

ANEJO Nº 2

ESTUDIO DE ESTABILIDAD DEL MURO MÉNSULA



ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN	2.2
2. ESTABILIDAD GENERAL DEL DEPÓSITO	2.2
2.1 Geometría y acciones actuantes	2.2
2.2 Estabilidad frente a vuelco	2.4
2.3 Estabilidad frente a deslizamiento	2.5
2.4 Tensiones sobre el terreno	2.7
2.5 Análisis del depósito mediante PLAXIS	2.8
2.5.1 Definición del modelo.....	2.8
2.5.2 Definición del terreno y acciones	2.10
2.5.3 Fases generadas.....	2.12
2.5.4 Resultados.....	2.15
3. CONCLUSIONES RELATIVAS AL ESTUDIO DE ESTABILIDAD.....	2.17

1. INTRODUCCIÓN

Tras los desplazamientos observados en los muros perimetrales de la zona del relleno, es necesario comprobar la estabilidad de muro en dicha zona. A continuación se procede a realizar los cálculos justificativos de la seguridad del depósito aplicando la Guía de cimentaciones en obras de carretera (GCOC).

De la misma forma, se profundiza el estudio mediante el programa informático de elementos finitos PLAXIS.

2 ESTABILIDAD GENERAL DEL DEPÓSITO

2.1 Geometría y acciones

Las comprobaciones para evaluar la estabilidad del muro ménsula son las de vuelco, deslizamiento y tensiones sobre el terreno.

Para ello, partimos de unos datos base como es la geometría y los materiales tanto del terreno como del muro.

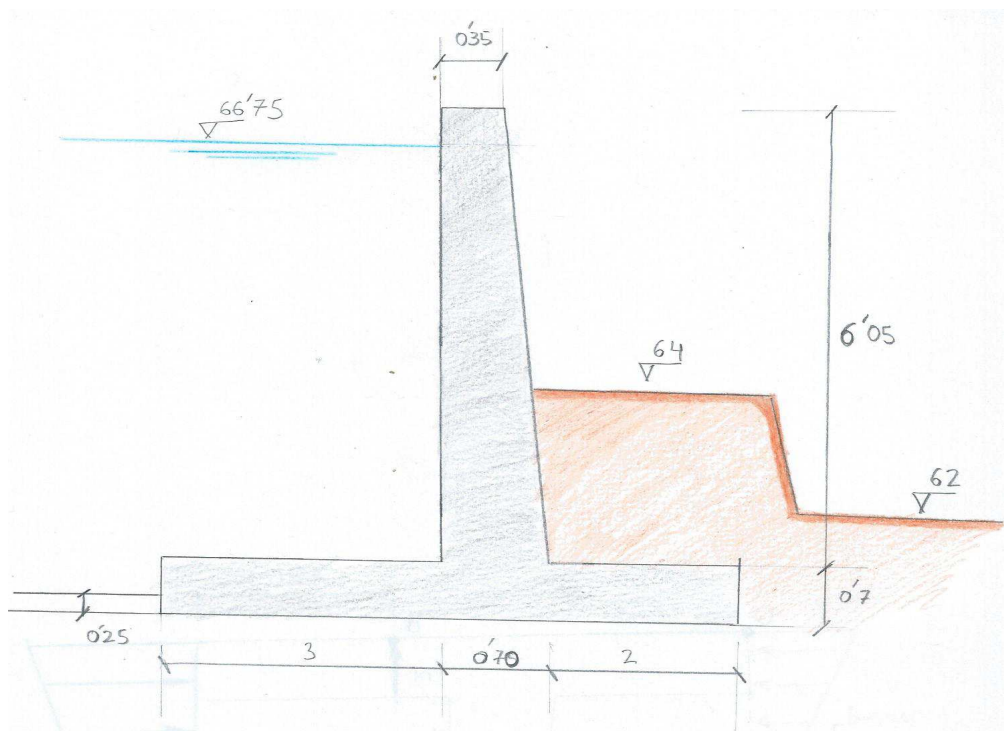


Fig.1 Geometría del muro

Las fuerzas actuantes en el muro ménsula son las siguientes, expresadas en kN/m :

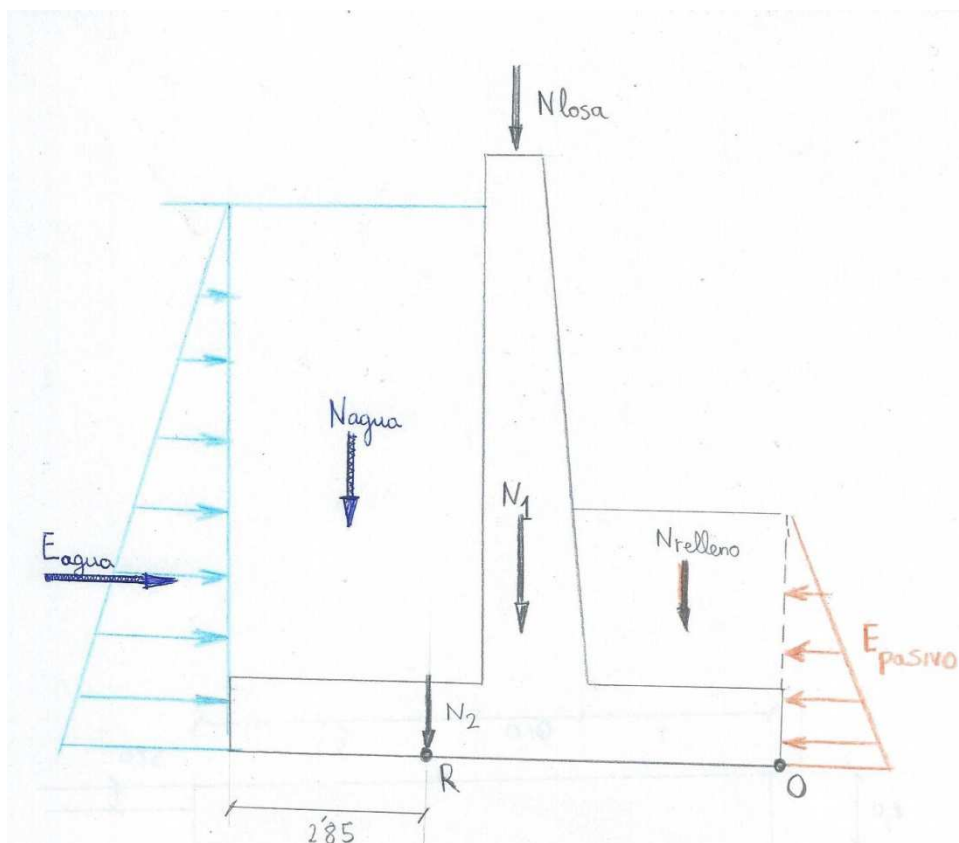


Fig.2 Cargas sobre el muro

N_{agua} :Peso del agua dentro del depósito

N_{losa} :Pelo de la losa de la cubierta sobre el muro

N_1 :Peso del muro

N_2 :Peso de la zapata del muro

$N_{relleno}$:Peso del material de relleno

E_{agua} :Empuje hidrostático del agua

E_{pasivo} :Empuje pasivo del relleno

No se considera E_{pasivo} sobre el talón para los cálculos ya que se considera que el grado de compactación es insuficiente.

A continuación se muestran los cálculos de las acciones verticales, así como los momentos actuantes sobre R y O, necesarios para las comprobaciones de deslizamiento, vuelco y tensión sobre el terreno.

	Justificación	Valor (Kn/m)	Excentricidad (m)		Momento(Kn.m/m)	
			R	O	R	O
Nlosa	4 Kn/m ² x 4m	16	0,15	2,525	2,4	40,4
Nagua	5,55m x 3m x 10 Kn/m ³	166,5	-1,35	4,2	-224,775	699,3
N1	25 Kn/m ³ x 6,05 x 0,52	78,65	0,25	2,6	19,6625	204,49
N2	25Kn/m ³ x 5,7m x 0,7m	99,75	0	2,85	0	284,2875
Nrelleno	20Kn/m ² x 2m x 2m	80	0,25	1	20	80

Tabla 1.Acciones

Por lo tanto, y tras el sumatorio de todas las acciones obtenemos:

$\Sigma N(Kn)$	ΣMR (Kn.m/m)	$\Sigma Mo(Kn.m/m)$
440,9	-54,7125	1308,4775

Tabla 2. Sumatorio acciones

La acción debida al empuje del agua es la siguiente:

$$E_{agua} = E_w = 10 Kn / m^3 \times \frac{(H)^2}{2} = 211,25 Kn / m$$

donde H= 6,5 m (altura más desfavorable), y que origina un momento en R y O de:

$$M_{E_w}^R = M_{E_w}^O = 211,25kn / m \times 2.145 = 453,13Kn.m / m$$

2.2Estabilidad frente al vuelco

El cálculo del coeficiente de seguridad ante el vuelco se realiza a partir de la Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera (GCOC).

El factor de seguridad frente a vuelco se obtiene según la siguiente fórmula:

$$F_v = \frac{\Sigma \text{Momentos estabilizadores}}{\Sigma \text{Momentos volcadores}} = \frac{\Sigma Mo}{M_{E_w}^O}$$

donde $\sum M_{res}$ es la suma de momentos resistentes respecto la base del muro (N_{agua} , N_{losa} , N_1 , N_2 y $N_{relleno}$) y M_{Ew}^O es la suma de momentos volcadores (E_{agua})

$$F_v = \frac{1308,4775}{453,13} = 2,88$$

El coeficiente de seguridad frente al vuelco es mayor que 1,8 , considerando que se cumple la estabilidad frente a vuelco.

COMBINACIÓN DE ACCIONES	COEFICIENTE DE SEGURIDAD AL VUELCO RÍGIDO	COEFICIENTE DE SEGURIDAD AL VUELCO PLÁSTICO
Casi permanente(*)	$F_1 \geq 2,00$	$F_1 \geq 1,50$
Característica	$F_2 \geq 1,80$	$F_2 \geq 1,30$
Accidental	$F_3 \geq 1,50$	$F_3 \geq 1,10$

(*) Como valor del coeficiente de seguridad para la combinación de acciones casi permanente, en situaciones transitorias y de corto plazo, podrá adoptarse el coeficiente de seguridad F_2 (véase apartado 2.10).

Tabla 3. Coeficientes de seguridad GCOC

2.3 Estabilidad frente al deslizamiento

El factor de seguridad para deslizamiento (FS_1) se obtiene de la GCOC a partir de la siguiente ecuación:

$$FS_1 = \frac{\text{Fuerzas estabilizadoras}}{\text{Fuerzas desestabilizadoras}} = \frac{V \cdot \tan \phi + B \cdot L \cdot c + R}{H}$$

donde:

V=Resultante vertical efectiva

H=Resultante de las fuerzas horizontales que actúan sobre la base de la cimentación

B, L =Dimensiones de la cimentación rectangular equivalente

ϕ , c: Ángulo de rozamiento y cohesión, del contacto del elemento de cimentación con el terreno

R=Suma de las posibles resistencias adicionales en la misma dirección y sentido contrario a H

La base de la cimentación se encuentra sobre un relleno antrópico de zahorra, por lo que la cohesión (c)=0.

De la misma forma, el coeficiente R es nulo ya que no tenemos en cuenta el empuje pasivo para los cálculos como se ha mencionado con anterioridad.

Por lo tanto, obtenemos la siguiente ecuación para el cálculo de deslizamiento:

$$Fs1 = \frac{\sum N \cdot \tan \phi}{E_{agua}}$$

En esta ecuación se puede obtener el factor de seguridad en función del rozamiento existente entre la base del cimiento del muro. Los resultados de este estudio paramétrico se incluyen en la Tabla 4, donde puede verse que en ningún caso el factor de seguridad es superior a 1,5, marcado por la norma (Tabla 5)

ϕ (°)	$\tan \phi$	$\tan \phi \times \sum N$ (Kn/m)	Fs2
30	0.58	255,72	1,21
25	0.47	207,22	0.98
20	0.36	158,72	0.75
15	0.27	119,04	0.56
10	0.18	79,36	0.38

Tabla 4. Seguridad frente a deslizamiento. Estudio paramétrico

Por lo tanto, se concluye que **la seguridad frente a deslizamiento es inaceptable**, necesitando alguna solución correctora, o bien una reducción de la cota de agua almacenable en el depósito.

Un aspecto que influye sobre el cálculo de FS_1 es la presencia de la lámina de PVC entre zapata y el terreno. No se ha incluido en los cálculos pero reduciría el factor de seguridad, siendo aún menor.

Del mismo modo, no se ha tenido en cuenta tampoco la presencia de una subpresión en la base de la cimentación, que aparece cuando el agua se filtra por las juntas. También reduciría el factor de seguridad.

COMBINACIÓN DE ACCIONES	COEFICIENTE DE SEGURIDAD FRENTE AL DESLIZAMIENTO
Casi permanente (*)	$F_1 \geq 1,50$
Característica	$F_2 \geq 1,30$
Accidental	$F_3 \geq 1,10$

(*) Como valor del coeficiente de seguridad para la combinación de acciones casi permanente, en situaciones transitorias y de corto plazo, podrá adoptarse el coeficiente de seguridad F_2 (véase apartado 2.10).

Tabla 5. Coeficientes de seguridad GCOC

2.4 Tensiones sobre el terreno

Esta comprobación se realiza con el fin de que un pequeño incremento del empuje no ocasione un fuerte incremento en la tensión del borde de la zapata. Se comprobará que en el punto de paso de la resultante de acciones sobre el muro no diste menos de $B/6$ del borde del muro. En nuestra zapata $B = 5,7$

De esta forma, el momento que se haya en R será:

$$M_R = M_{Ew}^R + \sum M_R = 453,13 - 54,71 = 198,42 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$e_G = \frac{M_R}{\sum N} = 0,5 \text{ m}, \text{ que será menor que } B/6 (0.95 \text{ m})$$

En este caso aparece un reparto trapecial de tensiones bajo el cimiento, cuyos valores máximos y mínimo son:

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{B} \left(1 + \frac{6e}{B} \right) = 118.06 \text{ Kn/m}^2$$

$$\sigma_{\min} = \frac{N}{B} \left(1 - \frac{6e}{B} \right) = 36.63 \text{ Kn/m}^2$$

La tensión mayor no es excesivamente elevada, aunque dadas las condiciones del relleno es de suponer que se ha producido la plastificación del mismo en algunas zonas, pudiendo ser este el origen del giro detectado.



Fig.3 Muro 2

2.5 Análisis del depósito mediante PLAXIS

Para un estudio más detallado de la estabilidad del depósito acudimos al programa informático de elementos finitos PLAXIS Professional 8.6. Se comprueba el ajuste del modelo al comportamiento observado en el depósito lo que permite evaluar el efecto de las medidas correctoras.

2.5.1 Definición del modelo

PLAXIS es un programa de ordenador de elementos finitos bidimensionales diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. Las situaciones modelizables corresponden a problemas de deformación plana.

El programa utiliza una interfaz gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema que se trate.

La generación de un modelo de elementos finitos en dos dimensiones en PLAXIS está basada en un modelo geométrico creado en el plano x-y del sistema de coordenadas global (Fig. 4), mientras que la dirección z es la dirección perpendicular al plano. En el sistema de coordenadas global, la dirección z positiva apunta hacia el usuario.

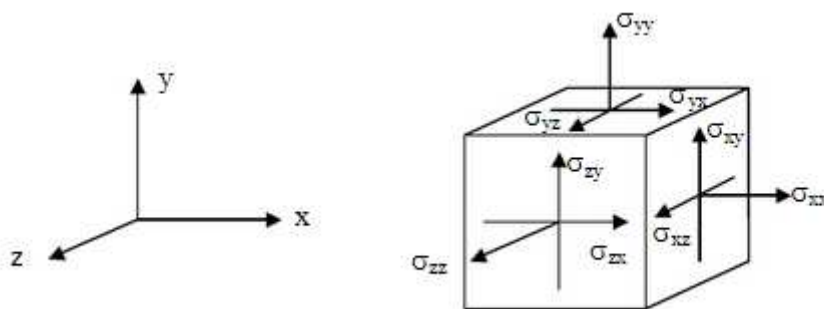


Fig.4 Convenio de signos del programa PLAXIS

El programa permite la simulación del proceso constructivo a partir de la definición de fases. En cada una de las distintas fases el usuario puede activar o desactivar las cargas, elementos estructurales y suelo en función de su aparición en dicho proceso constructivo. Además, permite una conexión entre los elementos estructurales y los elementos de suelo mediante unos elementos de interfaz, a los que se puede asignar una resistencia menor que la del suelo (para simular, p.e. el menor ángulo de rozamiento existente entre el cimientado del muro y el suelo por causa de la lámina plástica).

El programa da la opción de escoger un modelo constitutivo según el comportamiento del terreno (plástico, elasto-plástico, modelo del suelo blando...). Para nuestro depósito y con las condiciones de nuestro estudio empleamos el modelo elástico-plástico, basado en el criterio de plastificación de Mohr-Coulomb.

Este modelo se utiliza en una primera aproximación del comportamiento del suelo en general. El modelo consta de cinco parámetros, el módulo de Young (E), el coeficiente de Poisson (ν), la cohesión (c), el ángulo de fricción (ϕ), y el ángulo de dilatación (ψ).

Este modelo es suficientemente aproximado para el caso que nos ocupa, donde la complejidad de la geometría y de la secuencia constructiva dificulta la adopción de modelos más complejos.

2.5.2 Definición del terreno y acciones

Una vez obtenidos los estratos y tipos de terreno de la zona del depósito, se procede a introducirlos al programa informático. En la Fig.5 se muestran los diferentes estratos de los que se compone el objeto de estudio. Los hemos dividido de la siguiente forma:

- A. Rellenos bajo el depósito
- B. Rellenos frontales
- C. Terreno natural (calizas y margas)

Además, se introduce el hormigón de la solera y el muro como material elástico-lineal:

- 1 .Hormigón en muros y solera

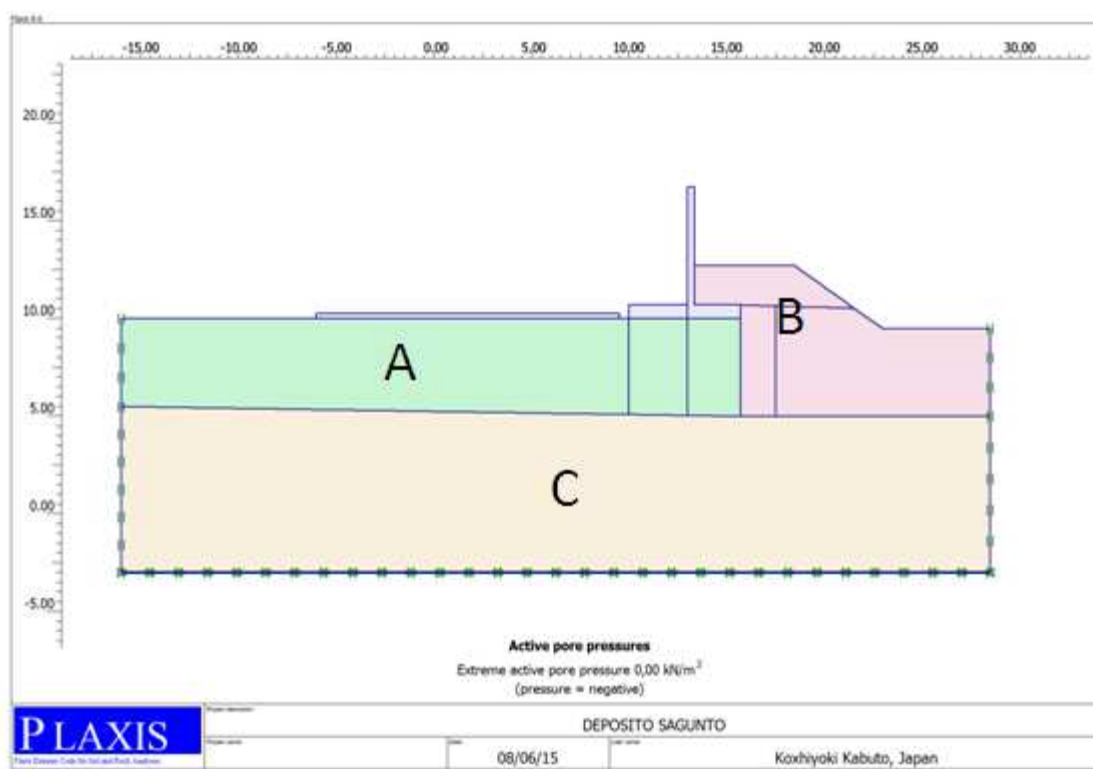


Fig.5. Caracterización del terreno

Para el análisis se adoptan los siguientes parámetros geotécnicos de la tabla 6, obtenidos de los ensayos geotécnicos.

ID	Nombre	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	Kx (m/day)	Ky (m/day)	ν	E(Kpa)	c(kPa)	$\Psi(^{\circ})$
A	Rellenos bajo depósito	20	21	0,1	0,1	0,3	8000	5	30
B	Rellenos frente	20	21	0,1	0,1	0,3	5000	5	28
C	Terreno natural	22	23	0,0001	0,0001	0,26	80000	100	35
1	Hormigón	25	25	0,000001	0,000001	0,2	30000000	-	-

Tabla 6. Parámetros geotécnicos introducidos en el modelo EF

Las cargas existentes en la estructura son las definidas previamente en “Tabla 1 .Acciones”. Las cargas actuantes a la hora de introducirlas en el programa se dividen en cargas puntuales y cargas distribuidas:

Cargas puntuales:

Peso propio del forjado reticular. Según un catálogo de una casa comercial (Grupo Forli Forjados), el peso propio del mismo se aproxima a 4kN/m² . Aplicado sobre el muro genera una carga lineal de 4 kN/m² * 4 m = 16 kN/m

Sobre cada fila de pilares es 4 kN/m² * 8 m = 32 kN/m

Cargas distribuidas:

Empuje del agua sobre solera y muros. Su acción se estima como una sobrecarga distribuida de valor igual al peso específico del agua (10 Kn/m³) * la altura de agua en el punto.

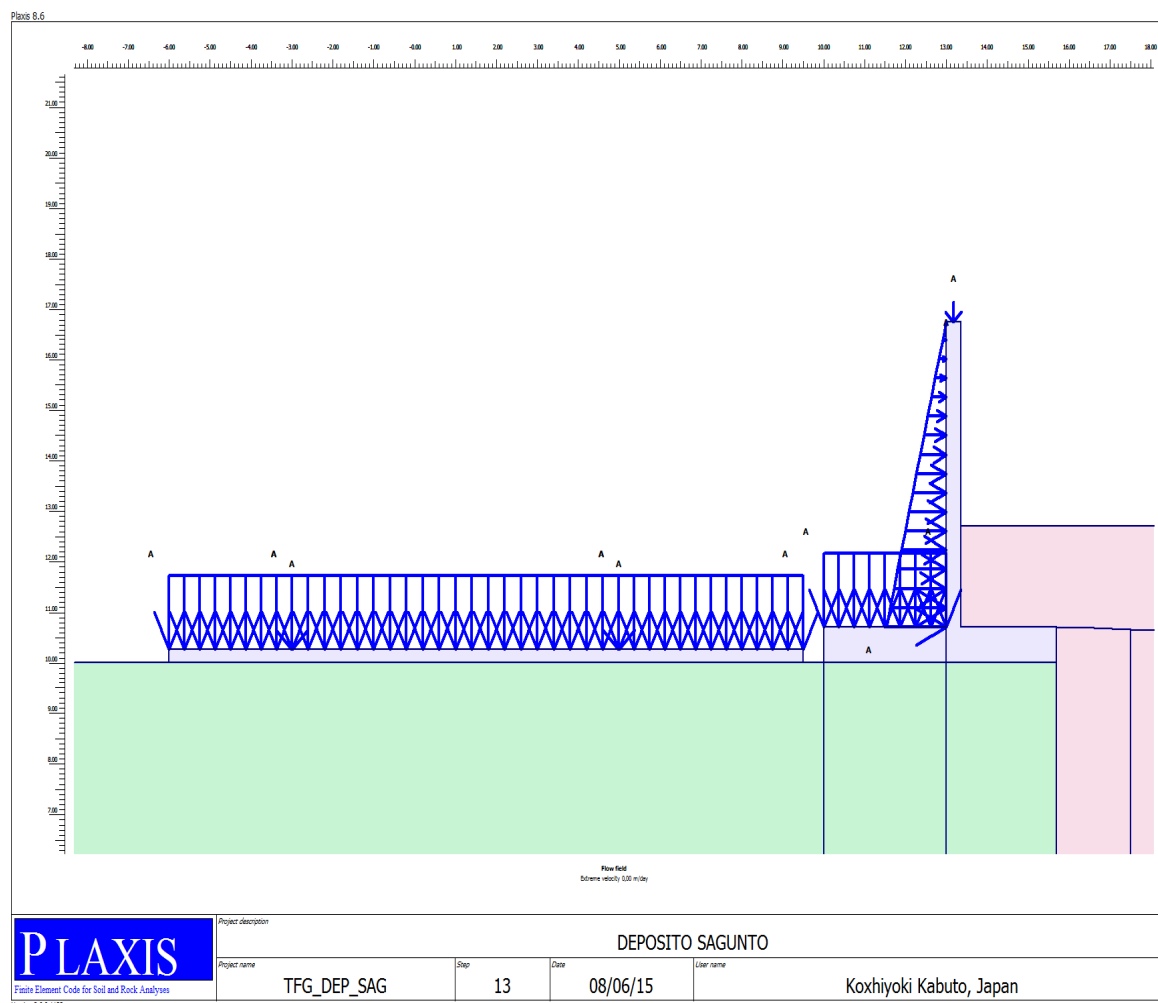


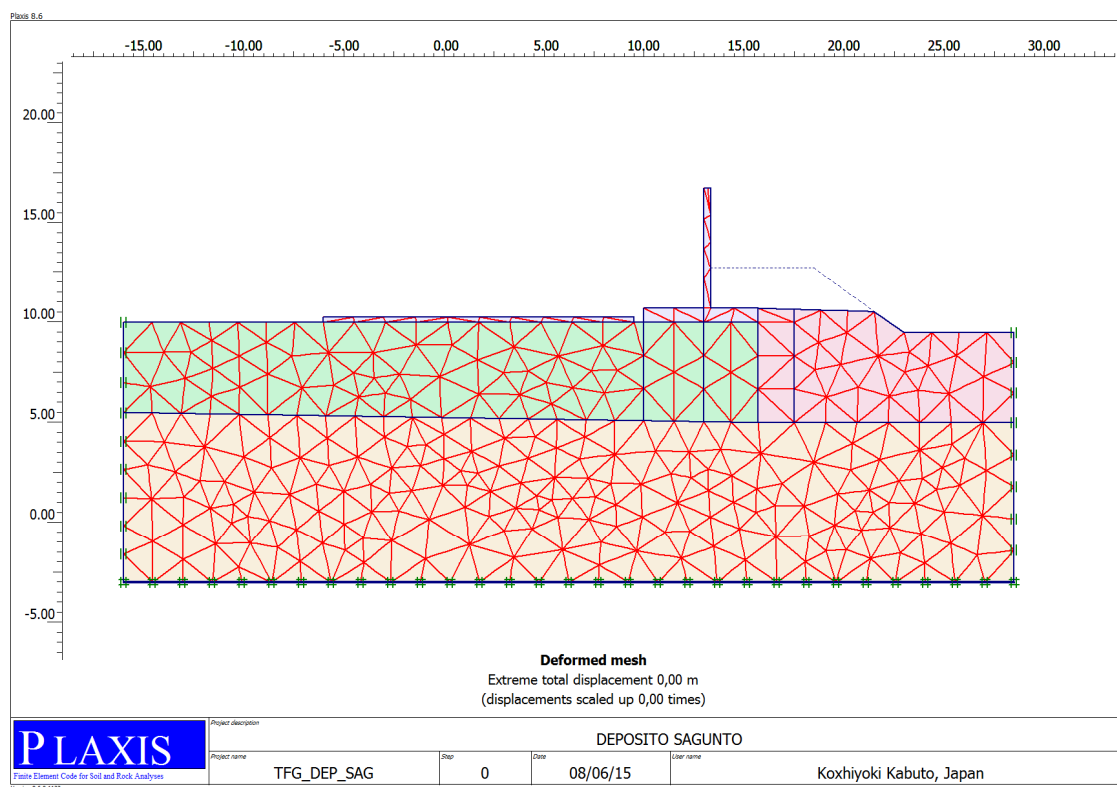
Fig.6. Cargas sobre muro y losa

Tras los sondeos no se detectó nivel freático por lo que no se ha incluido en la modelización

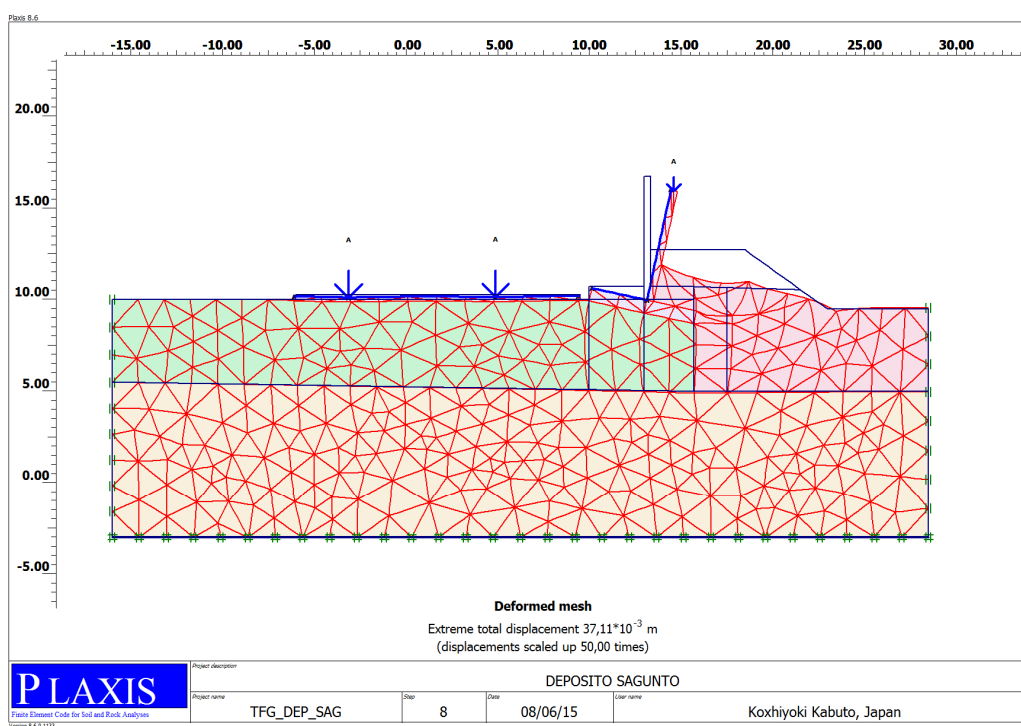
2.5.3 Fases generadas

Para el estudio de la estabilidad mediante el programa se han introducido un total de 4 fases. En las figuras siguientes se muestran las cargas y materiales presentes según la fase, junto con la malla de elementos finitos deformada.

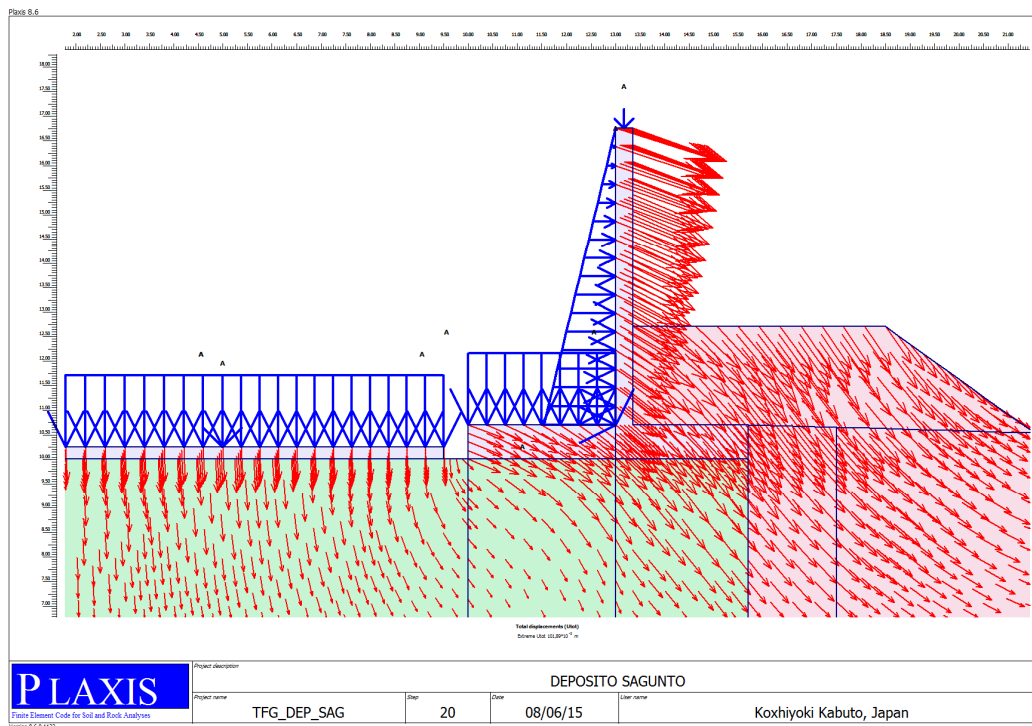
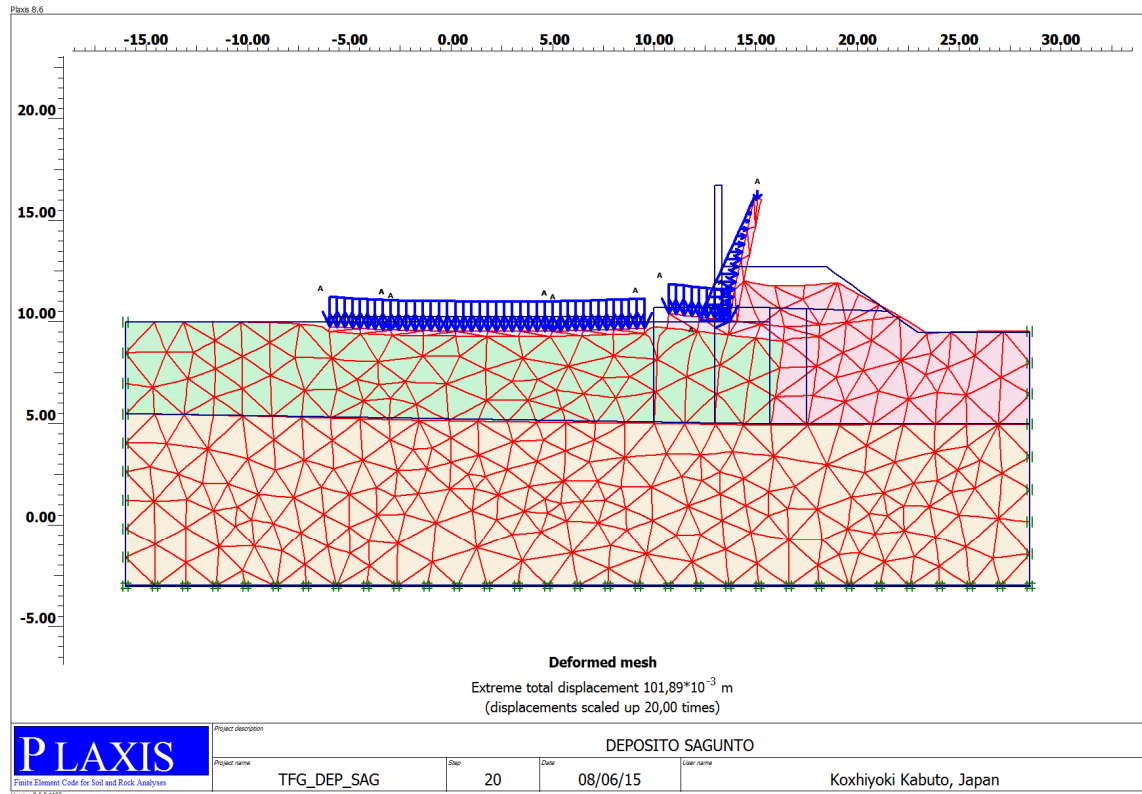
Fase 1.Construcción de la solera y el muro:



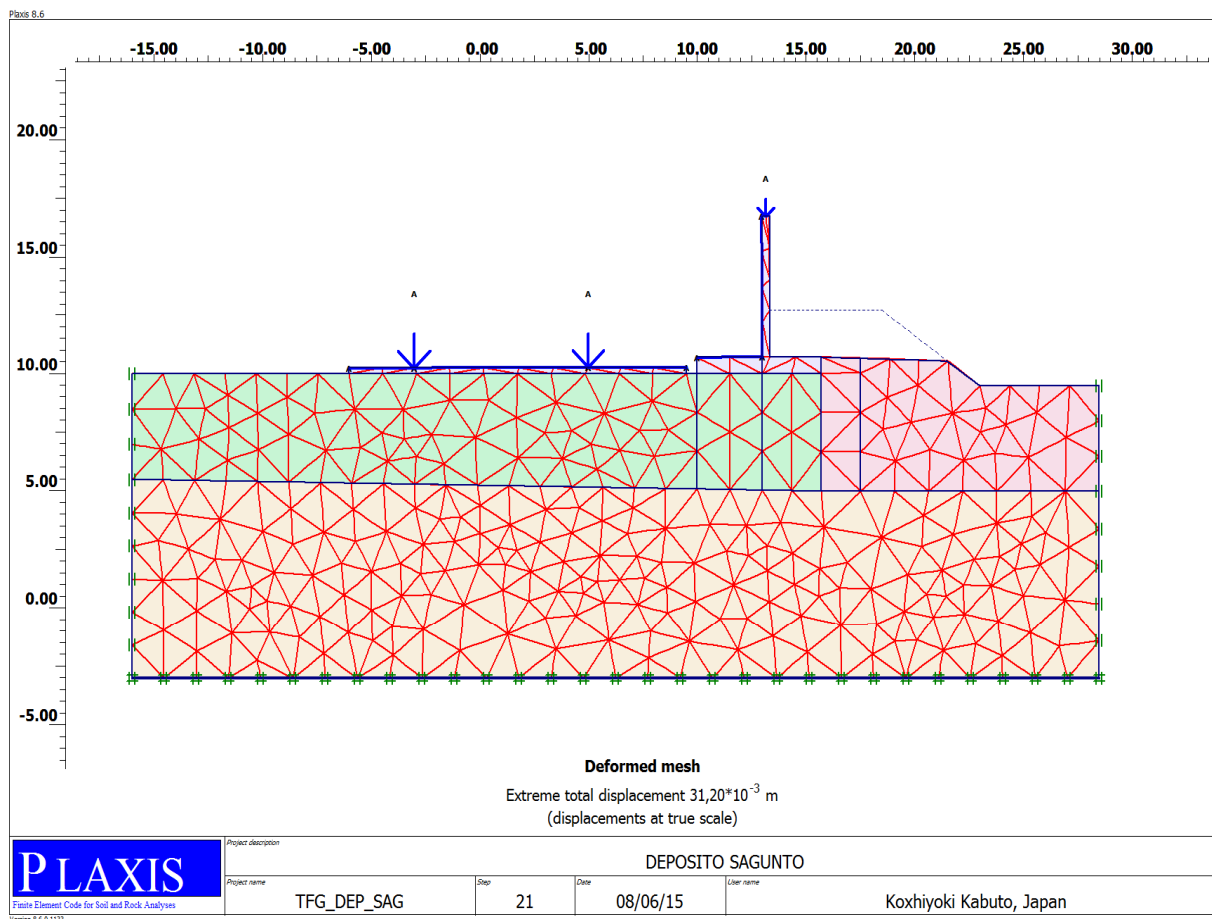
Fase 2.Construcción del forjado, pilares y relleno frontal:



Fase 3. Llenado del depósito:



Fase 4. Vaciado del depósito y retirada relleno en puntera (Fase actual):



2.5.4 Resultados

De acuerdo con la secuencia constructiva se procede a evaluar las deformaciones y movimientos, tanto en el terreno como en los elementos estructurales. El programa permite diferenciarlos en movimientos verticales y horizontales, distinguiéndolos en colores según su grado de deformación.

Las deformaciones obtenidas son las deformaciones totales, es decir, las deformaciones de cada fase se acumulan a la anterior.

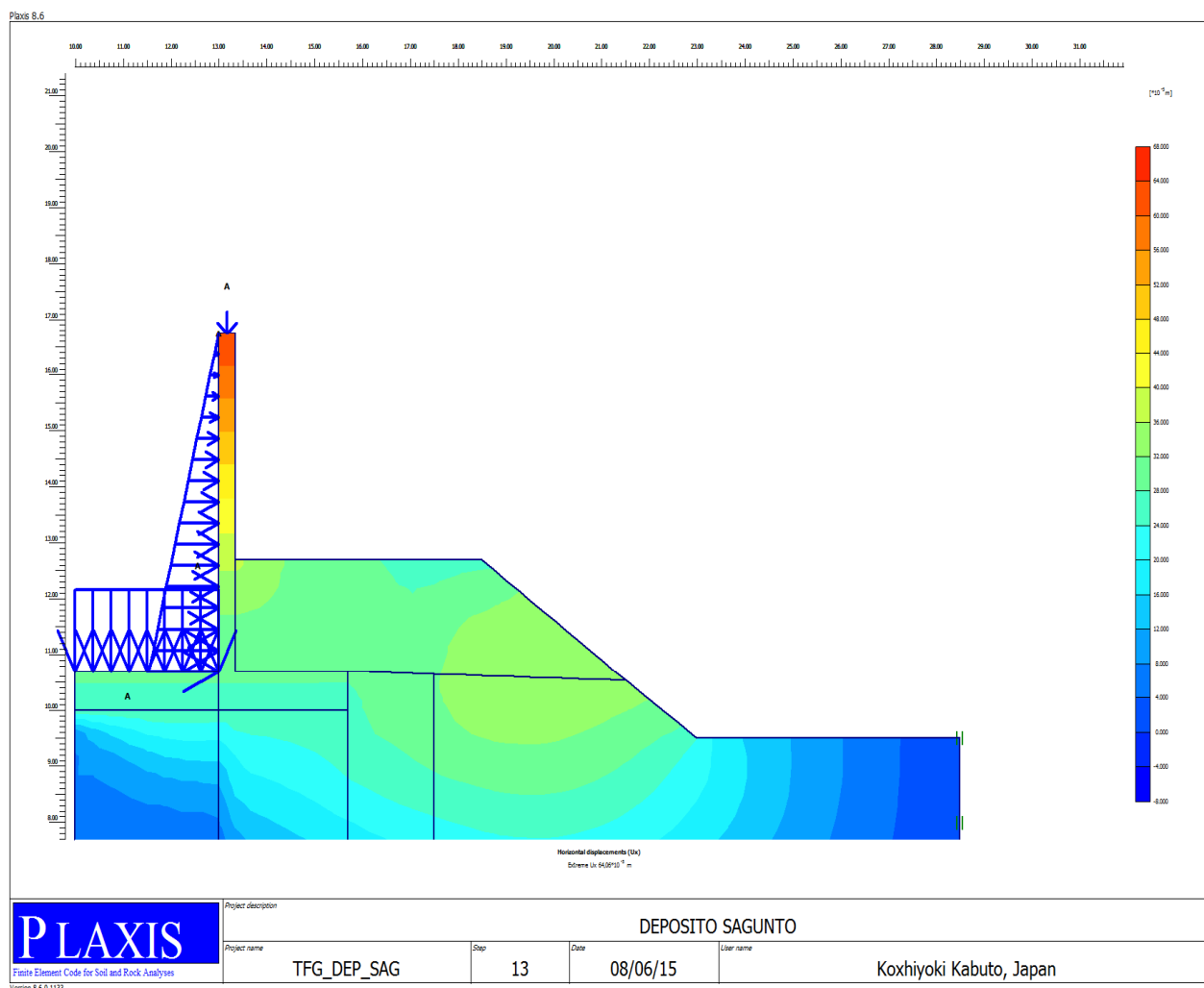


Fig 7. Movimientos horizontales

La Fig.7 ratifica las hipótesis acerca del movimiento del muro hacia el relleno existente frente a este .El movimiento en la parte superior del muro es del orden de 7 cm

Si observamos los movimientos verticales aportados por el programa y mostrados en la Fig. 8, cabe destacar la diferencia de movimiento vertical en diferentes puntos de la cimentación del muro. Es prueba de las hipótesis planteadas y calculadas en apartados anteriores, donde el muro se desplazaba de forma desigual hacia el relleno frente al muro.

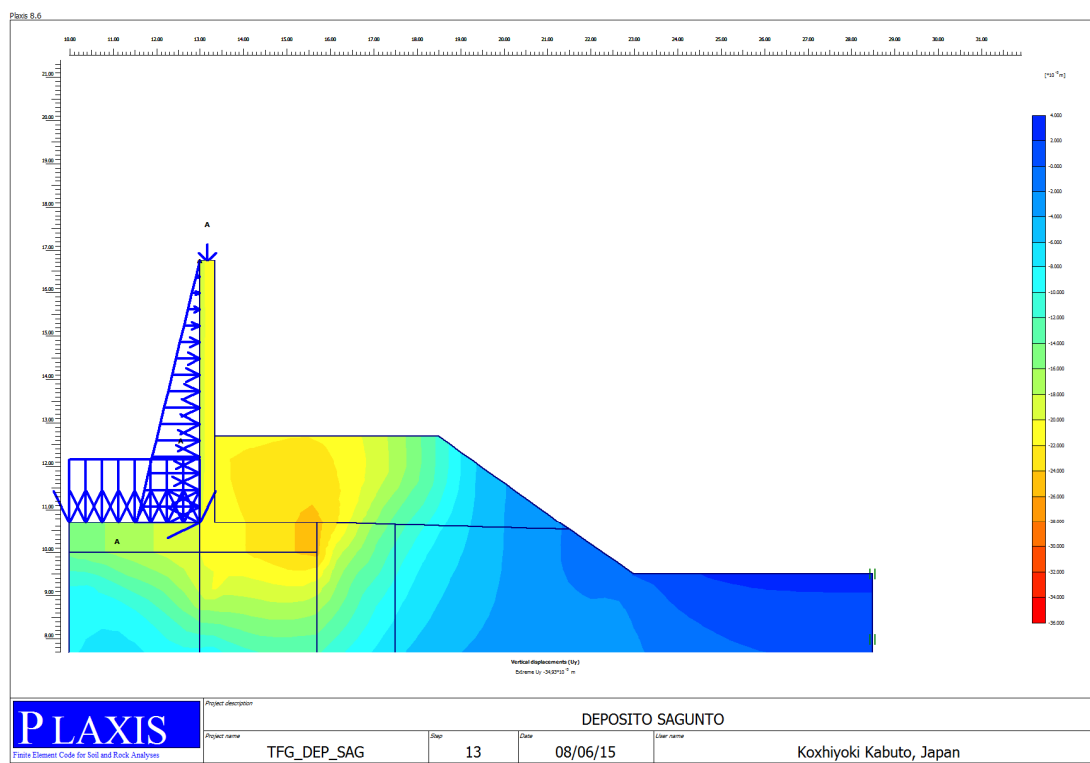


Fig.8.Movimientos Verticales

3. CONCLUSIONES RELATIVAS AL ESTUDIO DE ESTABILIDAD

Tras el estudio de la estabilidad del muro mediante las comprobaciones de deslizamiento, vuelco y tensión sobre el terreno a partir de la Guía de cimentaciones en obras de carretera (GCOC), y de la modelización mediante el programa de elementos finitos, se llegan a una serie de conclusiones:

- No se cumple la seguridad frente al deslizamiento marcada por la norma. Este coeficiente se ha obtenido sin tener en cuenta el empuje pasivo que proporciona el relleno frontal del muro.

El coeficiente de seguridad sí que se cumple, cumpliendo los umbrales especificados en la norma.



- La tensión máxima obtenida no es elevada. Sin embargo, no es un valor fiable puesto que el relleno bajo el muro y frente a él no está suficientemente compactado y podría generar problemas
- La presencia de la lámina de PVC existente bajo el muro podría afectar en gran medida la seguridad frente a deslizamiento del muro. La lámina podría generar una subpresión contra el muro que provocaría peores situaciones respecto a la estabilidad del muro.
- Los cálculos mediante el programa informático PLAXIS evidencian los resultados obtenidos a partir de la formulación de la GCOC. La deformación del muro hacia el relleno frente a éste es claro, y el movimiento, tanto de la coronación del muro como de la puntera de la cimentación es inaceptable.

Con esta serie de conclusiones, se concluye que el depósito **no cumple las condiciones de seguridad frente a la estabilidad** especificadas en la norma, y que habría que actuar con alguna medida correctora.