridad presente en dicho Real Decreto para obtener el coeficiente de seguridad de acorde a la presa del proyecto y posteriormente realizar un análisis de un hipotético remonte.

### 3.1. Funcionamiento de una central térmica

En una central térmica se utilizan combustibles para generar energía eléctrica mediante un ciclo termodinámico de agua-vapor que será el encargado de transformarlo posteriormente en energía eléctrica. Para la generación de energía, en la central de Lada se utilizan como combustible los residuos de lavadero de hulla procedentes de la cuenca central asturiana.

A través de la quema de estos residuos, se calienta el agua de una caldera aproximadamente a unos 200°C convirtiéndola en vapor, que es el encargado de hacer girar la turbina transformando la energía calorífica en energía mecánica y posteriormente, a través de un alternador, se transforma en energía eléctrica.

La producción de energía eléctrica en centrales térmicas que emplean carbón como combustible origina varios tipos de residuos:

- Cenizas gruesas: son las que caen al fondo por gravedad.
- Cenizas finas (o de cenicero): el porcentaje de cenizas gruesas que pasan por un tamiz de una determinada abertura.
- Cenizas volantes: se encuentran en suspensión.

Este tipo de centrales inciden en el medio ambiente emitiendo residuos a la atmósfera al expulsar por la chimenea el gas se producido procedente de la quema de combustible, en el que se encuentran las cenizas volantes. Actualmente, la normativa prohíbe que salga más de un cierto porcentaje de dichos residuos por la chimenea. Para evitar que estas partículas se emitan, se utiliza un filtro electrostático, cuyo objetivo es conseguir que las partículas que pasan a través de él (cargas positivas y negativamente) se queden pegadas a sus paredes, de manera que se impide su salida al exterior.

En lo correspondiente a los tipos de cenizas que se generan, se almacenan en el depósito aquellas correspondientes a las cenizas y escorias. Este depósito se encuentra parcialmente apoyado sobre el terreno natural y sobre el dique, cuya explanada presenta una cota superior de +347,0m y una inferior a la cota +341,0m.

### 3.2. Coeficiente de seguridad

Los coeficientes de seguridad mínimos expuestos en el Real Decreto 264/2021, de 13 de abril [5] son los siguientes:

Situación	Categoría de la presa		
	A	B	C
Normal.	1,4	1,4	1,3
Accidental.	1,3	1,2	1,1
Extrema.	> 1,0	> 1,1	> 1,2

Tabla 1. Coeficientes de seguridad mínimos relativos a la estabilidad de la presa.

Se observa que se establece un valor de coeficiente de seguridad en función de la categoría en la que se haya clasificado la presa y en función de la categoría que se le haya asignado.

En primer lugar, se va a realizar una descripción de cada una de las categorías de la presa y situaciones para poder escoger el coeficiente de seguridad adecuado para este proyecto.

### 3.1.1 Clasificación de las presas

Las presas, según lo establecido en el artículo 358 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, se pueden clasificar según dos criterios, en función de las dimensiones de la misma o en según del riesgo potencial que pueda derivarse de su supuesta rotura o funcionamiento incorrecto.

Según las dimensiones que tenga se pueden clasificar como grandes o pequeñas presas. En su caso, se considera gran presa aquella que tenga una altura superior a 15 metros, o la que, teniendo una altura comprendida entre 10 y 15 metros, tiene una capacidad de embalse superior de 1 hm<sup>3</sup>. Si no cumple estas condiciones se considera pequeña presa.

Por otro lado, en función del riesgo potencial se clasifican en tres categorías:

- a) Categoría A: Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto pueden afectar gravemente a núcleos urbanos o a servicios esenciales, o producir daños materiales o medioambientales muy importantes.
- b) Categoría B: Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños materiales o medioambientales importantes o afectar a un número reducido de viviendas.
- c) Categoría C: Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede producir daños materiales de moderada importancia y solo incidentalmente pérdidas de vidas humanas. En todo caso, a esta categoría pertenecerán todas las presas no incluidas en las categorías A o B.

A partir de esta información se llega a la conclusión, primeramente, que, debido a la altura de la presa, de unos 65 metros, se puede considerar como **gran presa**. En lo referente a la categoría, esta presa se encuentra situada en una zona alejada de la población,

Para realizar una correcta clasificación de la presa en función del riesgo potencial derivado de su rotura o funcionamiento incorrecto debe realizarse una evaluación de los riesgos potenciales que pueden ocurrir aguas abajo de la misma. Para ello, debe examinarse que no afecte a núcleos urbanos o número de viviendas aisladas habitadas, servicios esenciales, daños materiales y aspectos medioambientales.

Por un lado, se considera como afección grave a un núcleo urbano que involucre a más de cinco viviendas habitadas, por otro lado, en cuanto a servicios esenciales, estos son aquellos indispensables para el desarrollo de las actividades humanas y económicas de conjuntos de poblaciones de más de 10.000 habitantes. En lo referente a daños materiales son aquellos cuantificables directamente en términos económicos. Sin embargo, la presa se sitúa en una zona alejada de la población, aproximadamente a 1 km y no se aprecian viviendas aisladas cercanas de la zona, además de la poca posibilidad que realice daños materiales, con todo ello, se considera la presa de este proyecto de **categoría C**.

### 3.1.2 Comprobación estructural.

En función de las acciones a considerar que actúan sobre la presa y la clasificación de la misma se puede realizar una serie de combinaciones de cargas (permanente o variables) según la probabilidad de presentación y su permanencia en tiempo, dando origen a los siguientes tipos de situaciones:

- a) Situaciones normales: Corresponden al peso propio, al empuje hidrostático y a su correspondencia en término de presiones intersticiales, al empuje de los sedimentos, a los efectos térmicos, del viento y del hielo, y a cualquier combinación de estas mismas acciones que se pueda presentar en el tiempo de forma persistente, con el embalse en distintos niveles, con límite en el Nivel Máximo Normal (NMN).
- b) Situaciones accidentales: Resultarán de la combinación de las acciones permanentes y variables tomando solo una de estas el valor accidental.

Corresponden al peso propio, al empuje hidrostático y a las presiones intersticiales y su aumento anormal, al empuje de los sedimentos, a los efectos térmicos, del viento máximo y del hielo, a la acción del Sismo de proyecto, a la carga hidrodinámica del embalse y a cualquier combinación de estas que se pueda presentar en el tiempo con duración limitada y con el embalse en distintos niveles, con límite en el Nivel de la Avenida de proyecto (NAP).

- c) Situaciones extremas: Resultan de la combinación de acciones permanentes y variables tomando solo una de estas el valor extremo y el resto su valor normal.

Corresponden al peso propio, al empuje hidrostático y a las presiones intersticiales y su aumento anormal, al empuje de los sedimentos, a los efectos térmicos, del viento máximo y del hielo, a la acción del Sismo extremo, a la carga hidrodinámica del embalse y a cualquier combinación de estas que se pueda presentar en el tiempo con duración limitada y con el embalse en distintos niveles, con límite en el Nivel de la Avenida extrema (NAE).

El estudio de la comprobación estructural que se realiza para en este proyecto para la presa considerada corresponde a una situación Normal, de esta manera, el coeficiente de seguridad propuesto según la normativa, para una categoría de presa tipo C y una situación Normal, le corresponde un **coeficiente de seguridad de 1.3**.

### 3.2 Modelado numérico

El comportamiento de la estructura se analiza a través de PLAXIS 2D, un programa computacional que usa el método numérico de elementos finitos para el cálculo de deformación y estabilidad en el ámbito de la ingeniería geotécnica.

Actualmente, PLAXIS es uno de los programas de elementos finitos más empleados para el diseño y el cálculo de obras geotécnicas. La mayoría de estos estudios requieren modelos avanzados que incluyan cálculos no lineales, anisótropos y dependientes del tiempo (estudios a largo y a corto plazo), además su interfaz permite estudiar la interacción suelo-estructura.

Los suelos tienen un comportamiento no lineal cuando están sometidos a cambios de tensiones o de deformaciones, sin embargo, para realizar el cálculo, se recurre al modelo de Mohr-Coulomb [6], que se trata de un modelo lineal elástico perfectamente plástico que puede ser empleado como primera aproximación al comportamiento del suelo.

La parte elástica se basa en la ley de elasticidad isotrópica de Hooke, mientras que la parte plástica implica que las deformaciones son irreversibles, por tanto, para evaluar si se produce o no la plasticidad se recurre a una función de fluencia ( $f$ ) dependiente de las tensiones y deformaciones. El inicio del rango plástico está relacionado con la condición de  $f=0$ , que puede representarse como una superficie en el espacio de tensión principal. Por otro lado, un modelo plástico perfecto es un modelo que presenta una superficie de fluencia fija, ósea, que está definida por los parámetros del modelo y no afectada por la deformación plástica. Por tanto, los estados de tensión representados por puntos dentro de la superficie de fluencia presentan un comportamiento perfectamente elástico donde las deformaciones que sufren son reversibles.

Por tanto, el principio básico de la elastoplasticidad es que el campo de deformaciones puede descomponerse en una parte elástica y una parte plástica.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

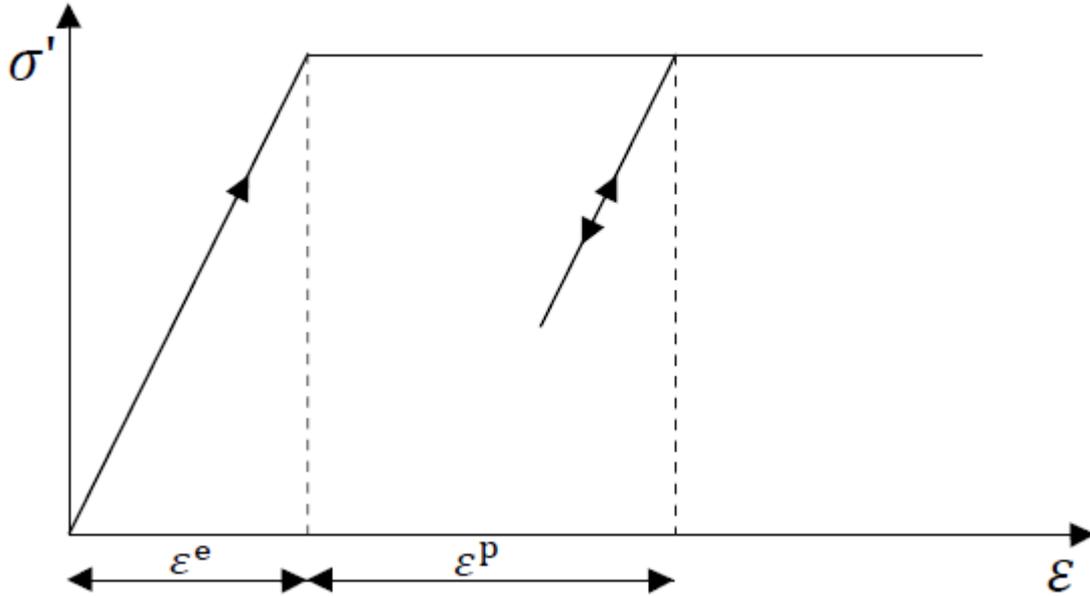


Figura 4. Modelo elástico perfectamente plástico.

La condición de fluencia de Mohr-Coulomb es una extensión de la ley de fricción de Coulomb a estados generales de tensión que asegura que dicha ley se cumple para cualquier plano dentro de un elemento material, que se resumen en seis ecuaciones de fluencia que dependen del ángulo de fricción ( $\phi$ ) y de la cohesión ( $c$ ) en el espacio de tensiones principales:

$$f_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin(\phi) - c \cdot \cos(\phi) \leq 0$$

$$f_{1b} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2) \sin(\phi) - c \cdot \cos(\phi) \leq 0$$

$$f_{2a} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin(\phi) - c \cdot \cos(\phi) \leq 0$$

$$f_{2b} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin(\phi) - c \cdot \cos(\phi) \leq 0$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin(\phi) - c \cdot \cos(\phi) \leq 0$$

$$f_{3b} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1) \sin(\phi) - c \cdot \cos(\phi) \leq 0$$

La condición de la superficie de fluencia,  $f=0$ , para las seis ecuaciones mencionadas anteriormente representan un cono hexagonal fijo en el espacio de tensión principal.

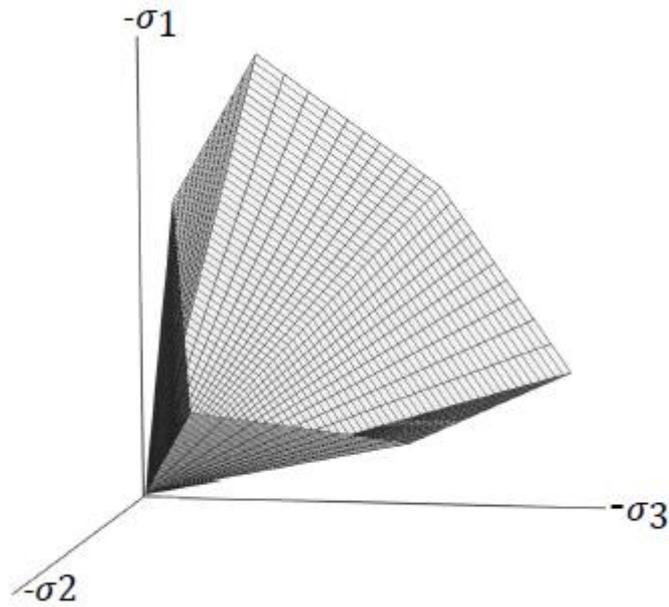


Figura 5. Superficie de fluencia del Modelo de Mohr-Coulomb.

Además de la función de fluencia, es necesario definir una función de potencial plástico ( $g$ ), que introduce un tercer parámetro, el ángulo de dilatación ( $\Psi$ ), el cual tiene en cuenta la deformación plástica positiva para suelos densos.

$$g_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3)\sin(\Psi) \leq 0$$

$$g_{1b} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2)\sin(\Psi) \leq 0$$

$$g_{2a} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\sin(\Psi) \leq 0$$

$$g_{2b} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)\sin(\Psi) \leq 0$$

$$g_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2)\sin(\Psi) \leq 0$$

$$g_{3b} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1)\sin(\Psi) \leq 0$$

Para  $c > 0$ , el criterio de rotura de Mohr-Coulomb permite que se produzcan tracciones en el suelo, aunque realmente un suelo tiene muy poca o ninguna capacidad de soportar una tracción, en ese caso, los círculos de Mohr con tensiones mayores a la indicada no serán permitidos. De esta manera, implementar la tensión máxima a tracción en el modelo implica tres nuevas funciones de fluencia de plasticidad asociada:

$$f_4 = \sigma'_1 - \sigma_t \leq 0$$

$$f_5 = \sigma'_2 - \sigma_t \leq 0$$

$$f_6 = \sigma'_3 - \sigma_t \leq 0$$

Cuando se utiliza este procedimiento, la tensión admisible de tracción se toma de valor igual a cero por defecto, aunque puede introducirse otro valor. Para las tres funciones anteriores se adopta una regla de flujo asociada.

Para estados de tensión dentro de la superficie de fluencia, el comportamiento es elástico y obedece la Ley de Hooke para materiales isotropos lineales, y se requiere la introducción de los siguientes parámetros:

- Cohesión ( $c$ ): para suelos no cohesivos, PLAXIS recomienda no emplear un valor nulo de este parámetro para evitar fallos de convergencia. Se proponen valores  $c > 0.2$ .
- Angulo de rozamiento interno ( $\phi$ ): valor de vital importancia a partir de  $35^\circ$ . El tiempo computacional se incrementa casi exponencialmente con el valor de este parámetro.
- Angulo de dilatación ( $\Psi$ ):
- Módulo de Young ( $E$ ): define la rigidez elástica del material
- Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ): mide la deformación transversal producida ante un incremento unitario de la deformación longitudinal.

Por tanto, estos de cinco parámetros son los que se requieren en el modelo de Mohr-Coulomb descrito y se obtienen a partir de ensayos realizados en campo o en laboratorio. La obtención de dichos parámetros se encuentra presente en el capítulo 4.

Como resumen aclaratorio, se puede decir que este programa permite obtener las tensiones y deformaciones en los distintos puntos del modelo de terreno introducido.

además de poder estudiar el coeficiente de seguridad mediante un análisis de seguridad.

Por otro lado, será de vital importancia en este proyecto estudiar el coeficiente de seguridad del remonte que se propone a continuación. El cálculo del análisis de seguridad de la estructura se realiza a través de un procedimiento denominado "*Phi-c reduction*". El factor de seguridad generalmente se define como la relación entre la cara de colapso y la carga de trabajo, sin embargo, en el caso de taludes es más importante señalar la pendiente del talud, en su caso, el ángulo de rozamiento y la cohesión del suelo. Por ello, la definición más apropiada del factor de seguridad (FS) será:

$$FS = \frac{c}{c_r} = \frac{\tan(\phi)}{\tan(\phi_r)} = \Sigma M_s f$$

La reducción de los parámetros de resistencia está controlada por un multiplicador denominado  $\Sigma M_s f$  que va incrementando hasta que se produce el fallo.

# 4 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DEL EMPLAZAMIENTO

---

**E**n este capítulo se va a llevar a cabo una descripción del estado inicial de este proyecto, condiciones geológicas y geotécnicas en las que se encuentra el proyecto actualmente, así como la geomorfología, tectónica e hidrogeología.

También se va a tratar uno de los puntos más importantes de este Proyecto, que es la caracterización geotécnica, fundamental para hallar los valores de los parámetros de cada uno de los materiales presentes.

## 4.1 Antecedentes

Este proyecto fue redactado en los años 80 y tenía como principal objetivo la construcción de un depósito para el transporte de los residuos procedentes de la central térmica.

El depósito se explotará en forma de balsa, vertiendo las cenizas aguas arriba a partir de un dique de arranque. Este dique de arranque se construye mediante el vertido de cenizas por de vía húmeda, por lo que deberá estar dotado con sus correspondientes drenajes. Los posteriores recrecimientos se realizarán mediante la ampliación del espaldón creado aguas abajo.

Los materiales procedentes de la central se transportan mediante vía húmeda, esto quiere decir que, cada parte de residuo generado se mezcla con tres partes de agua y a través de una conducción mediante bombeo, se traslada hacia el vertedero. Una vez allí, se vierte esta mezcla aguas arriba desde la coronación del dique de arranque (construido con cenizas), quedando de esta manera los materiales de mayor tamaño ubicados en el fondo del embalse por decantación, mientras que los de menor tamaño se sitúan más a la superficie.

El agua embalsada se recircula hasta la central favoreciendo su reutilización en circuito cerrado, mientras que el agua excedente es retirada del sistema para conducirla hacia la balsa de tratamiento de los residuos de la propia central para su posterior vertido.

Por otro lado, el dique de contención necesario para la materialización del embalse fue diseñado para ser construido con cenizas vertidas en seco de una manera controlada y mediante extendido y compactación, con el objetivo de asegurar la estabilidad e impermeabilidad del conjunto.

Con el objetivo de reducir los costes de transporte y ejecutar cuanto antes el transporte por vía húmeda, se planificó realizar la construcción del dique y la posterior explotación del vertedero por fases:

- Primera fase: construcción del dique de arranque mencionado anteriormente, con una cota variable entre 265 y 330 metros.
- Segunda fase: una vez construido el dique de arranque se disponía de la capacidad suficiente para proceder a la explotación mediante el vertido de los residuos por vía húmeda.
- Tercera fase: recrecimiento del dique de arranque mediante ensanche y elevación del espaldón aguas abajo a través de la compactación de los materiales situados en el fondo del embalse (cenizas y escorias) para poder seguir almacenando residuos.
- Se repite este proceso en las fases sucesivas hasta completar el dique de cierra, cuya coronación estaba prevista a la cota 375m.

Finalmente, se preveía continuar con una serie de vertidos sobre la horizontal de la coronación hasta alcanzar la cota de 400m. Sin embargo, este plan de explotación no llegó a materializarse, y la Compañía Eléctrica de Langreo, anterior propietaria de la central térmica solicitó el 20/05/88 a la Confederación Hidrográfica la autorización del vertedero hasta la cota 350, desistiendo del transporte de las cenizas por vía húmeda y construyendo dicho vertedero de acuerdo con el proyecto antes descrito, pero sin crear, en ningún momento embalse alguno.

De esta manera, con estos antecedentes expuestos, la situación actual se explica como una adaptación del proyecto original a las nuevas condiciones de explotación, entre las que destacan la eliminación del transporte por tubería y la reducción de la cota de explotación. Las modificaciones principales han sido:

- Ejecución del dique con la geometría del dique de cierre hasta la cota de la coronación del dique de arranque, a la cota 330 metros.
- Con el objetivo de evitar el transporte de los lixiviados hasta la central térmica, se construye una planta de tratamiento en el pie del dique.
- Adecuación de una zona del depósito para el vertido de yesos de la desulfadora.
- Implantación de un sistema de almacenamiento e impulsión para el riego de los lixiviados sobre el área operativa.

## 4.2 Condiciones geológicas y geotécnicas

El terreno de objeto se encuentra apoyado sobre un substrato rocoso de naturaleza sedimentaria y Edad Carbonífero Superior formado por intercalaciones de pizarras, areniscas y carbón.

Las distintas unidades lito-estratigráficas que existen en la zona son:

- **Carbonífero Superior**

Los materiales del Carbonífero Superior corresponden con el Paquete María Luisa, que pertenece al tercer tramo productivo dentro del Carbonífero de la Cuenca Asturiana y representa una sedimentación donde se alternan medios marinos y continentales. Presenta una potencia aproximadamente de 750m.

Dentro de los espesores continentales aparecen numerosas capas de carbón donde la mayoría se encuentran actualmente explotadas. Entre ellas, suele haber niveles de fauna típicos de agua dulce, que generalmente están intercalados entre niveles areniscosos.

Por otro lado, los medios marinos se encuentran representados principalmente por niveles pizarrosos con fauna marina intercalados con espesores de areniscas calcáreas.

- **Cuaternario**

Son materiales de naturaleza coluvial en los que aparecen los espesores de los suelos aluviales asociados principalmente a las llanuras de los grandes cauces existentes en la zona, el Río Nalón y similares. Los suelos eluviales se han formado como consecuencia de procesos de meteorización físico-química sobre el sustrato del cual proceden. Además de ello, zona donde se encuentra este material está cubierta por importantes espesores de suelos superficiales, prados, tierras de labor y abundante vegetación.

Cabe destacar que este material se ha mencionado en este apartado, pero no en el resto ya que se encuentra dentro de la zona de estudio en los alrededores del dique, pero no será necesaria su caracterización para realizar el análisis de estabilidad que es el objetivo principal de este proyecto.

## 4.3 Geomorfología

En cuanto a su geomorfología, se caracteriza por presentar altitudes variables entre los 300 y los 1000m.

Por un lado, las estructuras hercínicas han dado lugar a valles encajados con fondos muy estrechos y carentes de depósitos en las zonas bajas, con pequeñas llanuras aluviales y escasez de terrazas.

Por otro lado, los depósitos en ladera presentan reducidas dimensiones y están constituidos fundamentalmente por materiales silíceos.

#### 4.4 Tectónica

La zona de objeto se encuentra dentro del denominado Manto de Rioseco. Este presenta una estructura con dos rampas cabalgadas y una zona plana situada aproximadamente en el Pueblo de Ladines.

Esta unidad representa el límite estructural entre la Unidad de la Cuenca carbonífera Central y la Región de Mantos con un desplazamiento es muy notable, siendo interpretado como la lámina basal de la Unidad Carbonífera Central.

Como principales estructuras existentes en la zona, se detecta en la zona SO, un sinclinal denominado “Sinclinal de Sama” que ocupa los Mantos de Laviana y Rioseco. Dicho sinclinal presenta dos charnelas y un eje que buza unos 14° S.

Además de ello, se detectan en la zona de estudio dos estructuras discordantes entre sí mostrando un fuerte plegamiento. Estas estructuras son el “Anticlinal de Sama” y el “Sinclinal de El Entrego”.

Por toro lado, se detecta la presencia de la “Falla de Lada” en la zona Este del entorno ocupado vertedero que contribuye de manera muy importante a la formación de los distintos accidentes tectónicos de la zona.

Con todo lo anteriormente mencionado, cabe destacar que teniendo en cuenta estas características y las del propio vertedero, es de prever la existencia de una fracturación importante coincidente con el plano axial del sinclinal sobre el que se sitúa el vertedero además de posibles apariciones de pequeñas fallas.

A continuación, se muestra el encuadre geológico del emplazamiento de la zona de estudio junto con la leyenda geológica de los materiales.

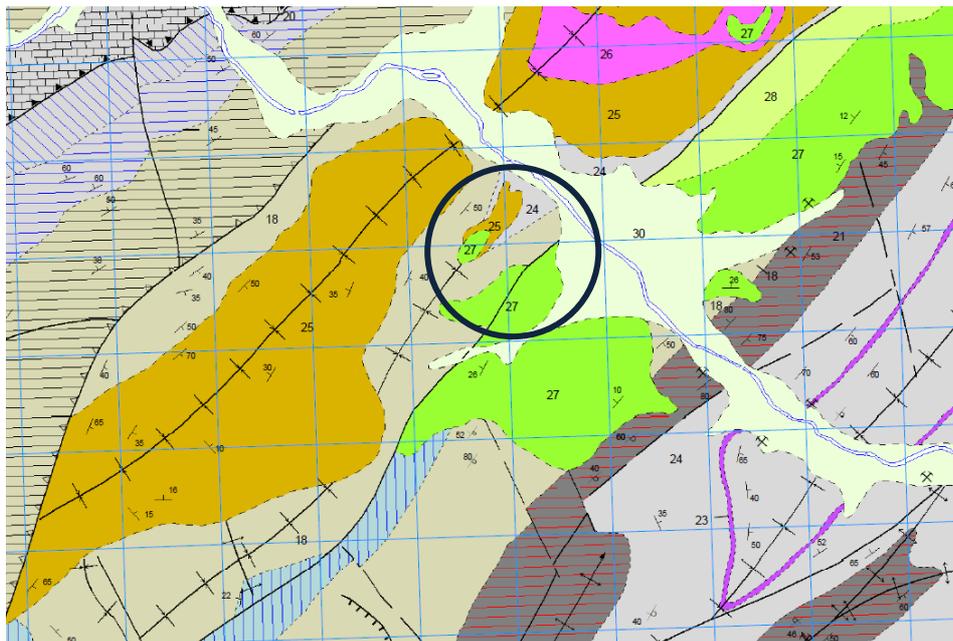


Figura 6. Encuadre geológico del emplazamiento de la zona de estudio [7].

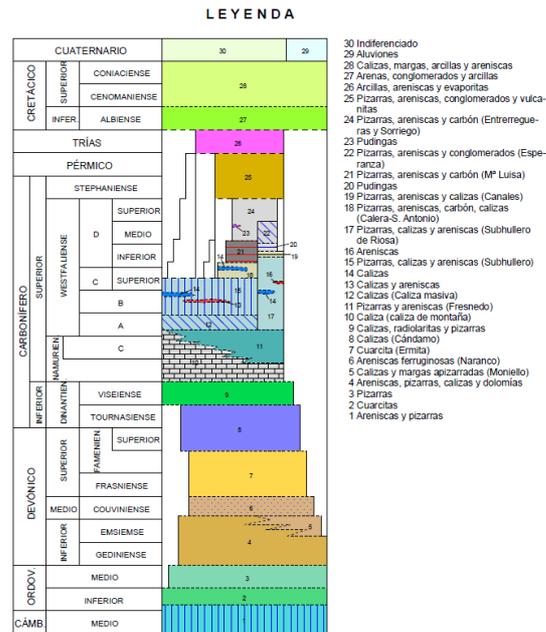


Figura 7. Leyenda de los materiales de la zona de estudio [7].

## 4.5 Hidrogeología

En este apartado se realiza una caracterización del medio hidrogeológico de la zona.

La zona de objeto se encuentra ubicada en Cuenca Carbonífera Asturiana ocupando la mayor parte de la superficie que ocupa la Masa de Agua subterránea Cuenca Carbonífera Asturiana, forma parte de la Cuenca del Río Nalón, excepto una pequeña área que pertenece a la Cuenca del Río Sella.

- **Hidrogeología general.**

Durante la realización de los trabajos de campo, tan sólo se ha detectado la presencia de agua en el sondeo S-1 a una profundidad aproximadamente de 13.7m. Esto se traduce en que sólo se prevé la presencia de agua procedente de escorrentías superficiales en los niveles geotécnicos 1 y 2, que podrían alcanzar el caudal del Arroyo del Regueión o interceptada por los sistemas de drenaje en épocas de abundantes precipitaciones.

Por otro lado, tal como se ha mencionado en el apartado de tectónica, existen zonas de fallas o zonas asociadas al pliegue sinclinal que pueden presentar una elevada permeabilidad. Así mismo, también se podrían producir filtraciones y surgencias de agua asociadas a zonas donde se detectan galerías y subsidencias derivadas de actividades mineras previas a la construcción del vertedero.

- **Hidrogeología superficial.**

La red fluvial de la zona de emplazamiento se encuentra muy desarrollada como consecuencia de la elevada pluviometría en esta zona y de la baja permeabilidad de los materiales que hay en ella, originando de esta manera una gran escorrentía superficial que hace que los cauces se encuentren bien encajados y con unos sedimentos aluviales importantes.

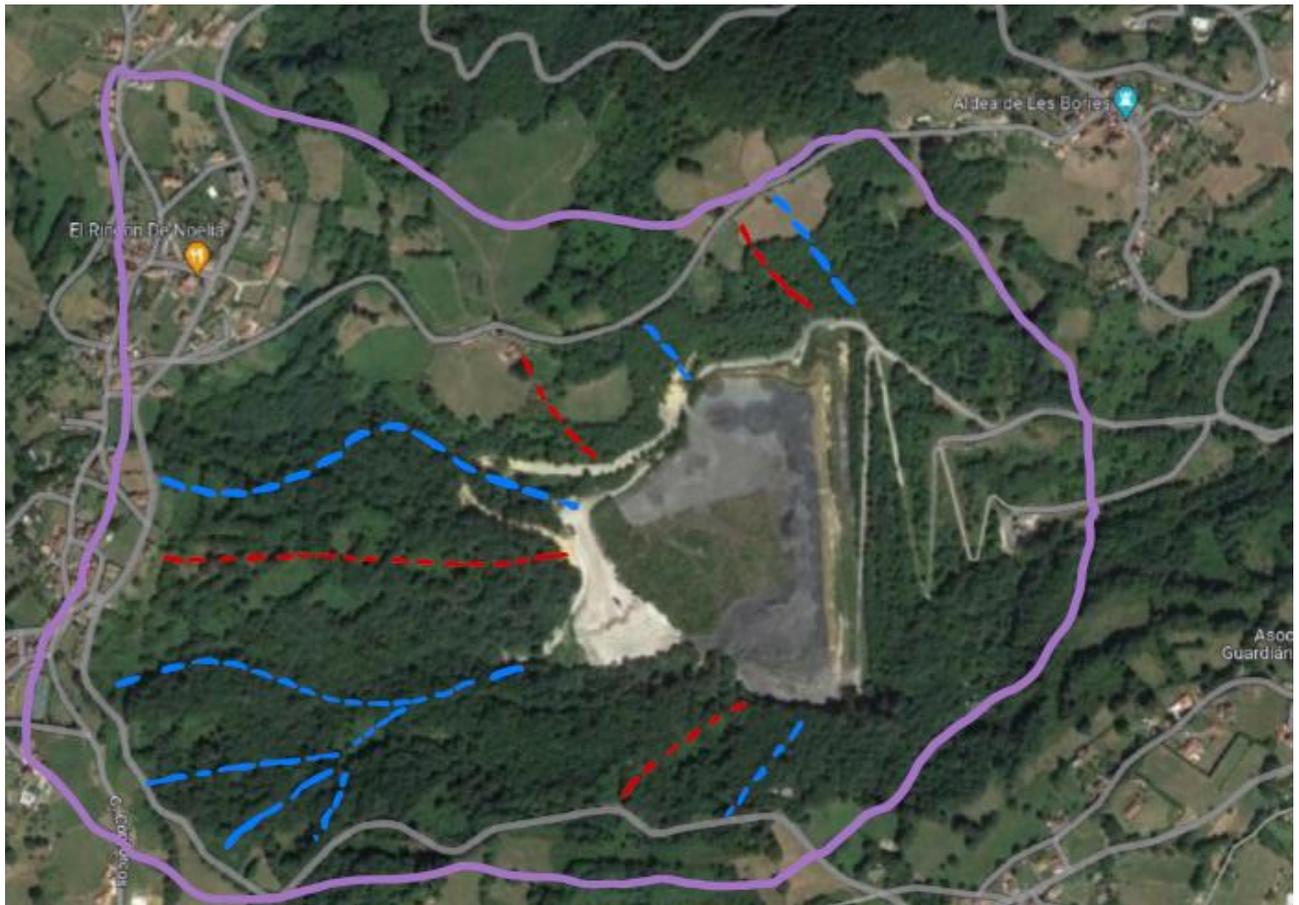


Figura 8. Cuenca de alimentación (morado). En azul las líneas que alimentan a la cuenca, en rojo las líneas divisorias.

Se aprecia una cuenca de aportación pequeña, del orden de 62 Ha con unos caudales máximos obtenidos de 4 m<sup>3</sup>/s para un periodo de retorno de 100 años y de 2.4 m<sup>3</sup>/s para un periodo de retorno de 5 años.

- **Hidrogeología subterránea.**

Desde el punto de vista hidrogeológico, la zona de estudio está constituida por materiales con una permeabilidad muy baja, que, aunque pueden llegar a formar pequeños acuíferos no constituyen sistemas acuíferos de importancia.

Desde el punto de vista hidrogeológico, esta zona se encuentra dentro de la “Unidad Paleozoica” (IGME 1984), caracterizada por una circulación de agua tipo fisural, dando lugar a numerosas surgencias de escasa entidad.

- **Acuíferos.**

La zona objeto de estudio pertenece a la denominada Masa de Agua subterránea Cuenca Carbonífera Central con una superficie total de 859 km<sup>2</sup> de los cuales, una pequeña parte constituyen los afloramientos permeables.

Dentro de la misma, se han definido tres formaciones geológicas permeables:

- Calizas y gonfolitas Carbonífero Superior.
- Areniscas y pudingas.
- Aluvial Cuaternario “Nalón-Caudal”.

Las dos primeras formaciones están formadas en su mayor parte, por pizarras, areniscas y carbón, donde las formaciones permeables formarían capas de pequeño espesor incluidas dentro de estos grandes paquetes de materiales de escasa o nula permeabilidad.

La última corresponde con los depósitos cuaternarios de los dos cauces principales que atraviesan la MASb, el

Río Nalón y el Río Caudal, con unos espesores alrededor de los 5m, aunque puntualmente pueden llegar a alcanzar los 12m.

Como se ha mencionado anteriormente, los materiales presentes en esta zona son poco permeables o muy impermeables, por lo que, en general, esta zona se comporta como un acuífero multicapa de muy baja porosidad y permeabilidad, donde las areniscas actúan como almacenes y las pizarras y capas de carbón como capas confinantes. Con ello, se puede deducir que las capas capaces de almacenar agua tienen conductividades hidráulicas muy variadas.

- **Funcionamiento hidrogeológico.**

En el área de estudio se pueden diferenciar dos tipos de acuíferos, uno representado por acuíferos formado por materiales permeables intercalados con carbón y otro formado por los depósitos Cuaternarios.

En general el funcionamiento de los sedimentos carboníferos es similar al de un terreno de baja permeabilidad con niveles entre ellas constituyendo un acuífero aislado. De esta manera, los niveles más permeables están constituidos por areniscas y calizas de espesores variables entre 40 y 60m.

La recarga de los niveles más permeables tiene lugar gracias a la infiltración del flujo superficial mientras que la descarga se realiza a través de manantiales o directamente aportación al cauce fluvial.

## 4.6 Caracterización geotécnica

La caracterización geotécnica de cada uno de los materiales presentes en el proyecto ha sido realizada gracias a los sondeos ejecutados en cada una de las diferentes zonas del dique a los que posteriormente se han ensayado en laboratorio para poder obtener los valores de los parámetros geotécnicos de cada uno de los niveles.

En este apartado se va a realizar un análisis crítico de los parámetros geotécnicos de cada uno de los materiales presentes en los distintos sondeos realizados a lo largo del dique. Siguiendo el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb al tratarse de un suelo, será necesario determinar los cinco parámetros resistentes imprescindibles para realizar dicho modelo, como son: cohesión, ángulo de rozamiento, ángulo de dilatación, módulo de deformación y coeficiente de Poisson. Además de ello, se analizarán los valores de la permeabilidad y peso específico para cada uno de los materiales obtenidos de los distintos ensayos realizados.

Mediante los ensayos efectuados en cada uno de los sondeos ejecutados en la zona, en los que se pueden presenciar los distintos materiales, se procede a comprobar si dichos resultados son coherentes, verificándolos con los valores recogidos en las normativas vigentes: CTE [2], CGOC [3] y/o ROM [4].

### 4.6.1 Reconocimientos realizados

Con el objetivo de conseguir una adecuada caracterización geológica, geotécnica e hidrogeológica de los materiales presentes en el proyecto, se ha llevado a cabo un estudio a través de sondeos.

El primero de los propósitos ha sido determinar los parámetros resistentes y la permeabilidad del dique y de los depósitos de residuos que se encuentran sobre él. Para ello, ha sido necesario realizar cuatro sondeos a rotación con extracción continua de testigo en distintas zonas del dique, en las que se pueden presenciar los diferentes materiales de los niveles estratigráficos presentes según la profundidad de dicho sondeo. Con la intención de estudiar los materiales más importantes, la distribución de los sondeos ha sido:

- **Sondeo S-1.** Se ha situado en el depósito de los yesos en una posición donde fuese posible alcanzar el terreno subyacente a una profundidad inferior a la longitud prevista para los sondeos.
- **Sondeo S-2.** Implantado en el depósito de cenizas, donde fuese posible alcanzar la coronación del dique de contención sobre el que se apoya parcialmente dicho depósito.
- **Sondeo S-3 y S-4.** Se han emplazado en el cuerpo del dique, con el objetivo de atravesar los drenes inferiores y alcanzar ligeramente el terreno subyacente.

En el interior de los sondeos se han realizado varios ensayos, entre ellos, 13 ensayos de penetración estándar

SPT, 3 ensayos de permeabilidad tipo Lefranc y 5 ensayos de penetración dinámica DPSH hasta alcanzar el rechazo, producido a una profundidad máxima de 5.80 m.

Por otro lado, para determinar la posición exacta del nivel freático se han instalado tres piezómetros. Previa a su instalación ha sido necesaria la ejecución de tres sondeos mecánicos a rotación con recuperación de testigos con una profundidad entre 10.00 y 14.00 m, donde, una vez realizada la perforación y purgado el sondeo, se ha introducido una tubería piezométrica.

Ensayo	Coordenadas UTM ETRS89-30N		Zini (m)	Zfin (m)	Profundidad (m)
	X	Y			
PZ1	378955.474	4798348.10	330.011	320.011	10
PZ2	279581.452	4798595.67	285.824	273.224	12.6
PZ3	279704.733	4798521.11	266.926	252.626	14.3

Tabla 2. Resumen datos de los piezómetros.

Los piezómetros realizados se encuentran en los alrededores de la zona que vamos a estudiar, particularmente en el Nivel Geotécnico 3, por lo que será necesario determinar el nivel de agua a través de los trabajos de campo en el ensayo de sondeos a rotación.

Durante la realización de estos ensayos, tan sólo se ha detectado la presencia de agua en el sondeo S-1 a una profundidad aproximadamente de 13.7 m. De acuerdo con esto, no existe la presencia de nivel freático natural, sin embargo, la presa contiene agua ya que el transporte de los materiales se realiza mediante vía húmeda además la presencia de agua procedente de escorrentías superficiales en épocas de precipitaciones importantes.

Conforme a lo anterior, se llega a la conclusión que los únicos materiales en los que sería posibles detectar niveles de agua asociados a escorrentías superficiales son los Niveles Geotécnicos 1 y 2, considerando el Nivel Geotécnico 4 como impermeable ya que es donde apoya el dique.

Continuando con la descripción geotécnica de los materiales de la zona, los criterios adoptados para describir cada uno de estos materiales se va a describir a continuación.

Para valorar la resistencia de los terrenos atravesados por los distintos sondeos, se han ido efectuando ensayos de penetración estándar SPT a medida que se realiza la perforación. Los valores se obtienen a partir del número de golpes realizados para hincar cuatro tramos de 0.15 m haciendo penetrar en el suelo un tubo de 0.6 m mediante el golpeo de una maza de 63.5 kg que cae a una altura de 0.76 m.

## 4.6.2 Niveles estratigráficos

### 4.6.2.1 Nivel Geotécnico 1: "Residuos"

Dentro de este Nivel Geotécnico se han incluido aquellos depósitos constituidos por cenizas, escorias y yesos procedentes de la actividad de la Central Térmica de Lada. Estos materiales en encuentran tanto en el depósito, como en el cuerpo del dique de contención de estos.

Por otra parte, el dique de contención está formado por cenizas mezcladas con escorias compactadas de forma controlada, mientras que los depósitos presentan escorias y cenizas (gris oscuro) y yesos (gris blanquecino), los cuales han sido depositados de forma incontrolada. Es por ello que este nivel geotécnico, se presentan varios tipos de terrenos en función del grado de compactación que presenten, concretamente, se presencian 3 subniveles geotécnicos.

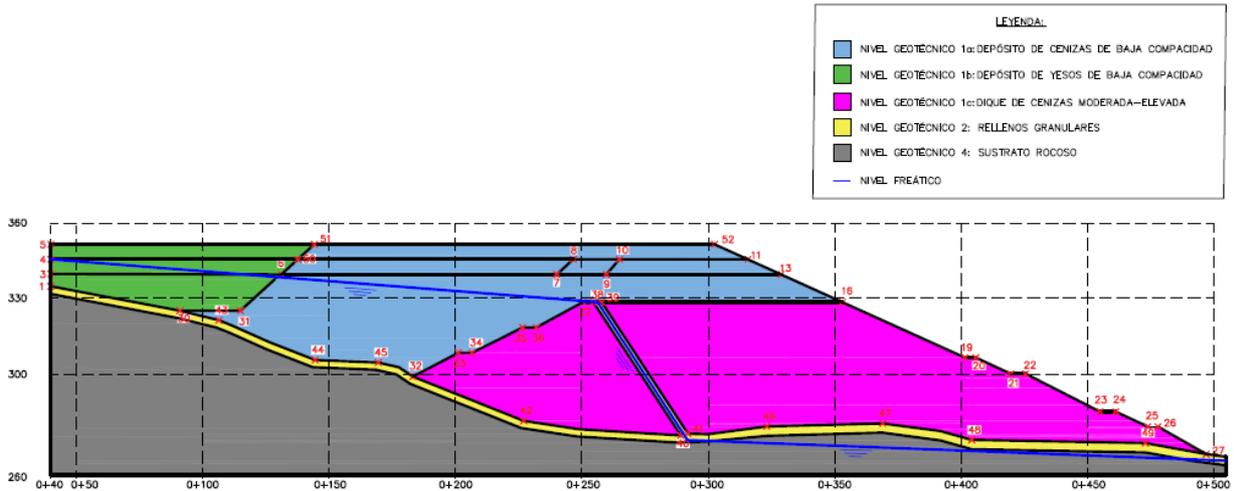


Figura 9. Sección geotécnica.

**4.6.2.1.1 Subnivel Geotécnico 1a: Cenizas de baja compactación**

Material presente en varios de los sondeos, pero será en el sondeo S-2 el que se estudiará para obtener los valores característicos del material. Este material está caracterizado por unas cenizas de baja compactación, compuesta fundamentalmente por materiales procedentes de la combustión del carbón de la central térmica, de tamaño granular similar a limos sin plasticidad y un bajo porcentaje de escorias. Presenta un espesor máximo alrededor de los 40 metros según la figura 6.

• **Parámetros resistentes**

De los ensayos realizados en este material se pueden obtener los parámetros resistentes tales como ángulo de rozamiento interno y cohesión a partir del ensayo de Corte Directo. El módulo de deformación en los suelos detectados se encuentra en relación directa con la resistencia en punta. Los valores de los parámetros resistentes para este material son:

	Nivel 1a		
	S-2	S-2	Promedio
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.50	16.50	<b>16.00</b>
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20.10	20.80	<b>20.45</b>
$\phi'$ (°)	25.00	30.49	<b>27.75</b>
$c'$ (kPa)	0.30	5.20	<b>2.75</b>
$\nu$	0.45	0.45	<b>0.45</b>
$E$ (MPa)	31.25	120.00	<b>50.00</b>

Tabla 3. Valores de los parámetros geotécnicos del Nivel Geotécnico 1a.

Se va a realizar un análisis crítico sobre los valores obtenidos en los ensayos haciendo uso de varias normativas como son el Código Técnico de la Edificación (CTE) [2], las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM) [4] y la Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera (GCOC) [3].

Este terreno ofrece una baja resistencia a la penetración con valores de golpeo inferiores a 10 golpes/20 cm en el ensayo de penetración dinámica. Para un  $N_{DPSH}$  bajo puede aproximarse a valores bajos de  $N_{SPT}$ . Tanto en el

CTE, como en la ROM y la CGOC tienen valores casi iguales a la hora de clasificar la compacidad del terreno, así que considerando 10 golpes como  $N_{SPT}$  este nivel geotécnico se contempla con compacidad floja.

- **Ángulo de rozamiento:** el ángulo obtenido del ensayo de corte directo es de  $25.66^\circ$ . Gracias a la figura D.1. presente en el CTE, se puede aproximar el ángulo de rozamiento en función del índice SPT a  $30^\circ$ . Al tratarse de un limo + grava, se ha realizado una media entre los ángulos de rozamientos teóricos de dicha normativa obteniendo finalmente un rango recomendado de  $29.5^\circ$ - $38.5^\circ$ . Por tanto, podemos considerar el valor del ensayo como apto.
- **Cohesión:** tiene un valor de  $0.25 \text{ T/m}^2$  ( $=2.5 \text{ kPa}$ ), obtenido del ensayo de corte directo consolidado sin drenaje a una profundidad 10-10.60 m. En las tablas de la CGOC podemos comprobar que el valor de la cohesión para limos tiene un rango de 0-10 kPa y 0 para gravas. Por otro lado, la ROM recomienda, para gravas y arenas con un alto porcentaje de finos y con compacidad floja, un valor de 5 kPa. Se puede considerar el resultado de 2.5 kPa como aceptable para un suelo con estas condiciones.
- **Peso específico:** el valor obtenido de los ensayos es de 16 kPa. Este valor es muy bajo ya que el material que abunda en este nivel son los limos, que tienen un peso específico entre 17 y 20 kPa según la tabla D.26. contenida en el CTE de valores orientativos. Al contener también un porcentaje de gravas, el valor del peso específico de esta matriz será algo mayor, por lo que se puede adoptarse un valor medio de 18 kPa.
- **Coefficiente de Poisson:** se considera 0.45 como primera aproximación. Según el CTE, se establece un valor entre 0.15 y 0.4 únicamente para arcillas, mientras que la ROM toma 0.3 para suelos densos y 0.40 para los más flojos o blandos. Por otro lado, la GCOC admite que  $\nu=0.3$  en formaciones arenosas y  $\nu=0.4$  en suelos arcillosos blandos y un valor de 0.5 cuando el terreno se encuentra a largo plazo. Esta primera aproximación se considera de valor muy alto, por lo que se va a adoptar un valor de 0.35 para este coeficiente.

Por otro lado, se puede obtener igualmente un valor aproximado para:

- **Módulo de deformación:** en el informe geotécnico no se realiza ningún ensayo para obtener este parámetro, sin embargo, se ha optado por un valor de  $50 \text{ MN/m}^2$ . En el CTE se realiza una clasificación en función del  $N_{SPT}$ , pero el dato que realmente tenemos es el de la resistencia a la penetración  $N_{DPSH}=10$  golpes/20 cm. Al tener un valor bajo, se puede aproximar como  $N_{SPT}$ , lo que corresponde según la tabla D.23. del CTE a un módulo de elasticidad entre 8 y  $40 \text{ MN/m}^2$ . En la ROM se contempla una estimación entre 5-20 MPa. El valor proporcionado en el informe es alto en comparación con los de las normativas, de esta manera podemos razonar un valor de 20 MPa.
- **Permeabilidad:** sus valores se encuentran entre  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$ . Según la tabla D.28. mostrada en el CTE, los limos tienen una permeabilidad entre  $10^{-5}$  y  $10^{-9}$ . Sin embargo, este material se encuentra mezclado con gravas, cuya permeabilidad es mayor a  $10^{-2}$ . Como conclusión puede considerarse este valor con identificativo de este material.

#### 4.6.2.1.2 Nivel Geotécnico 1b: Yesos de baja compacidad

Este nivel está compuesto principalmente por una capa de yesos de color gris blanquecino con una potencia aproximadamente entre 8 y 9 metros.

Este material se ha detectado principalmente en el sondeo S-1. En el ensayo SPT realizado en dicho sondeo se han detectado valores generalmente bajos. Al tener un valor  $N_{DPSH}=8$  golpes/20 cm bajo puede aproximarse como  $N_{SPT}$ , según las normativas puede decirse que este material tiene una compacidad muy floja, y gracias a la granulometría que presenta se puede considerar como un limo para verificar si los resultados de los ensayos con los proporcionados en las normativas.

- **Parámetros resistentes**

Los parámetros resistentes se han obtenido de los distintos ensayos de laboratorio realizados en los sondeos a los que pertenece este material. Los valores de dichos ensayos y parámetros tomados para caracterizar este material son:

	Nivel 1b		
	S-1	S-1	Promedio
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	16.00	17.00	<b>16.50</b>
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20.30	20.80	<b>20.55</b>
$\phi'$ (°)	25.66	31.95	<b>28.81</b>
$c'$ (kPa)	2.40	10.50	<b>7.00</b>
$\nu$	0.45	0.45	<b>0.45</b>
E (MPa)	50.00	325.00	<b>155.00</b>

Tabla 4 Valores de los parámetros geotécnicos del Nivel Geotécnico 1b.

A continuación, se va a realizar un análisis crítico sobre los valores obtenidos en los ensayos haciendo uso de varias normativas como son el Código Técnico de la Edificación (CTE) [2], las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM) [4] y la Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera (GCOC) [3].

- Ángulo de rozamiento: el valor proporcionado del ensayo de corte directo es de 28.75°. De la figura D.1. presente en el CTE, se estima un ángulo de rozamiento en función del  $N_{SPT}$  de valor 29.5°. En función de su granulometría, se considera este material como un limo. En la tabla D.27. presente en el CTE se contempla un ángulo de rozamiento comprendido entre 25 y 32°, por tanto, el valor obtenido de los ensayos es aceptable.
- Cohesión: se observa que el valor de la cohesión obtenido de los ensayos, con un valor de 7 kPa/m<sup>2</sup>, comprende entre los rangos establecidos de la CGOC (tabla 3.2) para un material arcilloso, entre 0 y 10 kPa y que la ROM en la tabla 2.4.3. establece un valor de 0 para suelo con mucho porcentaje de finos y una compacidad muy floja. Sin embargo, el yeso es un material muy cohesivo en presencia de agua, por lo que el resultado obtenido puede ser aceptable.
- Coefficiente de Poisson: con un valor de 0.45. El CTE establece un valor entre 0.15 y 0.4 únicamente para arcillas, mientras que la ROM toma 0.3 para suelos densos y 0.40 para los más flojos o blandos. Por otro lado, la GCOC admite que  $\nu=0.3$  en formaciones arenosas y  $\nu=0.4$  en suelos arcillosos blandos. El primero resultado considerado presenta un valor muy alto de este parámetro, por lo que se va a adoptar un valor de 0.35 para este coeficiente.
- Peso específico: se ha calculado un valor de 16.6 kPa. La CGOC recoge en la tabla 3.2 un valor orientativo de 22 kN/m<sup>3</sup>. Se considera apto el valor calculado ya que es aproximado al teórico y la muestra del ensayo se considera un poco más alterada.

En función del  $N_{SPT}$  dados, se puede obtener un valor aproximado para:

- Módulo de deformación: para obtenerlo no se ha realizado ningún tipo de ensayo, por lo que el valor estimado es de 155 MN/m<sup>2</sup>. Anteriormente hemos mencionado que este material es un suelo muy blando, al que le corresponde un valor de deformación menor a 8 MN/m<sup>2</sup> según la tabla D.23. contenida en el CTE. Vemos que existe una gran diferencia entre valores, que puede ser debido a que el ensayo se ha realizado en presencia de agua y con lo cual hay que despreciar dicho valor y establecer uno más coherente. De esta manera, se establece un valor para el módulo de deformación de 8 MN/m<sup>2</sup>.
- Permeabilidad: en base a la información aportada por los distintos ensayos Lefranc, se ha establecido un valor entre  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$  cm/s. Según la tabla D.28. Valores orientativos del coeficiente de permeabilidad presente en el CTE, puede establecerse dicho valor de la permeabilidad como válida para un material de estas características si se establecemos que se asemeja a una arena fina o limo.

**4.6.2.1.3 Nivel Geotécnico 1c: Dique de cenizas de compacidad moderada-elevada**

El dique tiene una potencia de 65m y está compuesto por limos sin plasticidad con presencia de escoria, al igual que el nivel geotécnico 1a. Este material se encuentra presente en los sondeos S-3y S-4.

Este material presenta muestra una compacidad moderada-elevada con valores de golpeo en los ensayos SPT y DPSH superiores a 25golpes/15-20 cm e incluso alcanzando el rechazo.

- **Parámetros resistentes**

	Nivel 1c		
	S-3	S-4	Promedio
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	16.50	17.50	<b>17.00</b>
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20.50	21.00	<b>20.75</b>
$\phi'$ (°)	26.95	33.50	<b>31.50</b>
$c'$ (kPa)	4.20	11.50	<b>8.50</b>
$\nu$	0.45	0.45	<b>0.45</b>
E (MPa)	62.50	425.00	<b>205.00</b>

Tabla 5. Valores de los parámetros geotécnicos del Nivel Geotécnico 1c.

A continuación, se va a realizar un análisis crítico sobre los valores obtenidos en los ensayos haciendo uso de varias normativas como son el Código Técnico de la Edificación (CTE) [2], las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM) [4] y la Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera (GCOC) [3].

- Ángulo de rozamiento: se ha calculado a partir del ensayo de corte directo no consolidado sin drenaje, un valor de ángulo de rozamiento de 31.5°. En la figura D.1. del CTE puede realizarse una correlación entre  $N_{SPT}$  y el ángulo de rozamiento, obteniendo un valor aproximado de 35°. Tomando de referencia los valores orientativos de la tabla D.27. del CTE y realizando una media entre los valores de los limos y las gravas se consigue un valor medio para el ángulo de rozamiento entre 29.5° y 38.5°. El resultado del ensayo es muy aproximado a dicho rango y como la presencia de limos es mayor que la de escoria, el ángulo de rozamiento estará más cerca de 29.5°, por lo que se puede considerar dicho el valor como válido.
- Cohesión: tiene un valor de 0.85 T/m<sup>2</sup> (=8.5 kPa), obtenido del ensayo de corte directo consolidado sin drenaje. En las tablas de la CGOC podemos comprobar que el valor de la cohesión para limos tiene un rango de 0-10 kPa y 0 para gravas. Por otro lado, la ROM recomienda, para gravas y arenas con un alto porcentaje de finos y con compacidad media, un valor de 10 kPa. Se puede considerar el resultado de 8.5 kPa como aceptable para un suelo con estas condiciones.
- Peso específico: se ha obtenido un valor de 17 kN/m<sup>3</sup>. En la tabla D.26. presente en el CTE, se establecen valores orientativos para distintos materiales. Realizando una media entre los valores de limo + grava se obtiene un rango de valores entre 18.3-21.4 kPa/m<sup>3</sup>. Po otro lado la CGOC propone entre 12 y 18 kN/m<sup>3</sup>. El valor calculado de 17 kN/m<sup>3</sup> se considera aceptable al estar contenido entre los valores de las normativas.
- Coefficiente de Poisson: con un valor aproximado de 0.45. Según las distintas normativas, el CTE considera un valor entre 0.15 y 0.4 para arcillas, la ROM toma 0.3 para suelos densos y 0.40 para los más flojos o blandos y la GCOC admite que  $\nu=0.3$  en formaciones arenosas y  $\nu=0.4$  en suelos arcillosos. El valor de 0.45 considerado inicialmente, se razona muy elevado para este tipo de material. Como conclusión, se va a adoptar un valor de 0.35.
- Módulo de deformación: se propone un valor en el estudio geotécnico de 205 MN/m<sup>2</sup>. El CTE en la tabla D.23., para suelos flojos o blandos establece un valor entre 8-40 MN/m<sup>2</sup>, el CGOC para materiales

limosos presenta una cuantía entre 5 y 20 MPa en la tabla 3.2, y, por último, la ROM implanta un valor de 5 MPa para un suelo cohesivo limoso que contenga porcentaje menor al 70% de gravas y/o arenas para una consistencia blanda. Para el tipo de material que es se considera muy elevado su módulo de deformación, esto puede ser debido a que el ensayo se ha realizado en presencia de agua y con lo cual hay que despreciar dicho valor y establecer uno nuevo.

Podemos establecer, por tanto, que el valor del módulo de deformación para este nivel es una media entre todos los valores de las distintas normativas, adoptando aproximadamente un  $E_d=20$  MPa.

- **Permeabilidad:** presenta un valor entre  $10^{-5}$  y  $10^{-6}$  cm/s. Según la tabla recogida en el CTE D.28, se establece que dicho valor de la permeabilidad para este material se encuentra dentro del rango de si consideramos este material como limoso.

#### 4.6.2.2 Nivel Geotécnico 2: Rellenos granulares

En esta unidad geotécnica, se han incluido distintos rellenos localizados en la zona objeto de estudio.

Por un lado, presente en los alrededores del sondeo S-4, se encuentran materiales como gravas y zahorras en matriz limo-arenosa con un espesor máximo de 1 metro aproximadamente.

En los sondeos PZ-1, PZ-2 y PZ-3 se encuentran rellenos procedentes de excavaciones y movimientos de tierras constituidos por gravas y fragmentos en una matriz limo-arcillosa, con una profundidad entre 4 y 5.4 m.

Por último, también se incluyen los rellenos que forman parte del cuerpo del dique, conformados por gravas, escorias, restos cerámicos, etc., embebidos en una matriz limo-arenosa, detectados principalmente en el sondeo S-1 a una profundidad entre 12 y 14.3 m bajo la superficie.

Debido a que este nivel aparece en los sondeos S-1 y S-4, se toman los resultados del ensayo SPT realizados en dichos sondeos para conocer en primer lugar la compacidad de este material. Los resultados obtenidos son:

Sondeo	Ensayo SPT	Profundidad (m)	$N_{SPT}$
S-1	SPT-1	4.00-4.60	6-5-7-20
	SPT-2	8.00-8.10	50R
	SPT-3	15.00-15.60	2-2-2-2
S-4	SPT-1	2.00-2.22	40-50R
	SPT-2	6.00-6.15	50R
	SPT-3	12.30-12.50	28-50R

Tabla 6. Resultados del ensayo SPT de los sondeos presentes.

Unificando todos los materiales de relleno mencionados, las propiedades de estos se van a considerar como si de un único material en su totalidad se tratase.

De forma general, de este relleno se obtiene un registro de golpeo de  $SPT_{30}$  variables entre 5 y 30 golpes/30cm, en algunos casos se obtienen valores superiores, incluso hasta llegar al rechazo.

Esto quiere decir que, de acuerdo con la tabla D.2. Compacidad de las arenas recogida en el CTE [2], a la tabla de clasificación de compacidad en función del N (SPT) presente en la ROM [4], y la clasificación realizada por la CGOC [3], se llega a la conclusión que este material muestra una compacidad baja-moderada.

• **Parámetros resistentes**

A través del ensayo de Corte Directo se pueden determinar las propiedades resistentes de un material, tales como son la cohesión o el ángulo de rozamiento interno, mediante la aplicación de una carga combinada, donde la fuerza de corte se genera a lo largo de una superficie horizontal determinada.

	S-1	S-4	Promedio
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	17.5	18.5	<b>18</b>
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20.8	21.5	<b>21.2</b>
$\phi'$ (°)	28	32.18	<b>29.34</b>
$c'$ (kPa)	3.5	10.6	<b>8</b>
$\nu$	0.45	0.45	<b>0.45</b>
E (MPa)	6	37.5	<b>17.5</b>

Tabla 7. Valores de los parámetros geotécnicos del Nivel Geotécnico 2.

A continuación, se va a realizar un análisis crítico sobre los valores obtenidos en los ensayos haciendo uso de varias normativas como son el Código Técnico de la Edificación (CTE), las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM) y la Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera (GCOC).

- Ángulo de rozamiento: el valor obtenido del ensayo de corte directo no consolidado y sin drenaje es de 29.34. El CTE, a través de la tabla D.27. implanta un valor entre 30° para rellenos de terraplén, por otro lado, la CGOC en la tabla 3.2. supone un valor entre 25° y 40°, y, por último, la ROM recoge que ángulo de rozamiento debe estar comprendido entre 25° y 35° para gravas y arenas con gran contenido en suelos finos. Por tanto, el resultado obtenido del ensayo puede considerarse adecuado.
- Ángulo de dilatación: se tiene en cuenta en aquellos materiales que se consideran granulares. Si se compone el movimiento horizontal  $U_x$  y el vertical  $U_y$  de una partícula para obtener el desplazamiento total  $\delta$ , el ángulo que forma dicho vector respecto a la horizontal es lo que se conoce como dilatación  $\psi = \arctg(U_y/U_x)$ . Otra forma de obtenerlo es a partir del ángulo de rozamiento interno:

$$\psi = \phi - 30 \quad (\text{si } \phi > 30)$$

$$\psi = 0 \quad (\text{si } \phi < 30)$$

- Cohesión: El resultado obtenido de los ensayos de corte directo ha sido de 8 kPa. La ROM presenta un valor entre 0 y 20 KPa para gravas y arenas con gran contenido en suelos finos en la tabla 2.4.3 y la CGOC, en la tabla 3.2., establece un rango entre 0 y 10 para limos, ya que la arena tiene una cohesión nula. Se considera adecuado el valor obtenido ya que está contenido entre los rangos de las normativas.
- Peso específico: presenta un valor de 18 kN/m<sup>3</sup>. Al tratarse de rellenos con varios tipos de materiales, nos guiaremos por los valores presentados en las normativas de los materiales más abundantes presentes en este nivel geotécnicos. La matriz limo arcillosa muestra un espesor entre 4 y 5.4 metros. Para un material limoso, según el CTE, en la tabla D.27. se establecen valores entre 17 y 20 kN/m<sup>3</sup>; por otro lado, en la CGOC en la tabla 3.2 indica un rango entre 12 y 18 kN/m<sup>3</sup>, por lo que se considera que el valor calculado para este nivel geotécnico es válido.
- Coefficiente de Poisson: el valor considerado para este parámetro es 0.45. Realizando las comparativas de los valores orientativos de las distintas normativas, el CTE establece un valor entre 0.15 y 0.4 para arcillas, mientras que la ROM toma 0.3 para suelos densos y 0.40 para los más flojos o blandos. Por otro lado, la GCOC admite que  $\nu=0.3$  en formaciones arenosas y  $\nu=0.4$  en suelos arcillosos blandos y un valor de 0.5 cuando el terreno se encuentra a largo plazo. La primera aproximación de 0.45, se considera de valor muy elevada, por lo que se va a adoptar un valor de 0.3 para este coeficiente.

- Módulo de deformación: se toma un valor de 17.5 MPa según el informe geotécnico. Con ello, la ROM en la tabla 2.4.3. establece un rango entre 5-50 MPa para este tipo de material. Se adopta un valor de 30 MPa como una media aproximada siguiendo el criterio de la ROM.
- Permeabilidad: los valores obtenidos del ensayo Lefranc son entre  $10^{-2}$  y  $10^{-3}$  cm/s. Este nivel geotécnico contiene materiales como limos, arenas y rellenos entre otros. Según la tabla D.28 presente en el CTE, para arena limpia y mezcla de grava y arena limpia, los valores de permeabilidad están entre  $10^{-2}$  y  $10^{-5}$  cm/s, por lo que puede considerarse un valor aceptable de permeabilidad.

#### 4.6.2.3 Nivel Geotécnico 4: Substrato Rocoso

Esta unidad geotécnica es sobre la que apoya el dique de la estructura y se encuentra a profundidades variables entre 4.50 y 12.50 metros. Se trata de una masa rocosa de Edad Carbonífero-constituida por intercalaciones de pizarras y areniscas con capas intermedias de carbón.

Este material no se encuentra presente en ninguno de los sondeos realizados en las distintas partes del dique y es necesario saber su caracterización para poder representarlo en el modelo de elementos finitos. Para su caracterización, se ha llevado a cabo una breve descripción de dicho material.

La matriz rocosa presenta un color grisáceo con alteración de tonos marrones y ocre. Hay que destacar que independientemente de su litología, el substrato presenta una elevada capacidad portante.

Respecto al material pizarroso, se encuentra representado por rocas con un importante grado de fracturación, y presenta un grado de alteración correspondiente al nivel IV según la escala ISRM. En cuanto a las areniscas, su grado de fracturación es menor al de las pizarras ya que dichas fracturas se encuentran rellenas de un material coluvial, además muestra un estado de meteorización según la escala ISRM de grado III-IV.

Esto se traduce en un GSI de valor 30 para el material pizarroso y de 40 para el material arenoso.

Para el cálculo de los parámetros resistentes de cada uno de los materiales presentes en macizo rocoso, se ha considerado el criterio de rotura de Mohr-Coulomb y Hoek-Brown, atribuyéndoles los siguientes Parámetros Geotécnicos:

	Pizarras	Areniscas	Promedio
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	25.00	26.00	<b>25.50</b>
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	28.00	29.00	<b>28.50</b>
$\phi$ (°)	42.08	57.34	<b>49.71</b>
$c'$ (kPa)	79.28	171.50	<b>125.39</b>
E (MPa)	10848	30501	<b>20674.50</b>
mb	0.66	1.76	<b>1.21</b>
s	4.00E-04	1.30E-03	<b>8.50E-04</b>
a	0.52	0.51	<b>0.52</b>

Tabla 8. Valores de los parámetros geotécnicos del Nivel Geotécnico 4.

Por otro lado, las discontinuidades del macizo, o juntas, condicionan de manera muy importante las propiedades y el comportamiento del macizo rocoso. Dentro de ellas, hay que estudiar:

- Espaciado entre planos de discontinuidad. Condiciona el tamaño de los bloques de la matriz rocosa.
- Separación. Generalmente entre 0.2-1m, de esta manera juega un papel muy importante en el comportamiento geo-mecánico del macizo rocoso.

- Rugosidad. Es muy importante en lo referente a la resistencia al corte de las rocas.
- Relleno. Material coluvial de naturaleza arcillosa.
- Criterio de rotura: para determinar la resistencia al corte de las discontinuidades de la roca a través método Barton-Brandis.

A las discontinuidades se les han atribuido los siguientes valores a los parámetros:

	Pizarras	Areniscas
$\phi$ (°)	34.4	40.32
$c'$ (kPa)	8.5	13.9

Tabla 9. Características resistentes de las discontinuidades

Se debe considerar que el substrato rocoso, en general (sin presencia de fallas, restos de galerías, etc) e independientemente del grado de fracturación que posee, presentaría una permeabilidad como mínimo similar a las del material arcilloso que se encuentra rellenando las superficies de fractura, que según los ensayos de Lefranc realizados, se ha establecido en torno a valores de  $10^{-6}$  y  $10^{-7}$  cm/s, dando muestra del carácter general impermeable que presenta.

#### 4.7 Resumen parámetros

A continuación, para los distintos niveles estratigráficos presentes en el proyecto, se muestra una tabla resumen de los valores de los parámetros escogidos.

Nivel geotécnico	$\phi'$ (°)	$\psi$ (°)	$c'$ (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	E (MPa)	k (cm/s)
<b>1a</b>	25.66	0.00	2.50	18.00	20.50	0.35	20.00	$10^{-4}/10^{-5}$
<b>1b</b>	28.75	0.00	7.00	16.60	20.60	0.35	8.00	$10^{-4}/10^{-5}$
<b>1c</b>	29.50	0.00	2.50	17.00	20.80	0.35	20.00	$10^{-5}/10^{-6}$
<b>2</b>	29.34	0.00	8.00	18.00	21.20	0.30	30.00	$10^{-3}/10^{-4}$
<b>4</b>	49.71	19.71	125.39	25.50	28.50	0.20	20674.63	$10^{-6}/10^{-7}$

Tabla 10. Resumen de parámetros resistentes para cada uno de los materiales.

# 5 PROPUESTA DE REMONTE

En este último capítulo se propone la solución frente al remonte de la presa realizando un modelo numérico en Plaxis. Para ello, será necesario definir la geometría, así como los materiales y posteriormente, obtener los resultados en desplazamientos de cada una de las fases definidas. Por último se realizará un estudio del coeficiente de seguridad para determinar si la presa es segura frente al remonte propuesto.

Tal y como se ha definido en el capítulo 3, actualmente el dique se encuentra ocupando una superficie de 83200 m<sup>2</sup>. Se encuentra parcialmente apoyado sobre terreno natural y sobre el dique. El depósito existente correspondiente a las cenizas y escorias, actualmente presenta una explanada con una cota +347m.

## 5.1 Solución propuesta

Con el objetivo de que la central térmica siga en funcionamiento y los residuos generados puedan seguir almacenándose de forma segura, se ha propuesto la solución de un nuevo remonte de una altura del orden de los remontes anteriores, a los que será necesario hacer un análisis de estabilidad para comprobar que es estable y seguro.

La situación actual cuenta con un dique de una cota de unos +347 metros, al que habrá que terminar de colmatar dicha capa con los mismos materiales que los depositados anteriormente, siguiendo el mismo orden. Una vez terminada esta capa, se procederá a realizar el remonte final propuesto, con una altura de aproximadamente 6 metros, hasta que el conjunto total alcance una altura máxima de +353 metros.

La solución propuesta consiste en colmatar la capa de cenizas y de yesos que existe actualmente y añadir sobre ella un remonte, con los mismos materiales, del orden de magnitud del remonte realizado anteriormente, de aproximadamente 6 metros.

### 5.1.1 Geometría del modelo

Es imprescindible definir la geometría del modelo basado en los planos originales de la presa de estudio. Se deben calcular cada una de las coordenadas de los puntos que conforman el modelo. Para ello, se ha importado el plano original a AutoCAD y, aplicando la escala correspondiente, se han obtenido los valores de las coordenadas cada uno de los puntos necesarios del modelo.

A continuación, una vez obtenidas las coordenadas, para definir la estratigrafía de la zona es necesario realizar dos pasos. Por un lado, asignar la base sobre la que se encuentra la presa, esta es, un material rocoso que será necesario definir mediante sondeos en distintos puntos al que se le asigna la altura de dicho material dentro del sondeo. Por otro lado, se crea la geometría tanto del cuerpo de la presa como de los materiales que se sitúan sobre ella creando polígonos de sólido.

Además de la geometría del plano original, se ha realizado un remonte adicional para determinar posteriormente el coeficiente de seguridad.

#### 5.1.1.1 Tipos de elementos

El sólido que estudiamos en este programa se discretiza en una malla de elementos finitos donde se diferencian tres tipos de componentes:

- Elementos triangulares de 6 o de 15 nodos. En este caso se ha escogido elementos de 15.
- Nodos: número de puntos que definen un elemento y en el que se calculan los desplazamientos.

- Puntos de tensión (o puntos de Gauss): son independientes de los nodos y en ellos se calculan las tensiones. En este modelo, el punto de tensión que va a interesar está en la parte superior del remonte realizado, aunque se han tomado otros puntos en el pie del talud y en los medios.

### 5.1.1.2 Materiales

Una vez definida la geometría, se procede a introducir los materiales presentes en el modelo.

El análisis crítico que se va a realizar depende de que un suelo trabaje a corto plazo o a largo plazo. El material del que está formada la presa son materiales arcillosos, es decir, su comportamiento es más propio de un análisis no drenado. Sin embargo, el sistema drenado o no drenado no depende únicamente de la permeabilidad del material, sino de la velocidad de aplicación de la carga. En este caso, la puesta en carga del nuevo remonte es un proceso paulatino, por tanto, nos permite considerar que el análisis que se va a realizar es tipo drenado, ya que da tiempo a que las presiones intersticiales se vayan disipando conforme se va depositando el material.

Los materiales que se van a definir siguen un modelo elasto-plástico ya que, al tratarse de suelos, se representan mediante el modelo de Mohr-Coulomb, que involucra cinco parámetros fundamentalmente al tratarse de un análisis drenado: cohesión ( $c'$ ), ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ), ángulo de dilatación ( $\Psi$ ), módulo de Young ( $E$ ) y coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Estos parámetros se han obtenido específicamente en el apartado 4.1.4. y sus valores se muestran en la tabla siguiente:

Nivel geotécnico	$\phi'$ (°)	$\Psi$ (°)	$c'$ (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$E$ (MPa)	$k$ (cm/s)
1a	25.66	0.00	2.50	18.00	20.50	0.35	20.00	$10^{-4}/10^{-5}$
1b	28.75	0.00	7.00	16.60	20.60	0.35	8.00	$10^{-4}/10^{-5}$
1c	29.50	0.00	2.50	17.00	20.80	0.35	20.00	$10^{-5}/10^{-6}$
2	29.34	0.00	8.00	18.00	21.20	0.30	30.00	$10^{-3}/10^{-4}$
4	49.71	19.71	125.39	25.50	28.50	0.20	20674.63	$10^{-6}/10^{-7}$

Tabla 11. Resumen de parámetros resistentes para cada uno de los materiales.

Cada uno de los materiales se caracteriza en Plaxis introduciendo los valores de los parámetros definidos en la tabla anterior, y a cada uno de los polígonos creados anteriormente se asigna el material correspondiente.

A continuación, se representa un esquema donde se puede observar la geometría del modelo y los materiales asignados:

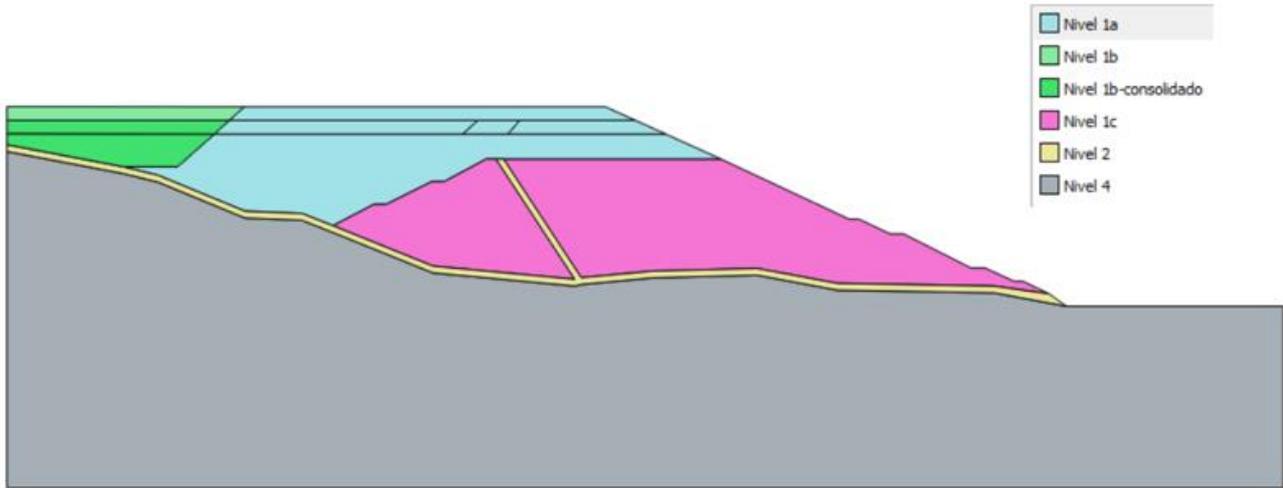


Figura 10. Geometría y materiales asignados al modelo de Plaxis 2D.

Como se ha mencionado en el capítulo 3, en el dique únicamente se espera la presencia de agua procedente de escorrentías superficiales en épocas de precipitaciones importantes, por ello, el nivel de agua introducido en el modelo ha sido en los materiales 1a y 1b hasta llegar al dren chimenea situado en el dique, por donde drena el agua. A continuación, podemos ver en la siguiente ilustración como se ha modelado el nivel de agua.

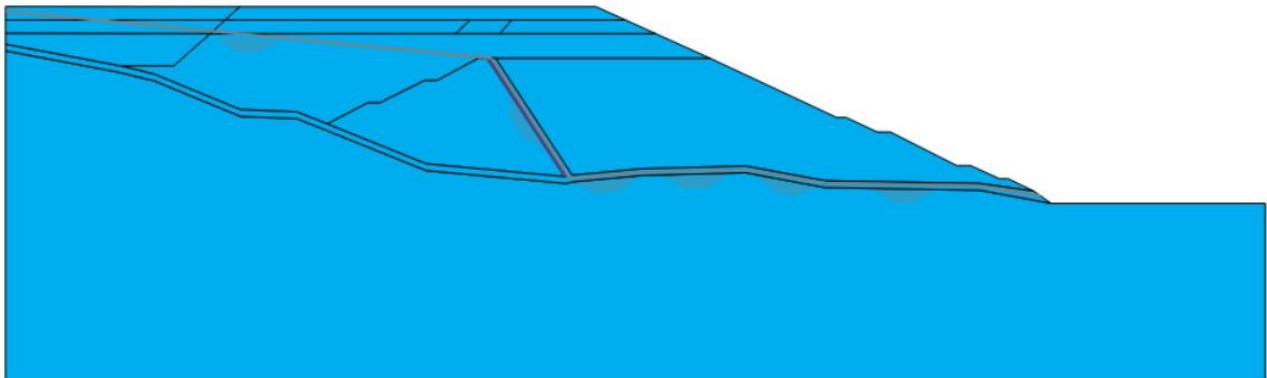


Figura 11. Nivel freático en el modelo.

**5.1.1.3 Mallado**

Una vez definida la geometría y asignados los materiales se realiza el mallado con elementos triangulares de 15 nodos. El mallado realizado por el programa es el siguiente:

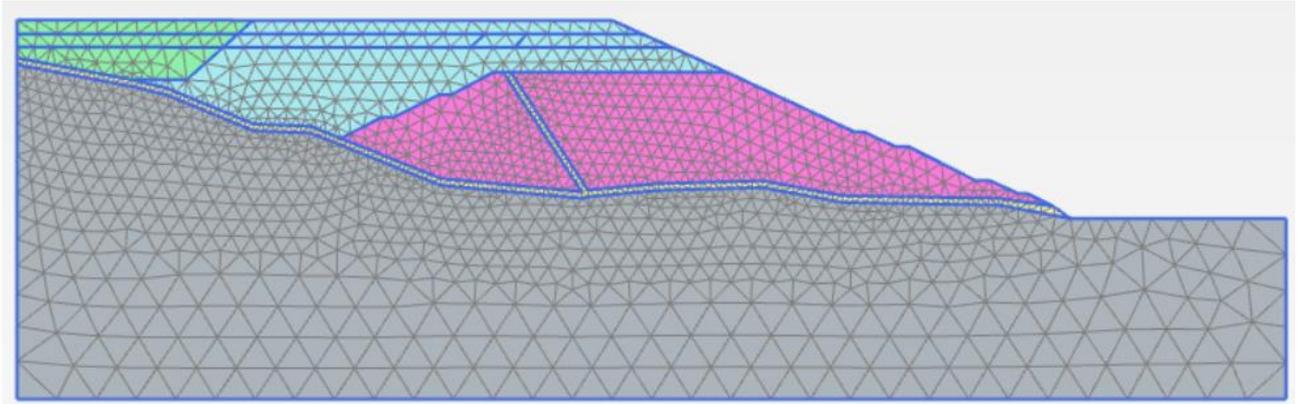


Figura 12. Mallado del modelo.

#### 5.1.1.4 Acciones consideradas

Para la comprobación estructural de la presa, será necesario considerar una serie de acciones sobre el cuerpo de la estructura. Debido a que la situación en la que se realiza el análisis es Normal, las acciones que van a tenerse en cuenta serán: peso propio y presiones intersticiales.

#### 5.1.1.5 Fases de cálculo

El cálculo y análisis de la estructura se va a realizar en distintas fases sucesivas de construcción, con un total de cinco fases.

- **Fase 0. Fase inicial. Construcción del dique de arranque.**

En esta fase únicamente se va a tener en cuenta la construcción del dique de arranque. Este dique presenta una cota de 330 metros y está formado por el material 1c. Se dispone un sistema de drenaje de material poroso por el cual el agua superficial o de escorrentía se irá eliminando hacia el exterior del mismo.

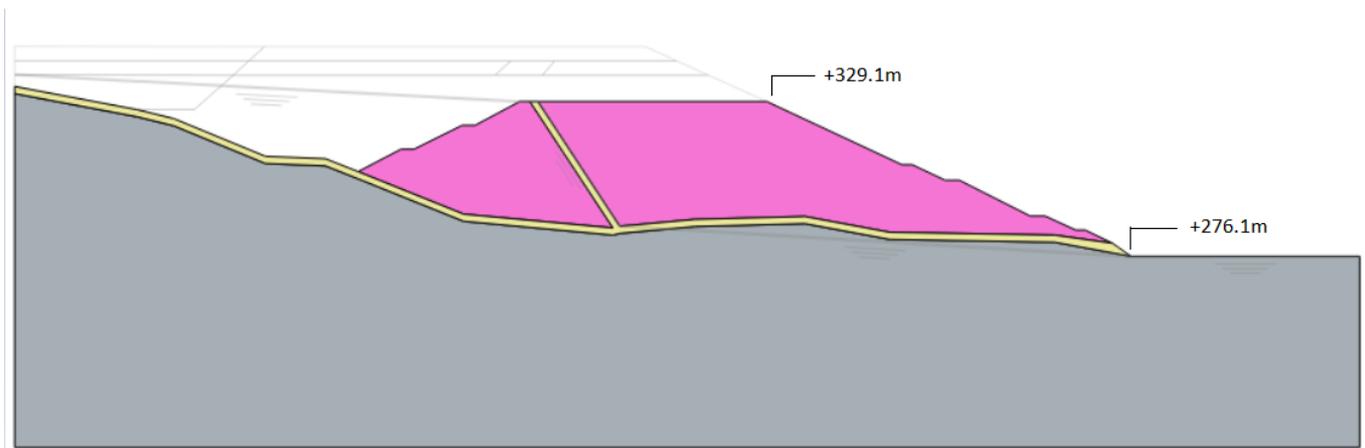


Figura 13. Fase 0 (Fase inicial). Dique de arranque.

- **Fase 1. Material de cenizas.**

Sobre el dique de arranque se va depositando el material procedente de la central térmica, concretamente cenizas, hasta llegar a una cota de +341 m. Por otro lado, las cenizas procedentes de la central térmica también se van acumulando en la zona a la izquierda del gráfico hasta llegar a la misma cota que el material de cenizas.

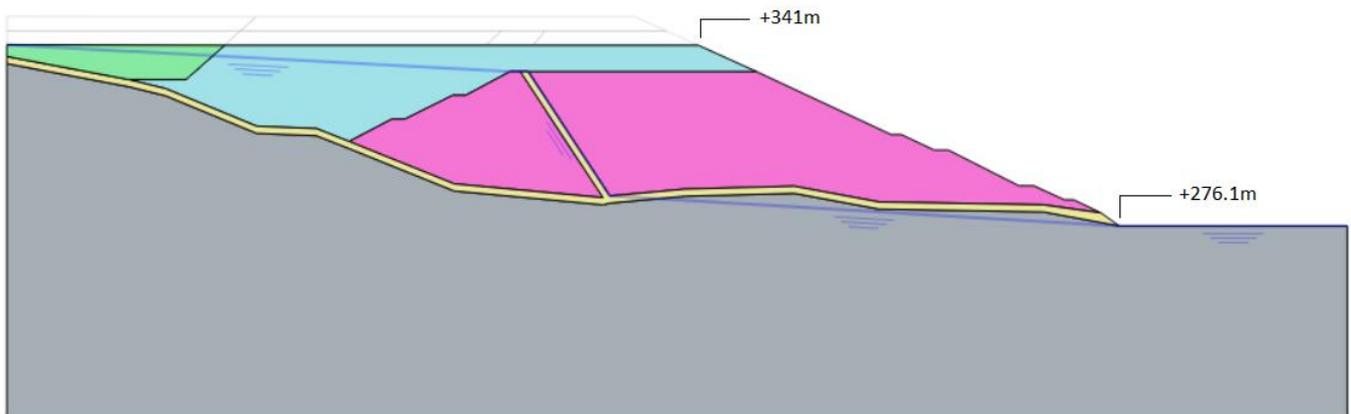


Figura 14. Fase 1. Material de cenizas.

- **Fase 2. Aporte de yesos y pequeño remonte sobre la capa de cenizas.**

Además, se realiza un pequeño remonte de aproximadamente 6 metros únicamente de cenizas, que apoyan sobre el material de la fase 1, llegando a una cota de +347 m.

Esta fase será la fase inicial de la que se va a partir para obtener los resultados, ya que es la situación en la que se encuentra actualmente la presa antes de realizar el remonte.

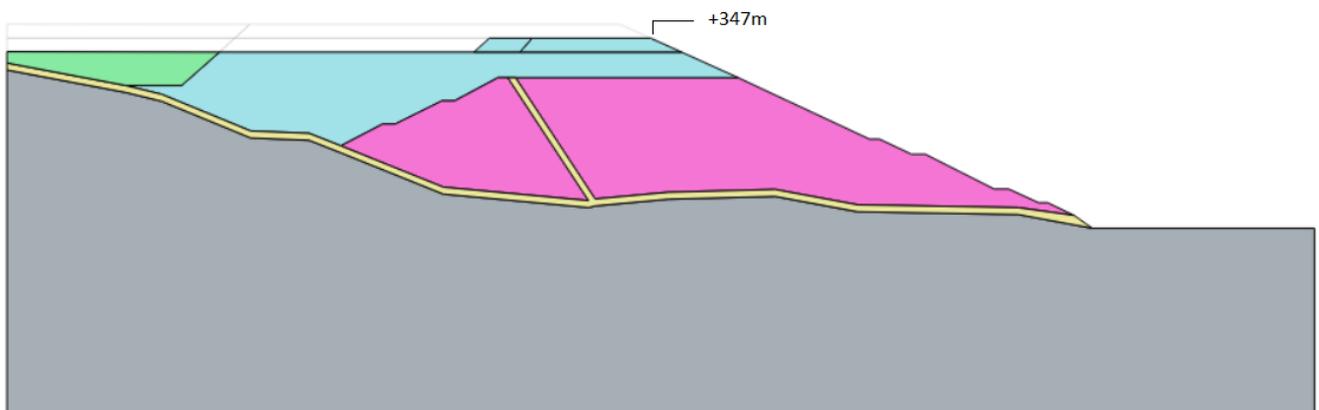


Figura 15. Fase 2. Aportación de yesos.

- **Fase 3. Colmatación de la capa anterior.**

Hasta aquí, la estructura presenta la geometría inicial. En esta fase se colmata la capa de la fase anterior con cenizas y yesos.

Destacar que, debido a la poca densidad de los yesos, al añadir una nueva capa, los de la fase 2 se encuentran consolidados, por tanto, se ha creado un nuevo material denominado "Nivel 1b-consolidado" (de color más oscuro que el Nivel 1b) con un módulo de Young del mismo valor que las cenizas.

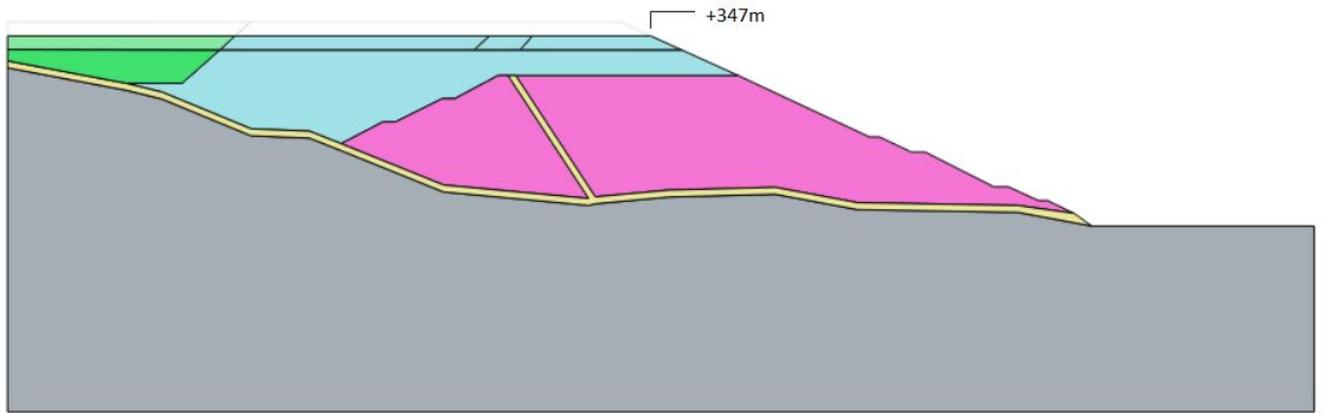


Figura 16. Fase 3. Colmatación de la capa anterior

- **Fase 4. Remonte.**

En esta fase se añade una nueva capa que vamos a denominar remonte. Este remonte presenta una altura similar a los anteriores remontes, de 6 m y del material "Nivel 1a".

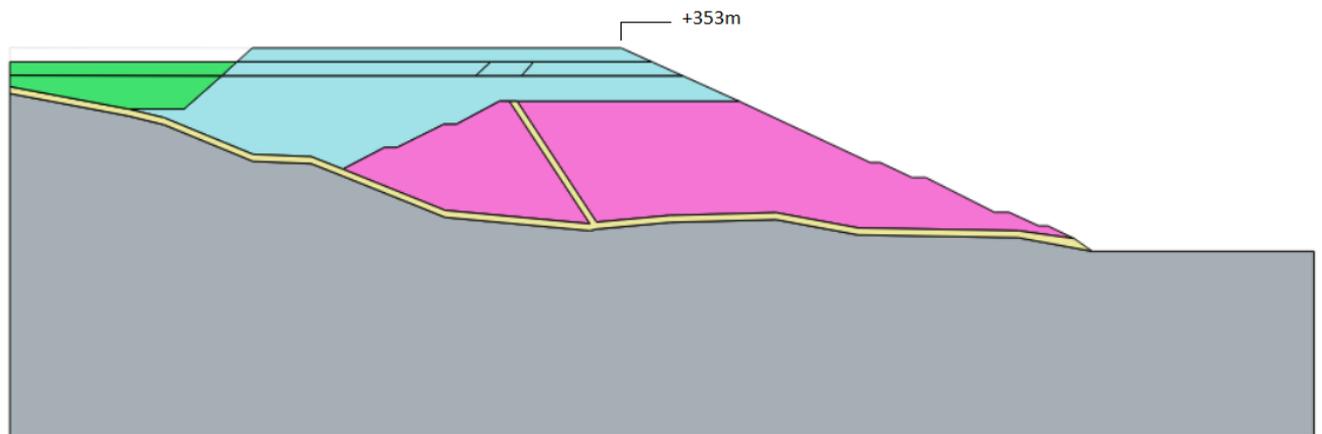


Figura 17. Fase 4. Remonte de 6m.

**Fase 5. Colmatación del remonte.**

Esta capa presenta los mismos materiales que la fase 3 ya que el objetivo de este proyecto es que la central térmica siga en funcionamiento y por tanto poder seguir almacenando el material. Mencionar que, al igual que en la fase anterior, la capa de yesos de la fase 3 también se le ha asignado el material consolidado.

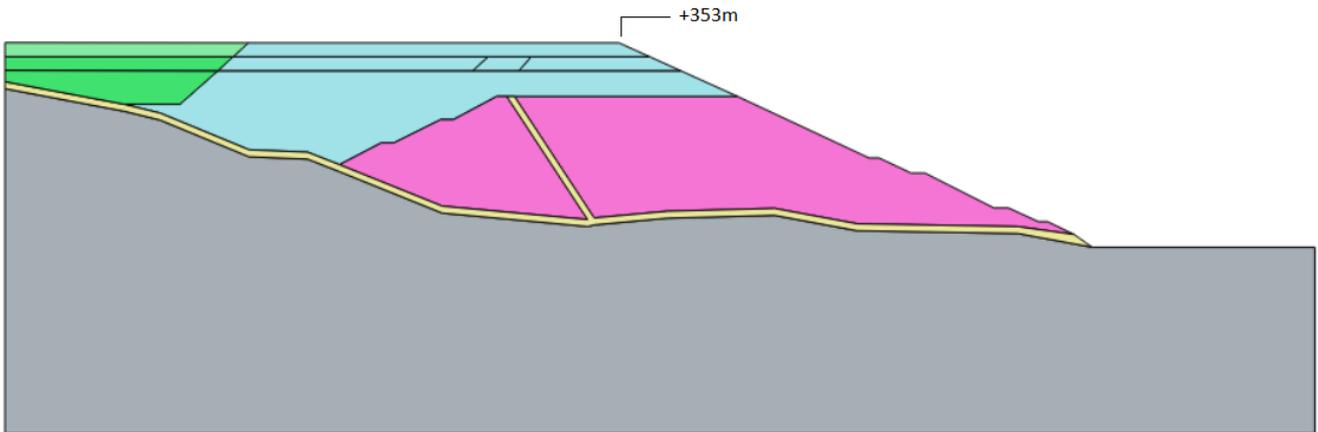


Figura 18. Fase 5. Colmatación del remonte de 6m.

### 5.1.1.6 Resultados

Partimos de la situación actual, que corresponde con la fase 3, en la que se han impuesto que los desplazamientos son cero, es decir, a partir de esta fase los desplazamientos comienzan a sumar. Los resultados mostrados son a partir de dicha fase.

- **Fase 0. Fase inicial. Construcción del dique de arranque.**

En la fase inicial, los desplazamientos son cero, ya que es a partir de la cual se comienzan a realizar los remonte.

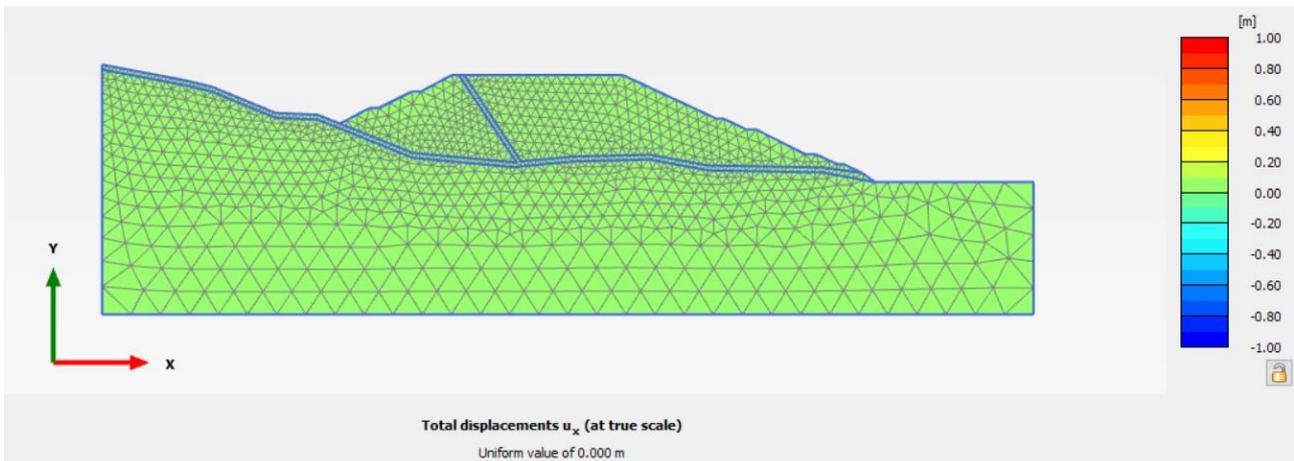


Figura 19. Desplazamientos en dirección X. Fase inicial. Dique de arranque.

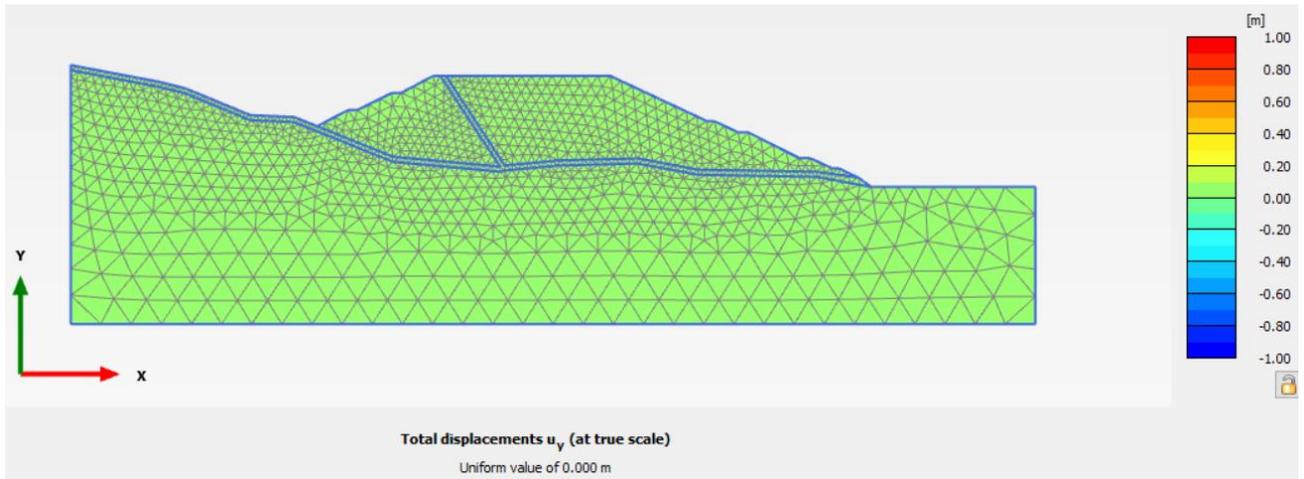


Figura 20. Desplazamientos en dirección Y. Fase inicial. Dique de arranque.

- Fase 1. Material de cenizas

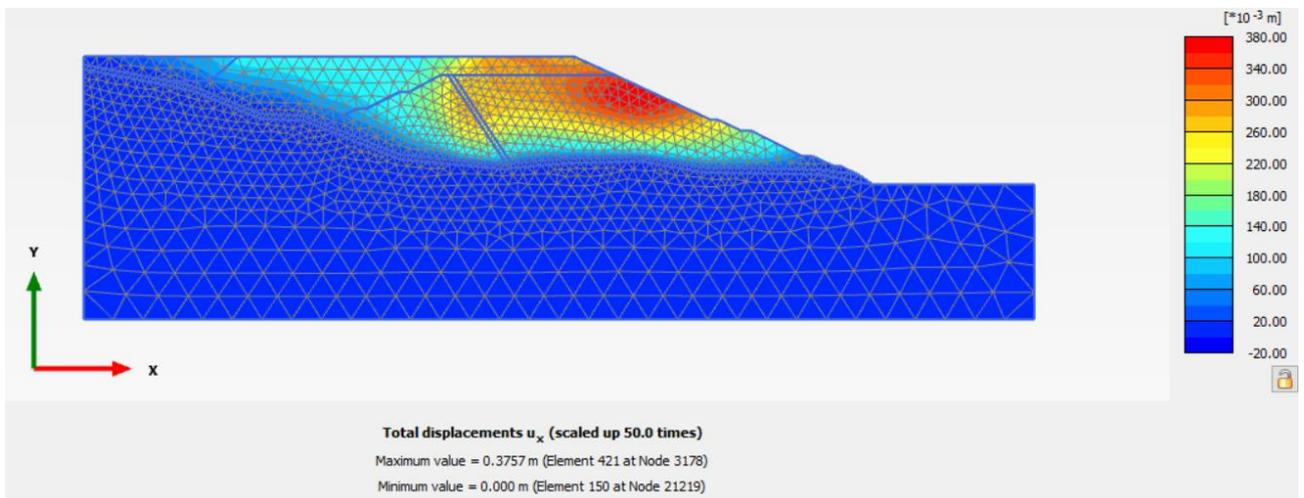


Figura 21. Desplazamientos en dirección X. Fase 1. Material de cenizas.

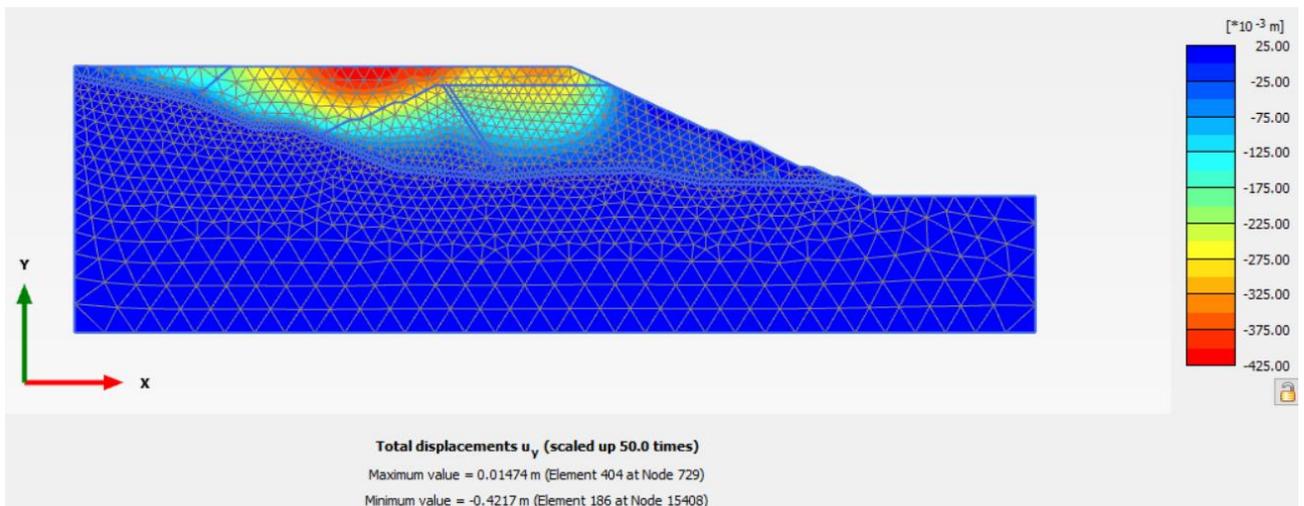


Figura 22. Desplazamientos en dirección Y. Fase 1. Material de cenizas.

- **Fase 2. Aporte de yesos y pequeño remonte sobre la capa de cenizas.**

Como se ha mencionado anteriormente, esta fase es la que se considera como inicial ya que es de la que se parte para realizar el remonte.

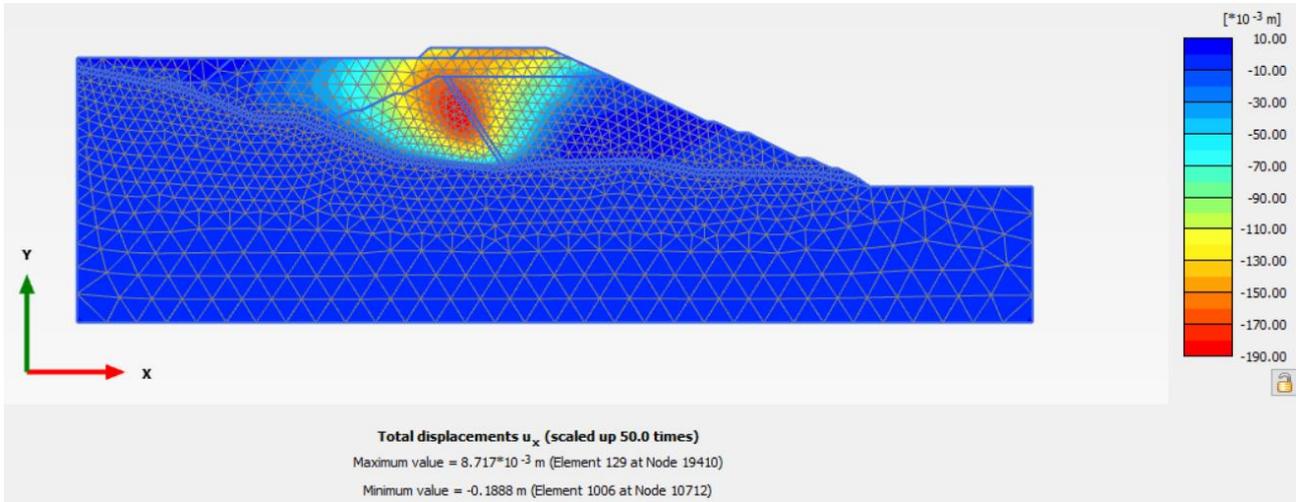


Figura 23. Desplazamientos en dirección X. Fase 2. Aportación de yesos.

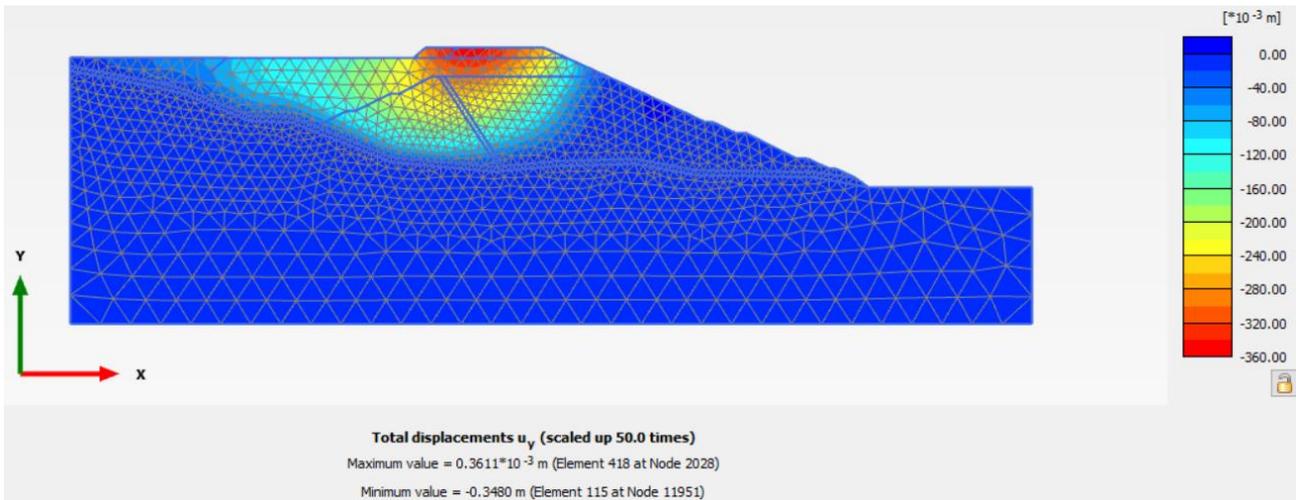


Figura 24. Desplazamientos en dirección Y. Fase 2. Aportación de yesos.

- **Fase 3. Colmatación de la capa anterior.**

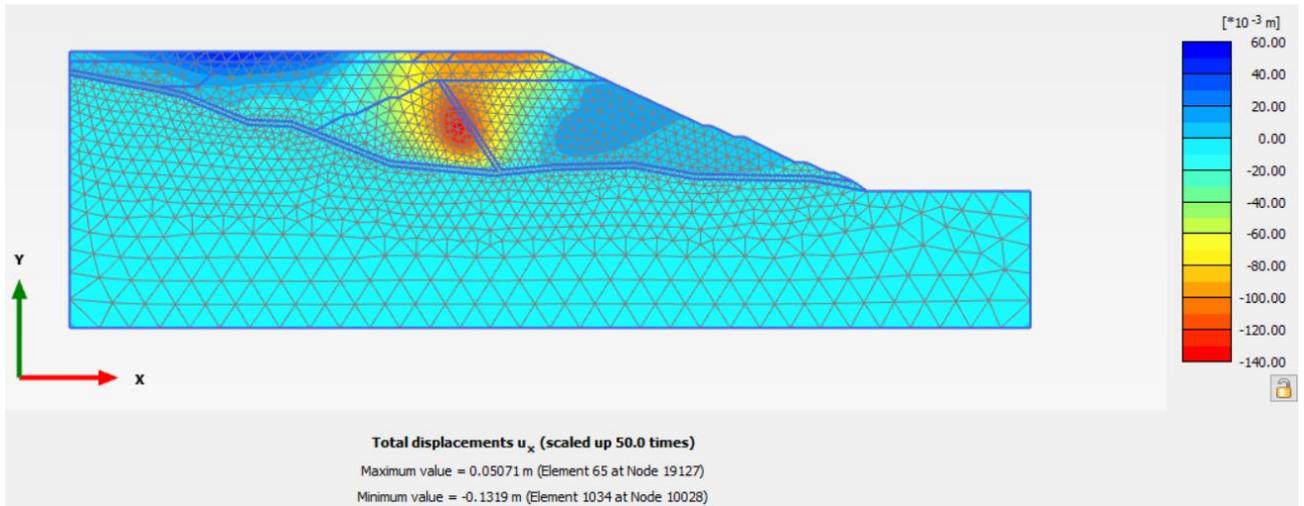


Figura 25. Desplazamientos en dirección X. Fase 3. Colmatación de la capa anterior.

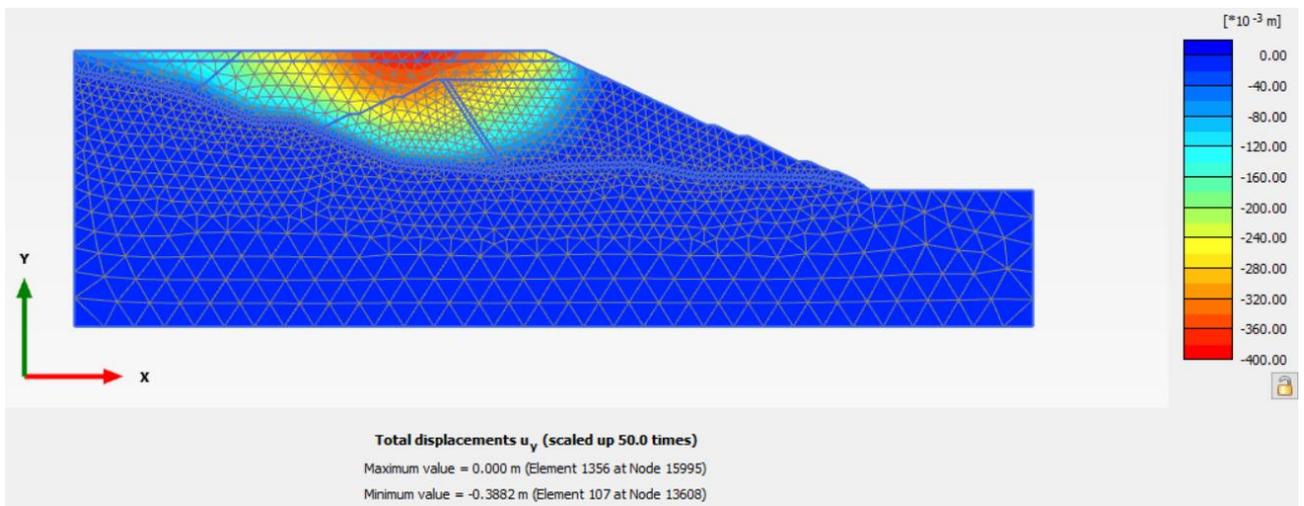


Figura 26. Desplazamientos en dirección Y. Fase 3. Colmatación de la capa anterior.

- **Fase 4. Remonte.**

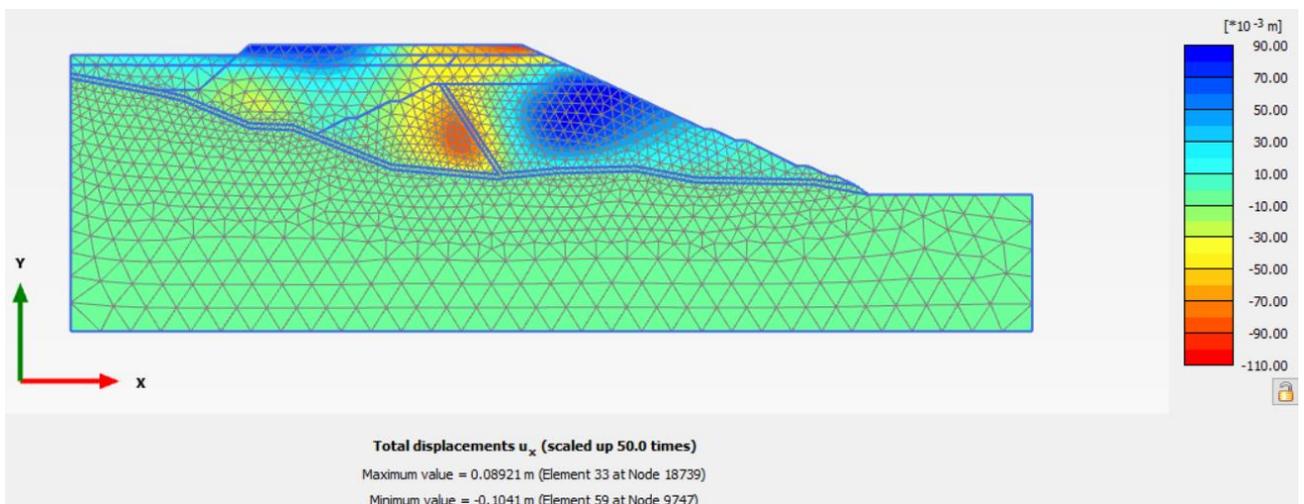


Figura 27. Desplazamientos en dirección X. Fase 4. Remonte de 6m.

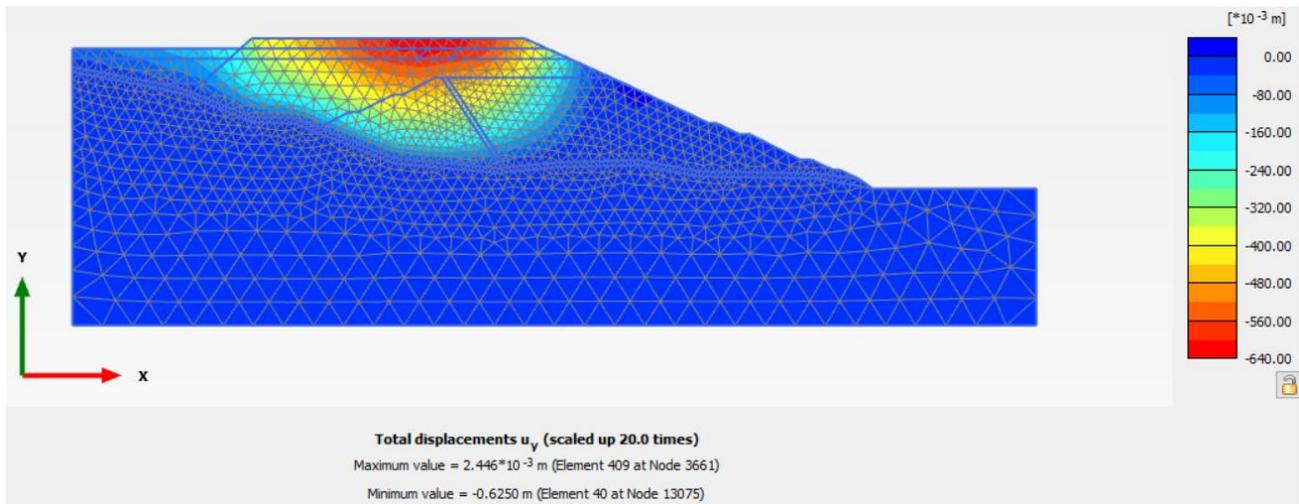


Figura 28. Desplazamientos en dirección Y. Fase 4. Remonte de 6m.

- **Fase 5. Colmatación del remonte.**

En esta fase, el dique se encuentra en su configuración final.

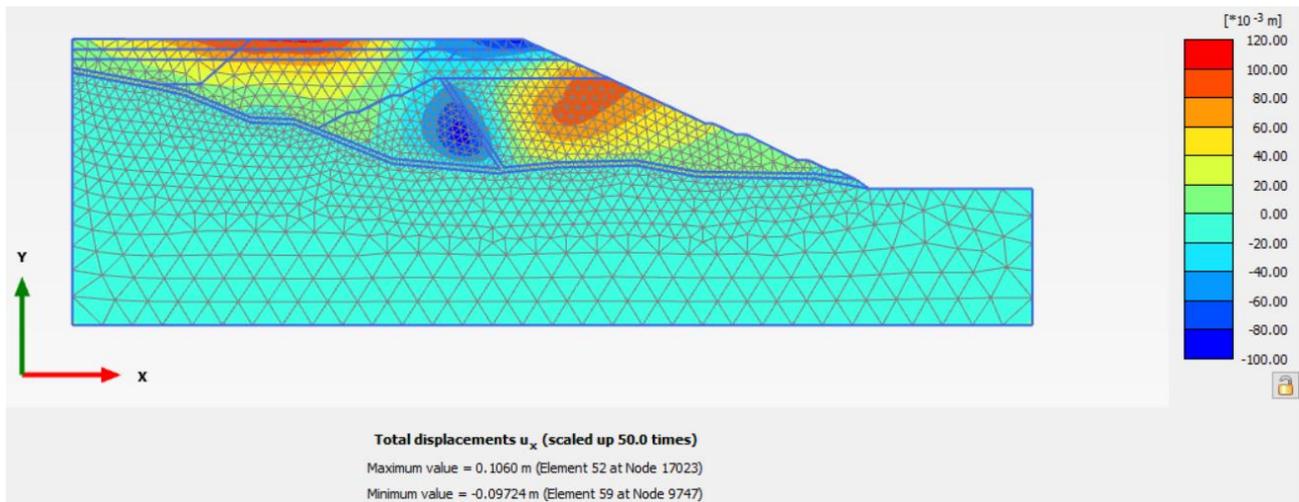


Figura 29. Desplazamientos en dirección X. Fase 5. Colmatación del remonte de 6m.

Debido a que el peso de las tierras va aumentando conforme se añaden tierras para realizar el remonte, los desplazamientos en sentido X son mayores en las zonas alrededor donde se van colocando estas tierras.

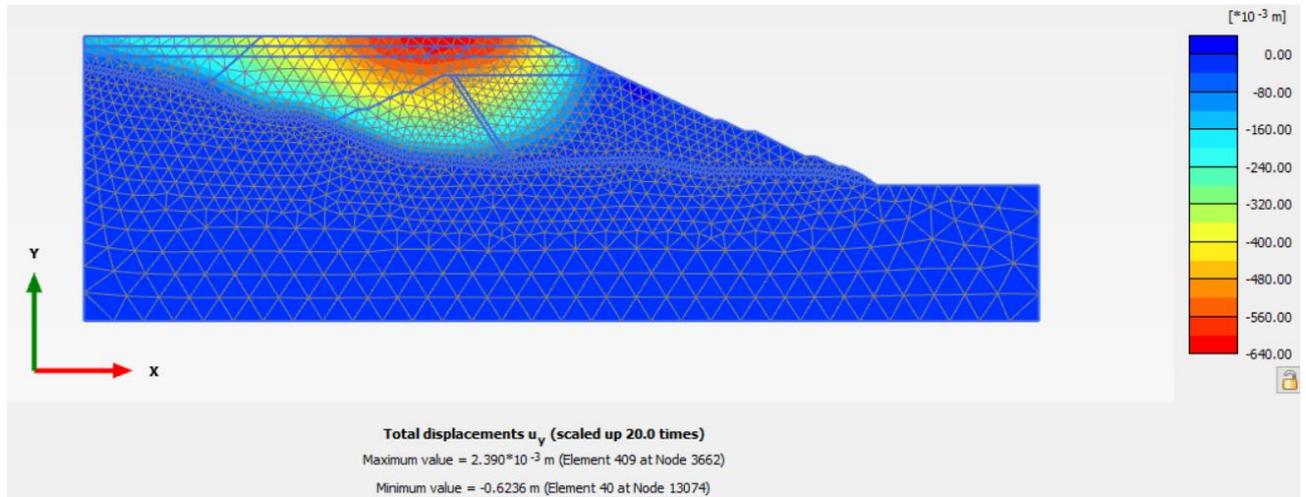


Figura 30. Desplazamientos en dirección Y. Fase 5. Colmatación del remonte de 6m.

Comentando los resultados obtenidos de los desplazamientos en Y en esta fase, se observa que, una vez realizado el remonte final, los desplazamientos aumentan en la zona central a medida que nos acercamos a la superficie.

A continuación, se representa en forma de tabla un resumen de los desplazamientos totales en cada una de las fases anteriores.

	U_total (m)	Ux_max (m)	Uy_max (m)
Fase inicial	0.0000	0.0000	0.00E+00
Fase 1	0.5931	0.3757	1.47E-02
Fase 2	0.2370	8.72E-03	3.61E-04
Fase 3	0.2821	0.0507	0.00E+00
Fase 4	0.4957	0.0892	2.45E-03
Fase 5	0.4965	0.1060	2.39E-03

Tabla 12. Desplazamientos de cada fase.

Por las dimensiones y el emplazamiento de la presa, se permiten que los desplazamientos de los materiales sean de un valor considerable, sin embargo, los valores obtenidos en cada una de las fases no son excesivos, siendo el valor máximo correspondiente a la última fase de poco menos de medio metro de desplazamiento total.

## 5.2 Factor de seguridad.

En este apartado, se va a llevar a cabo el análisis de seguridad [5] estructural mediante el programa mencionando anteriormente a través de un proceso de estabilidad de taludes, en las etapas más representativas: fase a partir de la cual realizamos el remonte (fase 2) y la fase final (fase 5).

El programa empleado para los cálculos obtiene el factor de seguridad en tantos puntos como sea necesario. La selección de puntos se ha definido en distintos puntos del dique, en aquellos donde más interesa saber los desplazamientos. En este caso, se han tomado tres puntos de referencia: en el pie del dique, en el punto más alto del remonte nuevo y en una zona intermedia entre estos dos puntos.

A través del método “Phi-c reduction” [6] se obtienen los valores de los multiplicadores  $\Sigma Msf$ . Esto se puede representar en función de los pasos que ha realizado el programa. Interesa obtener los valores de los coeficientes de seguridad de la fase inicial o fase 2 (representada en azul) y de la fase 5 que indica la situación final con el remonte realizado (rojo).

En la imagen presentada a continuación podemos ver los resultados:

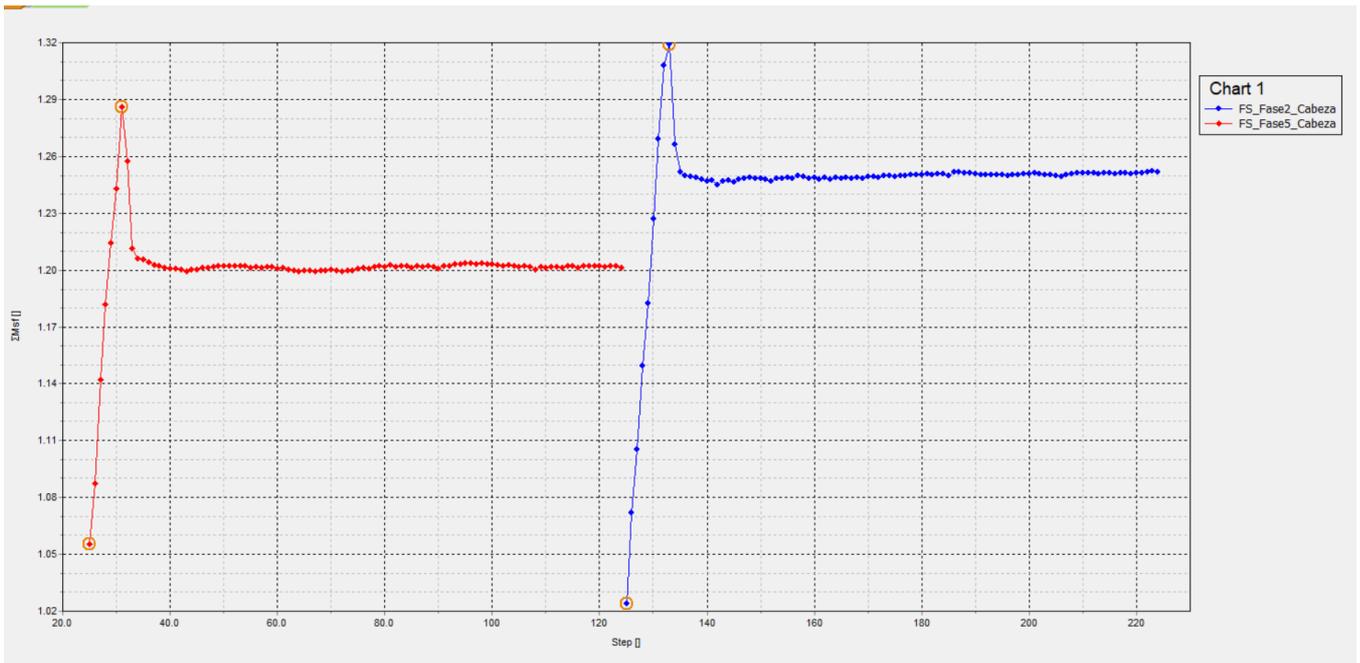


Figura 31. Coeficiente de seguridad fases 2 y 5.

Por otro lado, respecto a los valores de los coeficientes de seguridad, se puede observar que tanto para la fase 2 como para la fase 5, existe un pico, que es el valor tomado en la tabla. Para hallar el valor, se obtiene pasando el cursor sobre un punto de la curva, de manera que aparece un cuadro con el valor del multiplicador, así como la fase de cálculo. El valor del coeficiente de seguridad de las fases que más nos interesan (fase 2 y fase 5) tienen los siguientes valores:

Coeficiente de seguridad (FS)	
Fase 2	1.319
Fase 5	1.286

Tabla 13. Coeficientes de seguridad.

Se observa que para la fase 2 el valor del coeficiente de seguridad es mayor que para la fase 5, cuando está el remonte realizado, por tanto, el nuevo remonte no cumple el factor de seguridad mínimo indicado en la normativa de valor 1.3.

Del gráfico del círculo de deslizamiento del factor de seguridad de la fase 5, se puede observar que la pendiente del talud falla con una superficie de deslizamiento clásica.

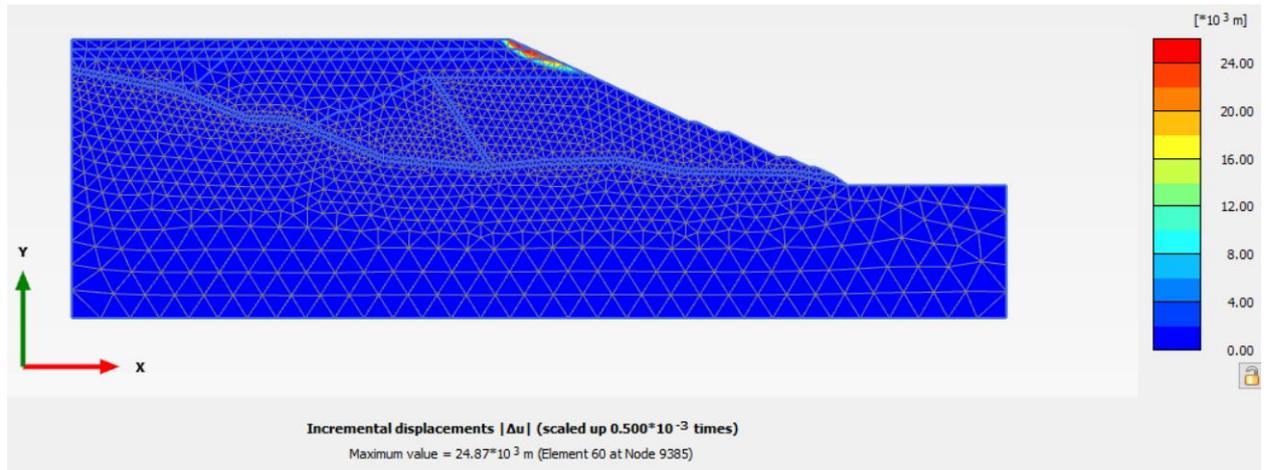


Figura 32. Círculo de deslizamiento. FS\_Fase5.

Y que los puntos de la zona donde se ha realizado el remonte han plastificado tal y como se puede observar en las figuras 33 y 34.

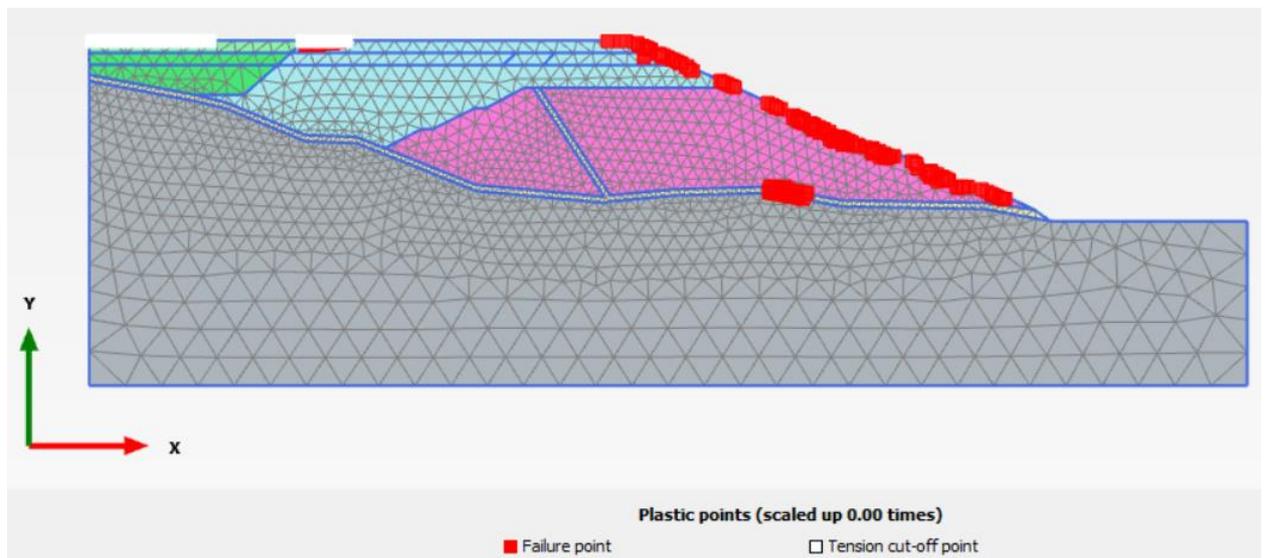


Figura 33. Plastificación de la fase 5.

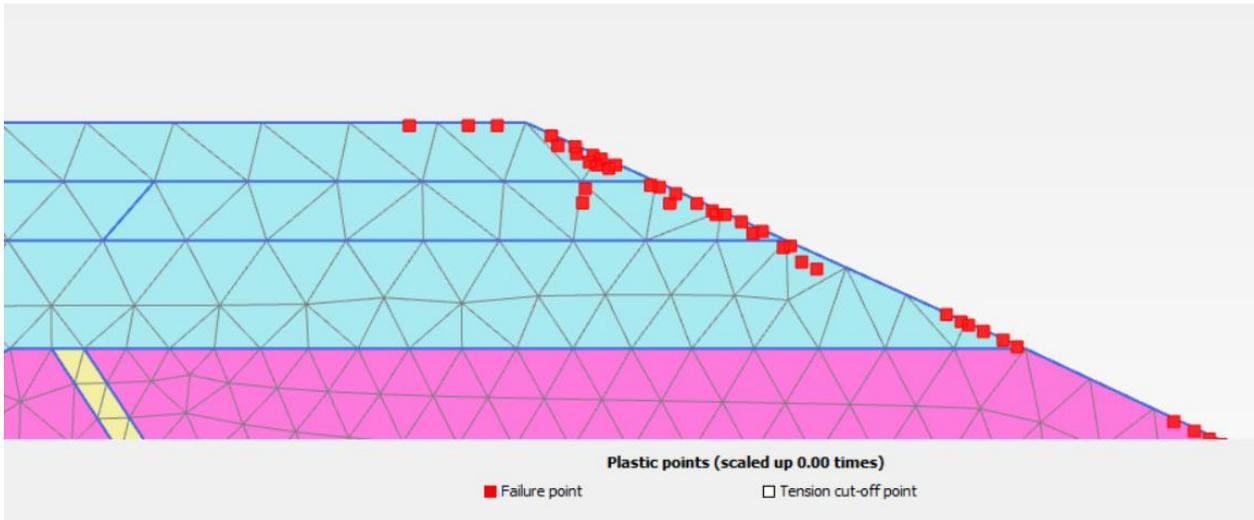


Figura 34. Detalle plastificación remonte.

Tal y como se puede observar en el círculo de deslizamiento, la zona de rotura está muy localizada, afectando solamente a la esquina superior derecha. Una solución factible sería estudiar de nuevo el coeficiente de seguridad realizando una berma, de manera que, al atrasar el arranque del último remonte, sea algo mas estable y por tanto aumente el factor de seguridad para que sea más seguro.

### 5.3 Solución final

Como se ha mencionado anteriormente, el retraso del talud formando una berma es una buena solución frente a los problemas de estabilidad de un talud.

Para ello es necesario en el modelo cambiar la geometría del talud creando un retranqueo que rompa con la continuidad de la pendiente. Se han realizado varios pasos en la berma hasta que finalmente cumpla con el factor de seguridad de 1.3. Este valor se verifica cuando la berma es de unos 25 metros. A partir de él se colocará el remonte con la misma altura y pendiente que en caso anterior.

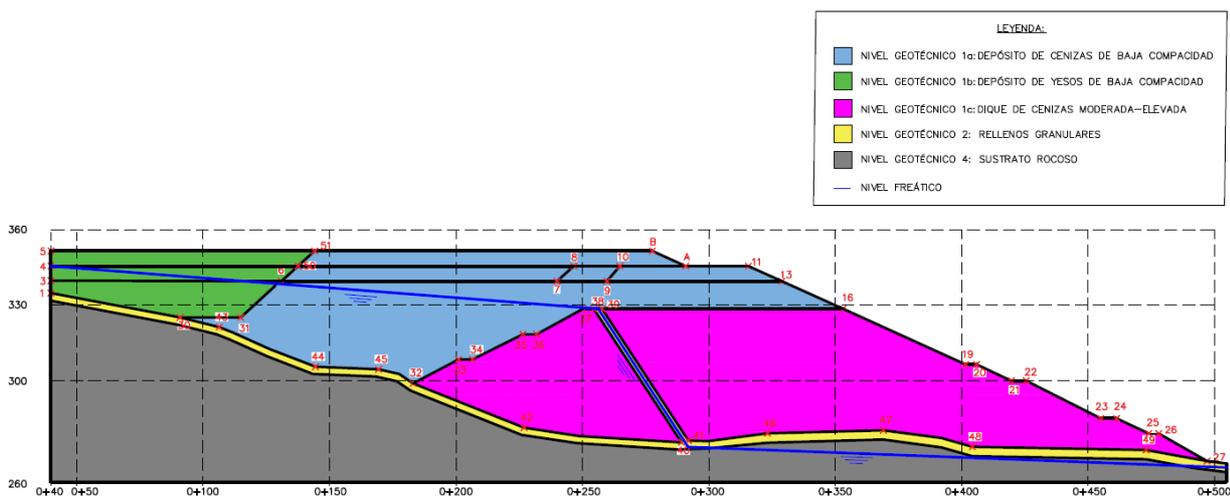


Figura 35. Geometría del modelo con berma.

A continuación, se muestra una imagen de cómo quedaría la modelo una vez introducida la berma.

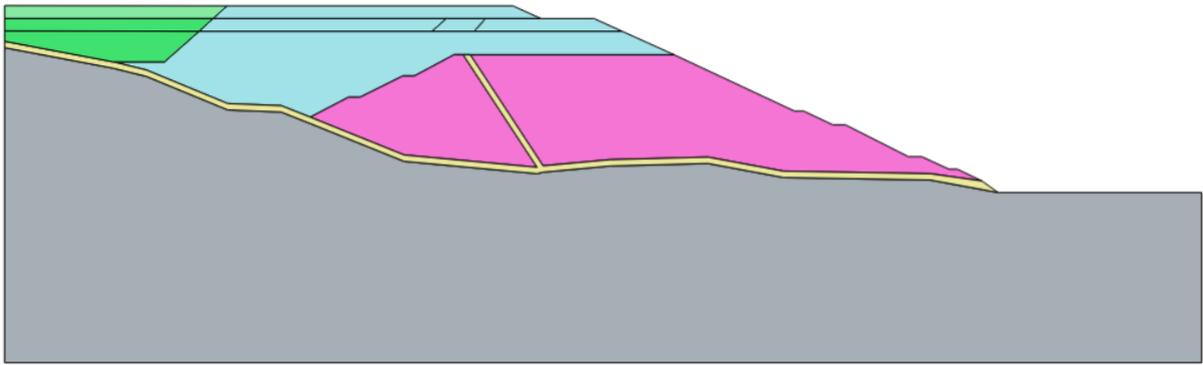


Figura 36. Geometría del modelo con berma

Recalculando el factor de seguridad para la nueva geometría, se obtienen los siguientes resultados:

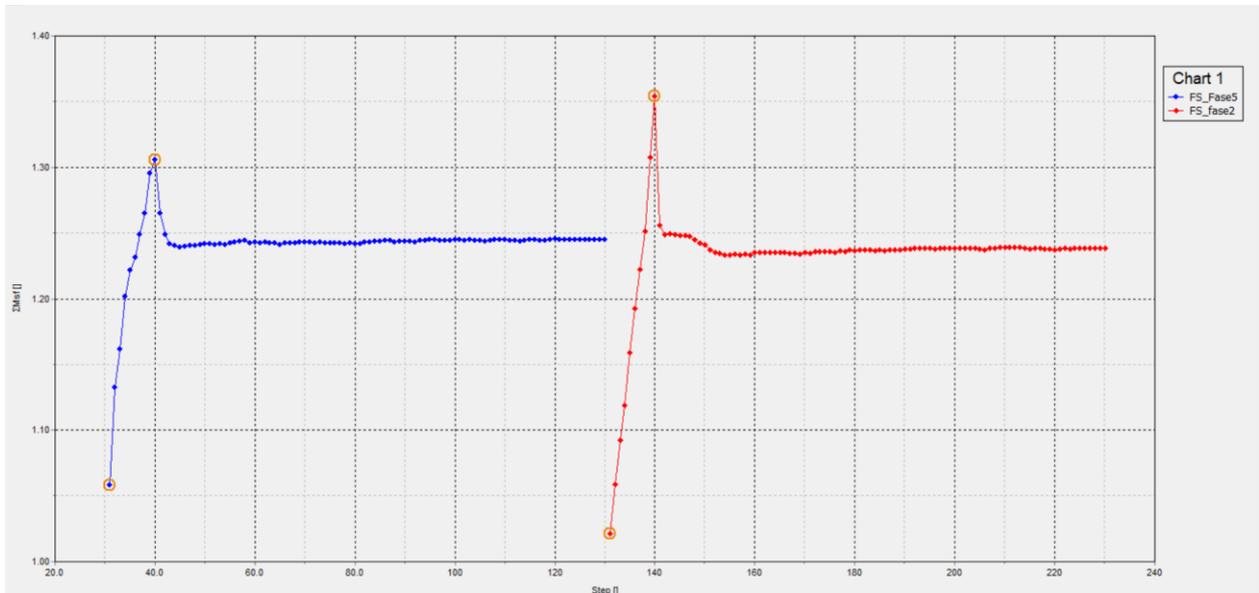


Figura 37. Coeficiente de seguridad fases 2 y 5 con berma.

Se observa que el valor del FS para la fase 5 ahora toma un valor de 1.306, el cual es superior al valor mínimo exigido por la normativa. Por otro lado, el valor del factor de seguridad de la fase 2 también es mayor que el obtenido en el apartado anterior.

Se ve que, aunque supera el valor mínimo en la Fase 5, está muy cerca del 1.30 recogido en la normativa, por lo que aumentar el valor de retroceso de la berma podría ayudar a que sea más estable, incrementando, de esta manera, su factor de seguridad.

Coeficiente de seguridad (FS) con berma de 25m.	
Fase 2	1.354
Fase 5	1.306

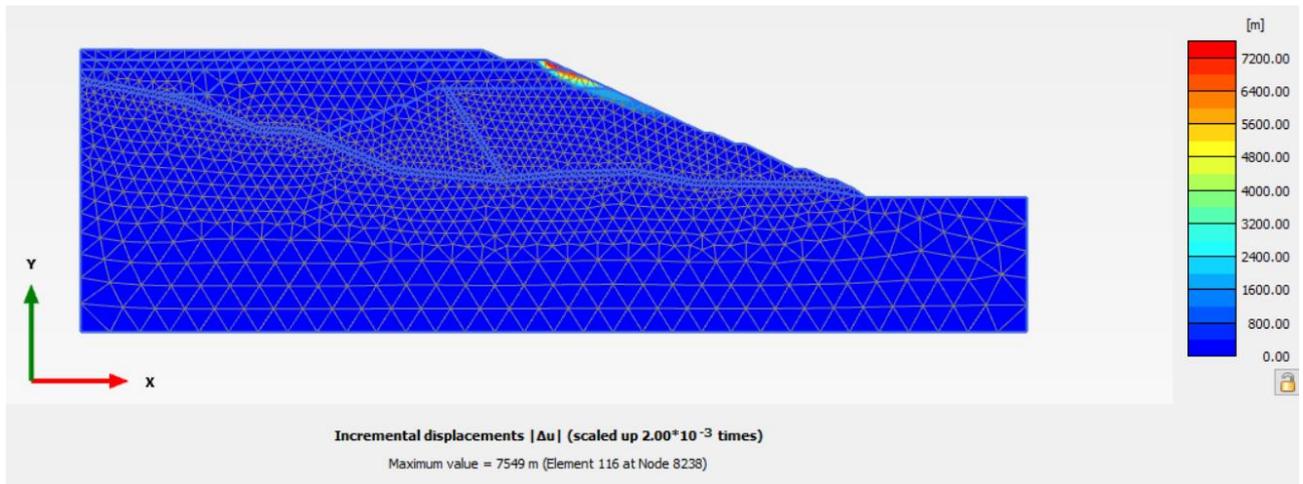


Figura 38. Círculo de deslizamiento FS\_Fase5 (con berma).

## CONCLUSIONES

---

Analizando la presa en su situación actual, se obtiene un coeficiente de seguridad de 1.319. El objetivo de este proyecto es realizar un remonte en la presa para que la Central Térmica siga en funcionamiento, es decir, que siga siendo seguro ante la acumulación de materiales procedentes de la Central. Por ello, la solución que se ha propuesto es realizar un remonte de las mismas características y altura que los realizados anteriormente.

Con esta primera idea, se ha obtenido una reducción del coeficiente de seguridad a un valor de 1.286. Esta opción no es factible ya que es menor al valor mínimo contemplado en la normativa de 1.3. Por ello hay que realizar una actuación a ese remonte colocando una berma de 25 metros para que cumpla. El coeficiente de seguridad obtenido con esta actuación es de 1.306 y por tanto puede considerarse que la estructura es segura frente a deslizamientos y así evitar posibles catástrofes, pudiendo continuar la actividad de la Central Térmica.

## REFERENCIAS

- [1] M. p. I. T. E. y. e. R. Demográfico, *Balance Energético de España 1990-2021*.
- [2] M. y. A. U. Ministerio de Transporte, ««DB SE-C. Documento básico. Seguridad estructural Cimientos. CTE. Código Técnico de la Edificación.»» 2006. [En línea]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-C.pdf>.
- [3] M. y. A. U. Ministerio de Transportes, «GCOC. Guía de cimentaicones en obras de carretera.» 2009. [En línea]. Available: [https://www.mitma.es/recursos\\_mfom/0710401.pdf](https://www.mitma.es/recursos_mfom/0710401.pdf).
- [4] M. d. F. P. d. Estado., ««ROM 0.5-05. Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias.»» 2005. [En línea]. Available: <https://www.puertos.es/es-es/BibliotecaV2/ROM%200.5-05.pdf>.
- [5] M. p. I. T. E. y. e. R. D. Ecol, «Normas técnicas de seguridad de presas y embalses.» 2021. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2021/BOE-A-2021-5867-consolidado.pdf>.
- [6] Bentley, *Plaxis 2D. Material Models Manual*, 2021.
- [7] IGME, «MAGNA 50 - Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (2ª Serie)» [En línea]. Available: <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx>.



# ANEXOS

- Coordenadas de los puntos

Coordenadas plano			Medidos en plano CAD	
	X	Y	Xplano	Yplano
1	40	336.3	40.0	223.2
2	52.2	336.3	6.5	223.2
3	40.0	341.2	40.0	237.6
4	40.0	347.0	40.0	254.4
5	40.0	353.1	40.0	272.2
6	131.0	341.0	236.4	237.0
7	240.0	341.0	554.6	237.0
8	246.6	347.0	573.9	254.5
9	259.7	341.0	612.1	237.0
10	264.9	347.0	627.2	254.5
11	315.7	347.0	775.6	254.5
12	319.6	341.0	787.1	237.0
13	328.9	341.0	814.1	237.0
14	324.3	339.0	800.9	231.2
15	331.2	339.0	821.0	231.2
16	353.1	330.0	884.7	204.8
17	350.0	327.9	875.8	198.8
18	357.5	327.9	897.5	198.8
19	409.4	303.5	1049.1	127.3
20	413.7	303.5	1061.6	127.3
21	427.4	297.0	1101.7	108.3
22	433.3	297.0	1119.0	108.3
23	462.8	282.0	1205.0	64.5
24	469.0	282.0	1223.2	64.5
25	481.8	276.1	1260.4	47.0
26	485.7	276.1	1271.9	47.0
27	497.1	270.6	1305.1	30.9
28	90.0	329.1	116.8	202.2
29	117.6	329.1	197.3	202.2
30	90.9	326.6	119.3	194.8
31	114.8	326.6	189.3	194.8
32	183.0	300.6	388.4	118.6
33	200.9	310.0	440.5	146.3
34	206.3	310.0	456.3	146.3
35	226.3	320.0	514.6	175.6

36	231.7	320.0	530.4	175.6
37	250.3	330.0	584.9	204.8
38	254.5	330.0	597.0	204.8
39	257.8	330.0	606.5	204.8
40	289.1	277.0	698.1	49.7
41	291.9	277.7	706.2	51.8
42	226.9	282.8	516.6	66.8
43	106.3	322.8	164.4	183.7
44	144.4	307.0	275.6	137.5
45	169.4	306.0	348.5	134.5
46	323.2	280.6	797.5	60.2
47	369.0	281.8	931.3	63.8
48	404.3	275.2	1034.3	44.5
49	473.0	274.0	1234.9	40.9
50	137.5	347.0	109.5	254.5
51	144.1	353.0	128.6	272.0
52	302.5	353.0	737.087	272.044

BERMA				
<b>A</b>	290.9	347.0	703.208	254.5
<b>B</b>	277.7	353.0	664.698	272.044

Chimenea		
	X	Y
1'	40	333.3
30'	90.9	323.6
32'	183.0	297.6
40'	289.1	274.0
41'	291.9	274.7
42'	226.9	279.8
43'	106.3	319.8
44'	144.4	304.0
45'	169.4	303.0
46'	323.2	277.6
47'	369.0	278.8
48'	404.3	272.2
49'	473.0	271.0
27'	504.8	265.1

