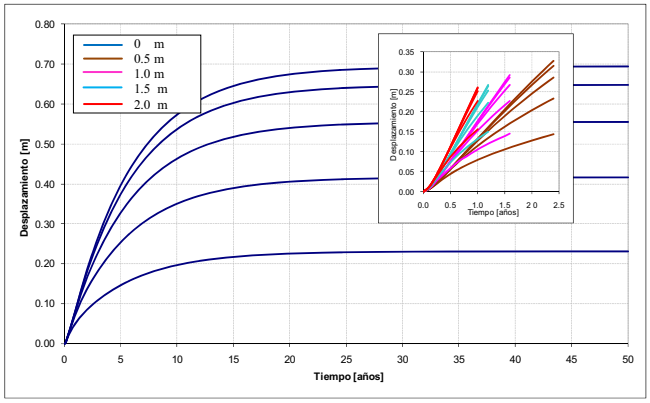
La Figura 7–6 muestra que el módulo de rigidez influye en gran manera sobre la respuesta del modelo, como era de esperarse. Es así que, para módulos de rigidez pequeños, la masa en movimiento registra valores altos de desplazamiento final y a medida que el módulo aumenta, estos desplazamientos disminuyen significativamente. También se observa que el tiempo para lograr estos desplazamientos se incrementa cuando el módulo de rigidez disminuye. En otras palabras, la masa deslizada tiende a estabilizarse en un menor tiempo cuando hay un aumento en el módulo de rigidez, de lo contrario se requiere de un mayor tiempo de análisis para que el sistema llegue a ser estable. Este parámetro no afecta el desarrollo de falla interna del suelo. Ver Figura 7–6(a).

La magnitud de la velocidad máxima, en general, es la misma indistintamente del valor del módulo de rigidez del suelo. Sin embargo, el módulo influye en la desaceleración que presenta la masa para llegar a la condición de estabilidad; es decir que para aumentos en el módulo de rigidez se aumenta la variación en la velocidad. Ver Figura 7–6 (b).

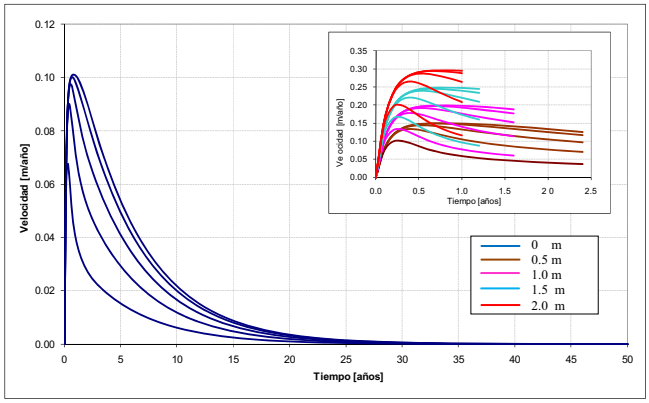
El empuje del suelo se incrementa con el aumento del módulo y, después de un tiempo determinado, llega a un valor máximo el cual es constante en el tiempo. El tiempo para llegar al empuje máximo se incrementa con la disminución del valor del módulo. Ver Figura 7–6 (c).

Con base en las gráficas del perfil del terreno (Figuras 7–6(d-1) a la 7–6(d-3)), se observa que para módulos pequeños, el muro planteado es insuficiente para contener el suelo. Sin embargo, a medida que aumenta el módulo los desplazamientos son menores como ya se había dicho y el muro es más que suficiente.

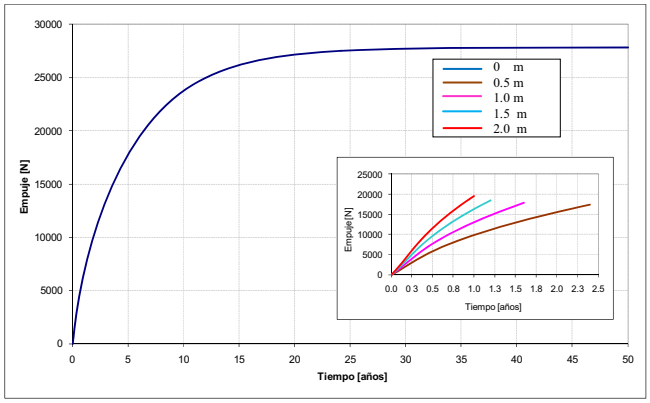
7.1.6 Caso 6: Influencia del nivel del agua subterránea



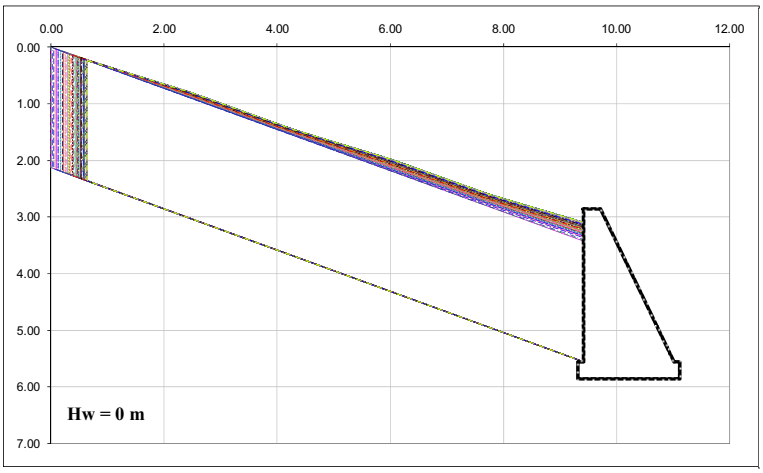
a)



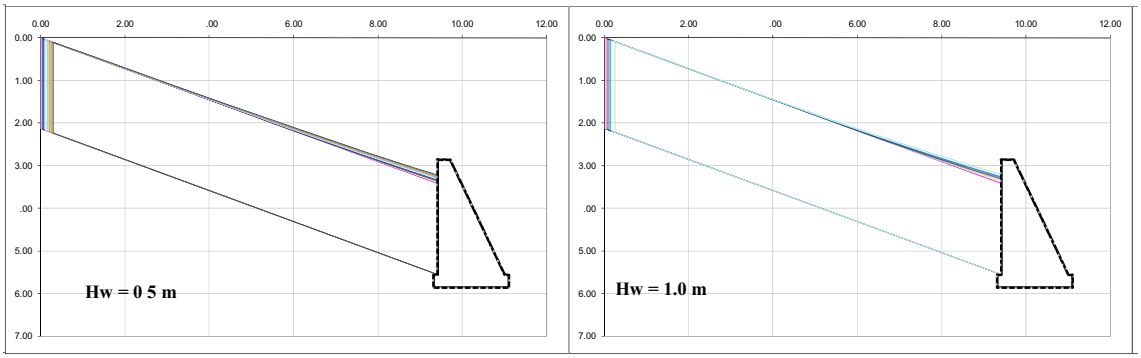
b)



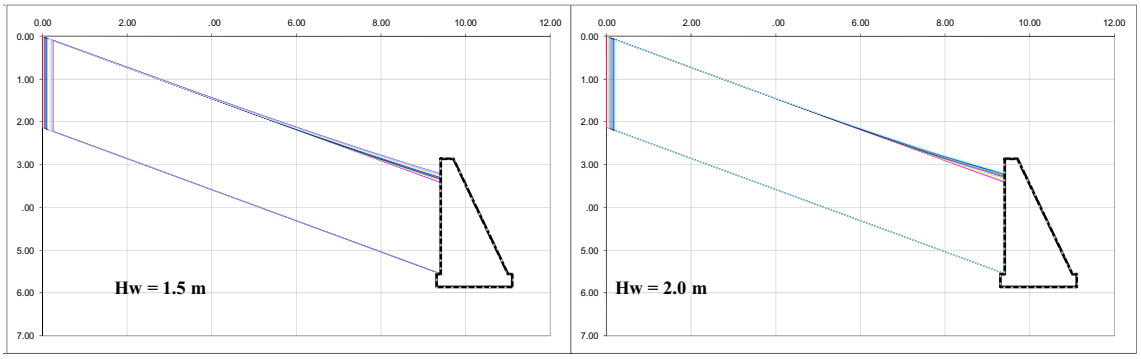
c)



d-1)



d-2) d-3)



d-4) d-5)

Figura 7–7. Influencia del nivel del agua subterránea. a) Desplazamiento; b) Velocidad; c) Empuje d) Perfil del terreno.

En la Figura 7–7 se muestra la influencia de la altura del agua subterránea sobre la respuesta en el movimiento de la masa deslizada. El nivel del agua en la masa del suelo produce que el suelo falle internamente, causando que el tiempo de análisis sea ahora el tiempo de falla. La presencia de agua en la masa del suelo hace que se movilice más rápidamente la resistencia al corte. Al aumentar el nivel del agua se incrementan las presiones de poros y se disminuye el esfuerzo efectivo, produciéndose la pérdida en la resistencia del suelo.

Se observa que el sistema no tiende a estabilizarse como ocurre en la condición seca, ni tampoco presenta un desplazamiento máximo. Sin embargo, se obtienen mayores desplazamientos a medida que se aumenta el nivel del agua para un mismo período, como era de esperarse. Ver Figura 7–7(a).

También se nota que la masa deslizada aumenta su velocidad a medida que se aumenta el nivel del agua, alcanzando un valor máximo, y cuando la masa empieza a desacelerar, el suelo falla internamente impidiendo que el sistema llegue a una condición estable. Ver Figura 7–7(b).

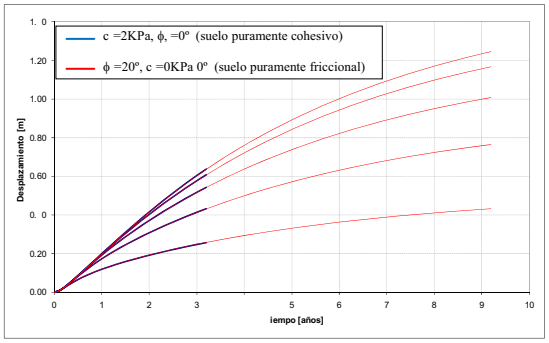
Se nota que no se presenta un empuje máximo pero, debido a la presencia del agua y al aumento en su nivel, se obtienen mayores valores del empuje para un mismo período. Es más, los valores encontrados corresponden casi al 70% del empuje máximo en la condición sin agua. Ver Figura 7–7(c).

En las gráficas del perfil del terreno, Figura 7–7(d-1) a la 7–7(d-5), se muestran que para la condición seca, la altura del suelo detrás del muro es mayor que en la condición saturada (Hw=2 m). Significando ello, no mayores valores de desplazamiento, sino mayor número de iteraciones del desplazamiento. Es decir, que mientras para la condición seca se hace un análisis de 50 años y se obtienen desplazamientos para este tiempo, el tiempo para la

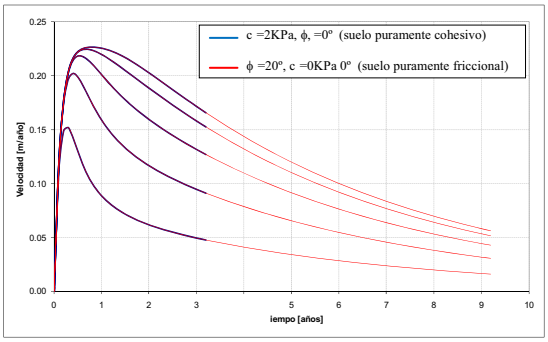
condición saturada apenas llega a ser de 1 año. Para los perfiles de terreno con presencia de agua, se observa que la altura del muro es más que suficiente para contener la masa.

Es importante destacar que en un análisis con agua, el parámetro más importante a tener en cuenta es el empuje al cual está sometido el muro (más que la cinemática del movimiento). De hecho, en las gráficas del perfil del terreno se observa que el muro es más que suficiente para contener la masa en movimiento; sin embargo, el empuje del suelo sobre el muro es mucho mayor que en la condición seca. No obstante, es importante determinar la cinemática debido a que la masa de todas formas se desplaza en el tiempo.

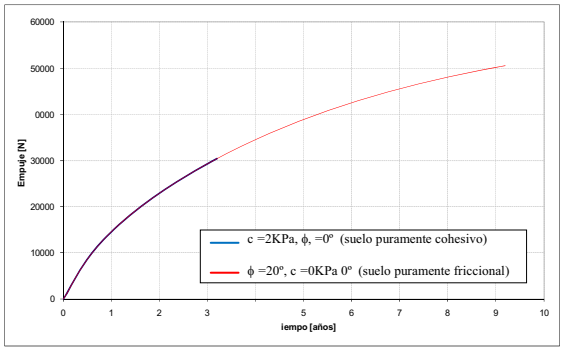
7.1.7 Caso 7: Influencia de los parámetros de resistencia del suelo



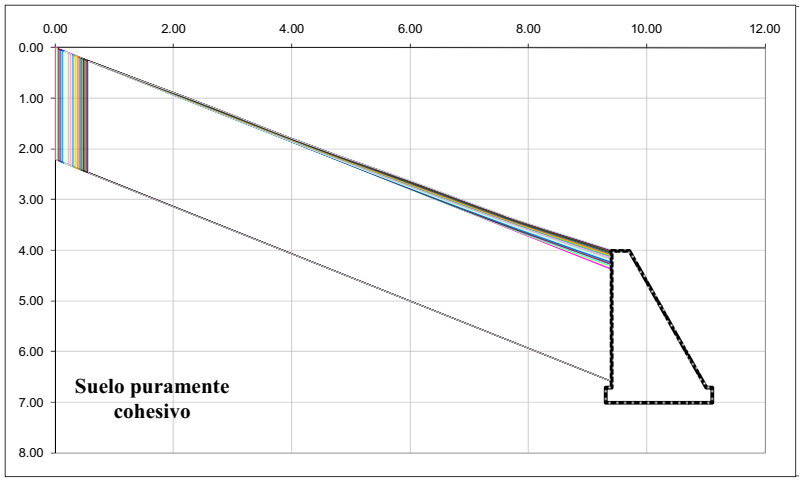
a)



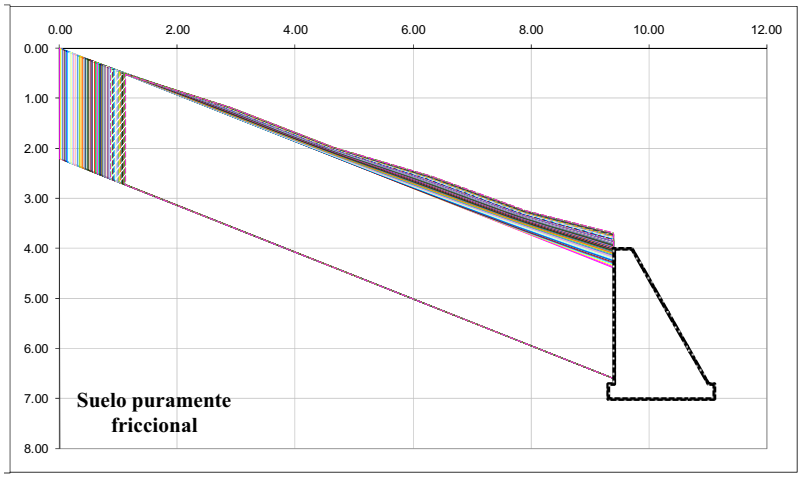
b)



c)



d-1)



d-2)

Figura 7–8. Influencia de los parámetros de resistencia del suelo. a) Desplazamiento; b) Velocidad; c) Empuje d) Perfil del terreno.

De acuerdo con la Figura 7–8, se observa que la variación en los parámetros de resistencia del suelo influye, obviamente, en el desarrollo de la falla interna y por lo tanto en el tiempo de falla.

En la Tabla 7–2 se hace un resumen de la variación de los parámetros en el movimiento de la masa de suelo deslizada.

Parámetro	Descripción	
	Disminuye	**Aumenta**
Ángulo de inclinación del talud	* El valor de los desplazamientos es menor. * El cambio de dirección del movimiento (v=0) ocurre en periodos cortos de tiempo. La tendencia del movimiento con el tiempo es uniforme. * Inicialmente la velocidad aumenta en un corto tiempo hasta alcanzar un valor máximo, luego disminuye suavemente en un periodo más largo hasta que la masa tiene a desarrollar una velocidad constante. * La velocidad máxima es menor. * No se desarrolla un empuje máximo para el tiempo de análisis, puesto que se observa que para tiempos superiores la tendencia es a que el valor se incremente. El valor del empuje disminuye.	* Los valores de los desplazamientos aumentan considerablemente. * Inicialmente la velocidad aumenta en un periodo corto hasta alcanzar un valor máximo, a partir de allí la velocidad disminuye abruptamente. * La velocidad máxima aumenta en gran medida. * Debido a que el tiempo de análisis es el tiempo de falla del suelo, el valor del empuje no corresponde al valor máximo; no obstante el empuje aumenta en gran proporción.
Viscosidad	* Los desplazamientos aumentan. * El cambio de dirección del movimiento ocurre en los primeros años, luego el movimiento es uniforme. * Inicialmente la velocidad aumenta en corto tiempo hasta alcanzar un valor máximo, después disminuye de una manera abrupta, también en un corto tiempo, hasta que la masa se detiene. * La velocidad máxima es mayor. * El empuje detrás del muro alcanza su valor máximo en tiempos muy cortos permaneciendo constante con el tiempo.	* El valor de los desplazamientos disminuye. * El cambio de dirección del movimiento ocurre en periodos largos de tiempo. A partir de allí se observa una tendencia a que el movimiento sea uniforme. * Inicialmente la velocidad aumenta en un corto tiempo hasta alcanzar un valor máximo, luego disminuye suavemente en un periodo más largo hasta que la masa tiene a desarrollar una velocidad constante. * La velocidad máxima es menor. * El empuje máximo detrás del muro se desarrolla para tiempos mayores observándose una tendencia a ser constante.
Módulo de rigidez	* Los desplazamientos aumentan en gran manera. * La velocidad aumenta en un corto tiempo hasta alcanzar un valor máximo, a partir de allí la velocidad disminuye muy suavemente. * El valor máximo de la velocidad aumenta levemente. * No se desarrolla un empuje máximo para el tiempo de análisis, puesto que se observa que para tiempos superiores la tendencia es a incrementarse.	* Los desplazamientos disminuyen considerablemente. * El cambio de dirección del movimiento ocurre en periodos muy cortos, después el movimiento se vuelve uniforme. * La velocidad aumenta en periodos muy cortos alcanzando valores máximos, luego disminuye de manera escabrosa, en un periodo muy corto, hasta que la masa se detiene. * La velocidad máxima disminuye un poco. * El empuje detrás del muro alcanza su valor máximo en tiempos muy cortos permaneciendo constante con el tiempo.
Talud sumergido	* Los valores de los desplazamientos aumentan. * El cambio de dirección del movimiento no se alcanza a desarrollar debido a que el análisis llega hasta el tiempo en que el suelo falla. * El tiempo en que el suelo falla es mucho menor que para la condición seca. * La velocidad aumenta en periodos muy cortos alcanzando valores máximos, luego disminuye rápidamente hasta unas velocidades correspondientes al tiempo de falla. * La velocidad máxima aumenta en gran medida. * Debido a que el tiempo de análisis es el tiempo de falla del suelo, el valor del empuje no corresponde al valor máximo; no obstante el empuje aumenta en gran proporción.	
Suelo puramente cohesivo	Las características del movimiento son iguales que para suelo puramente friccional (talud típico), la diferencia radica en el tiempo en que se presenta la falla del suelo. Para un suelo cohesivo la falla del suelo se produce de una manera más rápida que en un suelo puramente friccional.	

Tabla 7–2. Resumen del la variación de los parámetros.

7.2 Ejercicio de aplicación

Considerando la ladera que se muestra a continuación, se quiere determinar la longitud de separación óptima entre muros que garantice que el material retenido no rebose para un tiempo de diseño de 50 años. También se necesita determinar el empuje para el cual estará sometido el muro de gravedad. El talud está en condición seca.

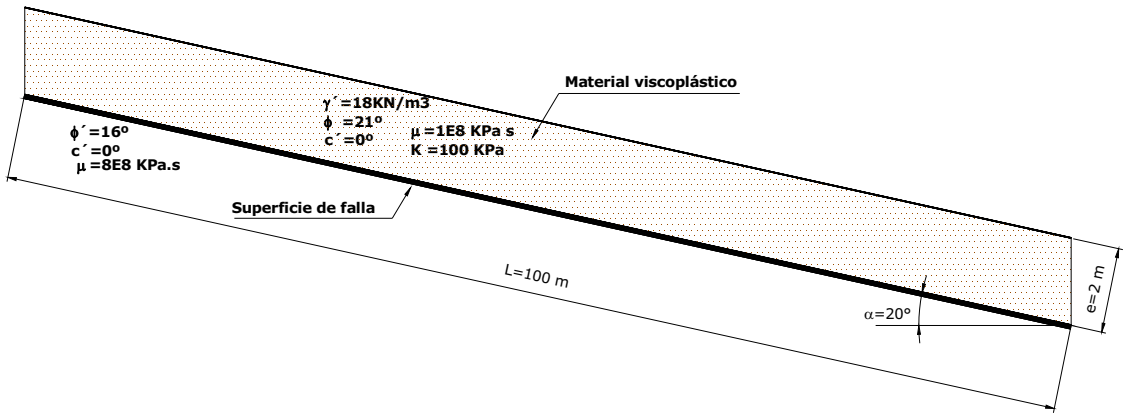


Figura 7–9. Esquema de la ladera natural.

7.2.1 Cálculo con el programa GeoCtVp

Con el fin de determinar la longitud óptima se corre el programa GeoCtVp para longitudes de separación entre muros de 5, 10, 20, 30 y 40 m. Para cada una de las longitudes se obtiene un archivo en donde se calcula la altura de la tajada que limita con el muro y a partir de allí se determina cual de las alturas es inferior a la altura del muro seleccionado.

Los datos de entrada del programa se muestran en seguida:

Inclinación superficie de falla	°	20
Inclinación superficie de terreno	°	20
Espesor de la masa	m	2
Peso unitario	KN/m3	18
Cohesión efectiva suelo	Kpa	0
Ángulo de fricción efectiva suelo	°	21
Módulo de rigidez	KPa	100
Viscosidad suelo	Kpa.s	1E+8
Ángulo fricción efectiva superficie falla	°	16
Viscosidad superficie falla	Kpa.s	8E+8
Nivel freático	m	0
Longitud de separación*	m	5
Número de tajadas	un	5
Tiempo	años	50
Paso del tiempo	años	0.1
Velocidad inicial	m/años	0
Desplazamiento inicial	m	0

Tabla 7–3. Datos de entrada del programa.

B	m	1.8	c	m	0.1
H	m	3	d	m	0.1
a	m	0.3	h	m	2.7
b	m	1.3	t	m	0.3

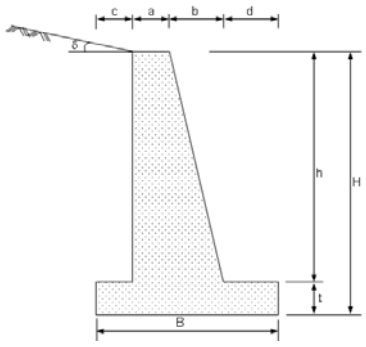


Figura 7–10. Muro de análisis.

Después de ejecutar el programa para cada una de las longitudes se obtienen los siguientes datos de salida.

Longitud de separación: 5 m

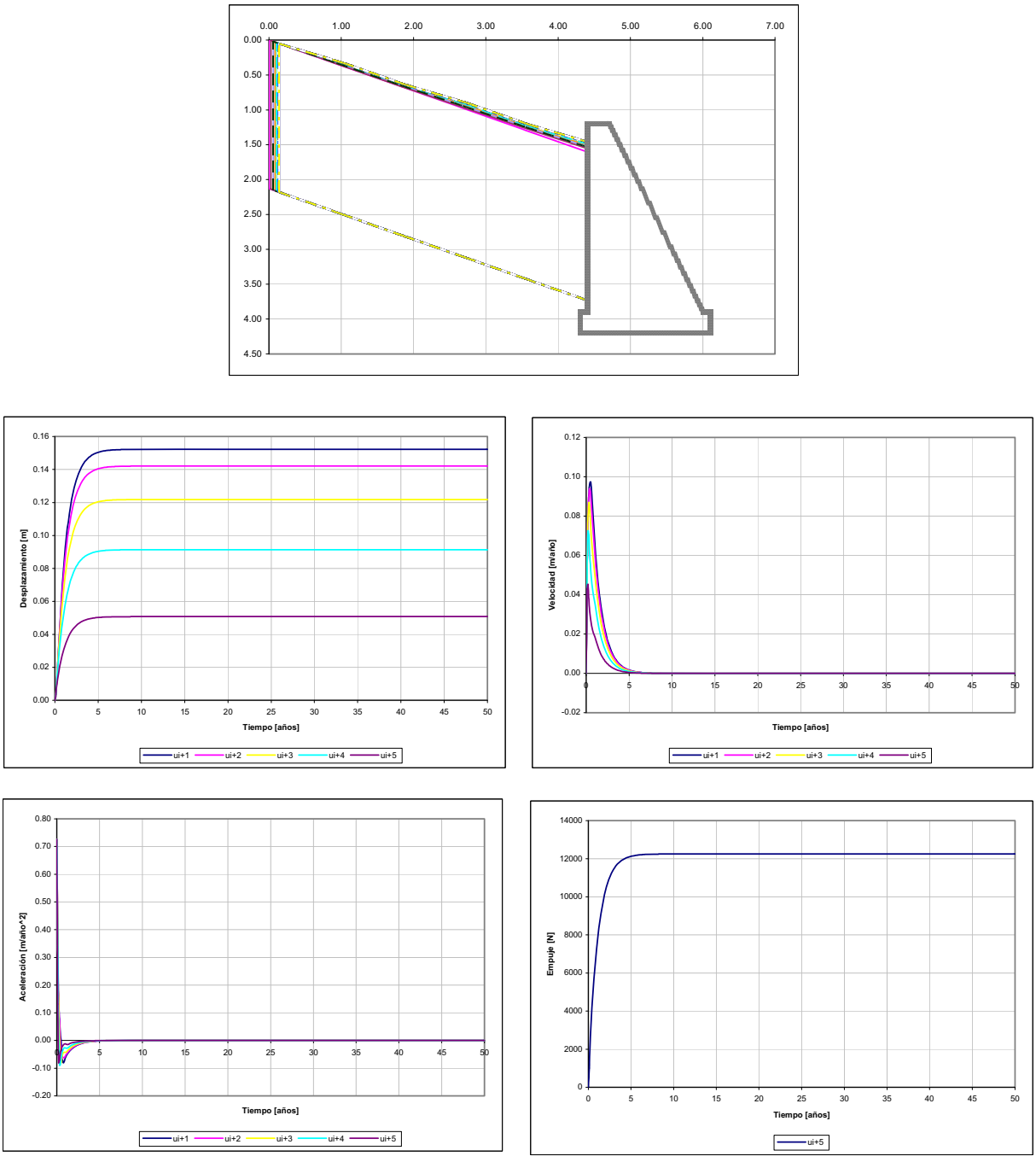


Figura 7–11. Gráficas de salida de GeoCtVp, L=5 m.