

EXPERIENCIAS CON TALUDES DE GRAN ALTURA EN GRANITO MUY ALTERADO

BORRÁS GABARRÓ, Xavier. Gisa.
CODONY SALCEDO, José M^a. Gisa.
CELADA TAMAMES, Benjamín. Geocontrol, S.A.
GALERA FERNÁNDEZ, José Miguel. Geocontrol, S.A.

RESUMEN

En este trabajo se presentan las experiencias habidas y las conclusiones que se han obtenido durante la construcción de 48 taludes, todos de más de 15 m y alguno de más de 50 m, excavados en granito muy alterado (sauló) en el EIX TRANSVERSAL de CATALUNYA entre S. Julià de Vilatorca y St^a. Coloma de Farners.

I.- INTRODUCCIÓN

El EIX TRANSVERSAL de CATALUNYA es una carretera que debe unir LLEIDA con GIRONA, proyectada para una velocidad específica de 100 Km/h, que tendrá una longitud de 204 Km, de acuerdo con el siguientes desglose:

Lleida-Cervera	54 Km.
Cervera-Manresa	45 Km.
Manresa-Vic	48 Km.
Vic-N-II	57 Km.

El tramo LLEIDA-CERVERA está siendo construido por el Ministerio de Fomento, mientras que la unión entre CERVERA y la N-II corre a cargo de la GENERALITAT DE CATALUNYA.

El tramo VIC-N-II entró en servicio en el mes de Septiembre de 1.995 y su construcción fue dividida en lotes con las características que se indican en el **Cuadro I**.

TRAMO	GURB-CALLDETENES	CALLDETENES-S. JULIA DE VILATORTA	S. JULIA DE VILATORTA-S. SADURNI D'OSORMORT	S. SADURNI D'OSORMORT-VILADRAU	VILADRAU-S. HILARI SACALM	S. HILARI SACALM-TRES CAMINS	TRES CAMINS-STA. COLOMA DE FARNERS	STA. COLOMA DE FARNERS-VILOBI D'ONYAR	VILOBI D'ONYAR-N-II
DENOMINACIÓN	----	0	I	II	III	IV	V	----	----
CONSTRUCTORA	COPCISA	COPCISA	AGROMAN	F.C.C.	DRAGADOS	CUBIERTAS Y MZOV	F.C.C.	ENTRECANALES	O.C.P.
INICIO DE LAS OBRAS	Sep-92	Agost-93	Febr-93	Agost-93	Agost-93	Agost-93	Agost-93	Nov-91	Agst-93
FIN DE LAS OBRAS	Sep-93	Dic-94	Dic-94	Sept-95	Sep-95	Sep-95	Sep-95	Sep-94	Sep-94
PRESUPUESTO (Mptas)	2.200	1.390	2.400	3.300	4.800	5.400	3.900	3.000	744

Cuadro I.- Distribución en lotes del tramo VIC-N-II del EIX TRANSVERSAL

Por encargo de GISA, GEOCONTROL, S.A. realizó el estudio geotécnico de los tramos comprendido entre S. JULIA DE VILATORTA y STA. COLOMA DE FARNERS y, también, prestó la asistencia técnica necesaria durante la realización de las obras.

En este trabajo se presentan los problemas que se produjeron durante la excavación de los desmontes del tramo S. JULIA DE VILATORTA-STA. COLOMA DE FARNERS, las medidas que se adoptaron para corregir los problemas presentados y las conclusiones que se han obtenido a partir de las experiencias habidas.

II.- CRITERIOS DE DISEÑO

El terreno en que debían excavarse los desmontes del tramo S. JULIA-STA. COLOMA del EIX TRANSVERSAL estaba constituido mayoritariamente por sauló con grados de alteración entre III y V; aunque los más frecuentes eran el III y el IV. En algunos desmontes el sauló presentaba diques porfídicos, que mejoraban notablemente el comportamiento general del talud y, en muy pocos casos los taludes estaban constituidos por granito no alterado; pero muy fracturado.

De acuerdo con los resultados de la campaña de caracterización geotécnica y de las exigencias medioambientales como geometría patrón para los taludes de los desmontes, se adoptó una disposición en bancos, separados por bermas de 3 m de ancho. La altura de los bancos variaba entre 4 y 8 m; mientras que se inclinación oscilaba entre 1(H):3(V) y 1(H):H(V) según la calidad del terreno.

En el caso más normal, sauló grado IV, entre los más desfavorables se retuvo una altura de banco de 4 m y una inclinación de 1(H):3(V) que da una pendiente media de $46,2^\circ$ para un talud de 6 bancos y de $44,4^\circ$ para otro que tuviera 12 bancos.

Al iniciarse las obras se comprobó que en algunos taludes excavados en sauló, a pesar de que éste fuera de baja calidad, se produjeron apreciables caídas de bloques de sauló cuando sólo se había hecho la excavación de dos bancos. En la **FOTOGRAFÍA N° 1** se ilustra la situación creada en el talud Sur, próximo al emboquille lado TRES CAMINS del Túnel de JOANET, cuando se habían excavado dos bancos.



Fotografía N° 1.- Rotura del talud Sur (p.k. 44+100).

A la vista de estos problemas geotécnicos, apoyados en un cambio sobre los criterios medioambientales aplicados a los taludes, se decidió modificar el diseño de los desmontes que presentaban inestabilidades, adoptando una pendiente uniforme de inclinación 1(H):1(V).

Este cambio en el diseño eliminó totalmente los problemas de caídas de “cuñas de sauló” en todos los desmontes; pero en alguno de ellos esta inclinación resultó excesiva y, como se expone en los apartados siguientes, fue necesario rebajarla todavía más, hasta alcanzar una inclinación de 1,5 (H) :1(V).

III.- EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD

En la **Figura N° 1** se presenta la ubicación de los 48 taludes, de más de 15 m de altura, existentes entre S. Juliá de Villatorra y Stª Coloma de Farners, así como su altura máxima y su inclinación media; de estos taludes 37 no han necesitado modificaciones, pues se han construido sin problemas tal como habían sido proyectados.

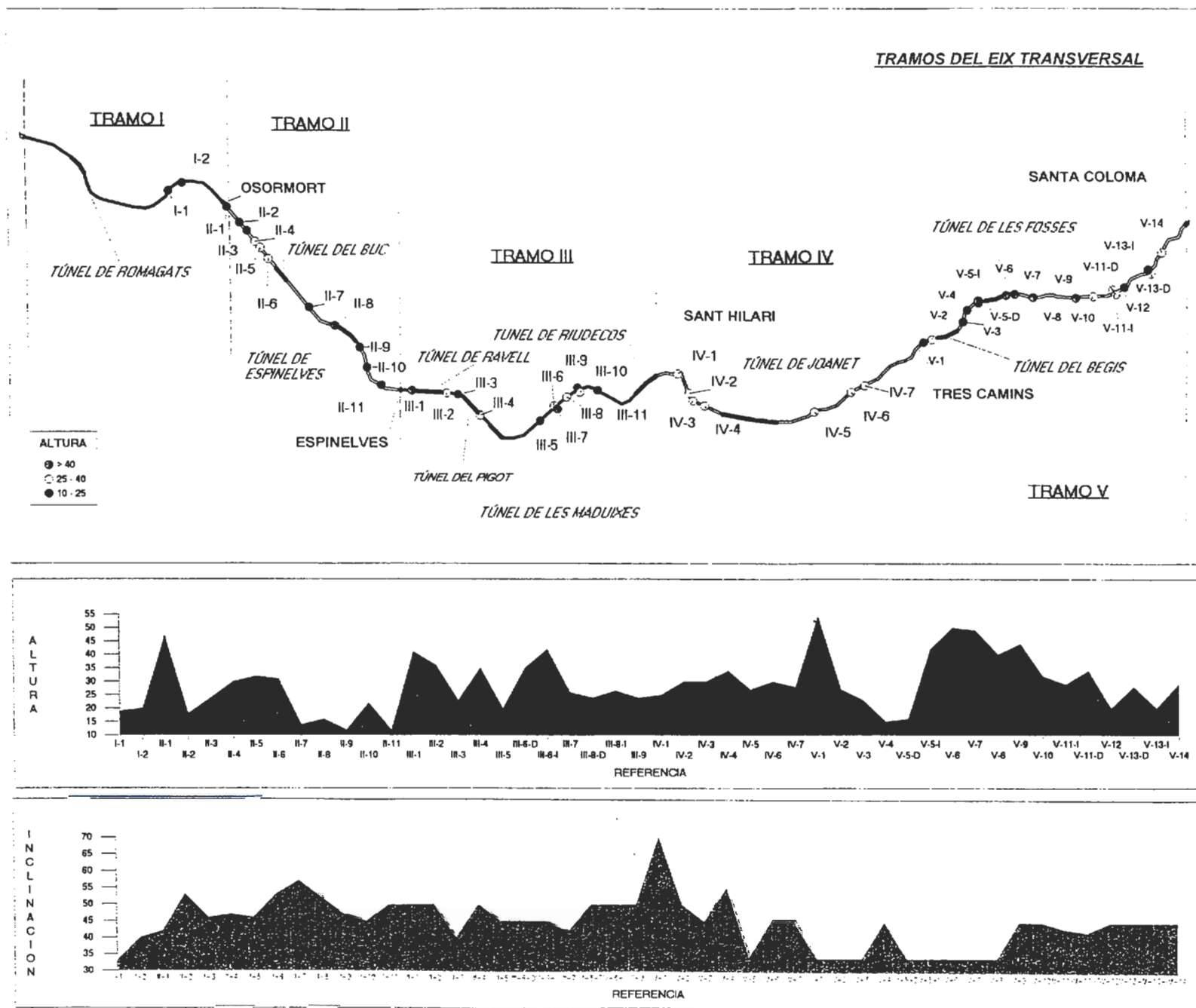


Figura Nº 1.- Situación y características de los 48 taludes

Sin embargo, en 11 taludes aparecieron durante la construcción diversas inestabilidades locales que hizo necesario introducir alguna modificación en el diseño inicial. Además, hay que señalar, que en 4 de los 11 taludes cuyo diseño se modificó hubo que hacer una segunda serie de modificaciones para conseguir una situación razonable desde el punto de vista de su estabilidad. La problemática de estos cuatro taludes que fueron modificados dos veces será tratada con detalle en el apartado 5.

En el **Cuadro II** se muestran con detalle las modificaciones introducidas en la pendiente de los 11 taludes que presentaron problemas de inestabilidad durante las obras.

TRAMO	ZONA DE ACTUACIÓN (PK)	PENDIENTE DE LOS TALUDES MODIFICADOS		
		ESTUDIO GEOTÉCNICO	PRIMERA MODIFICACIÓN	SEGUNDA MODIFICACIÓN
II.- OSORMORT ESPINELVES	13+940-14+000	1H:2V ^(*)	2H:3V ^(*)	---
III.- ESPINELVES SANT HILARI	31+200-31+440	1H:3V ^(*)	1H:1V	---
	34+340-34+500	1H:3V ^(*)	1,125H:1V	---
	35+900-36+300	1H:3V ^(*)	1,30H:1V	---
IV.-SANT HILARI-TRES CAMINS	41+550-42+050	1H:3V ^(*)	1H:1V	---
	43+440-44+150	1H:3V ^(*)	1H:1V	---
	44+020-44+440	1H:3V ^(*)	1H:1V	3H:2V
V.-TRES CAMINS-STA. COLOMA	49+350-49+500	1H:3V ^(*)	1H:1V	3H:2V
	51+800-51+910	1H:3V ^(*)	1H:1V	3H:2V
	51+980-52+115	1H:2V ^(*)	1H:1V	3H:2V
	53+540-55+510	1H:3V ^(*)	1H:1V	---

* Proyectados con bermas intermedias

Cuadro II.- Modificación de la pendiente en los taludes que presentaron inestabilidad durante las obras.

Una vez que se llegó a la geometría definitiva en los 48 taludes creados, se realizó un análisis de su estabilidad. Este análisis contempló tanto la posibilidad de caída de “bloques de sauló”, como el comportamiento global del talud.

El análisis de la estabilidad cinemática de los “bloques de sauló” en cada talud se realizó mediante el bien conocido programa SWEDGE y los resultados indicaban que no era de esperar caída de “bloques de sauló” en los taludes ya construidos.

El análisis de la estabilidad global se realizó, inicialmente, mediante el programa SLIDE que utiliza el método de BISHOP para modelos de rotura circular. Las propiedades geotécnicas de los terrenos que se utilizaron en el análisis con el programa SLIDE son las que se indican en el **Cuadro III**.

En la **Figura N° 2** se presenta la distribución de los factores de seguridad de cada uno de los 48 taludes analizados.

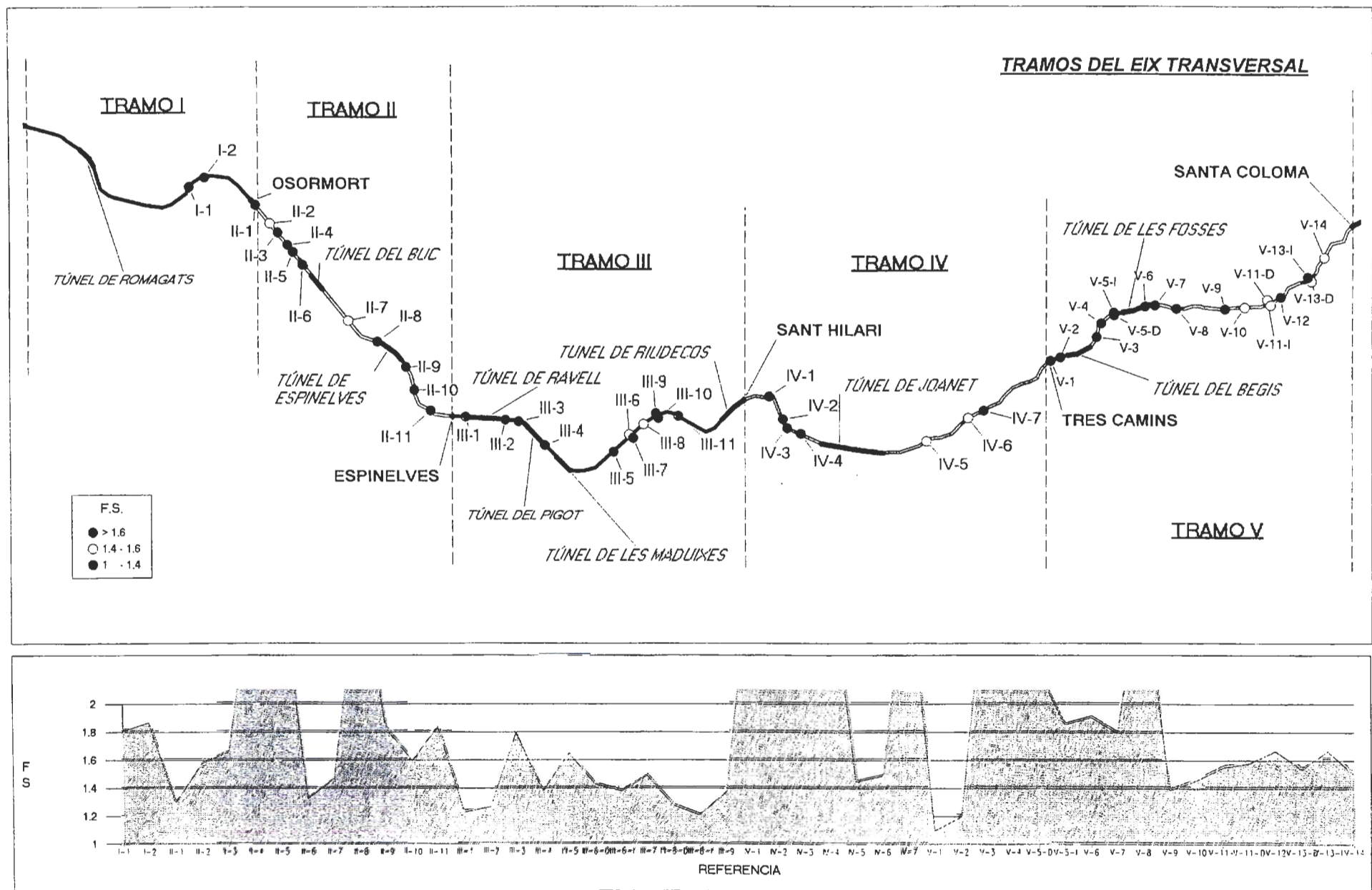


Figura Nº 2.- Distribución georreferencial de los Factores de Seguridad global.

LITOTIPO	COHESIÓN (MPa)	FRICCIÓN (°)	DENSIDAD (t/m ³)
Sauló IV	0,025	42	2,17
Sauló V	0,025	38	2,15
Granito	0,43	52	2,41
Pórfido	0,42	50	2,63

Cuadro III.- Propiedades geomecánicas utilizadas en el análisis de estabilidad global.

Si se considera que el mínimo Factor de Seguridad debe ser 1,5, lo cual es razonable debido a las imprecisiones inherentes a un análisis de estabilidad mediante equilibrio límite, resulta que 16 de los 48 taludes estudiados deberían tener problemas de estabilidad en el futuro. Esto representaría el 33% de los taludes analizados.

En la **Figura N° 3** se presenta el Factor de Seguridad de cada talud en función de su altura. En ella se han distinguido también las tres pendientes con las que se han excavado los 48 taludes.

Puede apreciarse que con un Factor de Seguridad 1,5 y una inclinación de 3H:2V la altura del talud podría ser cualquiera, exceptuando el caso del talud V-I. Si la inclinación es de 1H:1V sólo podría llegarse con seguridad, según este análisis, hasta una altura de 24 m. Si la inclinación aumenta hasta 1H:2V, la altura debería limitarse a sólo 13 m.

Los 16 túneles que presentaban un coeficiente de seguridad, obtenido mediante el programa SLIDE, inferior a 1,5 fueron objeto de un estudio específico con objeto de precisar sus condiciones de estabilidad y obtener garantías sobre su estabilidad a corto plazo o, en caso contrario, adoptar nuevas medidas de refuerzo.

Del examen detallado de los taludes con Factor de Seguridad inferior a 1,5 resultó que en la mayor parte de ellos existían diques de pórfido, que no pueden modelizarse correctamente con el programa SLIDE; que, sin embargo, aportaban un efecto de refuerzo que garantizaba su estabilidad.

En tres de ellos se adoptaron medidas superficiales de refuerzo, a base de mallazo y revegetación, para prevenir inestabilidades superficiales.

Dos de estos taludes, los denominados V-I y V-II, estaban excavados en Sauló con grado V de meteorización y tenían una altura de 54 y 27 respectivamente; por lo que, su estabilidad fue objeto de un análisis tenso-deformacional mediante un modelo geotécnico.

IV.- ANÁLISIS TENSO-DEFORMACIONAL

El Talud V-I se extiende entre los p.k. 49+350 y 49+500; por lo que tiene una longitud de 150 m; su altura media es de 28 m y la máxima llega a 50 m.

Este ha sido, con gran diferencia, el talud más conflictivo entre los 48 que se han excavado entre S. JULIA de VILATORTA y STA. COLOMA de FARNERS. Muy probablemente esta

TABLA RESUMEN DE TALUDES						
Series	Nº	Ref.	Altura (m)	Inclina. (°)	FS (global)	Met.
1H:2V	1	IV-1	25	70	>2	5
	2	II-7	14	57	1.47	5
	3	IV-4	34	55	>2	2
	4	II-2	18	53	1.58	4
	5	II-6	31	53	1.33	5
	6	II-8	16	52	>2	3
	7	II-11	12	50	1.84	4
	8	III-1	41	50	1.23	4
	9	III-2	36	50	1.27	5
	10	III-4	35	50	1.38	5
	11	III-8-D	24	50	1.28	5
	12	III-8-I	28.6	50	1.21	5
	13	III-9	24	50	1.37	5
	14	IV-2	30	50	>2	2
1H:1V	15	II-4	30	47	>2	3
	16	II-9	12	47	1.83	4
	17	II-3	24	46	1.66	4
	18	II-5	32	46	>2	3
	19	II-10	22	45	1.6	4
	20	III-5	20	45	1.65	5
	21	III-6-D	35	45	1.43	5
	22	III-6-I	42	45	1.38	5
	23	IV-3	30	45	>2	1
	24	IV-6	30	45	1.49	5
	25	IV-7	28	45	>2	2
	26	V-4	15	45	>2	3
	27	V-9	44	45	1.39	5
	28	V-10	32	45	1.46	5
	29	V-12	20	45	1.67	5
	30	V-13-D	28	45	1.54	5
	31	V-13-I	20	45	1.67	5
	32	V-14	29	45	1.5	5
3H:2V	33	V-11-I	29	43	1.55	5
	34	II-1	47	42	1.3	4
	35	III-7	26	42	1.49	5
	36	V-11-D	34	42	1.58	5
	37	I-2	20	40	1.87	4
	38	III-3	23	40	1.8	4
	39	IV-5	27	34	1.45	5
	40	V-1	54	34	1.1	5
	41	V-2	27	34	1.2	5
	42	V-3	23	34	>2	3
	43	V-5-D	16	34	>2	5
	44	V-5-I	42	34	1.86	5
	45	V-6	50	34	1.91	5
	46	V-7	49	34	1.8	5
	47	V-8	40	34	>2	3
	48	I-1	19	33	1.81	3

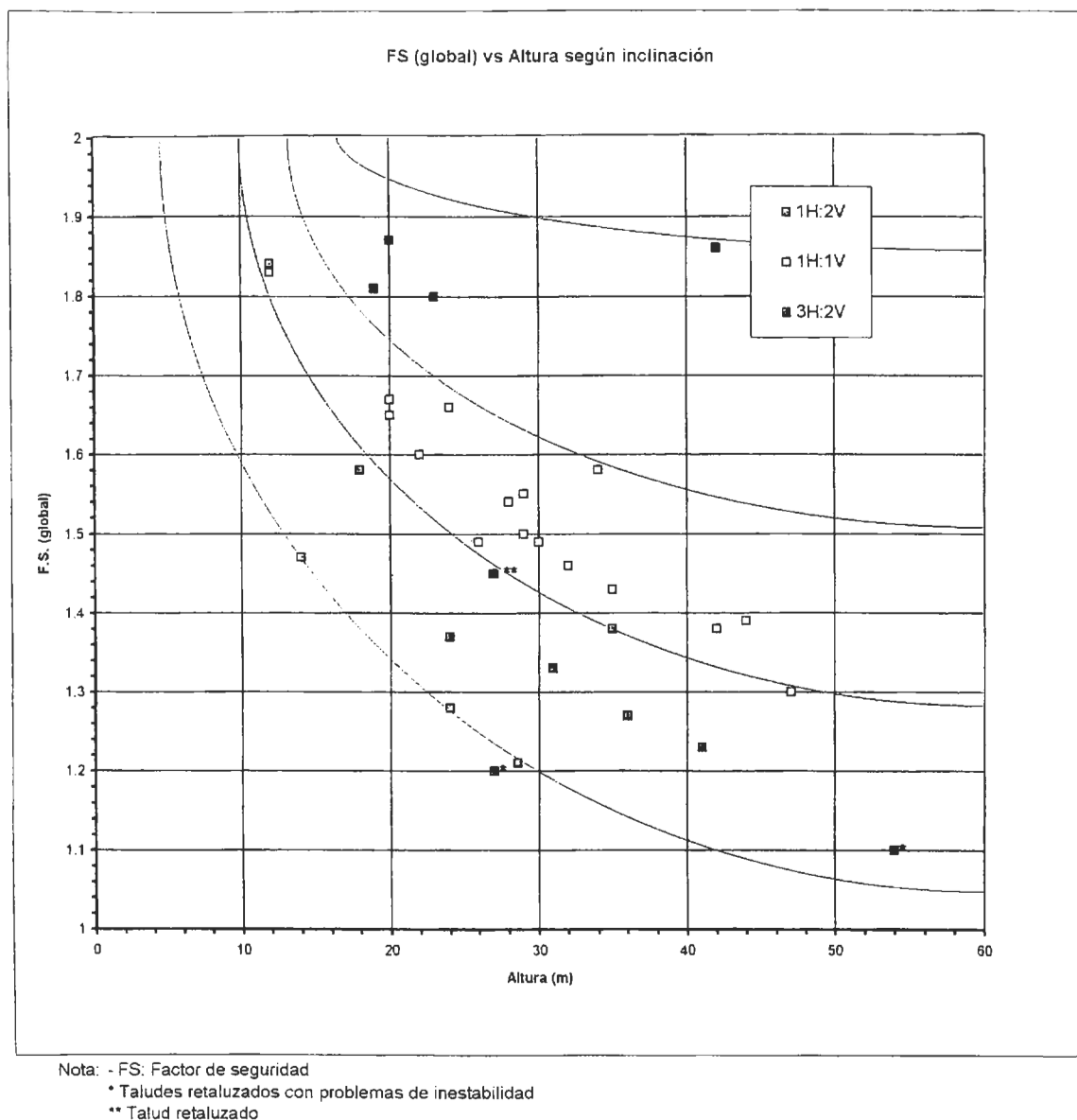


Figura N° 3.- Distribución del Factor de Seguridad global en función de la altura.

alta conflictividad se debe al hecho de su gran altura y al haber estado excavado en Sauló con grado V de meteorización, con ausencia prácticamente total de diques de pórfido en la masa del talud.

Este talud, como la mayor parte de los 48 taludes excavados, se inició con una pendiente uniforme de 1H :1V y al producirse problemas de inestabilidad durante la excavación, que se concretaron en una rotura aparentemente circular que afectaba a la mitad inferior del talud, se realizó con una pendiente 3H :2V, conforme se ha indicado en el Cuadro II.

Con esta inclinación, 3H :2V, se terminó la excavación sin problemas ; pero pocos meses después de finalizada apareció en la cara del talud una fina grieta, tal como se muestra en la **FOTOGRAFÍA N° 2.**

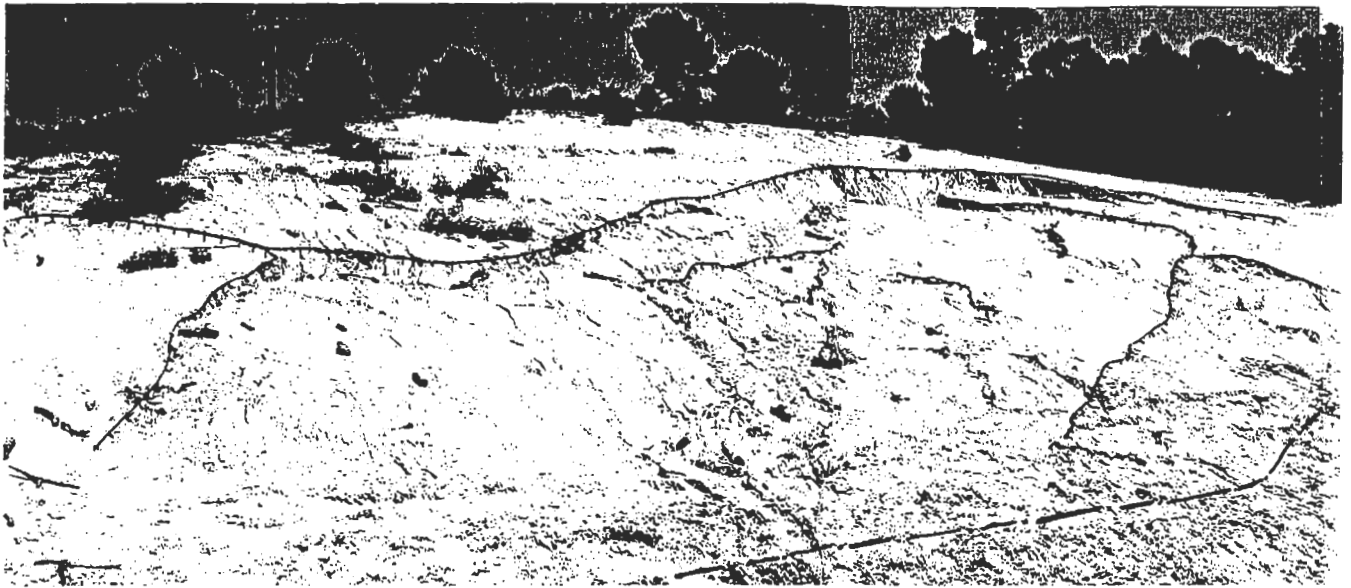


Fotografía N° 2.- Vista del inicio de apertura de las fracturas en el talud V-I

En poco tiempo esta grieta comenzó a abrirse hasta afectar a toda la masa del talud, tal como muestra la **FOTOGRAFÍA N° 3**, alcanzando una apertura final de varios metros.

La inestabilidad de este talud se puede asemejar a una explosión lenta de la masa de talud de tal forma que el sauló roto quedaba prácticamente en su sitio sin deslizarse hacia la parte inferior del talud.

Esto es coherente con el hecho de que la inclinación del talud 3H:2V equivalía a una pendiente media de $33,7^\circ$ que prácticamente coincide con el ángulo de rozamiento residual del sauló.



Fotografía N° 3.- Aspecto final del talud V-I

Dado lo excepcional de esta situación se decidió hacer en análisis lo más afinado posible para intentar encontrar las causas de este extraño fenómeno y poder decidir si había que bajar más la pendiente del talud o no.

Se investigaron las causas más variadas que podrían haber influido en la inestabilidad de talud: presencia de agua, efecto de la temperatura y potencial de hinchamiento de las arcillas presentes en las superficies de rotura, entre otros, sin que se encontrara nada anormal. Finalmente se decidió estudiar el efecto de la deformación de la masa del talud durante la rápida excavación de talud. Para ello se realizó un análisis tenso-deformacional tal como se presenta en los apartados siguientes.

IV.1.- Programa de cálculo

Como herramienta de cálculo se ha utilizado el programa UDEC, V.1,88 puesto a punto por ITASCA CONSULTING GROUP (U.S.A.). Este programa permite resolver, mediante el algoritmo de diferencias finitas, modelos geotécnicos de elementos finitos que integren el número de terrenos diferentes y también las discontinuidades que se desee.

Las posibilidades de simulación del programa UDEC incluyen :

- Estructuras de juntas con distribución estadística
- Deformabilidad variable de la roca matriz
- Comportamiento no lineal de las juntas
- Comportamiento plástico de la roca matriz
- Flujo de fluido en las juntas
- Análisis dinámicos y estáticos
- Flujo térmico

Además, el programa UDEC incluye una lógica propia de simulación de elementos de anclaje y elementos estructurales, así como de elementos de contorno para simular el comportamiento en los límites del modelo.

IV.2.- Modelo geotécnico

Se ha confeccionado un modelo geotécnico que representa la sección central del talud, tiene 180 m de ancho y 118 m de alto y permite simular la excavación del talud en franjas horizontales de 10 m de ancho; partiendo de una primera excavación de 15 m de alto.

En la **Figura N° 4** se muestra el modelo confeccionado para el análisis de este talud que simula la situación creada al excavar el talud con 55 de altura.

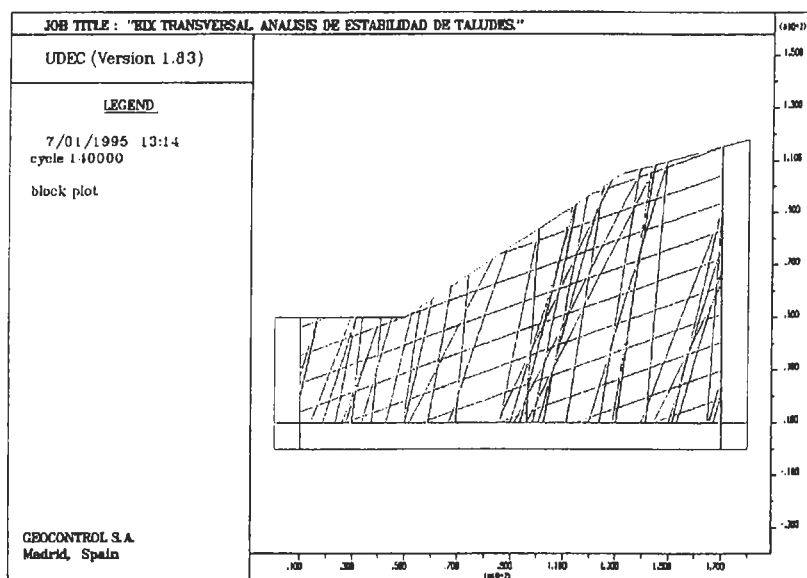


Figura N° 4.- Modelo empleado para el análisis de la estabilidad.

En este modelo se han incluido dos tipos de terreno : el Sauló V, que afecta prácticamente a la totalidad de la superficie de talud, y un dique de pórfido situado en el pie del talud.

En el **Cuadro IV** se presentan las propiedades geotécnicas que representan el comportamiento de estos materiales, que se ha simulado mediante un modelo constitutivo tipo Strain-Softening.

LITOTIPO	E (MPa)	ν	d (N/m^2)	CARACTERÍSTICAS RESISTENTES			
				INICIALES		RESIDUALES	
				COHESIÓN (MPa)	ϕ (°)	COHESIÓN (MPa)	ϕ (°)
Sauló	390	0,33	2,15	0,025	42	0	37
Dique porfídico	1825	0,11	2,63	0,39	43	---	---

Cuadro IV.- Propiedades geotécnicas de los terrenos del talud V-1.

Por lo que se refiere a las juntas, se ha considerado que éstas no tienen cohesión y que su ángulo de fricción residual es de 25°.

IV.3.- Resultados de análisis tenso-deformacional

El análisis realizado con el programa UDEC ha puesto de manifiesto que a medida que se iba excavando el talud estudiado, iban desapareciendo las zonas de la masa del talud que tenían coeficientes de seguridad, según el criterio de Mohr-Coulomb, superiores a 1,5 ; aunque en la etapa final de excavación, con una altura de 55 m, se llega a una situación estable tras la rotura del talud.

En la **Figura N° 5** se muestra la disminución del Factor de Seguridad en la parte de modelo que corresponde a la excavación del talud y en ella se puede apreciar que el Factor de Seguridad está comprendido entre 1 y 1,5.

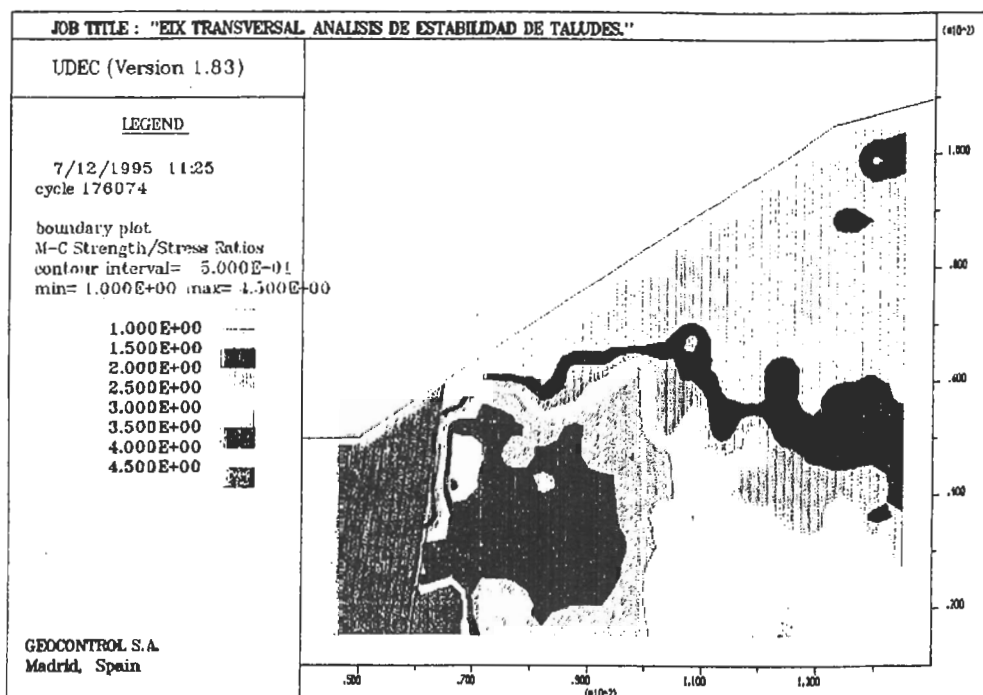


Figura N° 5.- Distribución del factor de seguridad.

En la **Figura N° 6** se muestra una composición en la que se incluye la distribución de desplazamientos en el talud excavado, proporcionada por el programa cuando se alcanza el equilibrio tras excavar el talud de 55 m de alto, y dos fotografías que ilustran los movimientos que realmente se han producido.

Puede apreciarse que la distribución de movimientos, proporcionada por el programa UDEC, indica una rotación de la masa inestable del talud que se traduce en un descenso en la parte superior de la cara del talud y un hinchamiento en la parte baja. Las dos fotografías, incluidas en la **Figura N° 6**, muestran claramente la coincidencia de los cálculos realizados con el programa UDEC y los movimientos reales.

IV.4.- Regeneración del talud

Dado que los cálculos realizados con el programa UDEC mostraban que tras producirse la rotura del talud se creaba una situación de equilibrio; considerando que la pendiente de talud



Fotografías N° 3.3.c y 3.3.d.- Dos aspectos del talud en Junio de 1995, que muestra en abombamiento producido en su zona central.

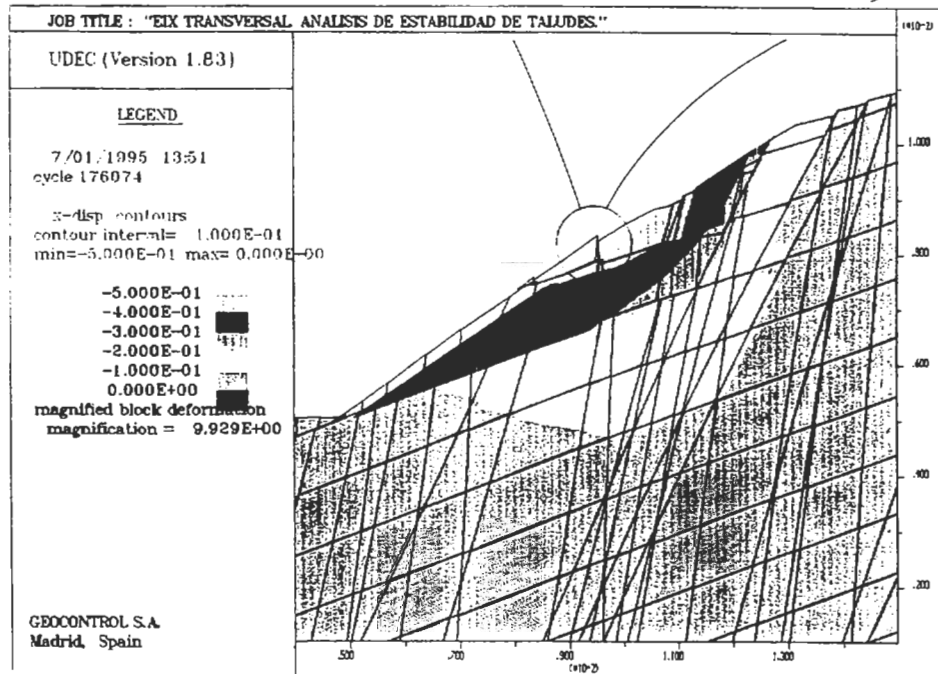


Figura N° 6.- Presentación de los desplazamientos horizontales registrados en el cálculo.

3H :2V equivalía a 33,7 y que este ángulo es inferior al de fricción residual del sauló, evaluado en 37° y teniendo en cuenta que durante varios meses tras la rotura del talud estaba totalmente estabilizado, se tomó la decisión de mantener el talud con la inclinación que ya tenía, refinando su superficie para hacerla uniforme.

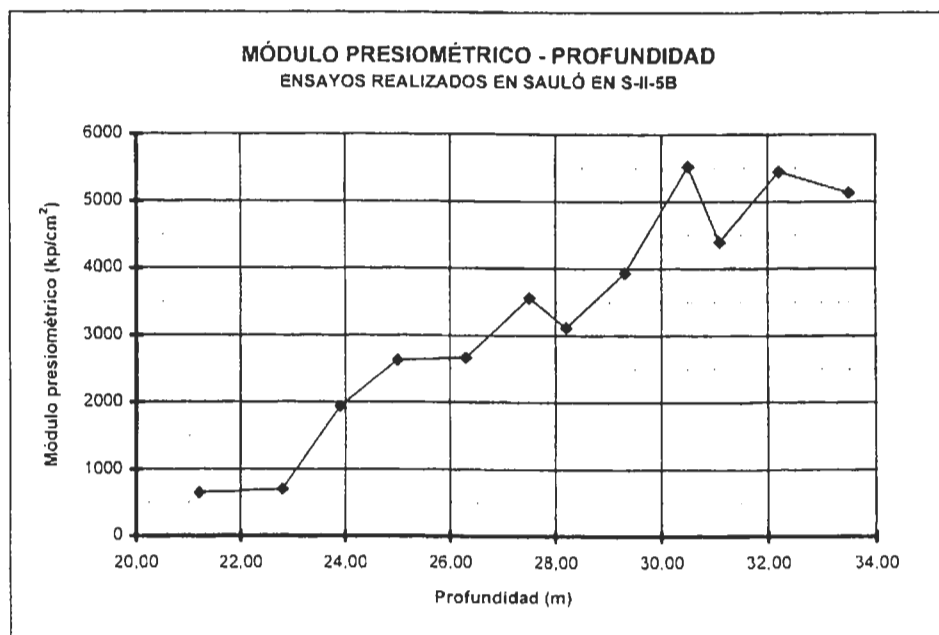
Una vez refinado este talud, en Mayo de 1.995, en él no se han vuelto a registrar problemas y dado que ha resistido bien las fuertes lluvias producidas en 1.996 se estimó que en el futuro este talud no tendrá problemas de estabilidad.

6.- CONCLUSIONES SOBRE EL DISEÑO DE TALUDES EN SAULÓ

De acuerdo con la experiencia habida en los 48 taludes, de más de 15 m de altura, excavados en Sauló para la construcción del EIX TRANSVERSAL de CATALUNYA, entre S. Julià de Vilatorrada y Stª Coloma de Farners, se pueden establecer las siguientes recomendaciones :

- I.- Es preferible que la pendiente de los taludes sea uniforme a que éstos estén excavados en bancos.
- II.- Con una inclinación de 1H :2V la altura del talud no deberá sobrepasar 13 m ; si la inclinación es de 1H :1V se puede llegar a 24 m y si la pendiente es de 3H :2V se pueden alcanzar los 54 m de altura.
- III.- Si se utilizan métodos de cálculo de la estabilidad basados en el equilibrio límite, el Factor de Seguridad de los taludes debería ser de 1,5 como mínimo. Este valor puede descender a 1,2 si el análisis se hace con modelos de cálculo tenso-deformacional y las propiedades de terreno se obtienen « in situ » en cada talud.
- IV.- En todos los taludes de más de 25 m de altura, debería perforarse un sondeo de reconocimiento y realizar en él ensayos « in situ » de tipo presiométrico para caracterizar el terreno, pues, dada la dificultad de obtener muestras representativas del sauló meteorizado, los ensayos de laboratorio sólo se podrán realizar con las muestras de mejor calidad que, ineludiblemente, sobreestimarán las propiedades reales del terreno.

En la **Figura Nº 7** se muestra la evolución del módulo presiométrico del terreno en los ensayos realizados en un sondeo en sauló durante el reconocimiento del terreno para la prolongación de la Línea 3 del Metro de Barcelona entre Canyelles y Trinitat Nova.



- V.- Los taludes que vayan a tener una altura superior a 25 m deberían ser objeto de un seguimiento detallado durante su excavación con objeto de poder comprobar que las condiciones establecidas en el Proyecto para diseñar la geometría del talud se corresponden con la realidad y, en caso contrario, poder modificar el diseño previsto con la rapidez necesaria.