

Recalces anclados para muros de contención en la carretera Los Curos – Málaga

Anchored underpinnings for retaining gravity walls in the Los Curos – Málaga road

Lisandro Beltrán Moreno

Ing. Civil, MIC, M.Sc., DIC

Profesor Emérito Universidad Nacional de Colombia.

Resumen

En la carretera San Gil – Bucaramanga la localidad Los Curos se encuentra 10km antes de llegar a la población de Piedecuesta y la distancia desde Bucaramanga es de 21km. Los primeros 25km de la carretera Los Curos – Málaga se hallan ubicados en el Macizo de Santander, el cual está conformado por rocas antiguas, algunas sometidas a un alto grado de metamorfismo, por las intrusiones de varios plutones graníticos del Mesozoico. Ellas son, el “Neis de Bucaramanga (PDb)”, el “Plutón de La Corcova (Rcl)”, y el “Plutón de Santa Bárbara (Rcs)”. Entre el k2 y el k5+600 la carretera se construyó en la zona media de la ladera, que tiene una pendiente promedio de 65°, en donde aflora roca sana, ligeramente meteorizada, con resistencias a la compresión confinada muy altas, El ancho promedio de la banca es de 5,5m, y de acuerdo con las indicaciones del INVÍAS, el ancho mínimo de la banca para pavimentar es de 6m, y no permitió la excavación de roca. Con el fin de lograr el ancho mínimo de la banca se decidió construir recalces de hormigón anclados sobre los cuales se apoyaron muros de contención de gravedad. En este artículo se describe el análisis que se realizó para determinar la estabilidad de dichos recalces anclados.

Abstract

Los Curos is located in the San Gil – Bucaramanga road, 10km before arriving to Piedecuesta city, and the distance from Bucaramanga is 21km. The first 25km of the Los Curos – Málaga were built in the “Macizo de Santander”, which is composed by old granitic rocks that were subjected to a high grade metamorphic process by several Mesozoic granitic plutons, which are named the “Neis de Bucaramanga (PDb)”, the “Plutón de La Corcova (Rcl)”, and the “Plutón de Santa Bárbara (Rcs)”. In between k2 and k5+600 the road was built in the middle of the hillslope, where the slope average is 65° and the fresh rock outcrops, which has very little weathering and very high uniaxial compressive strengths. The average bench width is 5,5m, that is less than the minimum of 6,0m that INVÍAS defined in order to pave, and none rock excavation was allowed. In order to obtain the minimum bench width it was decided to built anchored underpinnings, on top of which gravity retaining walls were settled. In this paper a description of the analysis to determine the stability of the anchored underpinnings is presented.

1 INTRODUCCIÓN

El sitio Los Curos se halla en una cota próxima a los 1360msnm y desde un poco menos que el primer km el alineamiento de la carretera hacia Málaga toma la vertiente derecha del Río Manco, por la cual sigue en dirección paralela a este río hasta que lo cruza en la abscisa k10+710, poco después de la localidad conocida como La Vega.

En la vertiente derecha del Río Manco se encuentran tramos de la vía en los que aflora la

roca fresca, con pendientes transversales próximas a 60°, en donde el ancho de la banca es estrecho por las dificultades que ella presentó para excavarla durante la construcción de la carretera.

El INVÍAS incluyó los primeros 25 km de la carretera Los Curos – Málaga en el Plan 2500, con el que se pretendió pavimentar vías regionales secundarias. Debido a la forma como se estructuró dicho Plan, no se permitió efectuar obras de estabilización de taludes ni la excavación de

taludes para ampliar la banca. Con el propósito de lograr el ancho mínimo de 6,0m que definió el INVÍAS se decidió conformar la cimentación de varios muros de contención mediante la colocación sucesiva ascendente de elementos prismáticos de concreto ciclópeo, que se apoyan en una saliente de la roca y que se adosan al talud inferior, hasta alcanzar la cota que permita apoyar encima un muro de contención por gravedad de menos de 3m de altura.

2 GEOLOGÍA

Los primeros 25km de la carretera Los Curos – Málaga se hallan ubicados en el Macizo de Santander, el cual está conformado por rocas antiguas, algunas sometidas a un alto grado de metamorfismo, por las intrusiones de varios plutones graníticos del Mesozoico.

A lo largo de la carretera se encuentran tres tipos de rocas, el “Plutón de La Corcova (Rcl)”, el “Neis de Bucaramanga (PDb)”, y el “Plutón de Santa Bárbara (Rcs)”. A continuación se resumen las principales características de cada uno de ellos.

2.1 Plutón de la Corcova (Rcl)

El INGEOMINAS (1973) lo define como una cuarzomonzonita gris de grano fino a medio, de textura sacaroidea, con biotita distribuida de manera uniforme. En estado fresco es gris, y en estado meteorizado cambia a gris claro o gris amarillento. Su composición básica es: 30 a 35% de cuarzo; 25 a 45% de plagioclasa; 30 a 40% de feldespato potásico; 3% de biotita; trazas de moscovita. Su edad es del Jurásico.

El Plutón de la Corcova se identifica en la carretera Los Curos - Málaga entre el k0+000 y aproximadamente el k5+600.

2.2 Neis de Bucaramanga (PDb)

Es un cuerpo conformado por rocas meta-sedimentarias de alto grado que se distingue en el Macizo de Santander por tres fajas de varios kilómetros de ancho y de rumbo N-S.

En la carretera se halla entre las localidades de La Chorrera y La Ceba, a las que les corresponden las abscisas k5+600 y k16+500, en donde se manifiesta como una migmatita mezclada con rocas néisicas graníticas.

2.3 Plutón de Santa Bárbara (Rcs)

Está conformado por una cuarzo-monzonita biotítica muy uniforme, de granos gruesos y tamaños variables, de colores rosado naranja a gris violáceo, con feldespato potásico rosado naranja a rojo grisáceo, plagioclasa blanca, cuarzo gris, y 2-3% de biotita. Su edad es del Jurásico. En la carretera Los Curos Málaga se encuentran afloramientos de esta roca entre las abscisas k16+500 y k27+040, el final del proyecto.

3 CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

3.1 Ensayos de Laboratorio

Además de efectuar el levantamiento de las discontinuidades en taludes característicos de los afloramientos de los diversos tipos de roca, se ejecutaron ensayos de humedad natural, peso unitario y resistencia a la carga puntual sobre muestras representativas.

Los ensayos de carga puntual se efectuaron de acuerdo con las recomendaciones de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, ISRM, (1981). En todos los casos se ejecutó el máximo número posible de pruebas con el material disponible, que siempre estuvo por debajo de diez. Por esta razón, con el propósito de obtener el valor promedio se desecharon los valores mínimo y máximo de los resultados de $I_s(50)$. Con el valor promedio de $I_s(50)$ de cada muestra se estimó su RCU mediante la siguiente expresión recomendada por la ISRM (1981):

$$RCU = 22 * \bar{I}_s(50)$$

Sobre los resultados obtenidos con los ensayos mencionados conviene hacer los siguientes comentarios:

a) Los contenidos de humedad natural de las muestras es muy bajo, a pesar de las lluvias caídas horas antes del muestreo, lo cual indica una baja absorción, que es característica de las rocas ígneas cristalinas. Los pesos unitarios se hallan entre 2,43 y 2,73tf/m³, que también son valores típicos en las rocas ígneas.

b) La roca cuarzomonzonita del Plutón de la Corcova, que se halla entre las abscisas k1+920 y k5+400, presenta un valor promedio de $I_s(50) =$

24,4 kgf/cm², mientras que la resistencia promedio a la compresión uniaxial es 536 kgf/cm².

c) La roca cuarzomonzonita del Plutón de Santa Bárbara, que se halla entre las abscisas k18+000 y k27+040, presenta un valor promedio de $I_s(50) = 31,2 \text{ kgf/cm}^2$, mientras que la resistencia promedio a la compresión uniaxial es 687 kgf/cm². En consecuencia esta roca posee una resistencia ligeramente mayor que la del Plutón La Corcova, pero en términos prácticos es la misma.

3.2 Clasificación de los macizos rocosos

Con base en los valores de resistencia a la carga puntual obtenidos, y en la caracterización de las discontinuidades se evaluaron los macizos rocosos con la Clasificación Geomecánica, o de Bienawski (1989), en la que se tienen en cuenta cinco parámetros, entre ellos la RCU, el RQD, y las condiciones de la discontinuidad dominante. El valor básico del Índice de Calidad de la Masa Rocosa (RMRb) y la clasificación correspondiente se halla en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos.

M. #	Absc. (k)	Is(50) (kg/cm ²)	RQD (%)		SEP. (m)		COND. DISC.		GW R5	RMR	CLASIF. GEOMEC.
			R1	R2	R3	R4	R5	R6			
1	2+620	-	10	0	3	0,02-0,06	5	20	10	48	RR
2	2+820	-	10	100	20	0,6-2	15	20	10	75	RB
3	3+180	25,2	20	90	20	0,2-0,6	10	25	10	85	RMB
4	4+360	13,6	10	96	20	0,2-0,6	10	25	10	75	RB
5	4+530	34,5	20	100	20	0,2-0,6	10	25	10	85	RMB
6	5+175	24,1	20	20	3	0,2-0,6	10	20	10	63	RB
7	18+265	21	20	100	20	0,6-2	15	25	10	90	RMB
8	25+090	41,4	25	90	20	0,2-0,6	10	25	10	90	RMB

RR = roca regular
RB = roca buena
RMB = roca muy buena

Con el fin de definir la calificación por el parámetro “condición de las discontinuidades”, se adoptó la descripción más cercana, que es “superficies ligeramente rugosas, separación <1mm, paredes ligeramente meteorizadas”.

Para efectuar la calificación por “agua subterránea” en todos los casos se consideró la condición “húmeda” (damp).

Los resultados de la clasificación geomecánica indican que los macizos rocosos evaluados poseen Roca Buena a Roca Muy Buena, y en solo un caso, el localizado en la abscisa k2+620, se tiene Roca Regular, por su alto grado de fracturación.

3.3 Resistencia al corte de discontinuidades

Con el fin de analizar la posible ocurrencia de fallas de tipo planar y en cuña, y de estimar la

capacidad de los anclajes, se efectuaron ensayos de corte directo sobre planos de discontinuidades. Los ensayos se ejecutaron en condición inundada, con el fin de hallar el ángulo de fricción interna de los planos en condición húmeda, que con seguridad es la que prevalece en las épocas de invierno. Los resultados que se obtuvieron en cinco probetas de sección cuadrada se incluyen en la Tabla 2.

Tabla 2. Ensayos de corte directo realizados sobre planos de discontinuidades.

M. No.	ABSCISA (km)	PUT (t/m ³)	Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3		c (kgf/cm ²)	φ (°)
			(t/σ) _f on	(kgf/cm ²)	(t/σ) _f on	(kgf/cm ²)	(t/σ) _f on	(kgf/cm ²)		
2	2+820	2,561	0,999	0,705	2,497	0,493	4,993	0,449	0,3	21,4
3	3+180	2,616	0,989	0,723	2,502	0,546	4,945	0,516	0,26	25
5	4+530	2,511	1,011	0,463	2,527	0,407	5,054	0,406	0,06	21,5
6	5+175	2,500	0,999	0,438	2,498	0,432	4,997	0,395	0,07	21
7	18+265	2,724	1,003	0,707	2,5	0,479	5,014	0,425	0,34	20

3.4 Criterio de falla generalizado de Hoek y Brown

Con el objeto de hallar los parámetros de resistencia al corte de la masa rocosa se aplicó el criterio de falla generalizado de Hoek - Brown. Con base en la evaluación geológica se determinó el “geological strength index”, GSI, (Marinos et al, 2000), y con los resultados de los ensayos de laboratorio se determinaron el módulo de compresibilidad, Em, y los parámetros de resistencia al corte del criterio de Mohr-Coulomb, c y φ, que se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3. Criterio generalizado de Hoek - Brown (2002).

mi	GSI	D	mb	s	a	oc	ot	Em(GPa)	ocm	H(m)	σ3max	σ3n	φ	c
25,0	80	0	12,2	0,11	0,5	182	-4,913	41,9	289	15	1696954	3063	0,02	14002
25,0	70	0	8,55	0,04	0,5	56	-1,252	17,3	123	15	288633	962	0,04	3525
25,0	80	0	12,2	0,11	0,5	290	-6,731	49,0	397	15	3080538	4059	0,02	22156
25,0	60	0,3	4,85	0,01	0,5	44	-0,819	11,0	155	15	465878	877	0,03	4458
25,0	80	0	12,2	0,11	0,5	152	-4,106	38,3	242	15	1236320	2670	0,03	10305
25,0	80	0	12,2	0,11	0,5	300	-8,08	53,7	476	15	4785200	5253	0,02	30335

mi = constante del material estimada con los ensayos de resistencia a la compresión y a la tensión
GSI = índice geológico de resistencia
D = factor del grado de alteración
mb = valor reducido de la constante del material mi
s y a = constantes del material
oc = resistencia a la compresión uniaxial
ot = Resistencia a la tensión biaxial
Em = módulo de deformación de la masa rocosa
ocm = resistencia de la masa rocosa
H = altura promedio del talud
σ3max = límite superior del esfuerzo de confinamiento en el rango para el se aplica la relación entre los criterios
φ y c = parámetros deducidos del criterio de falla de Mohr - Coulomb
Esfuerzos y c en kgf/cm²

3.5 Parámetros de diseño sismo resistente

Las ciudades de Piedecuesta y Málaga, que son las más cercanas a la carretera del proyecto, se encuentran en la zona de amenaza sísmica alta, de acuerdo con la Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (AIS, 1998), y por lo tanto, les corresponde un valor de diseño de la aceleración pico efectiva, Aa = 0,25.

El perfil del suelo se considera que es de tipo S1, al que corresponde un factor de 1, y puesto que la carretera es de clase terciaria, se considera que el proyecto es de tipo I, al que le corresponde un factor $S = 1$. En consecuencia, el coeficiente de aceleración sísmica horizontal con el que se deben diseñar los muros de contención del proyecto es $k_h = 0,25$.

4 MODELO DE ANÁLISIS

En la Figura 1 se presenta un esquema de la solución que se implementó entre las abscisas k5+170 a k5+190, que es válido para otros taludes, en la que se construyeron siete elementos de recalce de 1,2m de altura cada uno, y de aproximadamente 1,4m de ancho. En este sitio la inclinación promedio del talud inferior es de 74° , y en él aflora la roca cuarzomonzonita con cuatro familias de discontinuidades, que determinan un bloque típico de 0,5m de lado.

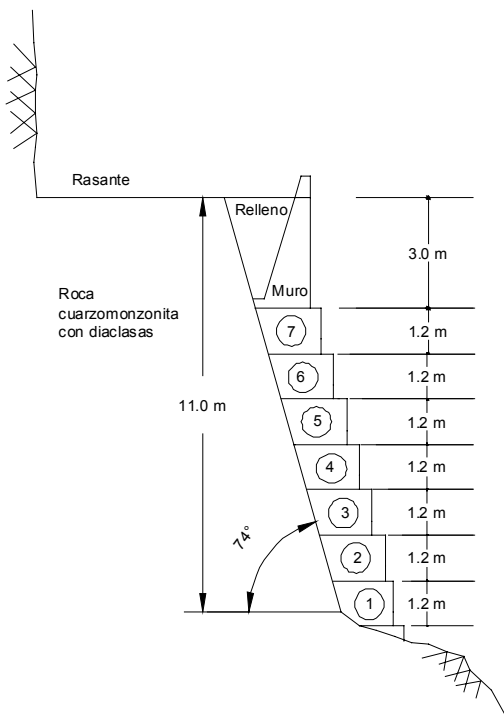


Figura 1. Recalce del talud inferior en la abscisa k5+170.

Con el propósito de obtener un algoritmo que permita analizar la estabilidad del conjunto de la estructura del recalce, se adoptaron las siguientes suposiciones:

a) En el evento sísmico se producen fuerzas inerciales horizontales y verticales en todos los elementos que conforman el recalce del muro, así

como en el muro de contención y el material de relleno que se colocarán encima.

b) La masa rocosa no empuja sobre los elementos del recalce, aun durante un evento sísmico. En el caso que la masa rocosa diaclasada presente la posibilidad de falla planar, por volteo, o en cuñas, con el fin de evitar que se generen empujes se colocarán pernos de anclaje para amarrar el macizo rocoso.

c) Cada uno de los elementos del recalce se puede deslizar en dirección horizontal de manera independiente, restringidos solo por las fuerzas de fricción que se desarrollan en las superficies de contacto entre ellos, y por la fuerza que ejerce el anclaje del elemento hacia el macizo rocoso.

d) No existirá tabla de agua y por consiguiente no habrá empuje del agua detrás de todo el recalce, situación que se garantizará mediante la instalación lloraderos o drenajes en los elementos de recalce.

e) Cuando se anclan los elementos de recalce se utilizan los coeficientes de aceleración horizontal, $k_h = 0,375$, y $k_v = 0,15$. El primero resulta al aplicar la expresión, $k_h = 1,5 \cdot A_a \cdot I \cdot S$, donde $A_a = 0,25$, y $S = I = 1$. El segundo de la expresión, $k_v = 0,4 \cdot K_h$, de acuerdo con las indicaciones de la AASHTO.

f) Cuando los elementos de recalce no se anclan, o para diseñar el muro de contención que se colocará encima, se utilizan los coeficientes de aceleración horizontal, $k_h = 0,125$, y $k_v = 0,05$. El primero resulta aplicar la expresión, $k_h = 0,5 \cdot A_a \cdot I \cdot S$, donde $A_a = 0,25$, y $S = I = 1$. El segundo de la expresión, $k_v = 0,4 \cdot K_h$, de acuerdo con las indicaciones de la AASHTO.

g) El ángulo de fricción entre la roca de fundación y el recalce es de 21° , mientras que entre los elementos de recalce es de 30° , que es el del hormigón.

h) El peso unitario promedio del muro de contención y del material de relleno es de $2,1 \text{ tf/m}^3$, mientras que el del concreto ciclópeo es de $2,4 \text{ tf/m}^3$.

En la Figura 2 se presenta la sección transversal típica del elemento i del recalce, con las fuerzas que actúan sobre él, que tienen la siguiente nomenclatura:

W_m = peso del muro de contención,

W_r = peso del relleno que se coloca detrás del muro de contención

W_{ns} = peso que se aplica en el nivel superior del elemento considerado, i,

T_{ns} = fuerza de fricción en el nivel superior del elemento,

W_{ei} = peso del elemento considerado, i ,
 T_{ni} = fuerza de fricción que se genera en el nivel inferior del elemento i ,

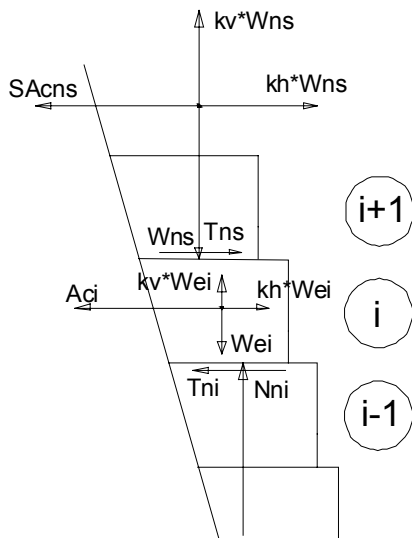


Figura 2. Fuerzas que actúan sobre un elemento de recalce.

N_{ni} = fuerza normal que se genera en el nivel inferior del elemento i ,

$Kh*W_{ns}$ = fuerza sísmica horizontal que se genera en la masa encima del elemento,

$Kh*W_{ei}$ = fuerza sísmica horizontal que se genera en el elemento i ,

$Kv*W_{ns}$ = fuerza sísmica vertical que se genera en la masa encima del elemento i ,

$Kv*W_{ei}$ = fuerza sísmica vertical que se genera en el elemento i ,

U_{ni} = fuerza producida por el empuje del agua freática hasta el nivel inferior del elemento

$$U_{ni} = \frac{1}{2}(\gamma_w * (p_{ni} - p_w))^2$$

p_{ni} = profundidad del nivel inferior,

p_w = profundidad del nivel freático

S_{acns} = suma de las fuerzas ejercidas por todos los anclajes de los elementos ubicados del nivel superior hacia arriba.

Si hacemos $\Sigma F_y = 0$ con las fuerzas que actúan sobre el elemento i ,

$$k_v * W_{ns} + k_v * W_{ei} + N_{ni} - W_{ns} - W_{ei} = 0$$

de donde,

$$N_{ni} = (1 - k_v) * (W_{ns} + W_{ei}) = (1 - k_v) * W_{ni}$$

$$k_h * W_{ei} + k_h * W_{ns} + U_{ni} + T_{ns} - T_{ni} - A_{ci}$$

$$- S_{acns} = k_h * W_{ni} + U_{ni} + T_{ns} - T_{ni} - A_{ci}$$

$$- S_{acns}$$

Si ahora $\Sigma F_x = 0$,

Pero,

$$T_{ns} = W_{ns} * (1 - k_v) * \tan(\varphi_{ns})$$

y,

$$T_{ni} = N_{ni} * \tan(\varphi_{ni}) = W_{ni} * (1 - k_v) * \tan(\varphi_{ni})$$

Por lo tanto,

$$k_h * W_{ni} - A_{ci} - S_{acns} + W_{ns} * (1 - k_v) * \tan(\varphi_{ns})$$

$$- N_{ni} * \tan(\varphi_{ni}) + U_{ni} = 0$$

De donde,

$$A_{ci} = k_h * W_{ni} + W_{ns} * (1 - k_v) *$$

$$[\tan(\varphi_{ns}) - \tan(\varphi_{ni})] - (1 - k_v) * W_{ei} * \tan(\varphi_{ni})$$

$$+ U_{ni} - S_{acns}$$

Con el planteamiento de las ecuaciones de todos los elementos de recalce se obtiene un sistema de n ecuaciones, donde n es el número de elementos, con $2n-2$ incógnitas, cuya solución por lo tanto es indeterminada, pues la fuerza del anclaje del elemento i , A_{ci} , depende también de la suma de las fuerzas que ejercen los anclajes de los elementos superiores al i , que es S_{acns} . Por consiguiente, solo se pueden hallar soluciones mediante las aproximaciones que se logran con el procedimiento de ensayo y error.

5 RESISTENCIA DE LOS ANCLAJES

Con el propósito de hallar la resistencia por unidad de longitud de los pernos de anclaje que se utilizarán para adherir los elementos de recalce al macizo rocoso, que es un valor necesario para determinar la longitud requerida por los dichos pernos, se efectuaron tres ensayos el día 19 de agosto de 2006, en el mismo sitio del muro comprendido entre las abscisas $k5+170$ y $k5+190$.

Los pernos de anclaje utilizados fueron varillas corrugadas de acero de 60000psi de resistencia a la fluencia, a la que corresponde una carga de fluencia de 21420kgf, las cuales se introdujeron en sendas perforaciones de 3.2cm de diámetro realizadas con martillo neumático, y de 1.2m de longitud. En dos de las perforaciones se utilizó el producto "Sikadur" para lograr la adherencia entre la varilla y la masa rocosa, mientras que en la tercera se empleó lechada de cemento. Sólo en este tercer perno se alcanzó la carga de falla, pues en los dos primeros ella excedió la capacidad de los dos gatos hidráulicos con los que se ejecutaron las pruebas.

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos con los tres ensayos de carga sobre los anclajes, en la que los valores más altos son los del material Sikadur. Con el promedio de los dos resultados encontrados con este material, y luego de considerar un factor de seguridad, $FS = 2$, se obtuvo una resistencia de trabajo por unidad de longitud de 4485 kgf/m, con la que se estimó la longitud requerida de cada elemento de recalce. Como ya se mencionó, en los dos anclajes con Sikadur no se alcanzó la carga de falla, de manera que el FS real es mayor que 2.

Tabla 4. Resultados de los ensayos de carga de los anclajes

Anclaje #	Presión manómetro (psi)	Carga máxima (kgf)	Relleno	Long. anclaje (m)
1	5000	8033	Lechada cemento	1.2
2	6600	10603	Sikadur	1.2
3	6800	10924	Sikadur	1.2

6 LONGITUD DE LOS PERNOS DE ANCLAJE

6.1 Cálculo de la longitud

Con la formulación planteada se elaboró el programa de computador RECALCES.BAS, el cual permite analizar varias condiciones y determinar las fuerzas de anclaje que eventualmente se necesitarían para sostener los elementos de recalce, mediante un proceso de ensayo y error.

En la Tabla 5 se presentan los valores de las fuerzas que actúan sobre cada uno de los siete elementos de anclaje de la sección de la Figura 1, que corresponde al muro en la abscisa k5+180, para el caso en que el nivel freático se halla apenas a 1m de profundidad con respecto a la superficie de la rasante de la carretera. En este caso, los valores de la presión del agua, Uni, son altos, y de igual forma las fuerzas de anclaje, Aci, y las longitudes calculadas de los anclajes, LACi. Con el objeto de reducir las magnitudes de los anclajes es necesario hacer descender el nivel freático mediante la instalación de un sistema de drenaje eficiente.

Tabla 5. Longitud calculada, LACi, de los anclajes para profundidad del NF = 1m.

Elm #	Wni (tf/m)	Wei (tf/m)	Uni (tf/m)	Tns (tf/m)	Tni (tf/m)	Aci (tf/m)	LACi (m)
1	46.4	4.49	54.1	20.6	15.1	76.9	17.1
2	41.9	4.49	42.3	18.4	20.6	55.8	12.5
3	37.4	4.49	32.0	16.2	18.4	43.8	9.8
4	32.9	4.49	23.1	14.0	16.2	33.3	7.4
5	28.5	4.49	15.7	11.8	14.0	24.2	5.4
6	24.0	4.49	9.7	9.6	11.8	16.5	3.7
7	19.5	4.49	5.1	7.4	9.6	10.2	2.3

En la Tabla 6 se incluyen los valores de las fuerzas que actúan sobre cada elemento de anclaje si el nivel freático desciende a 10m de profundidad, que es el deseado cuando se implementa un buen sistema de drenaje. En este caso las fuerzas y las longitudes de anclaje también disminuyen de manera notoria, pero estas últimas requieren valores mayores de 2m, que no se pueden perforar con martillos neumáticos manuales.

Tabla 6. Longitud calculada, LACi, de los anclajes para profundidad del NF = 10m.

Elm #	Wni (tf/m)	Wei (tf/m)	Uni (tf/m)	Tns (tf/m)	Tni (tf/m)	Aci (tf/m)	LACi (m)
1	46.4	4.49	0.98	20.6	15.1	23.8	5.3
2	41.9	4.49	0.02	18.4	20.6	13.5	3.0
3	37.4	4.49	0	16.2	18.4	11.8	2.6
4	32.9	4.49	0	14.0	16.2	10.2	2.3
5	28.5	4.49	0	11.8	14.0	8.5	1.9
6	24.0	4.49	0	9.6	11.8	6.8	1.5
7	19.5	4.49	0	7.4	9.6	5.1	1.1

Si se adopta una longitud estimada, LAEi, igual para todos los anclajes, que se pueda perforar con los martillos neumáticos manuales, por ejemplo de 1,2m, para la condición del NF = 10m, se obtienen las fuerzas de anclaje, Aci, y las longitudes requeridas, LACi, que se encuentran en la Tabla 7, en las que la mayoría de estos valores son negativos, pero la solución es válida porque dicha longitud estimada supera la requerida por todos los anclajes. No obstante, es una solución que de acuerdo con los resultados es sobre segura, y es posible obtener otras soluciones con longitudes de anclaje menores en la mayoría de los elementos.

Tabla 7. Longitud requerida por los anclajes, LACi, cuando se suponen anclajes de 1,2m.

Elm #	LAEi (m)	Aci (tf/m)	LACi (m)
1	1.2	-8.5	-1.9
2	1.2	-13.4	-3.0
3	1.2	-9.7	-2.2
4	1.2	-6.0	-1.3
5	1.2	-2.3	-0.5
6	1.2	1.4	0.3
7	1.2	5.1	1.14

6.2 Longitud de anclajes recomendada

Como ya se indicó en las suposiciones del análisis, la masa rocosa no debe empujar contra la estructura de recalce. Sin embargo, cuando ella se halla fracturada, es necesario amarrar los bloques que se puedan desprender durante un movimiento sísmico.

Por esta razón y por la facilidad de su construcción, se recomendó colocar anclajes con 1.2m de longitud en el bulbo en todos los

elementos de recalce, que deben insertarse dentro del elemento en una distancia no menor de $2/3$ del ancho del elemento de recalce, con una platina metálica en el extremo que distribuya la fuerza del anclaje a todo lo ancho y alto del elemento. Estos anclajes se deben instalar con separaciones horizontal de 1m y vertical de 1.2m.

7 CONCLUSIONES

En los primeros 10km de la carretera Los Curos – Málaga se construyeron varias estructuras de recalce ancladas, las cuales se apoyaron sobre una saliente del afloramiento rocoso en el talud inferior, y se conformaron mediante la fundición de elementos sucesivos de recalce de 1.2m de altura en concreto ciclópeo, hasta alcanzar el nivel que permita construir un muro de gravedad de 3m de altura. Esta solución ya se había implementado con éxito en la carretera Sardinata – Ocaña, la cual presenta unas condiciones geológicas y topográficas similares.

REFERENCIAS

- AIS, 1998. NSR-98, Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, Bogotá.
- Bieniawski, Z.T. (1989). "Engineering Rock Mass Classifications". John Wiley & Sons, New York, 251p.
- Hoek, E.; Carranza-Torres, C., y, Corkum, B. (2002). "Hoek-Brown Failure Criterium – 2002 Edition". Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, 267-273.
- Int. Soc. for Rock Mechanics (1981). "Suggested Method for Determining Point Load Strength", in. "Rock characterization testing and monitoring – ISRM Suggested Methods". Ed. Pergamon, 211pp.
- Marinos, P. and Hoek, E. (2000). "GSI – A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation". Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne.