Estabilización de una ladera en el tramo Vic-Fontfreda del Eix Transversal

Benjamín CELADA TAMAMES. GEOCONTROL, S.A.
José Miguel GALERA FERNÁNDEZ. GEOCONTROL, S.A.

Palabras clave: ANÁLISIS RETROSPECTIVO, CARACTERIZACIÓN, DEFORMACIÓN, DESMONTE, ESTABILIZACIÓN, TALUD, TERRENO.

Durante la construcción de un desmonte de gran altura, unos 45 m, se produjo una afección a la ladera circundante, produciéndose una inestabilidad cuantificada en unos 686.500 m^3. Para su estudio se instalaron trece inclinómetros realizándose diversos ensayos in situ, sondeos adicionales y ensayos de laboratorio, que permitieron elaborar un análisis retrospectivo, empleando métodos numéricos. Este análisis permitió cuantificar el problema y abordar el dimensionado de tres diferentes alternativas de estabilización existente. Tras una comparación técnica y económica de las soluciones propuestas, se incluye en el artículo la definición de la solución seleccionada y su puesta en ejecución en obra. Dos años después la solución escogida se ha mostrado eficaz y válida.
Este artículo se ha presentado como ponencia en el II Congreso Andaluz de la Carretera.

La empresa pública de la Generalidad de Cataluña, *Gestió d'Infraestructures, S.A.* (GISA) se ha encargado de la construcción de la mayor parte del denominado *Eix Transversal de Cataluña* que une las ciudades de Lleida y Girona.

Dentro del tramo Vic-Fontfreda estaba pendiente la realización de un desmonte con una pendiente 1:1 en terrenos constituidos, desde la base a la coronación del talud, por las conocidas *margas de Igualada*, argilitas y areniscas.

La excavación del talud finalizó en el mes de mayo de 1996, y un mes después aparecieron las primeras grietas en el contacto entre las argillitas y las margas, situados hacia la parte baja del talud.

En el mes de julio de ese año se instalaron cuatro inclinómetros de control y a finales de agosto se agudizó la rotura del talud, registrándose velocidades de desplazamiento del terreno de 1 cm/día.

En octubre de 1996 se inició el retaluzado del talud, en la parte constituida por argilitas, con una pendiente 2(H):1(V). La parte en margas se mantuvo con la pendiente inicial de 1:1.

En el mes de diciembre de 1996 aparecieron nuevas grietas en las argilitas; esta vez próximas al afloramiento de las areniscas en la coronación de la ladera, y en el mes de febrero de 1997, se instalaron tres nuevos inclinómetros. En el mes de marzo de 1997 se produjo el colapso generalizado del talud y ladera, se instalaron seis nuevos inclinómetros y *Gisa* encargó a un grupo de tres ingenierías (la redactora del proyecto, *Geocontrol* y otra tercera) el estudio del problema y la propuesta, por separado, de las soluciones a adoptar.

Panorámica hacia el oeste de la zona entre bermas.

En el mes de mayo de 1997, *Geocontrol* presentó un análisis retrospectivo de la inestabilidad producida y, en junio de ese mismo año, tres posibles soluciones para afrontar el problema.

Tras estudiar las propuestas realizadas por las tres ingenierías que estudiaron el problema, *Gisa* decidió adaptar una de las soluciones propuestas por *Geocontrol*, coincidente con el equipo redactor, con la que se resolvió el problema planteado.

Análisis del problema

Para analizar la situación creada, se realizó una cartografía geotécnica del talud, acompañada de una caracterización de los terrenos y un análisis retrospectivo mediante cálculo tensodeformacional.

Caracterización del terreno

Para organizar la información disponible, se realizó una cartografía geotécnica ***(Fig. 1)*** y morfológica de la ladera a escala 1:500.

A partir de dicha cartografía y de la información suministrada por los trece sondeos perforados, se confeccionó un perfil representativo de la rotura donde se apreciaba que la ladera presenta una suave disposición estructural, unos 10°, a favor de la pendiente y está formada por una sucesión de:

- Margas azules.
- Argilitas marrones con areniscas y yeso.
- Margas arcillosas grises, con niveles de argilita marrón blanda.
- Areniscas.

El nivel freático que, de acuerdo con signos visibles sufre fuertes oscilaciones, se encontraba a unos 20 m de profundidad. La inestabilidad afectó a un frente de unos 300 m con un desarrollo a favor de la pendiente de 200 m hasta el pié del escarpe, formado por las areniscas; teniendo un espesor comprendido entre 9 y 14 m.

Los movimientos registrados topográficamente alcanzarán los cinco metros en determinados lugares, inutilizando alguno de los inclinómetros instalados.

Tras el colapso producido en marzo de 1997, los inclinómetros siguieron registrando velocidades comprendidas entre 2 y 11 mm/día.

Como resultado de los trabajos de laboratorio, se disponía de los datos que se presentan en la ***Tabla I***.

Complementariamente se realizaron, en tres sondeos específicos, diez ensayos presiométricos; tres en margas y siete en las argilitas marrones. Estos ensayos permitieron conocer que el módulo de elasticidad medio para las argilitas era de 513 kp/cm^2 y de 5.863 kp/cm^2 para las margas.

Finalmente, se hicieron cinco ensayos de corte directo, en condiciones drenadas, con sendas muestras de margas y otros tantos con muestras de argilitas. De estos ensayos de corte se obtuvieron los parámetros que se presentan en la ***Tabla II***. y que complementan a los presentados en el cuadro anterior.

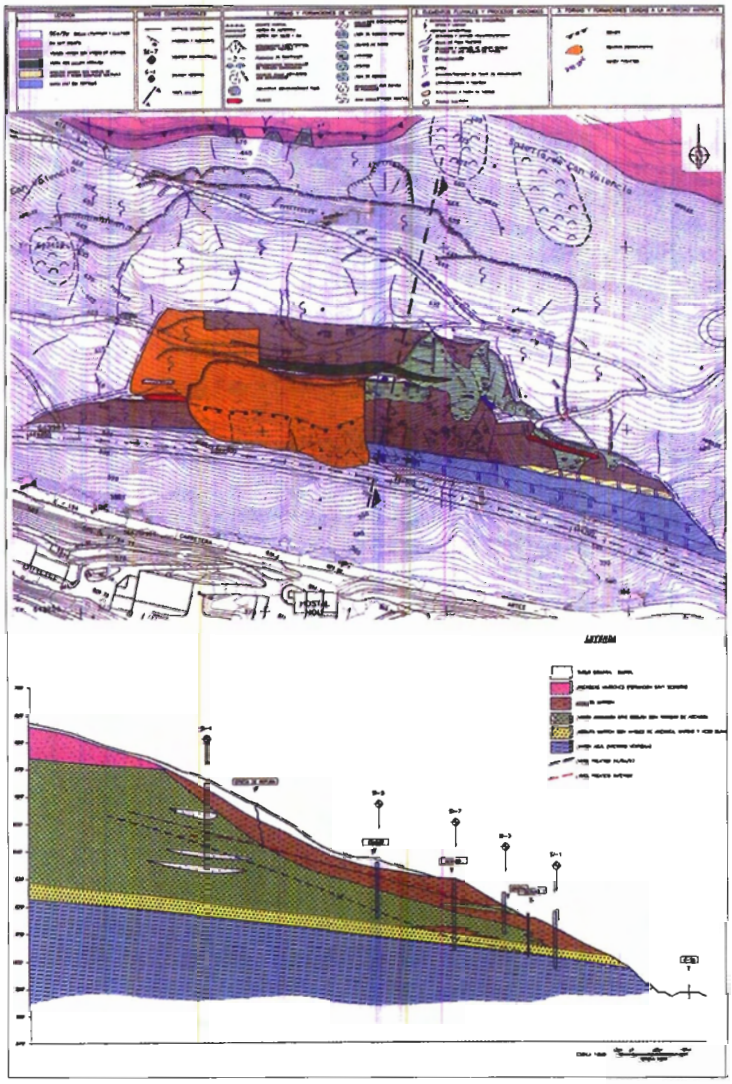

Fig. 1.- Geología y geotecnia de la ladera del Hostal Nou.

Análisis retrospectivo

Para poder abordar con precisión el diseño de la solución para estabilizar el talud, se consideró imprescindible conocer el mecanismo real de la rotura del talud y los parámetros geotécnicos que gobernaban esta situación. Para ello se realizó un análisis retrospectivo, mediante cálculos tensodeformacionales, de acuerdo con lo que se presenta en los siguientes apartados.

Situaciones a modelizar

De acuerdo con la información disponible, se consideró que se debían modelizar las tres situaciones del talud siguiente:

Litología	Resistencia de pico		Resitencia Residual	
	C (kp/cm^2)	ϕ_p(°)	C (kp/cm^2)	ϕ_r(°)
Argilitas marrones	0,75	28	0,15*	16
Margas grises	--	--	0,17*	20

* Cohesión aparente (intersección ajuste lineal con el eje de ordenadas).

TABLA I.- Datos previos sobre las características del terreno.

Litotipo	ϕ'p	Deformación unitaria (%)		
		Pico	Tránsito pico-residual	Inicio situación residual
Argilitas	18,7	5,8	7,8	10,5
Margas	36	5,1	1,2	4,6

TABLA II.- Resultados de los ensayos de corte directo.

1)Talud excavado con una inclinación 1(H):1(V) con la posición del nivel freático sin afectar a las argilitas; situación estimada para el mes de abril de 1997. En esta situación el talud debía resultar estable; tal como sucedió al realizar la excavación.

2)Situación similar a la anterior pero con un acceso del nivel freático afectando el tercio inferior de la masa de argilitas. En esta situación, el talud debía resultar inestable en la parte inferior de las argilitas.

3)Talud realizado al 2(H):1(V) en las argilitas aumentando el nivel freático respecto al de la situación anterior. En estas circunstancias se debía producir una inestabilidad general de la masa de argilitas.

Metodología utilizada

Para estudiar el análisis retrospectivo, se confeccionó el modelo geomecánico de elemento finitos, ***(Fig. 2)***, que incluía los materiales afectados por la inestabilidad de la ladera.

El modelo geomecánico ha sido resuelto por el programa ***FLAC 3.3***, trabajando en elasto-plasticidad con un modelo constitutivo de *Mohr-Coulomb* para las areniscas, las margas azules de base y la transción argilita-arenisca-yeso.

Para las argilitas marrones y las margas grises, se ha utilizado un modelo constitutivo, tipo *Strain-Softening*. En este modelo se asume la cohesión y la fricción del material en función de la deformación unitaria que se produce. Por ello, una vez definida la ley de variación de la cohesión y de la fricción en función de la deformación unitaria, el programa en cada paso de cálculo asigna a cada elemento del modelo el valor de la cohesión y fricción que le corresponde según la deformación unitaria calculada.

Terreno	Modelo constitutivo	D t/m³	E (kp/cm²)	ν	ϕ(º)			C (kp/cm²)		ε(%)	
					PICO	INT.	RES.	PICO	INT.	PICO	RES.
Areniscas	Mohr-Coulomb	2,58	25.110	0,2	53	-	-	7,4	-	-	-
Argilitas	Strain-Softening	2,15	485	0,35	19	17	16	0,7	0,2	1,8	10,5
Margas	Strain-Softening	2,34	3.200	0,3	28	24	20	1,5	0,15	1,2	4,6
Transición de argilitas y yesos	Mohr-Coulomb	2,50	4.800	0,25	33	-	-	2,4	-	-	-
Margas azules de base	Mohr-Coulomb	2,60	6.480	0,25	35	-	-	3,4	-	-	-

TABLA III.- Propiedades geotécnicas de partida.

En la ***Tabla III*** se presentan las propiedades geotécnicas de los materiales que se tomaron como base de partida para el análisis retrospectivo.

Resultados obtenidos

El análisis retrospectivo realizado ha supuesto la resolución de veinte casos diferentes, variando en cada uno los parámetros geotécnicos de partida, y ha concluido con la definición de los parámetros geotécnicos de las argilitas que mejor representan el comportamiento del talud en los tres casos analizados. Estos parámetros han sido:

- Módulo de elasticidad: 365 kp/cm².
- Cohesión de pico: 0,05 Mpa.
- Fricción de pico: 18º.
- Deformación unitaria en el tránsito pico/intermedio: 0,5%.
- Cohesión intermedia: 0,1 kp/cm².
- Fricción intermedia: 17º.
- Deformación unitaria en el tránsito intermedio/residual: 10%.

En los apartados siguientes se comentan los resultados obtenidos en los cálculos y las conclusiones referentes al mecanismo de rotura del talud.

- **Talud con inclinación 1(H):1(V) y nivel freático bajo**

En este caso, la magnitud de los desplazamientos horizontales es de orden milimétrico; lo cual corresponde con la descompresión elástica debida a la excavación y supone una situación de estabilidad.

En la ***Fig. 3***, se muestra la distribución del ángulo de fricción de las argilitas en los cálculos finales de esta etapa. En ella se apre-

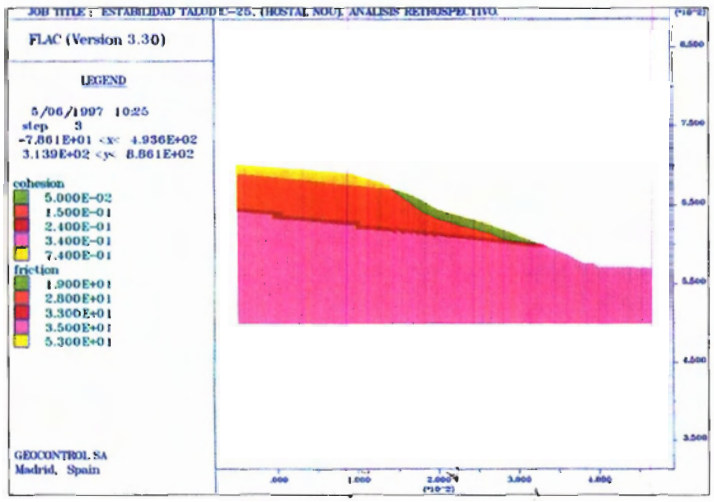

Fig. 2.- Modelo geomecánico.

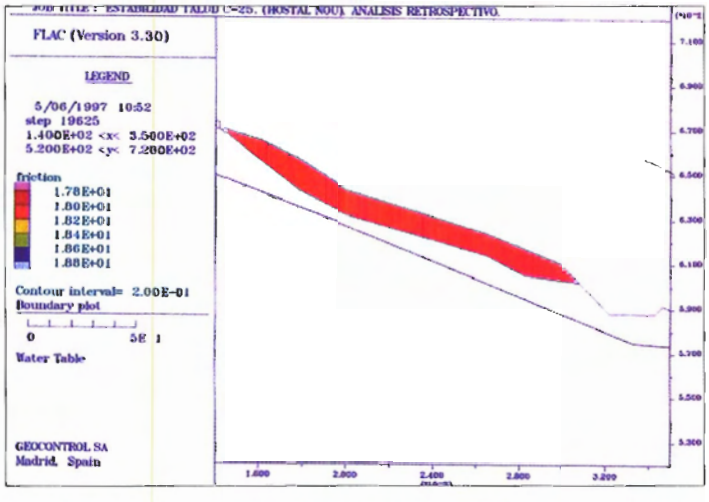

Fig. 3.- Angulos de fricción de las argilitas con el talud 1(H):1(V) y nivel freático bajo.

cia, como corresponde a una situación de estabilidad, que todos los elementos del modelo correspondientes a las argilitas están en condiciones de pico, con un ángulo de fricción de 18°.

- **Talud con inclinación 1(H):1(V) y nivel freático alto**

Al subir el nivel freático y afectar al tercio inferior del talud formado por argilitas, se desarrolla un núcleo de estabilidad en la parte inferior del talud, que se caracteriza por desplazamientos horizontales de magnitud decimétrica.

Esta tipología de desplazamientos parece que concuerda muy bien con la inestabilidad producida en el talud en junio de 1996.

En la ***Fig. 4***, se aprecia que la mayor parte de las argilitas siguen estando en condiciones de pico, con $\phi' = 18°$; pero en el contacto de las margas y hasta alcanzar el nivel freático las argilitas han pasado a situación residual creando una superficie de rotura que hace posible la inestabilidad del talud.

- **Talud con inclinación 2(H):1(V) y nivel freático alto**

A pesar de retaluzar el talud pasando de una inclinación 1(H):1(V) a otra de 2(H):1(V), si el nivel freático continúa subiendo, se produce un colapso generalizado del talud, que no alcanza una situación de equilibrio, con desplazamientos de orden métrico.

En la ***Fig. 5***, se muestra la distribución de los desplazamientos horizontales al final de los cálculos realizados en esta fase que, sin llegar a la estabilización del modelo, alcanzan cinco metros de movimiento en la parte inferior del talud.

En la ***Fig.6***, puede apreciarse que se ha generado una superficie de rotura en toda la base de las argilitas en contacto con las margas. En ella, las argilitas están en condiciones residuales.

Incluso en la masa de las argilitas aparecen superfícies de rotura que concuerdan muy bien con la distribución de las grietas observadas *in situ* al hacer la cartografía, referida en la caracterización del terreno.

- **Conclusiones obtenidas en el análisis retrospectivo**

A partir de los resultados obtenidos en el análisis retrospectivo que se ha realizado, se llega a la conclusión de que la inestabilidad del talud objeto de ete trabajo se ha producido básicamente mediante un *proceso de rotura progresiva* de tal forma que al ir movilizándose las zonas más inestables del talud, las argilitas han ido pasando de condiciones de pico a condiciones residuales.

Muy probablemente el ascenso del nivel freático dentro del talud ha actuado como un acelerador que ha activado el paso de las condiciones de pico a las de residual generando la inestabilidad.

Hay que tener muy presente que una vez que las argilitas pasan condiciones residuales, su movimiento no se detendrá hasta que

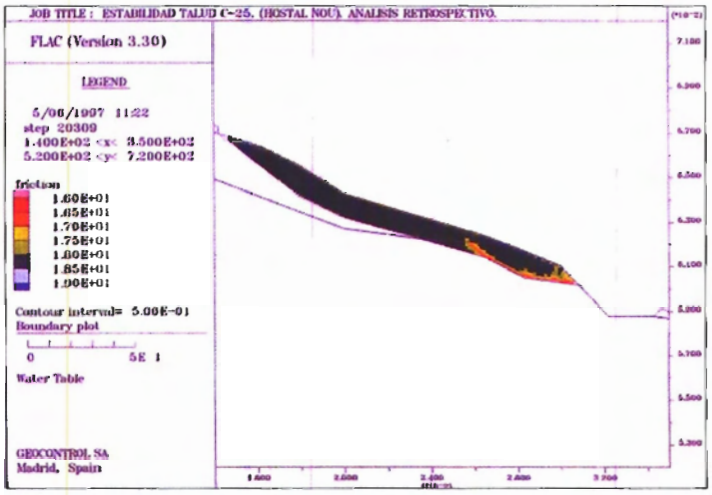

Fig. 4.- Angulos de fricción de las argilitas con el talud 1(H):1(V) y nivel freático alto.

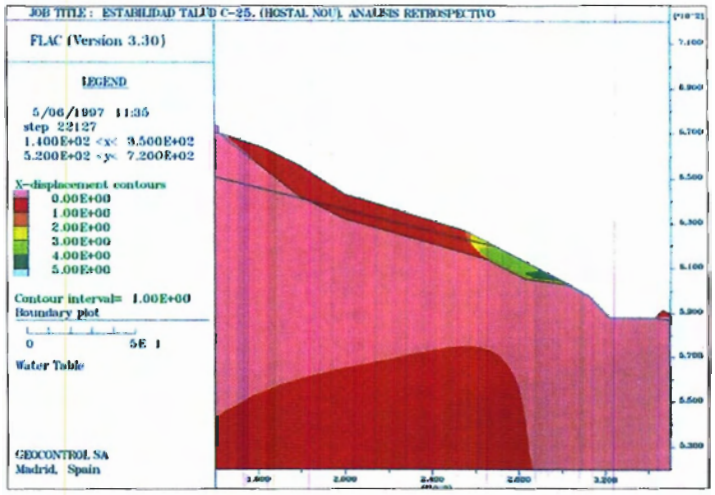

Fig. 5.- Desplazamientos horizontales del talud 2(H):1(V) con nivel freático alto.

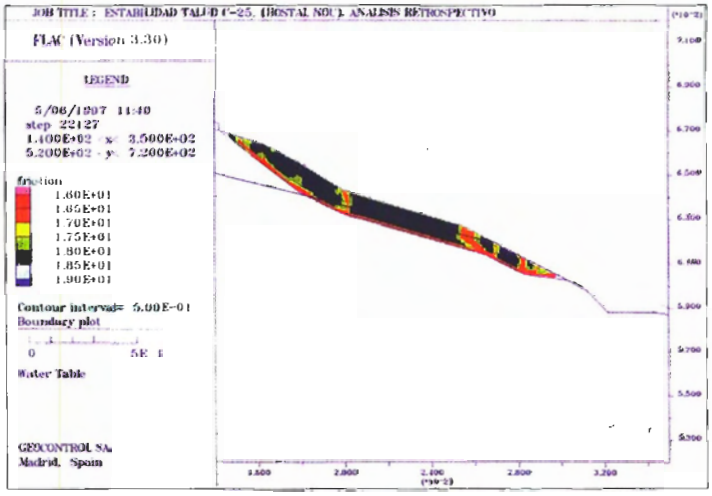

Fig. 6.- Angulos de fricción de las argilitas del talud 2(H):1(V) con nivel freático alto.

ocupen un espacio con una inclinación inferior a 10º, aunque se consiga hacer descender el nivel freático.

Soluciones propuestas

Dado que, tras el retaluzado realizado, una buena parte de las argilitas están en condiciones residuales y que la pendiente, obtenida tras el retaluzado, es de unos 26º, resulta que no se podrá obtener la estabilización de la ladera si no se rebaja su pendiente hasta que su pendiente sea inferior a 16º.

De acuerdo con esta conclusión, se propusieron a *Gisa*, las tres soluciones que se describen en los apartados siguientes.

Retaluzado de las argilitas en la parte alta de la ladera (Solución A)

Esta solución pretende eliminar las argilitas en la parte alta de la ladera, que es donde al ser la pendiente mayor se han producido los movimientos más importantes. En la parte baja del talud se mantienen las argilitas, pero retaluzándolas a 15º.

La puesta en práctica de esta solución exige la construcción de un muro de contención en la parte baja del talud; tal como se ilustra en la ***Fig. 7.***

Para analizar la viabilidad de esta solución, se ha confeccionado el modelo de elementos finitos. Una vez realizados los cálculos correpondientes, en la ***Fig. 8*** se muestra la distribución de los vectores de desplazamiento del terreno. En ella puede apreciarse que el máximo movimiento es de 5,2 cm, que es perfectamente asumible.

Los cálculos realizados han permitido evaluar las solicitaciones sobre el muro de contención y los anclajes, que resultan ser:

- Axil sobre el muro: 83,2 t/m.
- Flector sobre el muro: 113 m.t.
- Axil sobre los anclajes: 45 t.

Minimización del movimiento de tierras (Solución B)

El propósito de esta solución se concreta en conseguir el mínimo movimiento de tierras que sea compatible con la estabilización de la ladera.

Para ello, tal como se indica en la ***Fig. 9***,

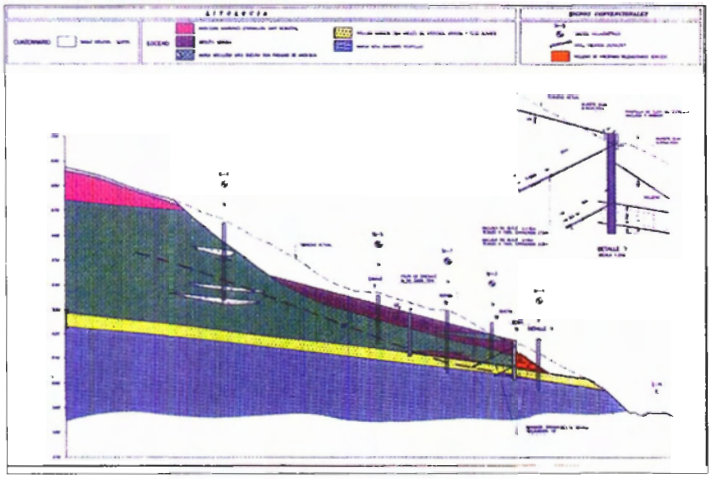

Fig. 7.- Desmonte de las argilitas en la parte alta de la ladera.

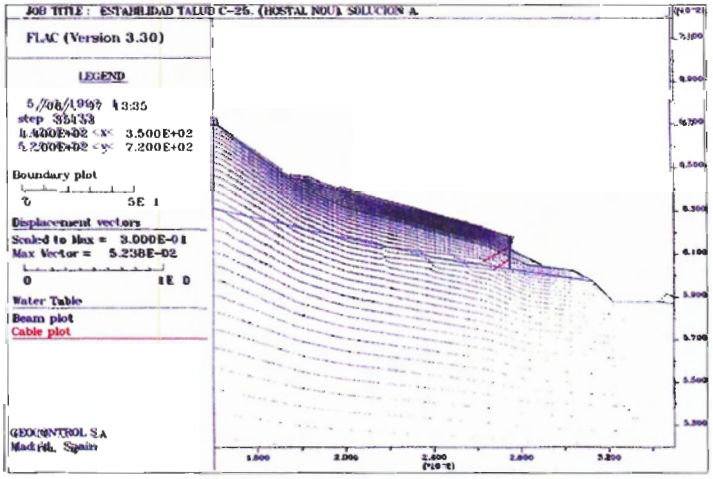

Fig. 8.- Distribución de los vectores desplazamiento al estabilizar el talud con la solución A.

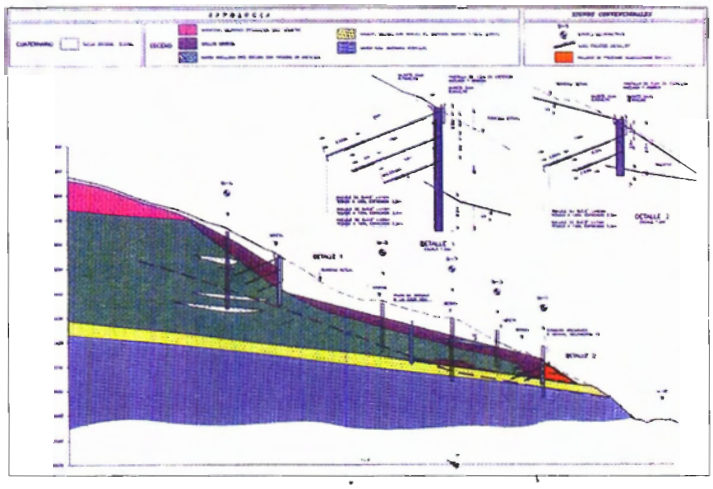

Fig. 9.- Solución B: minimización del movimiento de tierras.

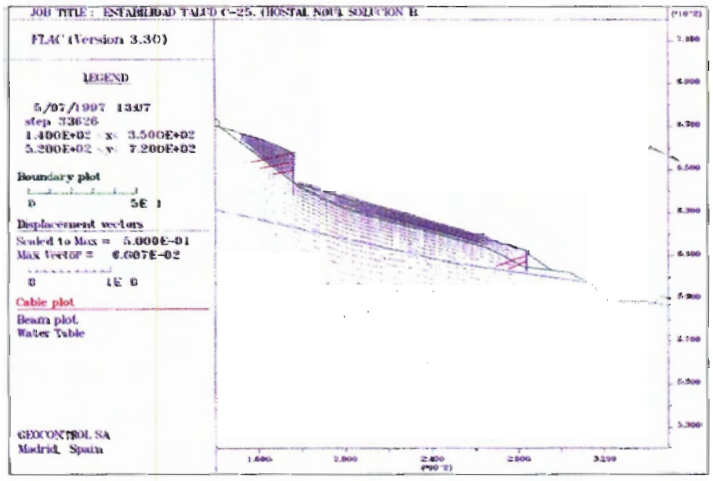

Fig. 10.- Distribución de los vectores desplazamiento al estabilizar el talud con la solución B.

se ha previsto la construcción de dos muros anclados para contener las argilitas que serían retaluzadas a 15°.

Al igual que en el análisis de la *Solución A*, en este caso se ha confeccionado el modelo de elementos finitos. En la ***Fig. 10,*** se muestra la distribución de los vectores, desplazamiento, una vez que se ha alcanzado la estabilización con la *Solución B*. En ella puede apreciarse que el máximo valor del desplazamiento que se produce es de 6,6 cm que, al igual que en la *Solución A*, es totalmente asumible.

Por lo que se refiere a las solicitaciones sobre los elementos de anclaje y contención, los cálculos realizados, han permitido obtener los siguientes valores:

- Muro inferior:
  - Momento flector: 233 mt.
  - Axil: 78,5 t/m.
- Muro superior:
  - Momento flector: 186 mt.
  - Axil: 31,69 t/m.
- Anclajes:
  - Axil: 35 t/m.

Eliminación total de las argilitas (Solución C)

En la *Solución C* se propone la solución más radical, al eliminar totalmente las argilitas de la ladera inestable, lo cual supone realizar un movimiento de tierras de unos 686.500 m³.

En la ***Fig. 11*** se presenta esta solución que supone eliminar las argilitas del talud: dejándolo con una pendiente de 15° en la parte baja y con tres bancos de inclinación 1(H):1(V), con dos bermas de 3 m en las margas de la parte superior del talud.

Al igual que en los casos anteriores, se ha realizado un modelo de elementos finitos para estudiar la estabilidad de esta solución. Una vez resuelto el modelo, se ha obtenido la distribución de los vectores desplazamiento, que se muestra en la ***Fig. 12***. En ella puede apreciarse que el máximo desplazamiento es de 4 cm, que es totalmente asumible.

Solución adoptada

Para seleccionar la solución que debía ponerse en práctica, se realizó el correspondiente estudio económico, con los resultados que muestra la ***Tabla IV***.

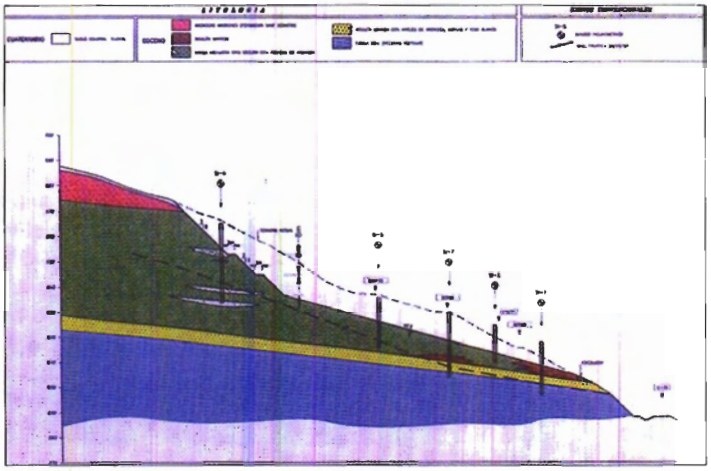

Fig. 11.- Solución C: eliminación de las argilitas.

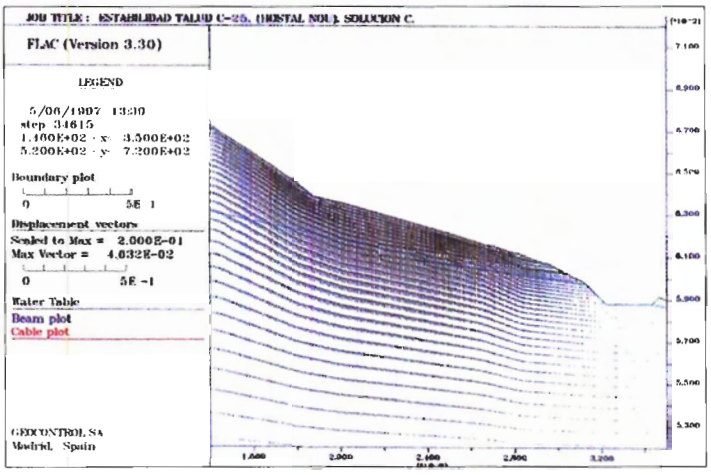

Fig. 12.- Distribución de los vectores desplazamiento al poner en práctica la Solución C.

Concepto	Precio unitario	Solución A		Solución B		Solución C	
		Medición	PTA	Medición	PTA	Medición	PTA
Momimiento de tierras (PTA/m³)	500	626 m³	313.000	617,5	308.750	1.436	718.000
Puesta a disposición del equipo para la construcción de pantallas (PTA/Ud)	2.500	1	2.500	1	2.500	-	-
Pantalla de 1,2 m de espesor (PTA/m²)	22.500	16	360.000	29	652.500	-	-
Muretes guía en la cara oculta (PTA/ml)	7.600	1	7.600	2	15.200	-	-
Muretes guía en la cara vista (PTA/ml)	18.400	1	18.400	2	36.800	-	-
Anclaje de 100 t (PTA/ml)	11.000	9,2	101.200	27,0	297.000	-	-
Relleno con material de préstamo (PTA/m³)	700	73	51.100	73	51.100	-	-
Muro de escollera (PTA/m³)	3.800	-	-	-	-	9,0	34.200
Coste por metro lineal (PTA)	-	-	853.800	-	1.363.850	-	752.200

Tabla IV.- Comparación económica entre las alternativas planteadas.

El coste de la *Solución B* era claramente superior al de las otras dos, por lo que fue inicialmente rechazada.

La *Solución C* es la más económica; aunque, a priori, la diferencia en coste por metro lineal con la *Solución A*, sólo era de 101.600 PTA, lo que para 250 metros lineales de talud a reparar, suponía unos 26,4 MPTA.

Por otro lado, la *Solución C* es mucho menos arriesgada que la *Solución A*; tanto desde el punto de vista de su ejecución como de la garantía de funcionamiento a largo plazo. Esto es debido a que la construcción del muro de pantallas anclado es, evidentemente, mucho más complejo que el simple desmonte necesario en la *Solución C*.

Por todo lo anterior fue escogida la *Solución C* para estabilizar este talud; obteniéndose con su aplicación unos resultados excelentes.

Aspecto del talud del Hostal Nou, en noviembre de 1999.

Conclusiones

De las tres soluciones planteadas se escogió la denominada *Solución C* que consiste en un retaluzado del talud y parte de la ladera inestable. Tanto a corto plazo, como posteriormente, los resultados han confirmado la bondad del diseño adoptado.