

ANCLAJES EN MACIZOS ROCOSOS

Por MARIO COLL ALAS

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

La técnica de comprimir las estructuras utilizando alambres o cables sometidos a una tensión previa va desarrollándose de una forma progresiva y abarcando nuevos campos. En el presente artículo se hace un repaso somero de algunas de estas aplicaciones, que permite vislumbrar el interesante horizonte que abarca a esta técnica. En la exposición se describe, en líneas generales, los elementos constitutivos de los anclajes utilizados en macizos rocosos, así como su forma de trabajo y la distribución tensional en el propio anclaje y en el macizo rocoso. Cita también el autor los riesgos de ataque a lo largo del tiempo, así como las protecciones que garantizan el buen comportamiento del anclaje, concluyendo con unas recomendaciones concretas y necesarias para el éxito de estos procedimientos.

Las obras de ingeniería, sólo responden al fin para el cual fueron proyectadas y ejecutadas si constituyen en sí mismas un conjunto que resista favorablemente, y sin deterioro, los esfuerzos a que son sometidas. Por muy variadas que puedan ser las obras de ingeniería civil, existe siempre en ellas un elemento común: la cimentación. Hacia ella se encauzan todos los esfuerzos, y su misión es transmitirlos al terreno, que a su vez debe ser capaz de absorberlos. A medida que las obras creadas por el hombre crecen en magnitud y audacia, se hace más necesario comprobar esta capacidad de absorción del terreno de cimentación.

La cimentación en macizos rocosos, en la ingeniería de grandes presas, da lugar a una preocupación que formalmente se manifiesta en 1951, en Salzburgo, donde un grupo de ingenieros, geólogos y técnicos investigan sobre lo que habrá de llamarse Mecánica de Rocas.

Los sucesivos congresos de Grandes Presas, a partir del de Roma en 1961, se muestran sumamente interesados en estos problemas.

La Mecánica de Rocas cuenta ya con una base científica y experimental para resolver problemas de ingeniería relacionados con el comportamiento de los macizos rocosos, en su propia estabilidad y cuando son sometidos a excavaciones o esfuerzos transmitidos por importantes obras de fábrica.

Pero además existen procedimientos, debidamente contrastados, pero también, afortunadamente, en constante evolución y desarrollo, para mejorar las condiciones de resistencia y deformabilidad de los macizos rocosos.

El anclaje de los macizos rocosos con elementos de acero que transmiten los esfuerzos, mediante un postensado; al interior, donde hay roca sana, es uno de estos procedimientos.

Los motivos para su utilización son distintos.

En primer lugar, tenemos el caso de obras de fábrica, que han sido calculadas utilizando el anclaje como un elemento propio de ellas, o bien para su refuerzo o transformación. Tal es el caso de la presa de Cheurfas (Argelia), conjuntando las ideas de Freyssinet y Coyne, anclada al terreno con tirantes de 1 000 Tn. en 1935. El éxito de esta solución ha hecho que sea seguido en otras muchas, tales como la de Allt-Na-Lairige, en Escocia; Tansa, en India; Ernestina, en Brasil, y Saint Michel, en Francia.

En segundo lugar tenemos los macizos rocosos cuya estabilidad es insuficiente o no pueden soportar las cargas que les transmitirán los cimientos o la decom-

presión de las excavaciones. Tal es el caso de los anclajes de las centrales subterráneas de Puente Bibey y Susqueda, en España, y la de Grande Dixence, en Suiza.

Se utiliza también para consolidar laderas o cimientos como en el apoyo dere-

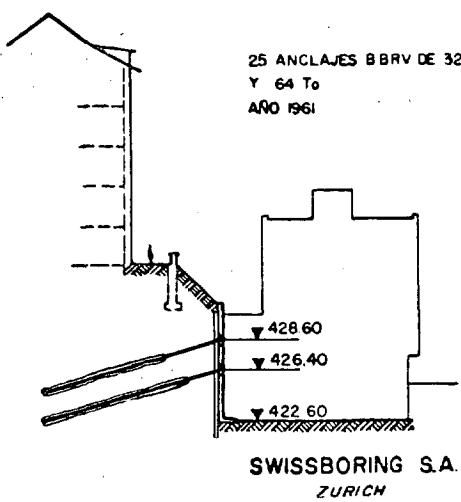


Figura 1.

cho de la presa bóveda de Castillón (Francia) y la ladera izquierda de la presa de Río Verde (España).

Y entre otras aplicaciones, también en la construcción de grandes sótanos para edificios, se emplean los anclajes (fig. 1) a los terrenos colindantes a medida que se va ejecutando la excavación, incluso en terrenos sueltos y de aluvión. En Suiza y Brasil, desde 1957, el procedimiento está muy desarrollado, e incluso, en Río, reglamentado.

ANCLAJES

En la actualidad existe una extensa gama de anclajes desde 50 Tn. a 1 000 toneladas por unidad. Se completa esta gama con el sistema de bulones, con los que se llega hasta las 50 Tn.

En anclaje está formado (fig. 2) por una barra roscada o por una serie de alambres, o de cables de acero, no trenzados entre sí, y mantenidos en la posición prefijada por separadores. Estos alambres pueden o no ir protegidos por una vaina, la cual suele ser de material plástico, polivinilo, etc. o metálica. Estas últimas ofrecen dificultades de colocación.

Se coloca el anclaje en el interior de una perforación hecha en el terreno con sonda rotativa o de roto-percusión, cuyo diámetro debe exceder en un par de centímetros del de la vaina de protección.

En un anclaje hay que distinguir tres partes: la cabeza exterior, desde donde se realizará la operación de tesado; la longitud libre, por medio de la cual se transmite el esfuerzo al interior del macizo y la cabeza interior encargada de absorber los esfuerzos.

La cabeza interior se prepara de forma que su recinto pueda ser inyectado a presión con lechada de cemento expansiva. Una vez fraguada la lechada queda la

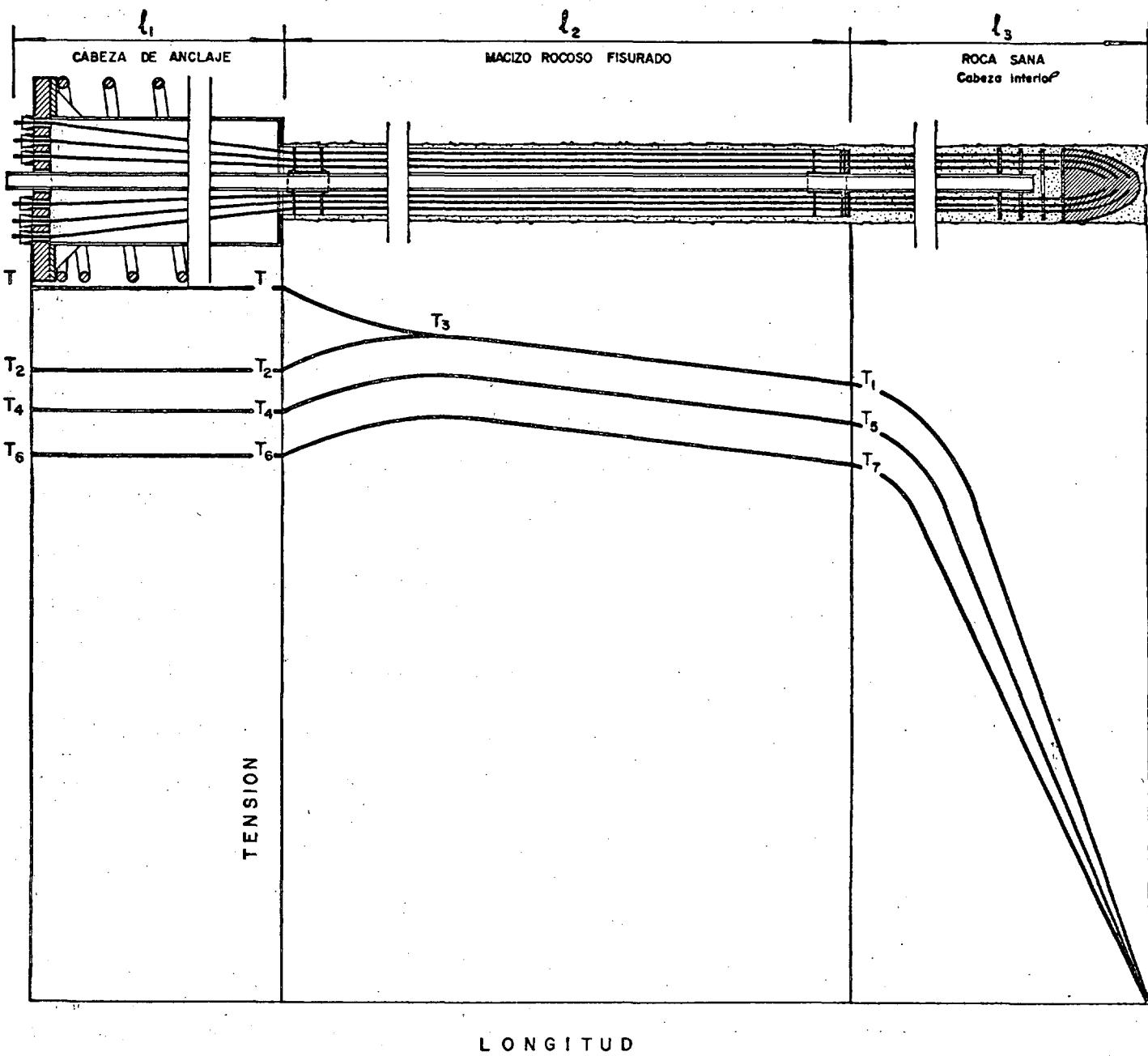


Figura 2.

cabeza en disposición de resistir el esfuerzo del anclaje. En el caso de utilizar una barra de acero se puede utilizar el anclaje expansivo propio de los bulones.

La longitud libre, si va protegida con vaina, suele también inyectarse con la misma lechada, entre el taladro y la vaina, mejorando así las posibilidades de resistencia del acero a los ataques de oxidación y corrosión.

PUESTA EN TENSION

La operación de puesta en tensión es la normal en los sistemas de postensado y también la de protección de los alambres con lavado de agua, secado con aire comprimido y, finalmente, la inyección de lechada plástica.

Al poner en tensión T un anclaje se producen las siguientes pérdidas (fig. 2):

1.º Pérdida de tensión a lo largo del anclaje debida a rozamiento (exponencial $T_1 T_1$).

2.º Pérdida de tensión debida a deformaciones elástica, retracción y relajación del macizo de hormigón de la cabeza exterior de anclaje (exponencial $T_2 T_3$).

3.º Pérdida de tensión debida a relajación del acero (curva $T_4 T_5$).

4.º Pérdida de tensión debida a las deformaciones del terreno atravesado que dependen de la naturaleza del macizo rocoso, según que su comportamiento sea o no elástico. Por tanto, podemos diferenciar las pérdidas por deformación no elástica y las pérdidas por deformaciones elásticas, con lo que quedan las tensiones residuales $T_6 T_7$.

La pérdida por rozamiento entre el cable y la vaina sería nula si fuese verdaderamente recto y si la vaina no sufriese ovalaciones.

Esta pérdida es función exponencial de la distancia (Montagnon). El valor de la tensión a una distancia x del origen es:

$T_x = T \cdot e^{-\varphi x}$, donde φ es un coeficiente de dimensiones L^{-1} , que depende del tipo de vaina utilizado y la corrección con que se ha hecho el trazado, y x es la distancia medida en metros. Para vainas de cartón $\varphi = 0,005 (m^{-1})$ y para fundas metálicas $\varphi = 0,003 (m^{-1})$.

La deformación del dado de hormigón de la cabeza exterior está dada por $\Delta_h = \frac{\sigma_h \cdot l_1}{E_h}$, donde σ_h es la tensión media a que está sometido el dado, o sea, $\frac{T}{S}$, siendo S el área del lado, y E_h el módulo de elasticidad para deformaciones diferenciales ($E_h = 220\,000 \text{ Kg./cm.}^2$).

Esta pérdida de tensión llega hasta una distancia x correspondiente al punto T_3 definida por:

Deformación inicial en el acero hasta distancia x :

$$\Delta_x = \frac{T \cdot (1 - e^{-\varphi x})}{E_a \cdot a \cdot \varphi};$$

donde a es la sección del cable y E_a el módulo de elasticidad del acero.

Por otra parte, la deformación del acero entre los puntos T_3 y T_2 vale:

$$\Delta'_x = \frac{T_3 (1 - e^{-\varphi x})}{E_a \cdot a \cdot \varphi};$$

la diferencia entre ambos debe ser $\Delta_x - \Delta'_x = \Delta_h$ la deformación del hormigón. Por tanto:

$$\frac{T \cdot l_1}{S \cdot E_h} = \frac{1 - e^{-\varphi x}}{E_a \cdot a \cdot \varphi} (T - T_3) = \frac{(1 - e^{-\varphi x})^2}{E_a \cdot a \cdot \varphi} \cdot T;$$

de donde:

$$1 - e^{-x} = \sqrt{\frac{E_a}{E_h} \cdot \frac{l_1 \cdot a \varphi}{S}};$$

que nos da x.

Pero basta con hacer un desarrollo en serie y tomar $1 - e^{-x} = \varphi x$ para obtener un valor de x suficientemente aproximado:

$$x = \sqrt{\frac{E_a}{E_h} \cdot \frac{l_1 \cdot a}{S \cdot \varphi}}.$$

La relajación del acero sometido a tensión tiene un valor variable. En los aceros de alta resistencia la relajación se garantiza con valores comprendidos entre el 4 al 6 por 100 cuando las tensiones iniciales son del 70 por 100 de las de rotura.

La instrucción francesa de 1953 cifraba esta pérdida en el 10 por 100, que puede considerarse exagerada. También se utiliza la fórmula:

$$\Delta T = 8 T \left(\frac{T}{T_r} - 0,55 \right) \text{ Relaj. 1 000 h.}$$

Siendo ΔT la pérdida de tensión, T la tensión de trabajo, T_r la tensión de rotura y relaj. 1 000 h. la relajación que se produce en el acero al cabo de mil horas en un ensayo sin sobretensión previa, con tensión inicial $0,7 T_r$ y realizado a $20 \pm 0,5^\circ \text{C}$. de temperatura.

DEFORMACION DEL MACIZO ROCOSO

Para estudiar las deformaciones que se producen en un macizo rocoso sometido a una carga, se utilizan varios métodos, tales como los gatos hidráulicos de carga circular, gatos planos, dilatómetros de sondeo, etc.

Con todos estos procedimientos se llega a la obtención de diagramas presión/deformación según aparecen en la figura 3, a y b.

La deformación del macizo rocoso tiene una parte elástica y otra no elástica debida al cierre de fisuras y diaclasas, deslizamientos mecánicos, incluso roturas de cristales, deformaciones plásticas y variación de presión hidrostática.

Existe, por tanto, un Módulo de Deformación E_d y un Módulo Elástico E , que corresponden respectivamente a la deformación total ε y a la deformación elástica $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$.

Para obtener estos módulos se hace uso de la teoría de Boussinesq. En el caso de pruebas con gatos circulares, la fórmula es:

$$E = \frac{F \cdot (1 - \mu^2)}{2 r \cdot \varepsilon}; \text{ siendo:}$$

F = fuerza aplicada, en Kg.

r = radio de la placa de carga, en cm.

ε = deformación medida en cm

μ = módulo de Poisson.

Las curvas se dan en presiones (p) y deformaciones (ϵ). Por tanto, si dibujamos una recta que pase por el origen, su coeficiente angular E' vale:

$$E' = \frac{2E}{\pi r(1 - \mu^2)}$$

Figura 3, a.

El trazado de estas rectas según la forma de la curva, nos permite definir la deformación elástica y la no elástica y los módulos E_e y E_d .

Si analizamos la figura 3, a, que corresponde a un macizo rocoso formado por roca sana pero diaclasada con relleno poco consistente (calizas Kársticas con arcilla roja en diaclasas), vemos que inicialmente, en el primer proceso de carga, hay un tramo curvo que indica que simultáneamente se han producido deformaciones elásticas ϵ_1 y no elásticas ϵ_2 . Pasado este período la curva sigue recta, lo cual indica un comportamiento elástico del macizo rocoso. El coeficiente angular E'_e nos dará el valor de E_e como ya hemos visto:

La figura 3, b corresponde a esquistos arcillosos. A lo largo de todo el proceso

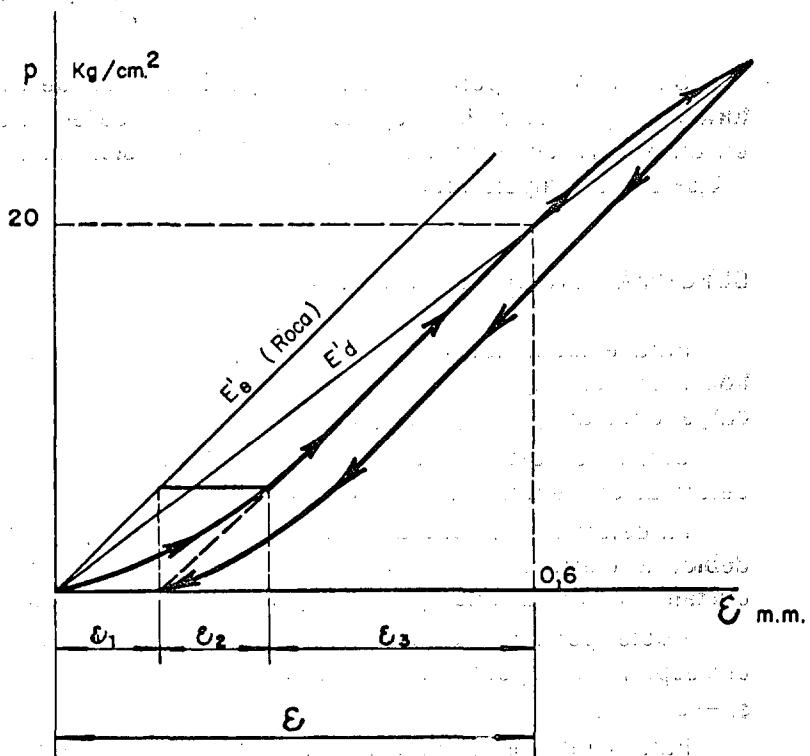


Figura 3, a.

de cargas y descargas reiteradas, se simultanean las deformaciones elásticas y no elásticas. El segundo proceso de carga puede darnos una recta E'_e propia de la roca que, trasladada al origen, nos permite descomponer la deformación del primer proceso de carga en ϵ_1 y ϵ_2 .

Para realizar anclajes, las rocas del primer caso son mucho más favorables que las del segundo. En estas últimas, al incrementar las tensiones aumentan mucho más las deformaciones lo cual resulta peligroso.

En todo lo anterior no se ha considerado el estado tensional del macizo rocoso y las modificaciones que se producen posteriormente en él por efecto de las exca-

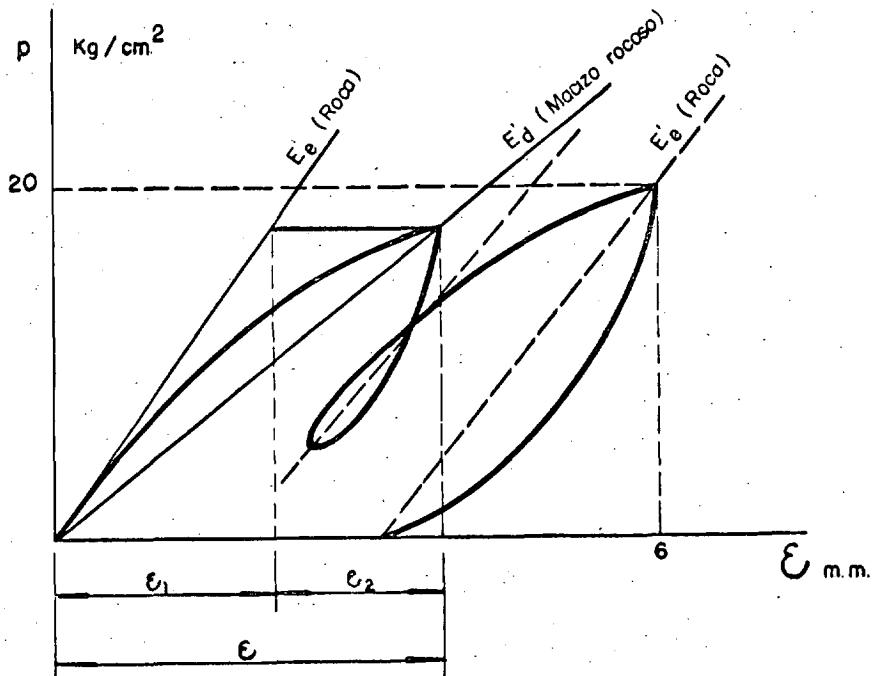


Figura 3, b.

vaciones que dan lugar a zonas decomprimidas y a los esfuerzos que transmite la obra de fábrica formando bulbos de presión en el terreno.

Este estado tensional se superpone al creado por el anclaje, llegando a modificar sus condiciones de trabajo.

CONTROL Y RETESADO

Las pérdidas de tensión que nos llevan de una tensión inicial T a T_4 y T_5 son conocidas y valorables. La pérdida en el terreno, que además requiere un cierto tiempo para producirse, sólo puede conocerse, aproximadamente, por medio de la técnica antes descrita.

En ningún caso deberá sobrepasarse el límite elástico del acero con la tensión inicial T . Dadas las características del trabajo a que ha de ser sometido, será preferible no sobrepasar la parte recta de la curva tensión/deformación característica del acero empleado.

La tensión T_4 debe considerarse como la tensión de trabajo.

Se hace necesario que el anclaje esté en disposición de volverse a poner en tensión para contrarrestar las pérdidas que produce la deformación del terreno.

Por tanto, debe controlarse, periódicamente la tensión y proceder en consecuencia. No puede admitirse un anclaje que no permita estas operaciones.

Es más, debido a las causas ya señaladas, el empuje del macizo rocoso puede aumentar y sobrecargar al anclaje.

En este caso la comprobación es todavía más necesaria, y si se llega a sobre-pasar el límite elástico del acero, deberá procederse a colocar nuevos anclajes intermedios en la trama inicialmente prevista.

CABEZA INTERIOR DE ANCLAJE

La cabeza interior debe resistir todo el esfuerzo del anclaje. Con este fin, se define su longitud l_3 (fig. 2). Como dice H. Cambefort, el cálculo de la parte activa del anclaje no está actualmente perfectamente definido.

En la práctica, se considera el esfuerzo cortante entre la roca y el material inyectado en la superficie del cilindro perforado. Valores corrientes para este cálculo oscilan entre 7 y 3 Kg./cm.².

Además, debe comprobarse el esfuerzo de adherencia entre los alambres y el material inyectado. Esto es causa de preocupación, ya que la superficie de los alambres suele ser muy pulimentada.

Se mejora la unión entre la inyección y los alambres, dando a estos últimos forma de espiral.

En efecto, al tomar esta forma se produce un esfuerzo de rozamiento definido por $F = T (1 - e^{-f\alpha})$, donde T es la tensión a que está sometido el cable, f el coeficiente de rozamiento y α el ángulo de giro en radianes. Basta dar dos vueltas completas a los alambres dentro de la cabeza de anclaje, para que la tensión residual en el extremo sea únicamente 0,08. Si tomamos $f = 0,20$, valor que es muy prudente.

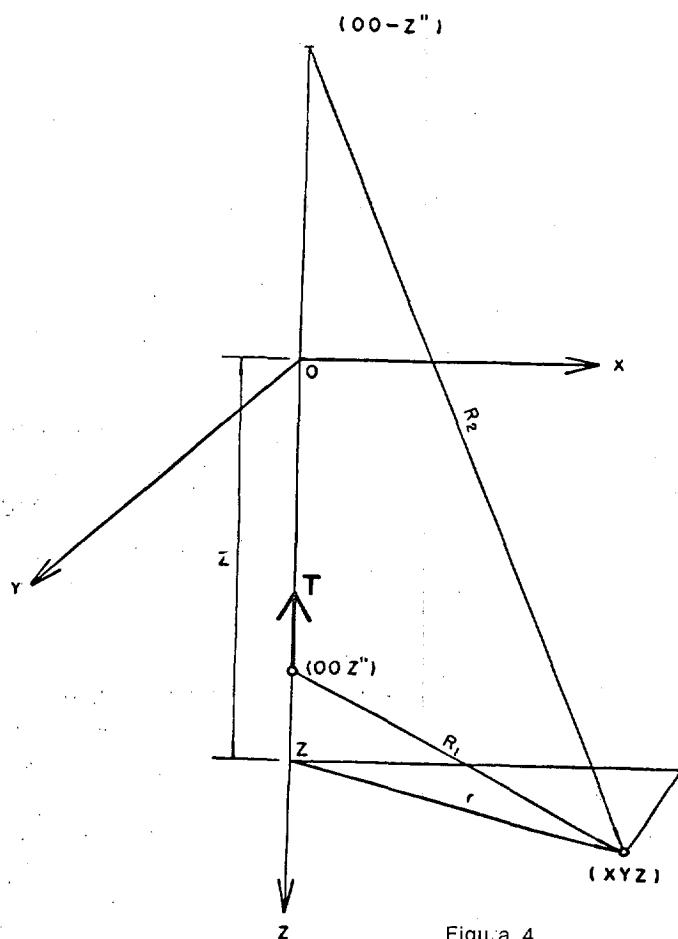


Figura 4.

alta presión, permiten suponer un comportamiento elástico del macizo rocoso en la zona de la cabeza interior de anclaje.

TENSIONES EN EL MACIZO ROCOSO

Siendo válido el principio de superposición, el estado tensional provocado por el anclaje en el macizo rocoso, se superpone al existente con anterioridad. Siguiendo este principio, en el congreso de 1938 en Berlín, Kollbrunner presentó un reparto de tensiones en el terreno producidas por anclajes oblicuos de 22 T .

En general, el hecho de haber realizado un lavado energético y una inyección a

De esta forma, pueden aplicarse las fórmulas de Boussinesq para conocer el reparto de tensiones. Así está hecho el estudio de J. C. Ott (Suiza, 1967) para fuerza vertical ascendente, actuando en un semiespacio elástico y homogéneo.

En el supuesto de que el esfuerzo concentrado T se produzca en el interior de un medio elástico, la generalización del problema de Boussinesq, dada por Mindlin (figura 4), nos da el siguiente estado tensional en el punto $(x \ y \ z)$ con la fuerza aplicada en $(00 \ z'')$:

$$\sigma_z = \frac{T}{8\pi(1-\mu)} \left[-\frac{(1-2\mu)(z-z'')}{R_{11}^3} + \frac{(1-2\mu)(z-z'')}{R_{11}^3} - \frac{3(z-z'')^3}{R_{11}^5} - \frac{30z'' \cdot z(z+z'')^3}{R_{11}^7} - \frac{3(3-4\mu)z(z+z'')^2 - 3z''(z+z'')(5z-z'')}{R_{11}^5} \right] \quad [1]$$

$$\sigma_r = \frac{T}{8\pi(1-\mu)} \left[-\frac{(1-2\mu)(z-z'')}{R_{11}^3} - \frac{(1-2\mu)(z-7z'')}{R_{12}^3} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+z'')} - \frac{3r^2(z-z'')}{R_{11}^5} + \frac{6z''(1-2\mu)(z+z'')^2 - 6z''^2(z+z'') - 3(3-4\mu)(z-z'')r^2}{R_{12}^5} + \frac{30z''r^2z(z+z'')}{R_{12}^7} \right] \quad [2]$$

$$\tau_{rz} = \frac{T \cdot r}{8\pi(1-\mu)} \left[-\frac{1-2\mu}{R_{11}^3} + \frac{1-2\mu}{R_{12}^3} - \frac{3(z-z'')^2}{R_{11}^5} - \frac{3(3-4\mu)z(z+z'') - 3z''(3z+z'')}{R_{12}^5} - \frac{30zz''(z+z'')^2}{R_{12}^7} \right] \quad [3]$$

$$w = \frac{T(1+\mu)}{8\pi E(1-\mu)} \left[\frac{(z-z'')^2}{R_{11}^3} + \frac{3-4\mu}{R_1} + \frac{5-12\mu+8\mu^2}{R_2} + \frac{(3-4\mu)(z+z'')^2 - 2zz''}{R_{12}^3} + \frac{6zz''(z+z'')^2}{R_{12}^5} \right] \quad [4]$$

E = módulo de elasticidad.

μ = coeficiente de Poisson.

El plano $z=0$ representa la superficie del macizo rocoso.

Siendo σ_z la tensión normal al plano z constante, σ_r la tensión según el radio r , τ_{rz} la tensión tangencial en el plano normal al radio r paralela al eje oz y w el desplazamiento según el eje oz .

Evidentemente, la cabeza interior del anclaje no transmite un esfuerzo concentrado. El problema está en conocer la distribución de este esfuerzo a lo largo de su longitud l_3 .

Puede establecerse un sistema de ecuaciones distribuyendo, como hace el doctor Ingeniero Giorgio Berardi, el esfuerzo T en varios T_1, T_2, \dots, T_n a lo largo de l_3 , estos esfuerzos producirán unas deformaciones en el acero e igualmente otras en la roca que deben ser iguales, teóricamente, a lo largo del eje de aplicación de las fuerzas.

En el caso de terrenos sueltos, arenas y gravas, puede seguirse el cálculo he-

cho por H. Bendel, que define la capacidad resistente del anclaje y la superficie de rotura en función del ángulo de rozamiento.

PROTECCION

Los cables y alambres del anclaje deben protegerse contra la oxidación y la corrosión. El agua, cargada de sales, que circula por el macizo rocoso favorecería notablemente estos ataques si no se emplease una protección adecuada.

La corrosión se produce por efectos electroquímicos, formando conos de corrosión con centro anódico y periferia catódica.

Una vez que se ha iniciado la formación de este cono, el esfuerzo a que está sometido el acero produce en su entorno una concentración de tensiones que conducen a la fisuración, con lo que se facilita la destrucción.

Un tratamiento térmico defectuoso en la fabricación del acero, con formación de austenita, puede facilitar el ataque. Por eso deben utilizarse aceros de calidad.

El ataque electrolítico depende también del potencial eléctrico existente y del pH de la solución que rodea al acero. Con pH comprendidos entre 9 y 12 no hay problema de corrosión.

Actualmente, la protección que garantiza la permanencia del anclaje es la formada por la vaina de material plástico rodeada exteriormente por inyección de lechada de cemento e interiormente por una lechada que sea muy plástica y cuyo pH, a ser posible, esté dentro de los valores antes señalados. El exigir que sea muy plástica es debido a que si llega a fisurarse el ataque puede ser más violento. En el mercado existen productos plásticos anticorrosivos y también pueden emplearse mezclas de cemento arcilla o cemento bentonita, procurando que no quede cloruro de calcio libre en el mortero o lechada.

También puede intentarse una protección por vía química a base de ortofosfatos monoamónicos $\text{PO}_4\text{H}_2\text{NH}_4$ o monosódicos PO_4NaH_2 en solución acuosa, formando con este tratamiento revestimientos de espesor inferior a una micra con formación de fosfatos férricos.

CONCLUSION

La larga experiencia ya existente en la utilización de anclajes con pleno éxito y la técnica cada vez más depurada para su proyecto y ejecución, hacen de este elemento de trabajo un procedimiento ideal, y en muchísimos casos indispensable, que pone en manos del ingeniero proyectista y del constructor, fuerzas enormes con las que hacer frente a los grandes problemas de estabilidad que pueden presentarse en las obras civiles y sus cimentaciones.

Para asegurar el éxito bastará utilizar aceros de calidad conocida, con bajo contenido de carbono ($< 0,65$ por 100). Someterlo a esfuerzos moderados. No ahorrar en el diámetro de la perforación para lograr una buena protección. Evitar la oxidación atmosférica inicial. Inyectarlo con lechadas de cemento adecuadas, exentas de cloruro cálcico libre y que sean expansivas en la cabeza interior del anclaje y sumamente plásticas en el interior de la longitud libre. Utilizar vainas adecuadas. Controlar las tensiones periódicamente y tesar de nuevo cuando sea necesario hasta que se stabilice el esfuerzo del anclaje. Proteger contra la oxidación la cabeza exterior y, en general, proceder con cuidado en todas las operaciones.

Más de treinta años de experiencia y éxitos son garantía de la eficacia de este procedimiento ingenieril.