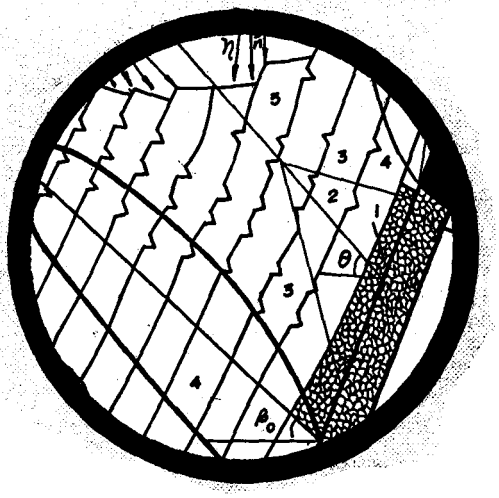
INFLUENCIA DE LOS TRABAJOS SUBTERRANEOS SOBRE EL TERRENO Y CONSTRUCCION DE SUPERFICIES



ING. ROBERTO BLANCO TORRENS

INFLUENCIA DE LOS TRABAJOS SUBTERRANEOS SOBRE EL TERRENO Y CONSTRUCCION DE SUPERFICIES

ING. ROBERTO BLANCO TORRENS

La Habana, 1995

Redacción: Ing. Carlos Hermida Laffite
Composición: Arlene Casas Mariño
Edición Corel-Ventura: Yohanka Morejón Rivero
Corrección: Lic. Yamile Verdecia García
Realización: Frank Herrera García
Emplane: Lic. José A. Aponte León

c Roberto Blanco Torrens, 1995
c Sobre la presente edición:
Editorial Félix Varela, 1995

EDITORIAL FELIX VARELA
San Miguel No. 1111
e/ Mazón y Basarrate,
El Vedado, Ciudad de La Habana, Cuba
ISBN 959-07-0076-4

INDICE

PROLOGO V

CAPITULO I. ESTUDIO DEL PROCESO DE DESPLAZAMIENTO-DEFORMACION DE LOS TERRENOS DE LA SUPERFICIE 1

1.1. Aspectos generales y parámetros del proceso de desplazamiento de las rocas. 3
1.2. Zonas de desplazamiento de la roca 12
1.3. Factores que influyen en el proceso de desplazamiento de las rocas y de la superficie 16

CAPITULO II. METODOS DE ESTUDIO DEL PROCESO DE DESPLAZAMIENTO DE LA SUPERFICIE 19

2.1. Observación visual del proceso de desplazamiento de la superficie 19
2.2. Investigación del proceso de desplazamiento de la superficie utilizando modelos físicos 29
2.3. Investigación analítica del proceso de desplazamiento de la superficie utilizando modelos matemáticos 30

CAPITULO III. CALCULO DEL ASENTAMIENTO DE LOS TERRENOS DE SUPERFICIE 32

3.1. Métodos empíricos para el cálculo del asentamiento 32
3.2. Método de cálculo del asentamiento basado en la utilización de la función de distribución 39
3.3 Cálculo del asentamiento con el empleo de modelos teóricos 42

CAPITULO IV. DESARROLLO DEL PROCESO DE DESPLAZAMIENTO DEL TERRENO DE SUPERFICIE CON EL TIEMPO 47

4.1. Análisis del desarrollo del proceso de desplazamiento con el tiempo 48
4.2. Cálculo del desarrollo con el tiempo del proceso de desplazamiento 49

CAPITULO V. AFECTACION DE LAS OBRAS DE SUPERFICIE POR LA INFLUENCIA DE LOS TRABAJOS SUBTERRANEOS 53

5.1. Presión del terreno sobre el cimiento 55

CAPITULO VI. VIAS PARA LA PROTECCION DE LAS OBRAS DE SUPERFICIE 61

6.1. Medidas profilácticas de protección 62
6.2. Medidas minero-técnicas de protección 63
6.3. Medidas constructivas para la protección de las obras de superficie 69

BIBLIOGRAFIA 76

PROLOGO

El presente título sirve como texto básico de la asignatura Mecánica de Roca II del Plan C de la carrera de Ingeniería de Minas. Este material puede ser usado también como literatura básica para cursos de posgrado en que se abarque la materia tratada.

El título consta de 6 capítulos, en los primeros 4 se estudia el proceso de desplazamiento de los terrenos de superficie, por la influencia de los trabajos subterráneos, y la incidencia que esto tiene sobre las construcciones allí ubicadas. En el 5to. capítulo se hace un breve análisis de las afectaciones que pueden sufrir dichas obras y el Capítulo VI se dan algunos criterios para la protección de las construcciones en la zona de la superficie afectada.

Para la elaboración del Capítulo I se contó con la participación del Ing. Juan F. Yolí Mateo, en tanto que los restantes capítulos fueron elaborados por el autor principal del presente título.

El presente material puede ser utilizado por ingenieros de la producción que trabajen en la esfera de la minería subterránea.

Agradecemos por anticipado cualquier indicación u opinión que sirva para mejorar nuestro futuro trabajo.

El autor

CAPITULO I

ESTUDIO DEL PROCESO DE DESPLAZAMIENTO-DEFORMACION DE LOS TERRENOS DE LA SUPERFICIE

El laboreo de excavaciones y la explotación subterránea de yacimientos conduce a la formación de espacios trabajados, que producen la alteración del equilibrio que existe en el macizo rocoso, como resultado de esto, la roca que rodea a los vacíos formados se deforma y desplaza, efecto éste que en muchas ocasiones alcanza la superficie.

Este proceso de desplazamineto de la roca puede ocurrir también por otras causas, tales como: procesos tectónicos, procesos de disolución, disminución del nivel de las aguas subterráneas, variación por distintas causas de las características de resistencia de las rocas y otros.

Son conocidos muchos casos en que como resultado de este proceso de desplazamiento de las rocas se han producido la destrucción de obras, tanto en la superficie como subterráneas.

En la actualidad el estudio de este fenómeno adquiere gran relevancia debido a la intensidad que se alcanza en los trabajos de construcción y explotación de minas.

El proceso de desplazamiento de las rocas se estudia hace mucho tiempo, así por ejemplo, se puede decir que en Bélgica en el siglo XV existía una ley que limitaba los trabajos mineros bajo zonas pobladas. Los primeros trabajos científicos encaminados al estudio de este fenómeno datan de la segunda mitad del siglo pasado en Bélgica, Alemania, Rusia y otros países europeos, proponiéndose en ellos diferentes fórmulas para el cálculo del asentamiento posible de la superficie.

Las primeras fórmulas aparecidas en la literatura para la determinación del asentamiento de la superficie provocado por el derrumbe

del techo en zonas explotadas, estaban dada por la siguiente expresión:

$$As = m \cos \alpha \qquad (1.1)$$

donde:

As: asentamiento de la superficie;

m: altura del vacío formado (potencia de mineral);

α: ángulo de buzamiento de las capas de roca.

Del análisis de esta expresión se ve que para el caso de yacencia horizontal el asentamiento se equipara con la potencia del cuerpo mineral explotado.

Más tarde aparecen expresiones que ya tenían en cuenta otros factores, como por ejemplo la expresión:

$$Az = a \cdot m \cdot z \qquad (1.2)$$

donde:

a: coeficiente que tiene en cuenta el método de explotación (con derrumbe, con relleno, etcétera);

z: coeficiente que tiene en cuenta el tiempo transcurrido desde que se formó el espacio vacío.

En etapas posteriores a las expresiones de cálculo se incluyen coeficientes que tienen en cuenta la profundidad a que están los vacíos formados y el aumento de volumen de la roca debido a su esponjamiento.

El mecanismo del proceso de desplazamiento de las rocas para el caso de vacíos situados a poca profundidad, se explica por la tendencia de toda la capa de roca que yace sobre el vacío de descender (en forma de un sistema o bloque único) a través de la superficie de corte hasta llenar el espacio. Este proceso a través de las rocas se trasmite a la superficie.

A medida que se aumenta la profundidad de los trabajos mineros, las zonas de influencia de los vacíos formados va aumentado, saliéndose más allá de los límites dados por sus dimensiones geométricas y por ende crece el volumen de roca destruida.

El proceso de desplazamiento horizontal del terreno de superficie se explica de la siguiente forma: todas las partes del macizo rocoso situadas sobre el vacío van a tender a descender (verticalmente), en tanto que las partes del macizo situadas en la periferia de la zona de influencia van a tender a desplazarse en forma horizontal hacia dicha zona.

De tal análisis se obtiene que para las zonas centrales se van a producir esfuerzos a compresión, en tanto que en la periferia surgen esfuerzos a tracción.

1.1. ASPECTOS GENERALES Y PARAMETROS DEL PROCESO DE DESPLAZAMIENTO DE LAS ROCAS

El desplazamiento de la roca habitualmente empieza con la flexión de la parte del macizo, situada encima del espacio vacío. A medida que aumenta el área de este espacio, la flexión de la roca crece y va a ir abarcando una mayor potencia de roca hasta que se manifiestan las primeras grietas y se produce el corte del sector del macizo, que yace dentro de la zona de influencia de la zona explotada.

Las observaciones y mediciones realizadas del proceso de desplazamiento de las rocas y del terreno de superficie, demuestran que la variación del estado tensional y el desplazamiento del macizo producido por los trabajos subterráneos, se pueden transmitir a grandes distancias, las que muy frecuentemente sobrepasan con creces las dimensiones del vacío formado. las partes del macizo que van a desplazarse por la influencia de los trabajos subterráneos habitualmente se denominan *zonas de desplazamiento*, en tanto que la parte afectada de la superficie se denomina *depresión de desplazamiento*.

La forma y ubicación de esta depresión de desplazamiento depende de las condiciones minero-geológicas que existan, de las propiedades físico-mecánicas y estructura del macizo rocoso.

Los factores fundamentales que determinan la forma y ubicación de la depresión de desplazamiento, así como también la magnitud del desplazamiento y de la deformación son:

- Potencia y ángulo de buzamiento del mineral extraído (o altura del vacío formado).
- Profundidad del vacío formado.
- Propiedades físico-mecánicas de las rocas y estructuras del macizo.
- Cantidad de vacíos formados.
- Sistema de explotación empleado, forma de dirección de la presión minera, velocidad de desarrollo de los trabajos.

Los principales tipos de desplazamiento y deformaciones que ocurren en la depresión y que traen consigo la mayor influencia sobre la variación de las características de explotación de las obras de superficie, la valoración de las afectaciones esperadas y en la elección de las medidas de protección, son: el asentamiento (desplazamiento vertical) y el desplazamiento horizontal.

La forma de la depresión y la magnitud del desplazamiento y deformación de éste, depende en gran medida de las dimensiones del espacio trabajado, a medida que sea mayor aumentará la magnitud del desplazamiento y la deformación de la roca.

Sin embargo, el aumento de los desplazamientos y deformaciones del terreno de la superficie, debido al aumento del área de los trabajos subterráneos, tiene lugar hasta un determinado momento, a partir del cual, independientemente que aumente el área de los trabajos subterráneos, no va a variar más la magnitud de los desplazamientos.

A este estado se le denomina *afectación total del terreno de superficie*. Este estado surge para unas dimensiones tales del espacio trabajado donde en la depresión de desplazamiento no se produce ningún aumento más del asentamiento (a pesar de que aumente el ancho del espacio trabajado). Aquí para una yacencia horizontal o suave, la depresión de desplazamiento va a tener un fondo plano.

La sección más importante de la depresión de desplazamiento llamada principal es la sección vertical que atraviesa los puntos de mayor asentamiento del terreno de superficie.

La ubicación de la depresión de desplazamiento con relación al espacio trabajado se determina con la ayuda de los denominados ángulos límites δ_o, β_o y γ_o el ángulo de asentamiento máximo y los ángulos de desplazamientos totales del lado superior e inferior del buzamiento X_1 y X_2, los cuales se construyen en las secciones principales de la depresión de desplazamiento en los cortes perpendiculares al rumbo y según él.

En la Figura 1.1 se da el esquema de la depresión de desplazamiento para el caso de explotación de cuerpos con yacencia suave y la afectación total del terreno de la superficie.

En la Figura 1.2 se da el esquema de la depresión de desplazamiento para el caso de explotación de cuerpos con yacencia suave y la afectación incompleta del terreno de superficie.

En la Figura 1.3 se da el esquema de la depresión de desplazamiento para el caso de explotación de cuerpos minerales con yacencia abrupta.

Se denomina *ángulos límites*, a los ángulos exteriores respecto al espacio trabajado, que se forman (en los planos verticales que pasan por las secciones principales de la depresión de desplazamiento) entre las líneas horizontales y las líneas que unen los límites del espacio trabajado con el límite de la zona de influencia en la superficie (Figura 1.4).

Sobre la magnitud de los ángulos límites, δ_o, β_o y γ_o ejercen una influencia significativa la profundidad del espacio trabajado, el ángulo de buzamiento del cuerpo mineral y la densidad de la roca. Estos ángulos se emplean en los cálculos preliminares del desplazamiento y la deformación de los terrenos de superficie.

El centro de la depresión de desplazamiento para el caso de una yacencia horizontal del cuerpo mineral explotado, se ubica sobre el centro del espacio trabajado, en tanto que para una yacencia inclinada se desplaza con respecto a la horizontal un ángulo θ (ver Figura 1.4). Este ángulo θ se denomina ángulo de asentamiento máximo.

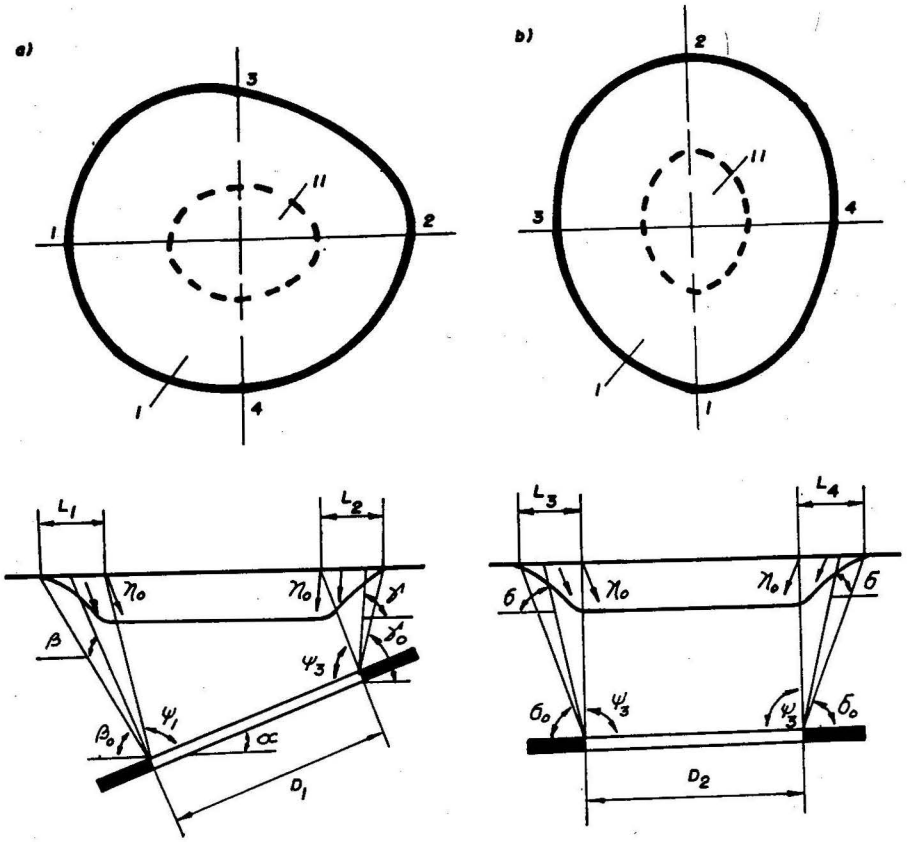


FIGURA 1.1. Depresión de desplazamiento para yacencia suave y una afectación total del terreno: a) perpendicular al rumbo, b) por el rumbo, I) límite de la depresión, II) sector plano de la depresión

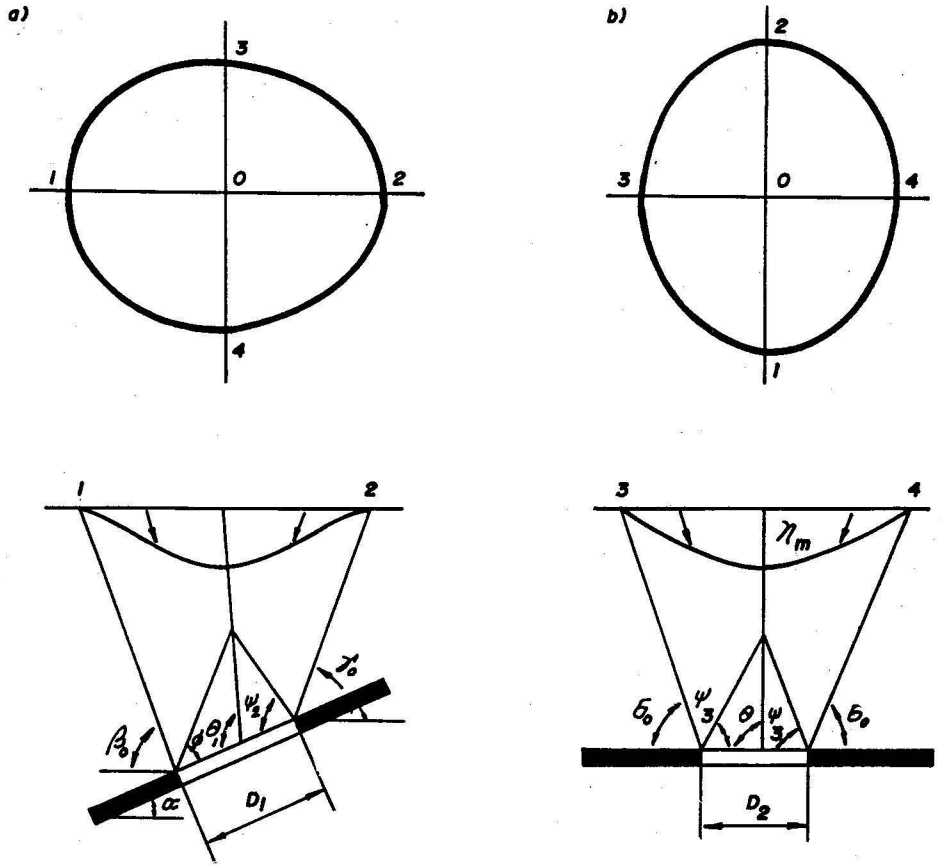


FIGURA 1.2. Depresión de desplazamiento para yacencia suave y una afectación incompleta del terreno de superficie

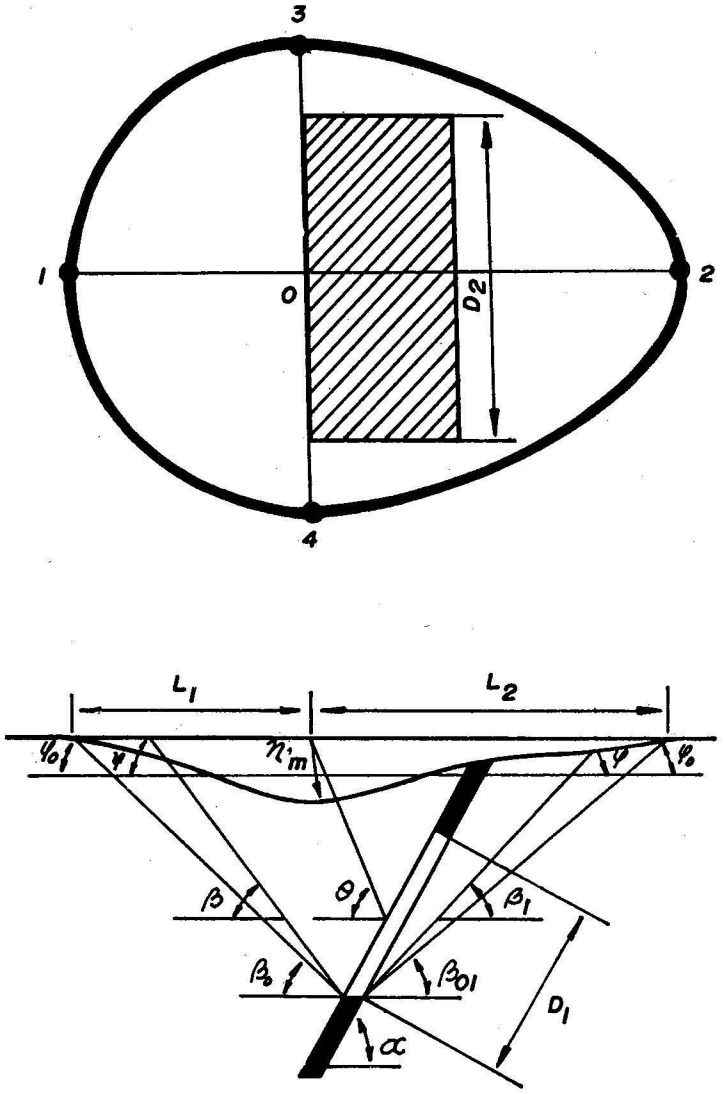


FIGURA 1.3. Depresión de desplazamiento para el caso de explotación de cuerpos minerales con yacencia abrupta

La determinación de la zona de afectación total se realiza con el empleo de los denominados ángulos de desplazamiento total X_1 y X_2 (los que son interiores con relación al espacio trabajado) que se forman en los planos verticales según las secciones principales de la depresión de desplazamiento (Figura 1.5).

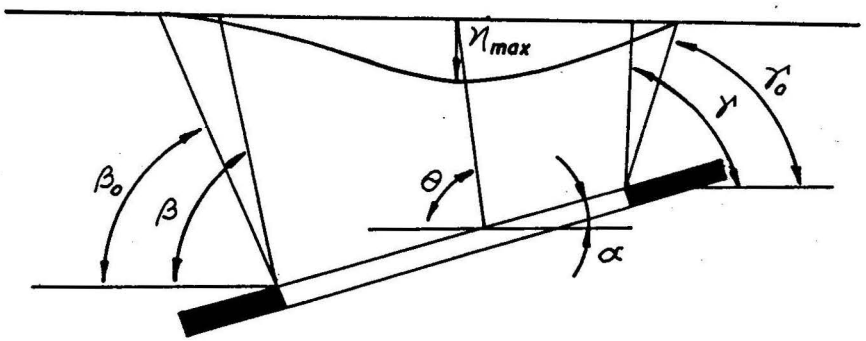


FIGURA 1.4. Angulos límites para el caso de cuerpos minerales con yacencia suave

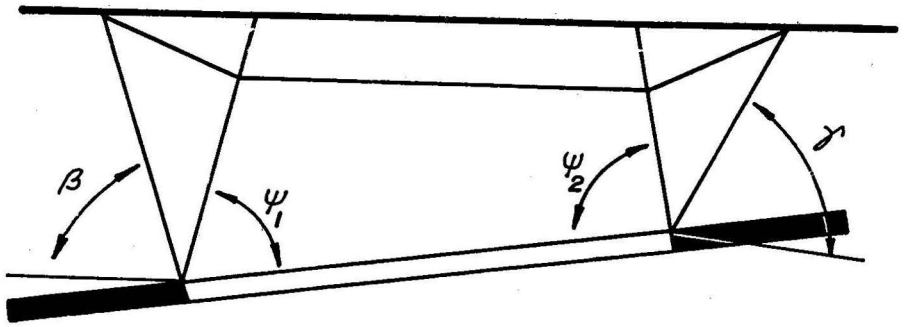


FIGURA 1.5. Angulos de desplazamiento total

Para caracterizar el proceso de desplazamiento de las rocas muy frecuentemente se usa el coeficiente de afectación, por el cual se entiende la relación entre la longitud del espacio trabajado con respecto a su longitud mínima que produjo la afectación total del terreno de superficie según esa dirección.

Son utilizados normalmente dos coeficientes de afectación, uno según el buzamiento y otro según el rumbo.

Si se designan por D_1 y D_2 las dimensiones reales del espacio trabajado según el buzamiento y el rumbo respectivamente y por D'_1 y D'_2 las dimensiones mínimas (según estos casos) del espacio trabajado que producen la afectación total, entonces el coeficiente de afectación según el buzamiento será:

$$\eta_B = \frac{D_1}{D'_1}$$

y por el rumbo:

$$\eta_R = \frac{D_2}{D'_2}$$

Un parámetro importante que da el grado de afectación es la relación entre la longitud del espacio de trabajo (D) con relación a la profundidad en que se realizan los trabajos (H) para la cual se crean las condiciones de una afectación total.

En muchas ocaciones durante el desplazamiento de la superficie surgen grietas. La zona de la depresión de desplazamiento donde se observa la aparición de grietas se limita por los ángulos de corte (de fracturación) los cuales son externos con respecto al espacio trabajado. Estos ángulos se forman entre la línea horizontal y la línea que une el límite del espacio trabajado con los bordes de la zona agrietada en la superficie (Figura 1.6).

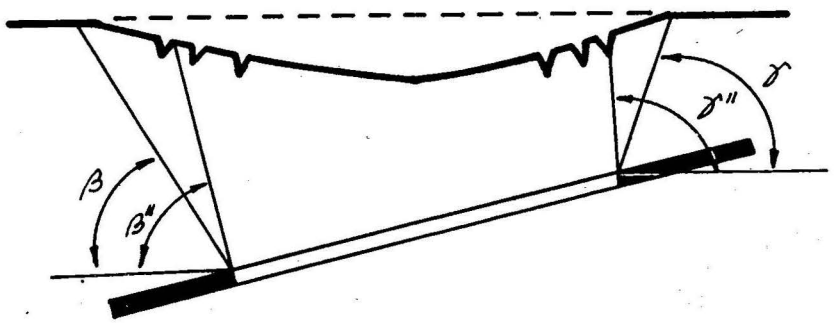


FIGURA 1.6. Angulos de corte

En los límites de la depresión de desplazamiento se encuentran las zonas de influencia de mayor peligrosidad, en donde la deformación puede sobrepasar las magnitudes críticas y ser peligrosas para las construcciones de superficie.

El asentamiento de la superficie (η) no es más que la componente vertical del desplazamiento del terreno de la superficie. Es costumbre diferenciar el asentamiento máximo para una afectación total (η_t) y para una imcompleta (η_i). El asentamiento que sufre cualquier punto de la superficie se determina a partir de la diferencia de altura que tiene dicho punto antes y después de los trabajos subterráneos.

Para el cálculo de la magnitud máxima del asentamiento del terreno de la superficie, existen una serie de fórmulas, entre las cuales una de las más difundidas es la de Avershin, la cual plantea que el asentamiento máximo η_o se calcula por la expresión:

$$\eta_o = \frac{a}{a + H} \qquad (1.3)$$

donde:

a: coeficiente al que el autor (Avershin) le da un valor que oscila entre 22 y 25;

H: profundidad a que se encuentra la roca o mineral arrancado (m);

m: potencia del mineral extraído o altura de la excavación.

Esta fórmula del cálculo, a pesar de presentar algunas deficiencias tales como: no tener en cuenta el valor de las propiedades físico-mecánicas de las rocas del techo de la zona explotada, ni las dimensiones del espacio trabajado; factores de los cuales en gran medida depende la magnitud del asentamiento, se aplica en la práctica mundial debido a que con el uso del coeficiente (a) se refleja en cierta forma el aspecto físico del proceso, además con esta fórmula el cálculo es bastante simple y los resultados con ella obtenidos son bastante cercanos a la realidad. Otra fórmula de cálculo es la propuesta por Leonotiev que da para el cálculo de la expresión:

$$\eta = \frac{K_1 \cdot S_v}{K_2 \cdot L} \qquad (1.4)$$

donde:

S_v: área de la sección vertical del espacio trabajado;

L: longitud de la zona de asentamiento;

K_1: coeficiente que caracteriza el grado de compactación de las rocas;

K_2: coeficiente que caracteriza las formas geométricas del techo.

Por su parte, la componente horizontal del desplazamiento del terreno de superficie se denomina desplazamiento horizontal. La magnitud del desplazamiento horizontal de cualquier punto de la superficie se determina a partir de la diferencia entre mediciones de la distancia del punto que se mide con respecto a un punto fijo en un momento inicial y en cualquier instante del proceso de desplazamiento.

El valor de los desplazamientos horizontales se puede calcular por métodos gráficos o utilizando fórmulas empíricas.

Entre las fórmulas más usadas tenemos la de S. Aversfin según la cual:

$$V_{máx} = K\, N'_{máx} \qquad (1.5)$$

donde:

K: es un coeficiente que según Avershin tiene valores de 5-20, en la mayoría de los casos se toma entre 10 y 12.

$N'_{máx} = 0{,}01 \frac{\eta_o}{l}$: es la inclinación máxima obtenida de la curva de asentamiento.

donde:

η_o: es el asentamiento máximo;

l: distancia de punto con hundimiento máximo hasta el punto inflexión de la curva de asentamiento.

La magnitud de la distancia se obtiene de las mediciones topográficas y por la construcción gráfica de la curva de asentamiento-hundimiento, si faltaran datos de los trabajos topográficos, entonces el valor se puede obtener con bastante aproximación por las fórmulas:

$$l = \frac{L}{2} \quad \text{o} \quad l = 0{,}7\, H \qquad (1.6)$$

donde:

L: es la distancia desde el límite de la zona de hundimiento hasta el punto de hundimiento máximo;

H: es la profundidad de la zona explotada.

Si no existen datos sobre los valores de η_o, este se puede tomar en forma orientativa por la expresión:

$$\eta = 0{,}6\, m \qquad (1.7)$$

donde:

m: potencia real del cuerpo mineral explotado o altura de la excavación.

Para este caso se puede emplear también otra fórmula dada por Avershin.

$$\eta = 0{,}78\ \frac{m}{H} \qquad (1.8)$$

Como la anterior, esta tiene un carácter orientativo.

La deformación vertical que puede sufrir una zona de la superficie se debe al asentamiento irregular que ella sufre y se caracteriza por su inclinación, curvatura y por el radio de curvatura. La inclinación de la superficie se determina a partir de la relación entre la diferencia de asentamiento de dos puntos vecinos de la superficie con respecto a la distancia entre estos puntos.

La curvatura de la superficie (K) se caracteriza por la relación entre la diferencia de pendientes entre sectores vecinos con respecto a la semisuma de las longitudes de estos sectores. La magnitud inversa a la curvatura, o sea, $1/K$ se denomina radio de curvatura (R) de la superficie, o sea, ($R = 1/K$) y se expresa en kilómetros.

La deformación horizontal de la superficie se determina, como la relación entre la diferencia de longitud de los sectores vecinos en un momento dado del proceso de desplazamiento, con respecto a la diferencia existente en el momento inicial de los trabajos.

1.2. ZONAS DE DESPLAZAMIENTO DE LA ROCA

Los distintos sectores del macizo rocoso que sufren la influencia de los trabajos mineros, tienen determinadas diferencias entre sí, dado esto por la características y el grado de deformación de las rocas.

En el caso más general el macizo deformado se puede dividir en numerosas zonas (ver Figura 1.7) para el caso de un yacimiento de yacencia abrupta.

Aunque en ocaciones en la literatura esto se muestra en forma simplificada dividiéndolo en 4 o 5 zonas (ver Figura 1.8).

En ambos casos en la zona 1 (que se ubica directamente sobre el espacio vacío), la roca se encuentra muy deformada, divididas en pedazos y en pequeños bloques. Esta zona habitualmente se denomina de fracturación.

Para el cálculo de la altura de la zona de fracturación (h_f) existen numerosas fórmulas, entre ellas, como ejemplo, tenemos la de S.Avershin.

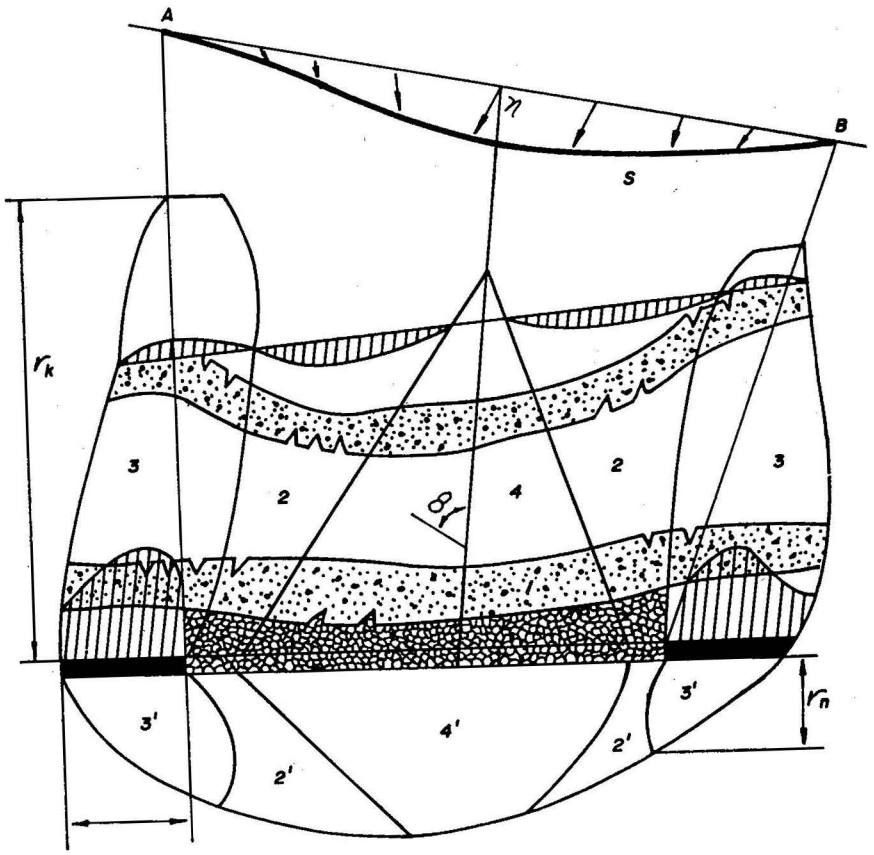


FIGURA 1.7. Esquema general de un macizo deformado dividido en zonas para cuerpos minerales con yacencia suave

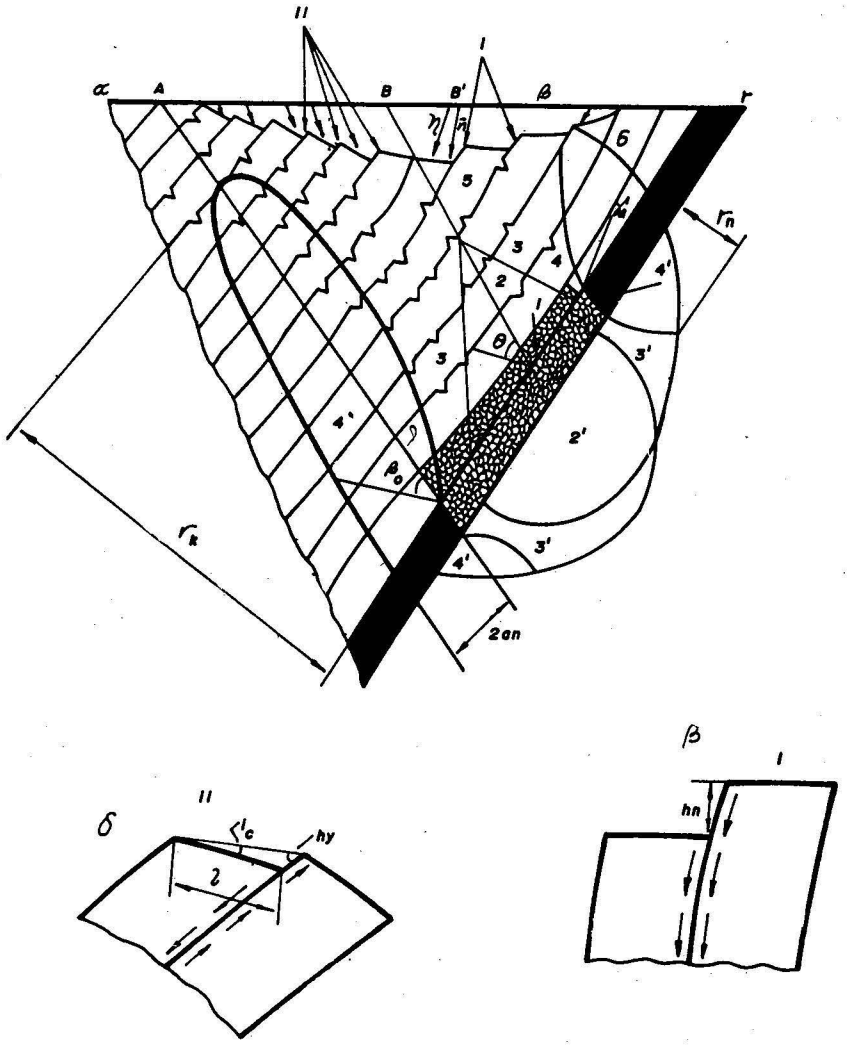


FIGURA 1.8. Esquema simplificado del macizo deformado dividido en zonas para cuerpos minerales con yacencia abrupta

$$h = 3 \cdot \frac{m}{(K_e - 1)\ \cos\alpha} \qquad (1.9)$$

donde:

m: altura del vacío formado;

K_e: coeficiente residual de esponjamiento de la roca, oscila de 1,1 a 1,4;

α: ángulo de buzamiento.

La dificultad de empleo de esta y otras fórmulas para el cálculo de h_f estriba en lo difícil que resulta obtener el valor de K_e. Por ello en la práctica, habitualmente la magnitud máxima de la zona de fracturación se toma como de dos a tres veces la altura del vacío formado.

La altura de la zona de fracturación h_f depende de una serie de factores, tales como:

- Relación entre la potencia del mineral extraído (altura del vacío formado) y la potencia de las diferentes capas que forman el techo directo (dimensiones de los bloques estructurales del macizo y sistemas de debilitamiento estructural del contorno).
- Propiedades físico-mecánicas de las rocas.
- Sistema de explotación empleado.
- Método de dirección de la presión.

Ligado a la tendencia de la roca al derrumbe está la manifestación de hundimientos del terreno de superficie, sin embargo, la altura de la zona de fracturación no se debe identificar con la distancia desde el techo del espacio trabajado a la superficie para la cual es factible la aparición de este fenómeno.

Los parámetros de la zona de destrucción, en particular su altura y el coeficiente de esponjamiento de la roca, tienen un gran significado durante la evaluación de la posibilidad de realización de los trabajos subterráneos.

La zona de roca flexionada (zona 2) se forma preferentemente en macizos estratificados. En esta zona la roca se deforma dividiéndose según las zonas de contacto formando un sistema de capas finas. La potencia de estas capas depende del tipo de roca, su estructura y de las propiedades físico-mecánicas.

La forma fundamental en que se manifiesta la deformación de la roca en esta zona es por la flexión de las diferentes capas de roca, acompañadas por los esfuerzos al cortante según los planos de debilitamiento.

En esta zona se puede diferenciar dos subzonas, la de descarga (ver Figura 1.8) y la de formación de grietas. La subzona de descarga se caracteriza porque en ella las tensiones actuales son menores que las que

existían inicialmente, en tanto que en las zonas de formación de grietas se cambian las condiciones existentes de permeabilidad del macizo.

La deformación de la roca en las zonas de la presión de apoyo (zona 3) depende del aumento de las tensiones normales y el grado de disminución del empuje lateral en la frontera de la zona de flexión. Las formas fundamentales de manifestarse la deformación en esta zona son por los esfuerzos a compresión según la dirección normal y por los esfuerzos al cortante en la superficie de contacto.

La zona de desplazamiento total (zona 4) se puede formar tanto en el macizo como en la superficie para determinadas relaciones entre las dimensiones del espacio trabajado y la profundidad.

1.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE DESPLAZAMIENTO DE LAS ROCAS Y DE LA SUPERFICIE

Se pueden mencionar numerosos factores geólogo-mineros que ejercen una influencia significativa sobre el carácter del proceso de desplazamiento de la roca y la superficie. Algunos de estos factores dependen del hombre (velocidad de avance de los trabajos, dirección de la presión minera y otros), en tanto que otros como los elementos geométricos de yacencia del mineral son invariables. A los primeros factores, los que depende del hombre, se les denomina regulables, en tanto que a los segundos factores, o sea, a los naturales que son invariables, se les denomina factores dados, a continuación se hace un estudio por separado de cada grupo.

A) Factores regulables:

Potencia de mineral extraído

Es uno de los factores que más influye sobre la magnitud y las características del proceso de desplazamiento de las rocas. De este factor van a depender en gran medida los parámetros de las diferentes zonas de desplazamiento-deformación que se forman en el macizo y los de la depresión de desplazamiento en la superficie.

Todos los tipos de desplazamiento que se producen en el macizo, en mayor o menor grado, son proporcionales a la potencia extraída. Por esta razón, este factor se considera fundamental a la hora de evaluar la magnitud de la zona de formación de grietas, para determinar la magnitud del asentamiento máximo del terreno de superficie y su desplazamiento horizontal y su deformación.

Método de explotación y dirección del techo

Los parámetros del sistema de explotación que influyen más sobre el proceso de desplazamiento de la roca son: la altura de la zona explotada, longitud de dicha zona, forma de dirección del techo y velocidad de avan-

ce del frente de trabajo. La altura y longitud de la zona de trabajo tienen una influencia similar, ellas determinan las dimensiones y o formas de la depresión de desplazamiento.

Para dimensiones pequeñas del espacio laboreado esta depresión de desplazamiento va a ser pequeña y va a tener una configuración en forma de taza, en tanto que para grandes valores del espacio laboreado su área va a ver mayor y va a adquirir una forma parecida a un plato.

El método de dirección de la presión minera que protege mejor a la superficie del efecto del desplazamiento es el rellenado del espacio trabajado. El relleno, al ocupar el espacio vacío, sostiene a las rocas que yacen sobre dicho espacio y en gran medida disminuye y hace más lento el proceso de desplazamiento de las rocas.

La eficiencia del rellenado, en este sentido, va a estar en dependencia de las características del material que se use para dicho fin, de la forma en que se realice el proceso de rellenado, así se tiene que un rellenado seco no produce el mismo efecto que cuando éste se hace por vía hidráulica.

Para un rellenado de calidad se ha obtenido en la práctica, que el asentamiento de los terrenos de la superficie no exceden de un 3 % de la potencia (altura) de la zona trabajada.

Otro aspecto a tener en cuenta es que cuando se usa el rellenado del espacio trabajado, el proceso de asentamiento se produce en forma suave y uniforme, no sufriendo afectaciones las construcciones de superficie.

Velocidad de los trabajos de avance

Este factor en gran medida influye sobre la duración e intensidad del proceso de desplazamiento. Variando la velocidad de los trabajos se puede regular la duración de las diferentes etapas del proceso de desplazamiento de la roca.

Cantidad de frentes de trabajo

El número de frentes de trabajo ejerce una gran influencia sobre el carácter y la magnitud del proceso de desplazamiento que se produce en la superficie. La afectación reiterada del macizo debido a los trabajos de explotación, puede conducir a la variación de las propiedades de las rocas y a la eliminación, de los vacíos existentes en el macizo, lo que puede conllevar a procesos internos de desplazamiento en determinados sectores del macizo.

B) Factores dados (naturales):

Propiedades físico-mecánicas de las rocas y sus características estructurales

El estado en que se encuentre la roca en el macizo en gran medida influye sobre las características del proceso de desplazamiento. Así tene-

mos que en el caso de la roca, desligada, con poca cohesión, el desplazamiento de la roca ocurre en forma rápida y se refleja en la superficie. Por el contrario en las rocas con características plásticas (por ejemplo esquistos arcillosos) se producen deformaciones plásticas en la roca y por ende el desplazamiento de la roca ocurre en forma distribuida y suavemente detrás del avance de los trabajos. Aquí generalmente se producen pocas afectaciones a las construcciones de superficie.

El grado de fracturación del macizo rocoso es otro factor que influye significativamente en la magnitud de la deformación que sufre el terreno de superficie y en el carácter de su distribución en la depresión de desplazamiento.

La fracturación del macizo se produce por variados factores (geológicos, tectónicos y otros).

Angulo de buzamiento de la roca

Es uno de los factores principales que determina los parámetros angulares del proceso de desplazamiento de la roca y de la distribución de la deformación en la depresión de desplazamiento.

Con el aumento del ángulo de buzamiento crece la relación existente entre los desplazamientos horizontales y los verticales. Por ejemplo, si para buzamientos suaves la componente del desplazamiento horizontal habitualmente no llegaba a la mitad de la vertical, ya para un buzamiento de 45 grados ellos se hacen iguales y para un buzamiento de 65 a 70 grados la componente horizontal llega a duplicar la vertical.

Profundidad de los trabajos

Este factor tiene gran influencia en la magnitud de la deformación de la superficie. A medida que aumenta la profundidad de los trabajos todos los tipos de afectaciones en la superficie se hacen menor. En particular es muy sensible a este factor la curvatura de la depresión de desplazamiento, ya que ella es inversamente proporcional al cuadrado de la profundidad.

Relieve del terreno de superficie

Este factor tiene influencia en un relieve de montaña en donde, producto de los trabajos subterráneos, en la superficie pueden ocurrir deslizamientos. La estabilidad de la roca en tales casos en mucho depende del ángulo de fricción interna y de la fuerza de cohesión por la superficie de deslizamiento.

Como resultado del proceso de desplazamiento de la roca se produce su esponjamiento lo cual es acompañado, generalmente, por la disminución de las características de resistencia de la roca (en particular la cohesión) y esto como es lógico conduce a disminuir la estabilidad del terreno de superficie.

CAPITULO II

METODOS DE ESTUDIO DEL PROCESO DE DESPLAZAMIENTO DE LA SUPERFICIE

Los principales métodos de estudio del proceso de desplazamiento del terreno de superficie son:

- Observación visual del proceso de desplazamiento de la superficie.
- Investigación del proceso de desplazamiento de la superficie utilizando modelos físicos.
- Investigación analítica del proceso de desplazamiento de la superficie utilizando modelos matemáticos.

2.1. OBSERVACION VISUAL DEL PROCESO DE DESPLAZAMIENTO DE LA SUPERFICIE

Un gran aporte al desarrollo de los métodos para el pronóstico del desplazamiento y deformación de los terrenos de superficie a causa de los trabajos subterráneos, han brindado los resultados obtenidos de la observación visual de este proceso.

La observación visual del proceso de desplazamiento de los terrenos de superficie se hace desde las estaciones de observación. Se denomina estación de observación a un conjunto de puntos de observación que se colocan según un perfil en la superficie.

Durante la realización de los trabajos se diferencian dos tipos de estaciones de observación: las típicas y las especiales.

Las estaciones típicas de observación se destinan para la determinación de los parámetros fundamentales del proceso de desplazamiento del terreno de superficie, en tanto que las especiales tienen como fin, obtener informaciones adicionales acorde a las características del macizo rocoso estudiado.

Según el tiempo de trabajo de estas estaciones de observación ellas pueden ser: estaciones para un largo tiempo de servicio, estaciones para un tiempo medio y estaciones para un corto tiempo de servicio.

Las estaciones destinadas para un largo tiempo de observación tienen la función de determinar los parámetros del proceso de desplazamiento en las condiciones de explotación de uno o varios horizontes de uno o varios cuerpos minerales. El tiempo de servicio de estas estaciones de observación es mayor de 3 años.

Por su parte las estaciones destinadas para un tiempo mediano de servicio, tienen la función de determinar los parámetros esenciales del proceso de desplazamiento del terreno de la superficie, motivado por la explotación en un horizonte. El tiempo de servicio de estas estaciones de observación oscila de 6 meses a 3 años.

Con respecto a las estaciones de observación de corto tiempo de servicio están destinadas para el estudio de los parámetros del proceso de desplazamiento del terreno de la superficie a profundidades no mayor de 250 metros. El tiempo de servicio de estas estaciones se prevee que no exceda de los 6 meses.

Las características de construcción de las estaciones de observación se eligen en dependencia de la tarea que se quiera resolver y de las condiciones minero-geológicas existentes. Habitualmente estas estaciones constan de una o dos líneas de referencias colocadas perpendicular al rumbo y por una línea de referencia colocada por el rumbo del yacimiento.

En la Figura 2.1 se da un esquema típico de una estación de observación para la medición de los parámetros del proceso de desplazamiento para cuerpos minerales, con un ángulo de buzamiento de hasta 25 grados.

En la Figura 2.2 se da un esquema típico de una estación de medición para el caso de ángulos de buzamiento del cuerpo mineral entre 25 y 45 grados.

Para la ubicación de la estación de observación se realiza su proyecto, el cual se compone de la memoria y los anexos gráficos.

El material gráfico del proyecto contiene: el plano combinado de la superficie y de los trabajos mineros con la representación de las líneas de perfiles de la estación de observación (las escalas del plano deben ser de 1:500, 1:1 000 o 1:2 000). En este plano se señalan los límites del campo de mina, el estado de los trabajos mineros en el momento de confeccionar el proyecto y su desarrollo futuro, la zona de desplazamiento presupuesta, las dislocaciones tectónicas, el proyecto de avance de los puntos de los cortes geológicos por las líneas de perfiles con la representación en ellos de las excavaciones mineras y las construcciones de los puntos de trabajo.

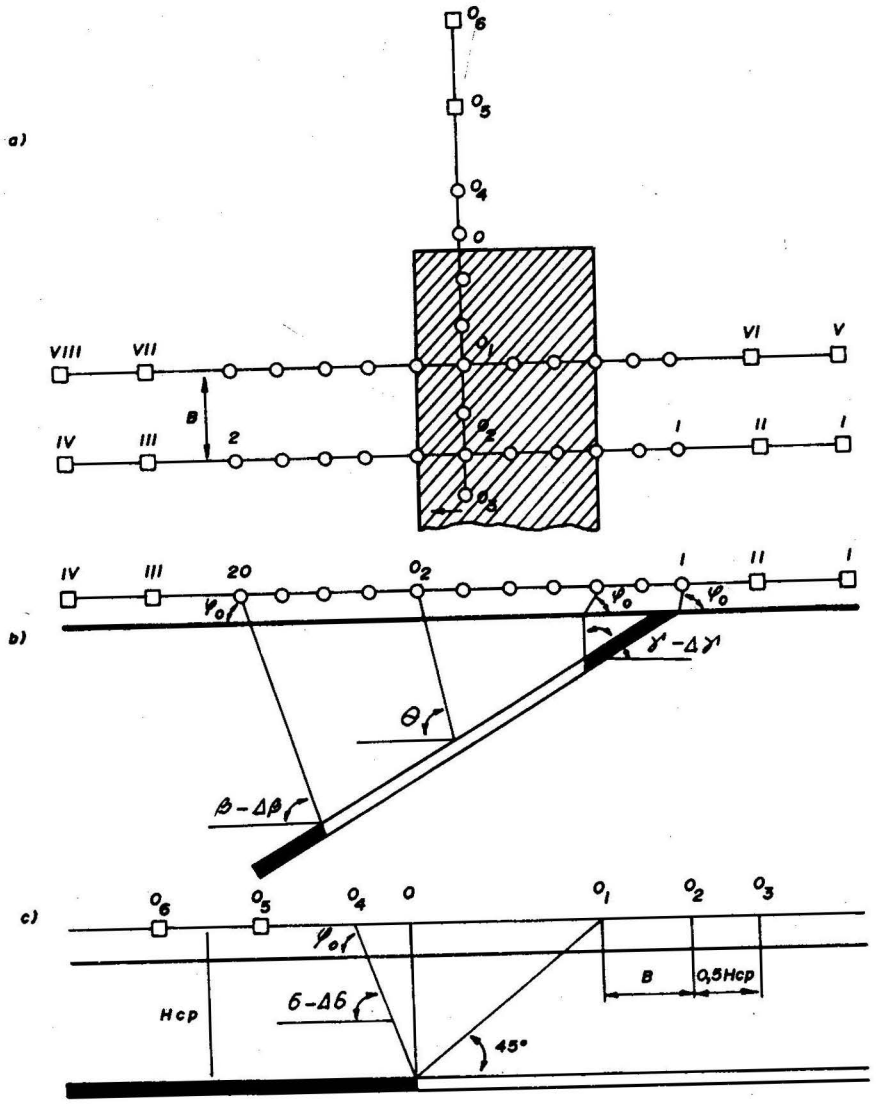


FIGURA 2.1. Estación de medición para cuerpos minerales con ángulo de buzamiento de hasta 25 grados; a) vista de planta, b) perfil perpendicular al rumbo, c) perfil por el rumbo

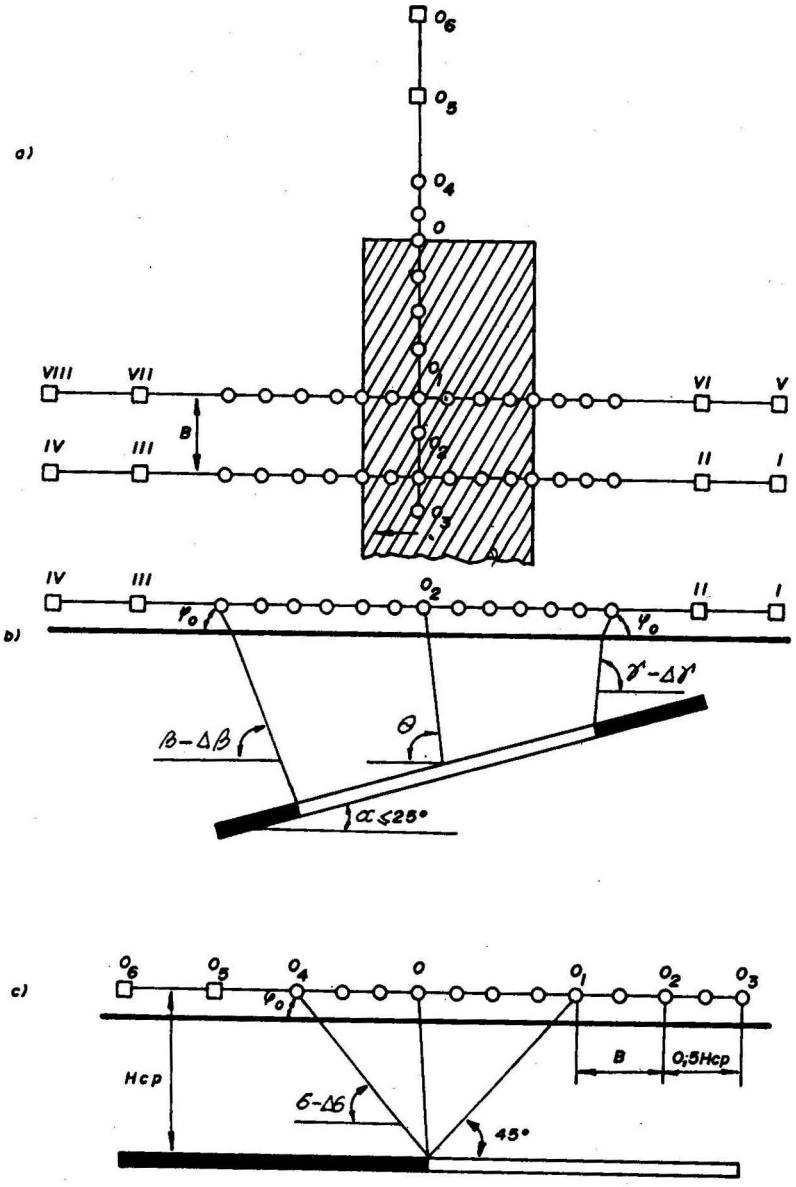


FIGURA 2. 2. Estación de medición para cuerpos minerales con ángulos de buzamiento entre 25 y 45 grados; a) vista de planta, b) perfil perpendicular al rumbo, c) perfil por el rumbo

El lugar de ubicación de la estación de observación se determina por la posición de los trabajos mineros y por la tarea de las observaciones. Sería más cómodo para las observaciones, un terreno llano poco poblado, situado al lado de las vías de carga y de los caminos. Habitualmente se trazan dos líneas de perfil por la dirección perpendicular al rumbo y una línea por el rumbo del yacimiento. Durante la explotación de los yacimientos, con condiciones geológicas y minero-técnicas variables las líneas de perfiles se distribuyen sobre unos cuantos sectores que se diferencian uno de otros por los elementos de yacencia, por la potencia de la capa y por el sistema de explotación.

Cercano al pilar, la línea de perfil perpendicular al rumbo del yacimiento se sitúa a una distancia no menor de 0,85 Hm del sector de corte o del lugar de detención del frente (Hm es la profundidad media de la excavación). Si el frente de trabajo se alejó del sector de corte, entonces la distancia desde ella hasta la línea de perfil se determina por la fórmula:

$$d = Hm + \cot \delta_o + 0{,}85\, Hm \qquad (2.1)$$

La segunda línea de perfil se sitúa paralela a la primera, a una distancia de 50 m .

La longitud de las líneas de perfil perpendicular al rumbo (Figura 2.3 a) se determina en los cortes verticales, por los ángulos límites del desplazamiento. En la continuación de las líneas de perfil, fuera del límite de la zona esperada del movimiento, se fijan dos puntos de apoyo. La distancia del primer punto de apoyo, hasta el límite de la parte de trabajo de la línea de perfil, debe ser no menos de 50 m, en tanto que la distancia entre los puntos de apoyo, en dependencia de las condiciones locales, se toma de 50 a 100 m.

La línea de perfil por el rumbo debe pasar por el punto de la depresión de desplazamiento con mayor asentamiento; para su determinación en el corte perpendicular al rumbo desde el medio del espacio laboreado, se traza una línea con un ángulo hasta interceptarse con la superficie.

La longitud de la línea de perfil por el rumbo se determina de la siguiente manera (Figura 2.4): el lugar propuesto por la ubicación del frente se proyecta en la superficie (punto K).

Por el lado del pilar se deja la distancia $B = H_{media} \cot \delta_o$, y por el lado del espacio laboreado se pone a una distancia igual a 1,75 Hmedia.

Los referidos de apoyo se ponen según las mismas reglas que se aceptaron para las líneas de perfil perpendicular al rumbo.

En las líneas de perfil se ponen los referidos de trabajo, la distancia entre ellos se toma en dependencia de la profundidad de los trabajos mineros.

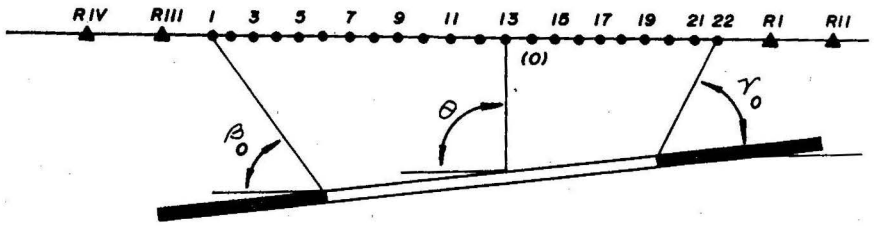


FIGURA 2.3. Esquema para la determinación de la longitud de la línea de perfil perpendicular al rumbo

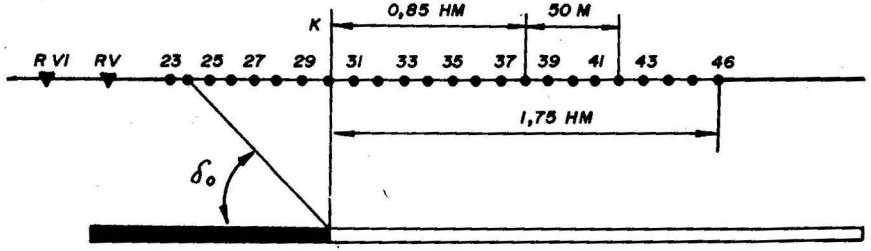


FIGURA 2.4. Esquema para la determinación de la longitud de la línea de perfil según el rumbo

La construcción de los puntos de apoyo debe garantizar, ante todo, su estabilidad y conservación con el transcurso del tiempo y además ser barato y contribuir a la mejor y más conocida realización de las observaciones. Para las estaciones permanentes y las ordinarias como regla, los puntos de apoyo representan tubos metálicos de hormigón, pedazos de rieles, (que se deben colocar a una profundidad por debajo del nivel de

congelación en los países fríos). En calidad de puntos de apoyo para las estaciones temporales se pueden utilizar estacas de madera. Para la conservación de los puntos, se hace un hoyo en el suelo a la profundidad de 30-40 cm .

Realización de las observaciones

Las observaciones en las estaciones de observación de la superficie constan de los siguientes pasos:

- Amarre de los puntos de apoyo de la estación con los de la red de apoyo.
- Observaciones preliminares en las estaciones de apoyo en los planos horizontales y verticales.
- Repetición de las observaciones.

El amarre de los puntos de apoyo de la estación de observación en el plano horizontal se realiza por el método de triángulación o con empleo de poligonales cerradas. El error de cierre permisible de la poligonal no debe superar a 1:2 000.

El amarre de los puntos de apoyo en el plano vertical se realiza desde los puntos de apoyo de la red de nivelación con el empleo de la nivelación geométrica con un error en el cierre que no debe exceder de la magnitud 15 $\sqrt{L}$ mm (donde L = longitud de la poligonal en milímetros).

Después del amarre de las estaciones de medición (observación) se realizan las observaciones primarias y posteriormente estas se reiteran.

La serie completa de las observaciones instrumentales incluye:

La nivelación de todos los puntos de apoyo, la determinación de las distancias entre los puntos de apoyo a lo largo de la línea de perfil, la determinación de las desviaciones de los puntos de apoyo de trabajo de la zona de la línea de perfil, el levantamiento de las zonas agrietadas que se forman en la superficie que incluye la determinación del tiempo de su manifestación y la medición de las deformaciones que sufren las obras de superficie.

La primera observación de la estación se recomienda realizarla después de 7 a 10 días de fijado los puntos de apoyo (si ellos se han hormigonado) y después de 2 a 3 días si ellos fueron hincados. La observación inicial se realiza dos veces y como resultado se da la media aritmética de ambas mediciones.

El intervalo que debe existir entre mediciones va a depender del objetivo que se persigue con la observación. Si es necesario obtener un comportamiento detallado del proceso de desplazamiento, entonces es menester realizar, en el intervalo de tiempo comprendido entre la primera y última observación, no menos de cuatro observaciones intermedias. El

intervalo de tiempo (t) entre la primera y última medición se puede determinar por la expresión:

$$t = H\,(6v) \qquad (2.2)$$

donde:

H: profundidad del piso de la excavación (m);
v: velocidad de avance de los trabajos (m/días).

Para condiciones minero-geológicas difíciles (por ejemplo para el caso de un macizo muy fracturado) o cuando se necesita obtener información específica para la resolución de una tarea fuera de lo común, se emplean las denominadas estaciones especiales de medición.

En estas estaciones, además de los perfiles habituales, se colocan puntos de apoyo complementarios según perfiles ubicados en la zona fracturada (Figura 2.5).

La longitud de estos perfiles adicionales oscilan entre 80 y 100 m, en tanto que la distancia entre puntos de referencia en estos perfiles se reduce a 5 o 10 m independientemente de la profundidad a que se realicen los trabajos.

En las estaciones especiales de observación en el período inicial de medición y en la etapa activa del proceso de desplazamiento la observación debe realizarse por lo menos tres veces al mes, en tanto que en la etapa de conclusión de este proceso por lo menos una vez por mes. La realización de las nivelaciones en las estaciones de observación de llevarse a cabo según las normas establecidas para las poligonales de nivelación de 4to orden.

En cualquiera de los tipos vistos de las estaciones de observación, la medición de las distancias entre los puntos de apoyo a lo largo de la línea de perfil, se debe realizar con el empleo de cintas compensadas de acero.

Durante la elaboración de los datos obtenidos de la observación del proceso de desplazamiento y deformación de la roca es bueno utilizar para el cálculo de los diferentes parámetros que caracterizan este proceso, las fórmulas siguientes (η):

$$\eta = H_i - H_n \qquad (2.3)$$

donde:

H_i: cota del punto de apoyo en la observación inicial;
H_n: cota del punto de apoyo en una observación posterior.

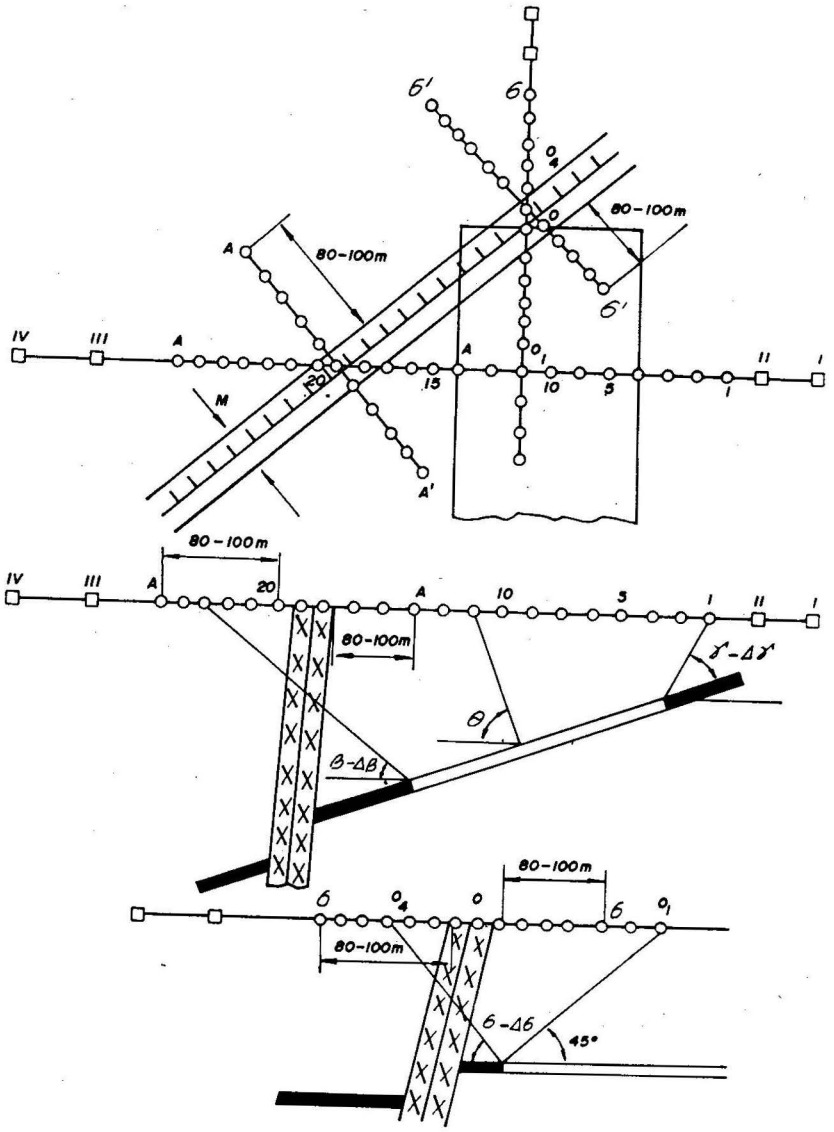


FIGURA 2.5. Estación de observación especial para el caso de una zona fracturada del macizo

Para el cálculo de la inclinación (i):

$$i \doteq \frac{(\eta_n - \eta_{n-1})}{l} \qquad (2.4)$$

donde:

η_n: magnitud de asentamiento del punto de apoyo n;
η_{n-1}: magnitud de asentamiento del punto de apoyo n-1;
l: distancia entre los puntos de apoyo n y n-1.

Para el cálculo de la curvatura (k):

$$K = \frac{(i_n - i_{n-1})}{l_\mu} \qquad (2.5)$$

donde:

i_n: inclinación para el intervalo n;
i_{n-1}: inclinación para el intervalo n-1;
l_μ: longitud promedio de los intervalos n y n-1.

El radio de curvatura (R) se determina de la expresión:

$$R = \frac{1}{K} \qquad (2.6)$$

Cálculo del desplazamiento horizontal (ξ):

$$\xi = D'_n - D^o_n \qquad (2.7)$$

donde:

D'_n: distancia del punto de apoyo base, al punto de apoyo n en un momento de la medición;
D^o_n: distancia del punto de apoyo base, al punto de apoyo n en el inicio de la medición.

Cálculo de la formación horizontal (ε):

$$\varepsilon = \frac{l_n - l_{(n-1)}}{l} \qquad (2.8)$$

donde:

l_n: longitud de los intervalos en la observación n;
l_{n-1}: longitud de los intervalos en la observación (n-1).

Apartir de los resultados obtenidos se pueden construir los gráficos de desplazamiento y deformación de los terrenos de la superficie.

2.2. INVESTIGACION DEL PROCESO DE DESPLAZAMIENTO DE LA SUPERFICIE UTILIZANDO MODELOS FISICOS

El método de laboratorio más utilizado para el estudio del proceso de desplazamiento de las rocas, es el método de modelación con el empleo de materiales equivalentes.

La esencia de este método consiste en que el macizo rocoso se modela en una determinada escala con el empleo de diferentes materiales, que se denominan equivalentes. Las propiedades físico-mecánicas y la construcción de este modelo deben satisfacer tres exigencias fundamentales:

- Debe observarse la semejanza geométrica entre todos los elementos del macizo y los correspondientes elementos del modelo (o sea, todos los elementos del modelo deben diferenciarse de sus correspondientes elementos del macizo en un coeficiente determinado).
- Es necesario la semejanza de las propiedades mecánicas del modelo y del macizo (las propiedades mecánicas del modelo deben encontrarse en una determinada relación con sus similares del macizo).
- Deben observarse las condiciones límites y las iniciales en el entorno de la zona estudiada (magnitud de las cargas, de formación,etcétera).

Las propiedades mecánicas del material que conforma el modelo se determina, sobre la base de la ley de semejanza mecánica de Newton.

De tal forma a la hora de elegir los materiales equivalentes para la construcción del modelo debe observarse la condición de semejanza dada por la expresión:

$$N_\mu = \frac{l}{L} \frac{\gamma_\mu}{\gamma_\eta} N_\eta \qquad (2.9)$$

donde:

N_μ: propiedades del material del modelo (tiene dimensiones kgf / cm^2 o mPa);
N_η: propiedades del macizo (estado natural) kgf/cm^2 o mPa;
l/L: escala geométrica elegida;
γ_μ: masa volumétrica del material equivalente;
$\gamma\eta$: masa volumétrica del macizo.

En muchos casos los materiales equivalentes elegidos no pueden satisfacer a la vez todas las propiedades que comprende el criterio de semejanza (expresión 2.9). En tales casos es necesario tener en cuenta las más importantes para el caso que se analice.

Durante la modelación del proceso de desplazamiento de las rocas una particular atención se le presta a las características estructurales del macizo y a la relación existente entre la altura del vacío formado (potencia de mineral extraído) y la profundidad de los trabajos.

Durante la modelación del proceso de desplazamiento de la roca es necesario conocer la escala de tiempo en la que ocurren los procesos geomecánicos. Esta escala se puede utilizar para ajustar las velocidades de las diferentes operaciones y para evaluar la influencia que tiene la velocidad de realización de los diferentes trabajos, sobre los parámetros del proceso de desplazamieto.

Habitualmente para obtener la escala de tiempo se emplea la siguiente expresión:

$$\alpha_t = \frac{T}{t} = \frac{V_\mu}{V_\eta} \cdot \frac{L}{T} \qquad (2.10)$$

donde:

V_μ y V_η: máxima velocidad de asentamiento de los terrenos de la superficie en el modelo y en condiciones naturales respectivamente;

T: tiempo de duración del proceso estudiado en las condiciones reales;

t: tiempo de duración del proceso estudiado en el modelo.

Para la modelación del proceso de desplazamiento de la roca se utilizan dos tipos de modelo: los planos y los volumétricos.

2.3. INVESTIGACION ANALITICA DEL PROCESO DE DESPLAZAMIENTO DE LA SUPERFICIE, UTILIZANDO MODELOS MATEMATICOS

La investigación analítica permite comprender la esencia física del proceso de desplazamiento. Sin embargo, aun en la actualidad, una teoría de este proceso no está elaborada, lo cual se explica por la complejidad de este fenómeno.

En el proceso de deformación el macizo rocoso se encuentra en diferentes estados funcionales, desde uno elástico hasta uno que caracteriza a

un macizo fracturado, las propiedades físico-mecánicas del macizo a causa de su estratificación y agrietamiento son diferentes y heterogéneas.

Los métodos de estudio más difundido se fundamentan en los resultados de la observación visual. Como fundamento de estos métodos sirve la dependencia de S. Avershin entre la magnitud del desplazamiento horizontal y la inclinación de la superficie.

$$\xi = h \cdot \frac{\partial_\eta}{\gamma_x} \qquad (2.11)$$

donde:

ξ: desplazamiento horizontal de la superficie;

$i = \frac{\partial_\eta}{\gamma_x}$: inclinación de la superficie;

h: distancia de la zona central de la depresión a la superficie.

Como una segunda condición que caracteriza la deformación de la superficie se utiliza la ecuacción de volumen constante. Se considera que la variación de volumen durante el proceso de deformación es relativamente pequeña en comparación con la deformación lineal.

$$\frac{\partial_\eta}{\partial_z} + \frac{\partial_\xi}{\partial_x} = 0 \qquad (2.12)$$

donde:

$\frac{\partial_\eta}{\partial_z}$: deformación de la roca según la vertical;

$\frac{\partial_\xi}{\partial_x}$: deformación horizontal.

Resolviendo conjuntamente las expresiones (2.11) y (2.12) se llega a una ecuación de segundo orden.

$$\frac{\partial_\eta}{\partial_z} = h \frac{\partial^2_\eta}{\partial_x^2} \qquad (2.13)$$

La expresión (2.13) significa que la comprensión (o tracción) depende de la 2da. derivada de la función del asentamiento según la variable x.

Esta solución está dirígida a cuerpos minerales con yacencia horizontal o poco inclinado y se corresponde a una serie de trabajos desarrollados en esa dirección (C. Avershin, R. Müller, y otros).

CAPITULO III

CALCULO DEL ASENTAMIENTO DE LOS TERRENOS DE SUPERFICIE

Las magnitudes del desplazamiento y la deformación de las rocas y del terreno de la superficie son parámetros fundamentales para realizar el proyecto y la construcción, tanto de las obras subterráneas como de las de superficie.

El aumento de la profundidad de los trabajos subterráneos conlleva a una ampliación de la zona de afectación en la superficie y por ende a un aumento en la cantidad de objetos y obras que van a estar afectadas por esta influencia, y por tanto, necesitan medidas de protección. Simultáneamente con esto, con el aumento de la profundidad se disminuye la magnitud de esta influencia, lo cual posibilita tomar medidas de protección más simples y menos costosas.

Para poder dar respuesta a una serie de interrogantes relacionadas con la afectación que se puede producir en los terrenos de la superficie por la influencia de los trabajos subterráneos, se utilizan numerosos métodos para el cálculo preliminar del asentamiento, ellos se pueden clasificar como sigue:

- Métodos empíricos.
- Métodos basados en las funciones de distribución.
- Métodos basados en los modelos teóricos.

3.1. METODOS EMPIRICOS PARA EL CALCULO DEL ASENTAMIENTO

Muchos autores plantean las ventajas de estos métodos sobre los demás, debido a que en ellos se emplean datos que se obtienen experimentalmente en los lugares en que se produce el desplazamiento y la deformación del terreno de superficie.

Los primeros métodos empíricos para el cálculo del asentamiento de los terrenos de superficie se basaron en el criterio, obtenido de la observación visual, de que la magnitud del asentamiento depende de la altura del espacio trabajado (potencia del mineral extraído), del ángulo de buzamiento del cuerpo mineral y del tiempo en que transcurre el proceso de asentamiento. Así surgieron fórmulas en que el asentamiento dependía del área de trabajo subterránea, teniéndose en cuenta mediante coeficientes, el esponjamiento que sufre la roca al fracturarse. A continuación se estudian brevemente algunos métodos empíricos para la determinación del asentamiento.

Método inglés de las curvas típicas

Según este método la forma generalizada de la curva de asentamiento (curva típica), obtenida a partir de un gran número de mediciones *in situ*, se describe con ayuda de un nomograma, con el empleo del cual pueden ser determinada la posición de los puntos característicos del perfil de la depresión de asentamiento para unas condiciones minero-geológicas dadas y condiciones concretas del frente de trabajo subterráneo.

Inicialmente, hasta los años 40, aproximadamente en Inglaterra se utilizaban curvas típicas, obtenidas a partir de tres puntos característicos, que eran: el límite de la zona de los trabajos subterráneos, el punto en el cual el asentamiento era la mitad del máximo y en el centro de la zona de depresión (ver Figura 3.1).

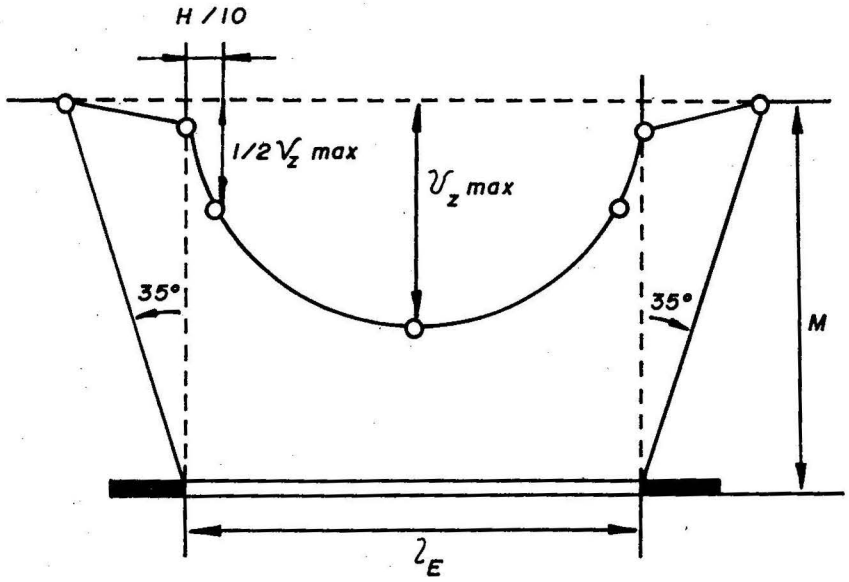


FIGURA 3.1. Curva típica obtenida a partir de tres puntos

En esta curva el punto en el cual el asentamiento, es igual a la mitad del máximo, se encuentra cercano a los límites del espacio trabajado, a una distancia de dicho contorno que en forma aproximada se puede obtener por la relación:

$$L' = 0{,}1\ H{,}M \qquad (3.1)$$

siendo:

H: profundidad de la zona de trabajo subterráneo (m).

Posteriormente, sobre la base de un gran número de datos obtenidos de observación visual y de la medición *in situ* fue elaborado un método de cálculo más exacto basado en la utilización de tres diafragmas adicionales a partir de los cuales se puede determinar al asentamiento en diferentes puntos de la curva típica para diferentes profundidades de los trabajos (H), diferentes longitudes de los frentes de trabajos (L_1) y según los intervalos (L) de los puntos de medición.

Para analizar este método se va a utilizar el caso de un frente de 200 m de ancho y de una longitud de 300 m ubicado a una profundidad de 400 m. La potencia de mineral extraído (altura del espacio trabajado, en m) es de 200 m .

En primer lugar con la utilización de los diagramas a y b (ver Figura 3.2) se determina el máximo asentamiento (η_o) sobre el punto medio del espacio trabajado.

A partir de la suposición de que en el espacio trabajado se emplea uno u otro método de los sostenimientos y de que la relación $\frac{L_f}{H}$ para este caso es $\frac{200}{400} = 0{,}5$ se obtiene de la Figura 3.2a, para el caso de sostenimiento con el derrumbe del techo, un valor de 0,45 con el cual se afecta la potencia (m) del espacio trabajado y se obtiene la magnitud del asentamiento máximo, o sea, $\eta_o = 0{,}90$ cm . Para una excavación que tenga una longitud igual al diámetro de un área trabajada de $2R = 1{,}40$ H, si la dimensión por el rumbo del área trabajada es menor que $2R$, el valor obtenido del asentamiento máximo (η_o) debe ser corregido al afectarlo por un coeficiente (Z) que se obtiene del diagrama en la Figura 3.2b.

En el caso estudiado, el valor de $2R$ es igual a 0,75 H (ya que la dimensión por el rumbo del espacio trabajado es de 300 m), o sea, $L_R < 2R$.

En este caso el asentamiento máximo se obtiene por la expresión:

$$\eta_o' = Z \cdot \eta_o \qquad (3.2)$$

$$\eta_o' = 0{,}77 \cdot 0{,}90 = 70 \text{ cm}$$

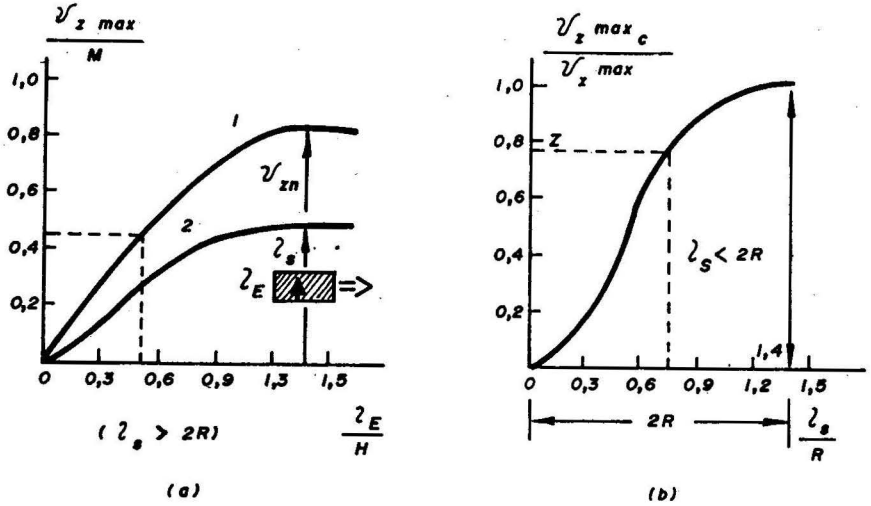


FIGURA 3.2. Diagramas para la determinación del asentamiento máximo:
a) Curvas que dan la dependencia entre el asentamiento máximo (η_o) y la relación entre la longitud del frente (l_f) y la profundidad (H): 1) para el arranque con el derrumbe del techo; 2) para el arranque con rellenado total del espacio. b) Curva para determinar el asentamiento máximo (η_o') corregido en dependencia de la longitud del frente según el rumbo (l_R)

En el punto de inflexión del perfil de la depresión, el asentamiento será igual a la mitad del máximo. Para los frentes trabajados de poco ancho este punto estará ubicado a una distancia del contorno de la zona no mayor de 0,15 H. A medida que aumenta el ancho de la zona trabajada este punto se desplaza hacia el límite de la zona trabajada y coincide con ella para una magnitud del ancho de 0,41 H.

La curva típica que se construye por esta vía puede ser utilizada para el caso de yacencias horizontales del cuerpo mineral y para cualquier sección de la drepresión de asentamiento según el rumbo o el buzamiento.

Método de las curvas típicas empleado en la URS

Este método se diferencia del anterior en que el perfil de la depresión de asentamiento no se construye con el empleo de diagramas, sino con la utilización de expresiones analíticas que describen la trayectoria de la curva de asentamiento.

Según el método, se propone la siguiente expresión:

$$\eta = \eta_o \left[1 - \frac{X}{L} + \frac{1}{2\pi} \operatorname{sen}\left(2\pi \frac{X}{L}\right)\right] \qquad (3.3)$$

donde:

X: distancia horizontal entre el punto examinado de la superficie (*P*) y el centro de la depresión;

L: distancia desde el centro de la depresión hasta su contorno.

La magnitud del asentamiento máximo se determina por la expresión:

$$\eta_o = a \cdot m \cos\alpha \sqrt{\eta_1 \cdot \eta_2} \qquad (3.4)$$

$$\eta_1 = 0{,}9 \frac{l_R}{H_m} \qquad (3.5)$$

$$\eta_2 = 0{,}9 \frac{l_f}{H_m} \qquad (3.6)$$

donde:

a: coeficiente que tiene en cuenta la forma de sostenimiento del espacio trabajado;

H_m: profundidad de la zona media del espacio trabajado (ver Figura 3.3).

Si la dimensión del espacio trabajado, ya sea por el rumbo o el buzamiento, excede de la magnitud de la profundidad H_m, los valores respectivos de η_1 y η_2 que se utilizan en la expresión (3.4) serán iguales a 0,9.

Método de integración de redes

Se emplea para el caso de yacencia horizontal de los cuerpos minerales. Este método no necesita de la construcción de los perfiles de la zona depresión, ni del empleo de expresiones de cálculo analítico, ya que se basa en mediciones del asentamiento realizado directamente en la zona de afectación.

Para ello en un papel de dibujo (papel alba) se representa, en la escala en que esté el plan de los trabajos mineros, un círculo o un cuadrado

(que se corresponda con el área de los trabajos subterráneos) los que se desarrollan en forma de zonas sectoriales o de rectángulo (para el caso de un círculo Figura 3.4 y para el caso de un cuadrado Figura 3.5).

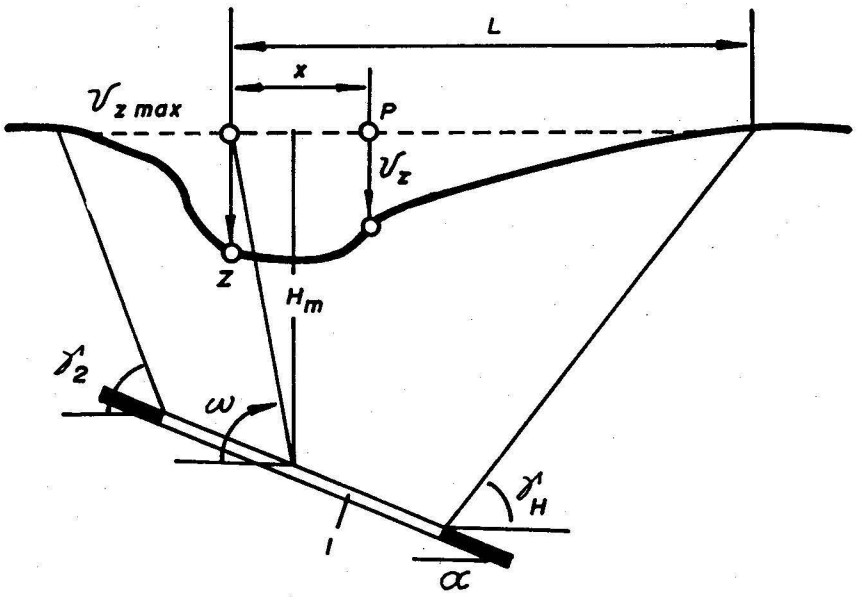


FIGURA 3.3. Curva típica obtenida según la expresión analítica

Posteriormente esta red se coloca sobre el plan de los trabajos mineros y sucesivamente se hace coincidir su centro con todos los puntos de la superficie, para los que son conocidos (por la medición directa) las magnitudes de los parámetros del proceso de desplazamiento.

Para cada uno de estos puntos se conforman ecuaciones de asentamiento con coeficientes que se obtienen por la relación:

$$C_i = C_1 \cdot A_1'/A_1 \,;\, b_1 = C_2 \frac{A_2'}{A_2} \,;\, \ldots\ldots \,;\, J_i = C_{10} A_{10}'/A_{10} \qquad (3.7)$$

donde:

C_i: convergencia en el frente de trabajo subterráneo.

Para η puntos de la superficie y la red conformada por η zonas se obtiene un sistema de ecuaciones que permite realizar el cálculo de los parámetros buscados.

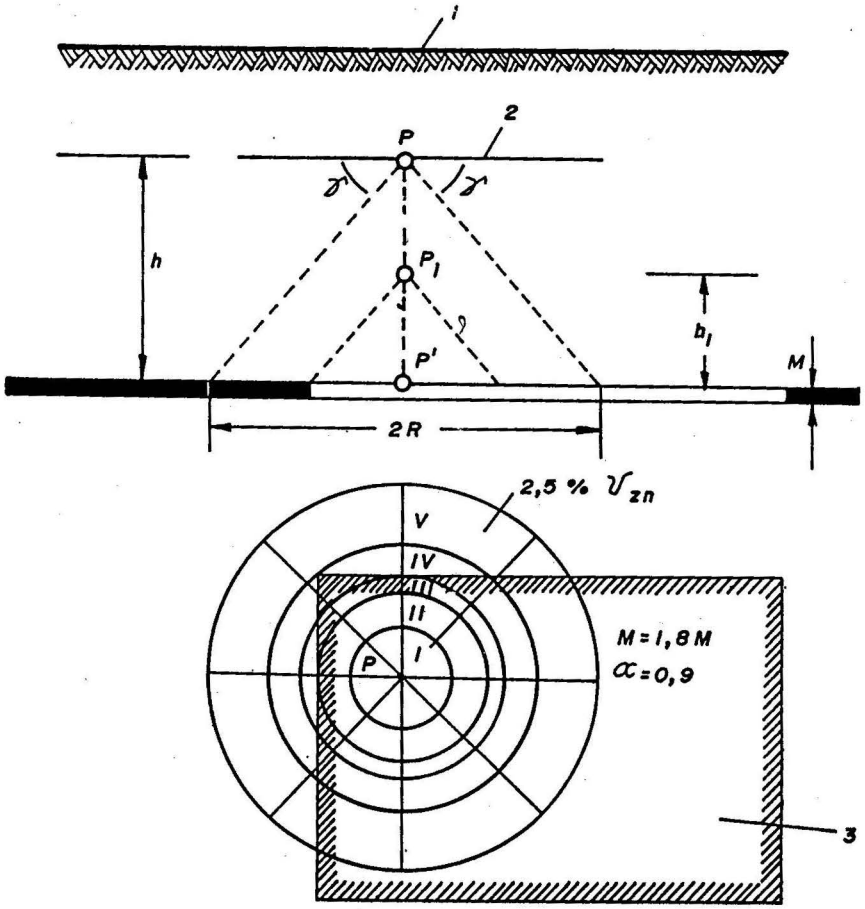


FIGURA 3.4. Esquema para el cálculo del asentamiento de la superficie a partir de un sector circular

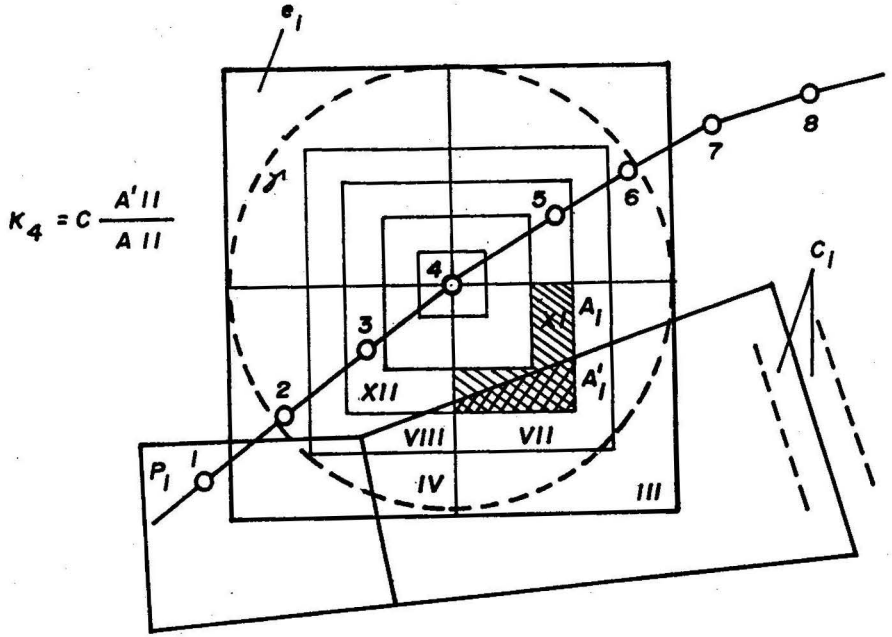


FIGURA 3.5. Esquema para el cálculo del asentamiento de la superficie a partir de un rectángulo

3.2. METODO DE CALCULO DEL ASENTAMIENTO BASADO EN LA UTILIZACION DE LA FUNCION DE DISTRIBUCION

Los métodos de cálculo del asentamiento, basados en la utilización de la función de distribución, ocupan un lugar intermedio entre los métodos empíricos y los métodos que se fundamentan en modelos.

Todos los métodos comprendidos en este grupo tienen de común que ellos se basan en la denominada función de distribución o la función de influencia que es la que describe el carácter y grado de influencia de áreas elementales, en los que se divide el área del sector subterráneo explotada, sobre la superficie. Así tenemos (Figura 3.6) que el elemento dA, del frente de trabajo cercano al área que ya fue trabajada, ejerce sobre el punto P de la superficie; menos influencia que el elemento dA_z situado en el centro del espacio trabajado, debido a que este elemento (el dA) se encuentra más alejado de ese punto P y la línea por la que se produce su afectación, es inclinada (o sea, tiene un ángulo menor con respecto a la horizontal en relación con la del elemento dA_z).

Durante el cálculo, en la mayoría de los métodos de este grupo, los elementos infinitesimales se unen formando zonas en forma de sectores circulares (Figura 3.6.).

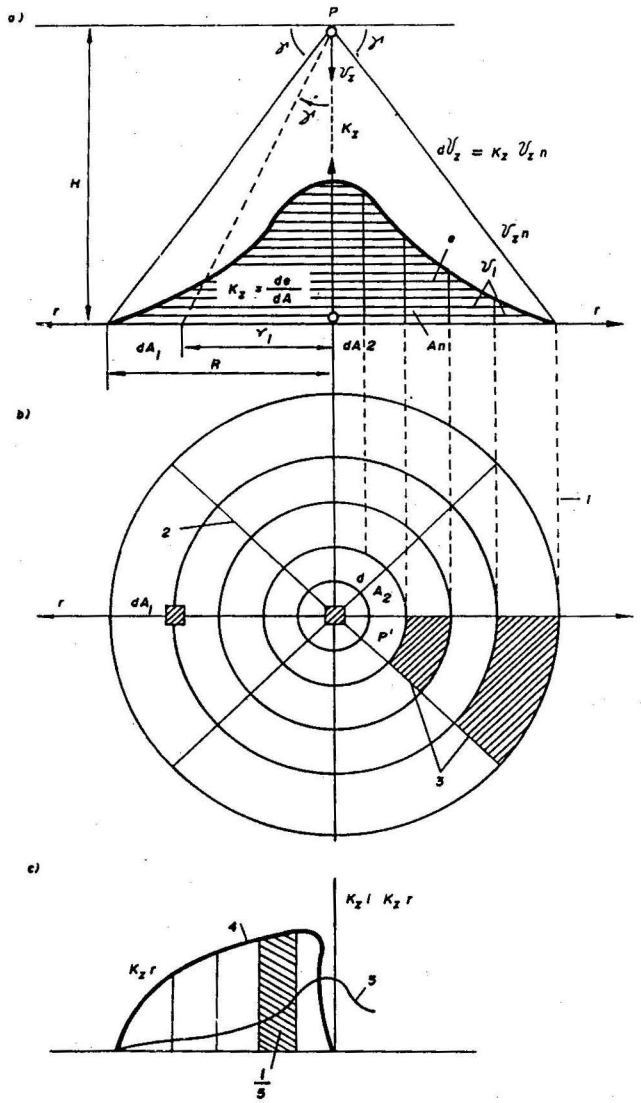


FIGURA 3.6. Esquema para el cálculo del asentamiento según las funciones de distribución

Las dimensiones de estos sectores se eligen a partir del criterio de que el grado de influencia de cada una de estas zonas sobre el punto de la superficie situado en el centro del espacio, fuera aproximadamente igual.

Con la ayuda de las redes construidas se puede determinar el asentamiento esperado en diferentes puntos de la superficie.

El primer método difundido para el cálculo del asentamiento con el empleo de la red integrada fue elaborado por H. Keinhorst en el año 1925.

A continuación se mencionarán las funciones de distribución más difundidas para el cálculo del asentamiento.

Función de distribución según R. Bals

$$K_z' = \cos^2 \gamma$$

$$K_z = 0{,}25\ (sen\ 2\gamma + 2\gamma) \qquad (3.8)$$

Según el método de F.Beyer

$$K_z' = K'(1 - i^2)^2$$

$$K_z = 2\pi K' R^2 \left(i^2 - i^4 + \frac{i^6}{3}\right) \qquad (3.9)$$

Según el método de B. Sann

$$K_z' = 2{,}256\,\frac{1}{r}\,e^{-4r^2}$$

$$K_z = 2\pi\ (2{,}256)\ (i - 1{,}33\,i^3 + 1{,}60\,i^5 - 1{,}523\,i^7 + 1{,}185\,i^9 .....) \qquad (3.10)$$

Para el método de W. Ehrhard- A. Saver

$$K_z' = 0{,}01392\ e^{-0{,}5\,r^2}$$

$$K_z = 2\pi\ (1 - e^{-0{,}5\,r^2}) \qquad (3.11)$$

donde:

K_z: función que caracteriza la ley de crecimiento de la influencia de los trabajos subterráneos sobre la superficie;

K_z': función de distribución de un elemento.

Las funciones de distribución mencionadas y empleadas anteriormente son utilizadas para el caso de yacencia horizontal de los cuerpos minerales.

Las funciones de distribución empleadas en los diferentes métodos de cálculo del desplazamiento de la superficie, se basan en elaboraciones analíticas obtenidas de datos de la observación visual o en diferentes suposiciones teóricas.

3.3. CALCULO DEL ASENTAMIENTO CON EL EMPLEO DE MODELOS TEORICOS

Para poder determinar el desplazamiento de los terrenos de superficie, es necesario calcular la deformación del macizo rocoso a partir de las leyes de la mecánica de los medios continuos o mediante principios de la estadística en dependencia del modelo de macizo que se estudia.

Habitualmente los modelos de macizo más utilizados en este caso son: el probabilístico (para macizos que se caracterizan por su discontinuidad), el elástico y el inelástico. En ocasiones se utilizan modelos combinados, por ejemplo, un modelo de dos capas, la inferior que caracteriza la zona situada encima del espacio trabajado (un medio discontinuo) y la superior que se caracteriza por un medio elástico.

Modelo probabilístico

En un medio probabilístico el desarrollo del proceso de desplazamiento se puede explicar a partir del siguiente ejemplo. Se supone un rombo formado por globos (Figura 3.7) si se extrae un globo, por ejemplo el C, entonces el espacio vacío que queda puede ser ocupado por el globo A o el B. La probabilidad de que el espacio vacío, con coordenadas de su centro x, z + a, lo ocupa el glogo A con coordenadas de su centro x – a, z o un globo B con coordenadas de su centro x + a, z se puede dar por la expresión:

$$\tfrac{1}{2} P(x-a, z) + \tfrac{1}{2} P(x+a, z) = P(x, z+\alpha) \qquad (3.12)$$

Si ambas partes de esta expresión le restamos la magnitud $P(x,z)$ y sacando el factor $\frac{a^2}{2\alpha}$ fuera del paréntesis, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{a^2}{2\alpha}\left(\frac{P(x-a,z) - 2P(x,z) + P(x+a,z)}{a^2}\right) = \frac{P(x,z+\alpha) - P(x,z)}{\alpha} \qquad (3.13)$$

Tomando la condición límite: $\frac{a^2}{\alpha} \rightarrow 1{,}0$, se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$1/2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{\partial P(x,z)}{\partial z} \qquad (3.14)$$

Esta ecuación diferencial parabólica describe el proceso probabilístico como un proceso de difusión.

De igual forma que la analizada, el proceso de desplazamiento de los globos va a repetirse; así tenemos que si el globo A pasa al lugar que ocupa el C, entonces el espacio que él deja vacío puede ser ocupado por el globo E o el D y así susesivamente.

La probabilidad de este movimiento hasta un 3er nivel será probable en 1/4 (para D), 1/2 (para E) y 1/4 (para F).

La distribución de las probabilidades de este movimiento, provocada por la extracción de un globo del nivel inferior (el C), o sea, por la extracción de un volumen elemental del frente de trabajo se da en la (Figura 3.7).

La probabilidad de que se desplacen los globos situados en los niveles superiores aproximadamente se escribe por la curva de Gauss.

Igual distribución tiene lugar en la depresión elemental situada sobre un volumen elemental del frente de trabajo.

Si la expresión (3.13) se reescribe de la siguiente forma:

$$B(z) \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = \frac{\partial \omega}{\partial z} \qquad (3.15)$$

Ella expresa la interrelación entre las infinitamente pequeñas deformaciones verticales $\frac{\partial \omega}{\partial z}$ (ensanchamiento-compresión) y la curvatura en la dirección horizontal $\omega'' = \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}$ para el caso de una resolución plana de la tarea.

De aquí se obtiene que ambas magnitudes están relacionadas mediante un coeficiente de proporcionalidad $B(z)$. Esta dependencia se mantiene vigente para todas las teorías que consideran que la trasmisión del desplazamiento de la roca, desde los frentes de arranque hasta la superficie, se produce como el proceso de difusión de los gases.

De tal forma la ecuación fundamental del modelo probabilístico para un asentamiento (ω) infinitamente pequeño, en un punto de coordenadas x,y,z, producido por el arranque de un volumen elemental va a tener la siguiente forma:

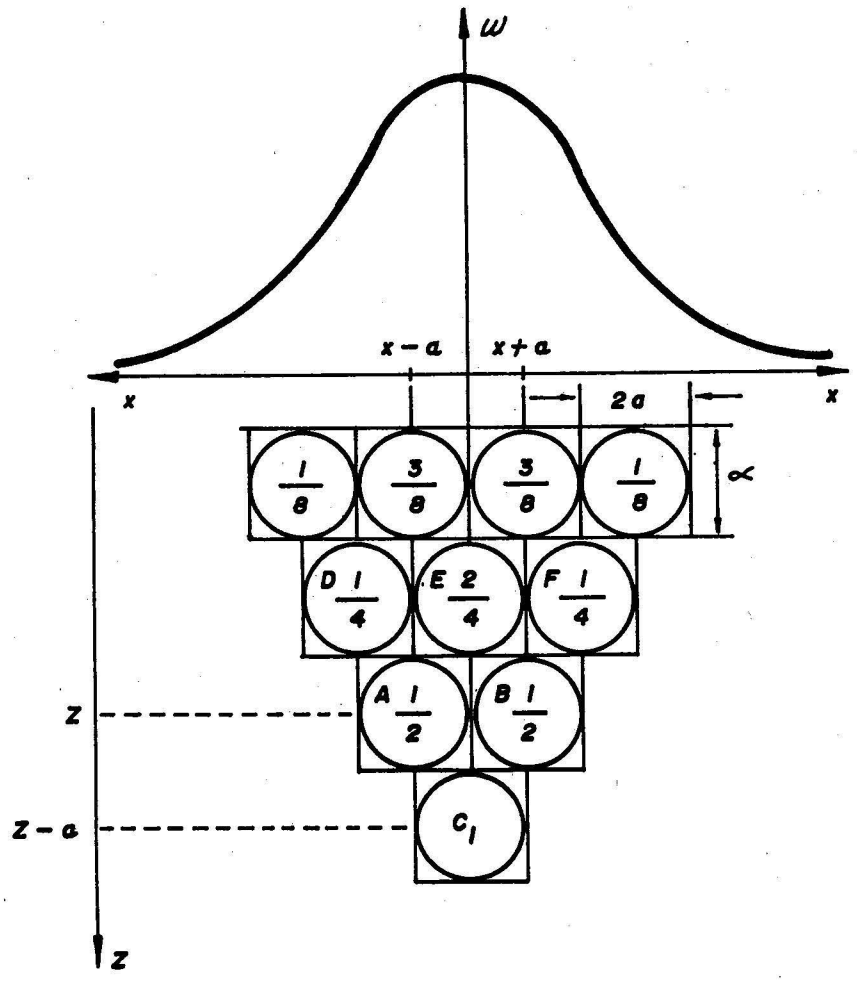


FIGURA 3.7. Esquema del proceso de desplazamiento en un medio probabilístico

En coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial \omega}{\partial z} = B(z)\left(\frac{\partial \omega^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right) \tag{3.16}$$

En coordenadas polares:

$$\frac{\partial \omega}{\partial z} = \frac{B(z)}{r}\,\frac{\alpha}{r}\left(r\,\frac{\partial \omega}{\partial z}\right) \tag{3.17}$$

En estas expresiones el coeficiente (z) es una magnitud dependiente de z, que se expresa en metros y representa las características de deformación de la capa de roca que yace sobre el horizonte z.

Para un horizonte dando $z = H$, la solución de la expresión anterior:

$$\omega(r) = \frac{a \cdot m}{4\pi\,\varphi(H)} \cdot \frac{l}{\frac{r^2}{e\overline{4\,\varphi(H)}}} \tag{3.18}$$

donde:

a: coeficiente de asentamiento;

m: potencia de mineral extraído;

y

$$\varphi(H) = \int_0^H B(z)\,dz \tag{3.19}$$

De tal forma se obtiene que el infinitamente pequeño asentamiento (ω) que se produce sobre el elemento del frente de trabajo, de acuerdo a la expresión (3.18) va a disminuir a medida que aumenta la profundidad (*H*) y la distancia radial (*r*).

Modelo elástico

En muchas ocasiones, a pesar de que el macizo rocoso no es completamente elástico, durante su estudio se pueden usar las expresiones de la teoría de la elasticidad.

Sin embargo, las deducciones matemáticas sobre los desplazamientos del macizo y del terreno de superficie se dificultan debido a que en este caso las magnitudes iniciales no se dan en forma de cargas conocidas, sino solamente se conoce el peso propio de las rocas que yacen sobre la zona trabajada y la forma de dicha zona.

En un medio elástico incompresible ($\mu = 0{,}50$), en una superficie sobre la que se aplica una carga distribuida y se produce una compresión distribuida según el área de un círculo de diámetro 2a, el asentamiento

que tiene lugar en forma simétrica según una distancia radial r (ver Figura 3.8) y una distancia vertical h, se puede calcular por la expresión:

$$\eta = \int_0^a 2\pi r \omega \, dr = \frac{F}{2G} \int_0^a \left[\frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}} + \frac{h^2 r}{\sqrt{r^2 + h^2}^3} \right] dr \quad (3.20)$$

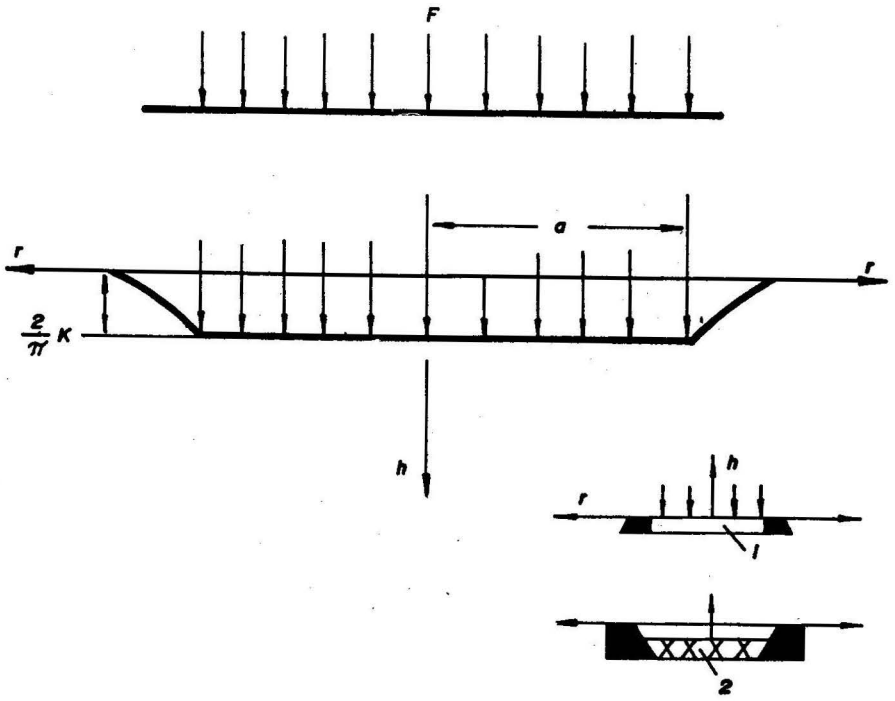


FIGURA 3.8. Esquema de la carga distribuidora (F)

Son usados, además de los mencionados, otros modelos como son: el plástico, el modelo basado en los elementos finitos.

CAPITULO IV

DESARROLLO DEL PROCESO DE DESPLAZAMIENTO DEL TERRENO DE SUPERFICIE CON EL TIEMPO

En los métodos de cálculo del desplazamiento de los terrenos de superficie existentes, los parámetros de este proceso se determinan para su etapa final. Es conocido que este proceso, en dependencia de las características del macizo, puede durar desde meses hasta decenas de años. Por lo antes expuesto a la hora de planificar los trabajos bajo tierra y de elegir las medidas de protección para las obras de superficie se debe tener en cuenta no sólo la caracterización de la etapa final, sino también de las etapas intermedias de este proceso de desplazamiento.

Los parámetros de este proceso de desplazamiento, asentamiento, inclinación y deformación (a compresión o tracción) de los terrenos de superficie motivado por el desarrollo de los trabajos subterráneos, van a ir variando.

A la hora de estudiar el proceso de desplazamiento de la superficie con el tiempo, se le debe dar respuesta a las siguientes cuestiones.

- Determinar cuándo se puede producir en la superficie la primera manifestación peligrosa a causa de los trabajos subterráneos, con el objetivo de tomar las medidas necesarias.
- Determinar cuándo la afectación en la superficie, motivada por la influencia de los trabajos subterráneos, se amortigua con vistas a realizar, de ser necesario, los mantenimientos capitales de las obras de superficie.
- Determinar en qué momento se va a producir la afectación máxima sobre la superficie para efectuar mediciones de las deformaciones en las obras de superficie.
- Determinar los asentamientos esperados en determinados intervalos de tiempo, con el objetivo de poder, profilácticamente, tomar las medidas necesarias.

- Analizar las características del proceso de deformación en la superficie y su variación cuando se realizan a la vez trabajos en varios frentes y horizontes, con el objetivo de poder realizar los trabajos en el subterráneo con las menores pérdidas posibles.

Con este fin se introduce el empleo de un coeficiente (Z) que caracteriza el proceso de desplazamiento con el tiempo y se da en porciento del asentamiento o por la relación:

$$Z = \frac{\eta_{inter}}{\eta_f} \qquad (4.1)$$

siendo:

η_{inter}: asentamiento en un intervalo dado de tiempo;

η_f: asentamiento final.

4.1. ANALISIS DEL DESARROLLO DEL PROCESO DE DESPLAZAMIENTO CON EL TIEMPO

El criterio de los investigadores sobre como se produce el desarrollo con el tiempo del desplazamiento de los terrenos de superficie, producto de la influencia de los trabajos subterráneos, es variable. Así tenemos que muchos especialistas (R. Bals, A. Eckardt y otros) consideran que el asentamiento de la superficie comienza inmediatamente cuando el techo del espacio trabajado comienza a descender, otros especialistas (entre ellos F.Mohor) plantean que en la dirección de abajo hacia arriba va a tener lugar una disminución de la velocidad de asentamiento, o sea, la velocidad de asentamiento de las distintas capas de rocas va a ser diferente en dependencia de su profundidad.

El proceso de desplazamiento de la roca con el tiempo va a depender fundamentalmente de tres factores: flexibilidad del relleno usado o de la roca destruida; velocidad de avance del frente de trabajo y la rigidez del complejo de capas de rocas.

Para unas propiedades determinadas del material de relleno la velocidad de desplazamiento de las rocas en el macizo depende tanto de la velocidad de aplicación de la carga como de la altura de la columna de rocas que provoca dicha carga (profundidad de la zona trabajada y distribución de la carga) y también de la potencia de la zona rellenada.

La velocidad de avance del frente de trabajo ejerce una influencia doble, por un lado sobre la velocidad de aumento de la luz del espacio trabajado y por ende de su techo con el consecuente aumento de la magnitud de su flexión, por el otro, sobre el aumento con el tiempo de la

carga. A medida que aumenta la velocidad de avance del frente de trabajo tiende a acelerarse todo el proceso de desplazamiento.

Por su parte a medida que aumenta la rigidez de las capas de rocas del techo de la zona trabajada, más se demorará el inicio de su asentamiento y por ende menor será su flexión mientras no concluya el proceso de desplazamiento del macizo.

Durante el análisis del desarrollo del proceso de desplazamiento con el tiempo, es necesario diferenciar la observación realizada desde puntos independientes de la realizada desde líneas trazadas por el rumbo o por el buzamiento del cuerpo mineral, así como también diferenciar el desplazamiento que se produce sobre frentes inmóviles (donde no se trabaja) de los que se producen sobre frentes en avance.

De los resultados de la medición en puntos aislados, sólo se obtiene la diferencia del desplazamiento en estos puntos del tiempo. En tanto que de las mediciones en líneas determinadas de observación se obtiene el cuadro de desarrollo de la deformación de la zona de depresión de desplazamiento en el perfil dado del macizo.

4.2. CALCULO DEL DESARROLLO CON EL TIEMPO DEL PROCESO DE DESPLAZAMIENTO

El cálculo de desplazamiento esperado de los terrenos de superficie a partir de los trabajos planificados que se van a realizar en condiciones subterráneas, habitualmente se hace por trimestre o semestre, considerando un valor $Z = 1$.

Según este método simplificado de cálculo la zona afectada se desarrolla en pequeños sectores, para cada uno de los cuales son determinados los diferentes parámetros del proceso de desplazamiento.

La sumatoria de todos los valores obtenidos en las diferentes etapas analizadas, hasta ese momento ofrece un cuadro cualitativo confiable del desarrollo de este proceso de desplazamiento, en función del aumento que va teniendo el área de la zona trabajada (en condiciones subterráneas).

Con el empleo de este método se puede conocer, por ejemplo, cuando las deformaciones que sufren los terrenos, ubicados bajo las construcciones, cambian de signo (tracción-compresión) factor este de vital importancia a la hora de proyectar las medidas de protección. También por este método se determina las deformaciones máximas que se pueden producir para las condiciones más adversas ($Z = 1$).

Este análisis tiene como deficiencia que la afectación que se produce en la superficie por la influencia de los trabajos subterráneos, no alcanza inmediatamente su significado total, sino que este se va produciendo gradualmente con el desarrollo del tiempo.

Por ello, para poder de una forma más precisa pronosticar sobre el desarrollo del proceso de desplazamiento en determinados *lapsus* de tiempo, en los cálculos se debe introducir el factor tiempo Z en forma variable. El valor de Z se puede obtener en forma práctica como resultado de observaciones que se hacen del desplazamiento de puntos de la superficie situados sobre espacios subterráneos trabajados. Para esto se realiza el cálculo de la relación entre el asentamiento (η_z) que se produce en un intervalo dado de tiempo (un trimestre o semestre, por ejemplo) con respecto al asentamiento η_f final (cuando la zona subterránea de trabajo alcanza su valor planificado).

Con el empleo de la expresión (4.1) se puede ir obteniendo valores de Z_t para diferentes intervalos de tiempo I, II, III, IV....después que se inició la afectación sobre el terreno de superficie (ver Figura 4.1).

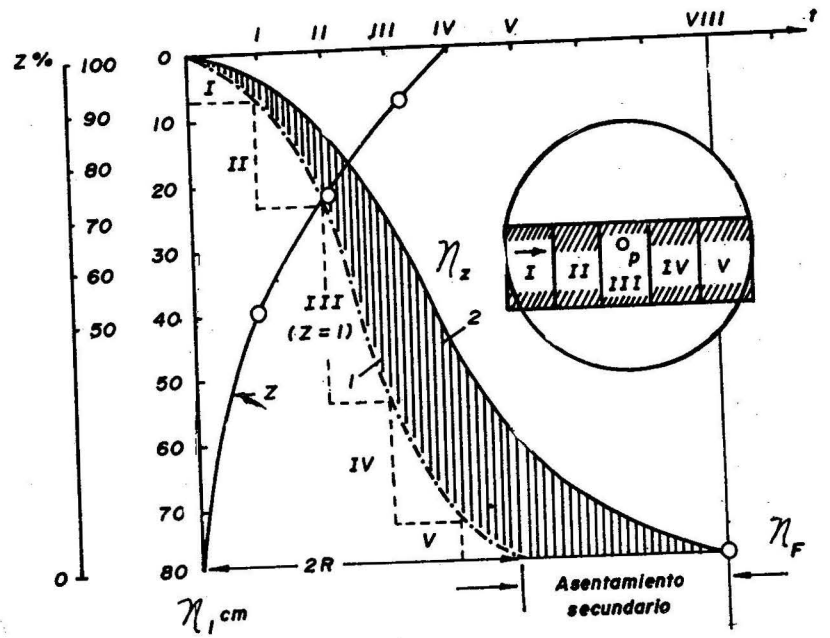


FIGURA 4.1. Gráfico para el cálculo del coeficiente Z: 1) curva de asentamiento final, 2) curva de asentamiento para frentes móviles de trabajo

Utilizando el ejemplo de la Figura 4.1. donde se señala que la magnitud final del asentamiento η_f se toma de 80 cm y suponiendo que en los diferentes intervalos de tiempo analizados, I,II,...V, se producen asentamientos de 8,15,33, 15 y 9 cm (se obtienen de la curva 1) se puede hallar para cada intervalo el valor correspondiente de Z_t.

Así tenemos que Z_t para el primer intervalo será (según expresión 4.1):

$$Z_I = 8/80 = 0{,}10$$

Para el segundo:

$$Z_{II} = 15/80 = 0{,}187$$

Para el quinto:

$$Z_V = 9/80 = 0{,}011$$

Y de existir otros intervalos de análisis se procedería de igual forma. Una vez obtenido el valor de Z_t se puede determinar el asentamiento que se produce al final de cualquiera de los períodos analizados, por ejemplo al final del período I

$$\eta_z = 80 \cdot 60{,}1 = 8 \text{ cm}$$

Al final del período II

$$\eta_z = (80 \cdot 0{,}87 + 8) \text{ cm} = 15 + 8 = 23 \text{ cm}$$

Y así sucesivamente con este análisis se supone que el frente de trabajo subterráneo se desplaza a una distancia total igual al diámetro final de la zona trabajada (en la Figura 4.1→2R) y que la velocidad de avance de los trabajos subterráneos y su profundidad se correspondan con las condiciones de observación para los que fueron calculados los valores de Z.

Se puede determinar también el coeficiente de tiempo (Z_t) como la relación entre el asentamiento (η_z) que se produce en un intervalo dado de tiempo con respecto al asentamiento total que se ha producido hasta ese momento (curva 1, Figura 4.1).

Por ejemplo si analizamos el II intervalo:

$$Z_t = \frac{\eta_{II}}{\eta_t} = \frac{15}{23} = 0{,}65$$

Y para el IV intervalo:

$$Z_t = \frac{\eta_{IV}}{\eta_t} = \frac{15}{71} = 0{,}21$$

Este coeficiente Z obtenido por cualquiera de las formas indicadas debe usarse en condiciones similares a las que se obtuvo.

Existe otra vía para determinar el coeficiente (Z), que se emplea habitualmente en los casos en que no se produzca un crecimiento gradual de la zona trabajada (como se preveía en el caso anterior), sino que se quiere evaluar la influencia, para un período determinado de una zona trabajada (de área constante) sobre el terreno de la superficie.

En este caso el grado de influencia de cualquier zona trabajada, al final de cada intervalo de tiempo (trimestre, semestre, etcétera) se puede expresar en función de la magnitud total del coeficiente Z. Por ejemplo al final de un período III, el asentamiento que ha sufrido el punto P de la superficie (ver Figura 4.1), va estar dado por el asentamiento que se produce debido a los trabajos en el intervalo III, pero además por los trabajos anteriormente realizados (intervalos I y II).

CAPITULO V

AFECTACION DE LAS OBRAS DE SUPERFICIE POR LA INFLUENCIA DE LOS TRABAJOS SUBTERRANEOS

Los aspectos anteriormente vistos del proceso de desplazamiento, o sea, el asentamiento, desplazamiento horizontal y deformaciones del terreno de superficie, sirven de fundamento para la evaluación de la acción de los trabajos subterráneos sobre las diferentes construcciones de superficie.

Un aspecto importante en este análisis es determinar la dependencia existente entre la afectación que sufren las obras de superficie en relación con la deformación y desplazamiento del terreno de superficie.

Es conocido que durante el desplazamiento de la superficie, las obras colocadas en ella varían su ubicación, se asientan y se pueden inclinar (ver Figura 5.1), aquí se puede añadir que las cimentaciones reciben en menor cuantía las afectaciones que el subcimiento (terreno), aunque en cada caso concreto va a existir una determinada dependencia entre esas magnitudes.

Sobre estas obras de superficie simultáneamente van a actuar las cargas exteriores que pueden producir en ellas esfuerzos a compresión, tracción, flexión, etcétera.

Muchas obras debido a su longitud, por ejemplo: carreteras, vías férreas, canales, redes soterradas de comunicación y otras, debido a su poca rigidez no están en condiciones de asimilar la depresión que se produce en el terreno sin deformarse. Estas construcciones por la acción de su peso propio van detrás del asentamiento del terreno y se flexionan. Si las obras están construidas sobre un cimiento rígido, ellas pueden no flexionarse, sino seguir la deformación del terreno (ver Figura 5.1b), en estos casos tiene lugar una redistribución de tensiones en el terreno.

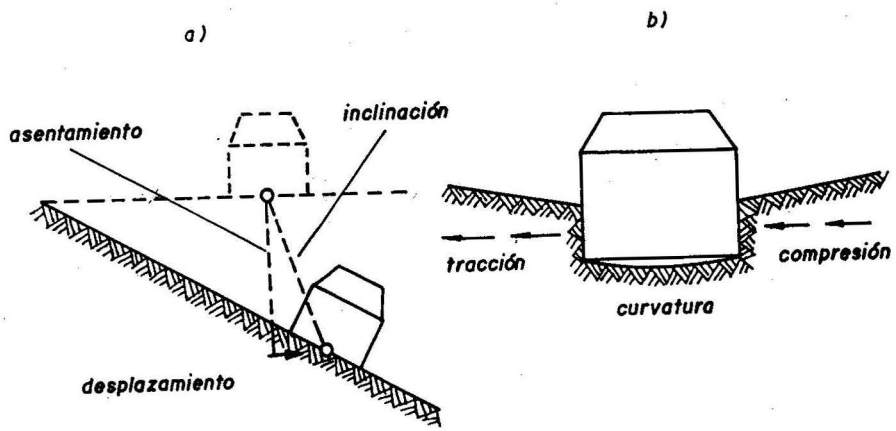


FIGURA 5.1. Esquema de influencia de los desplazamientos y deformaciones de los terrenos de superficie sobre las edificaciones de superficie: a) desplazamiento, b) deformación

Con respecto a las deformaciones horizonatales que sufre el terreno, se puede decir que la mayoría de las construcciones asimilan favorablemente su acción, debido a que ellas poseen una mayor rigidez que el terreno suelto y erosionado de superficie. Por esta causa, en ocasiones, el terreno deformado se desplaza bajo los zapatos y por las superficies laterales del cimento, surgiendo fuerzas de fricción que se trasmiten a la obra.

Por otra parte el terreno en la zona deformada produce sobre la pared del cimento una presión lateral en una dirección perpendicular al desplazamiento.

Para el sistema terreno-cimiento de la construcción se pueden diferenciar cuatro tipos de manifestaciones características:

- Desplazamiento de toda la construcción en una magnitud igual a la magnitud del desplazamiento del terreno de superficie.
- Manifestación de un empuje lateral complementario del terreno sobre la pared del cimiento.

- Trasmisión de la fuerza de fricción por la zapata y las superficies laterales del cimiento.
- Variación de la presión del terreno debido a la acción de un cimiento rígido sobre el mismo.

De los cuatro aspectos antes mencionados sólo el primero de ellos se puede decir que está completamente resuelto. En este caso, el desplazamiento de la obra ocurre sin su deformación. En los restantes tres casos mencionados va a producirse la deformación de la construcción, pero se debe significar que ella va a ser menor que la deformación del terreno.

Por esta causa la suposición uilizada de que la deformación que va a sufrir la construcción es igual que la del terreno, conduce a que se aumente artificialmente la carga que actúa sobre la construcción.

Esta suposición simplifica los cálculos, pero al utilizarse en los trabajos de proyección o planificación, produce un aumento injustificado del coeficiente de reserva lo que trae consigo mayores costos.

La tarea de determinar los esfuerzos que se trasmiten desde la capa de terreno deformada a los cimientos de las obras de superficie, en la actualidad, es resuelta con bastante confiabilidad, con el empleo de la mecánica de suelos. La hipótesis de trabajo de la mecánica de suelos y algunas fórmulas empíricas pueden ser utilizadas incluso en la resolución de las tareas más complejas si se tiene en cuenta durante los cálculos las suposiciones hechas.

Para poder determinar el grado esperado de afectación que va a sufrir las construcciones en dependencia de las deformaciones de los terrenos de superficie, es necesario partir del análisis del estado tenso-deformacional del terreno y después calcular la afectación producida por la presión del terreno y por la fuerza de fricción.

5.1. PRESION DEL TERRENO SOBRE EL CIMIENTO

Cuando la construcción o edificio de superficie se encuentra ubicada en la zona afectada, en un sector de curvatura convexa, las paredes de su cimentación se descarga (ver Figura 5.2).

En tanto cuando ella se ubica en un sector de terreno con curvatura cóncava sobre esta pared, además de la presión normal de terreno (que es la que tiene lugar para el caso de un cimiento no deformado), comienza a actuar una presión complementaria (ver Figura 5.3).

En los casos límites, o sea, para valores altos de inclinación de las capas de terreno, la presión sobre la pared del cimiento puede, en la zona de tracción, disminuir hasta el valor de la presión activa (E_a) en tanto que en la zona de compresión puede aumentar hasta la magnitud de la presión (Ep).

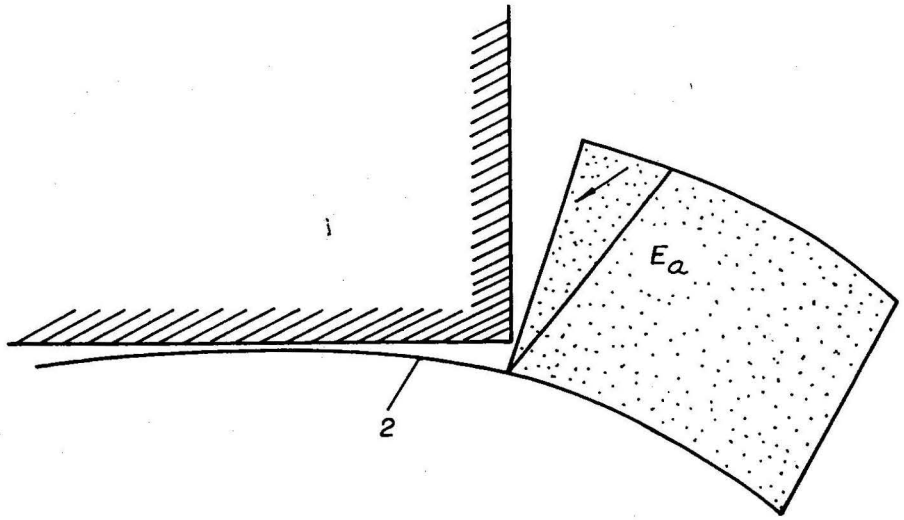


FIGURA 5.2. Esquema de la presión del terreno sobre la pared del cimiento al deformarse el terreno con una inclinación convexa: 1) cimiento, 2) línea de consolidación

La presión activa del terreno se produce cuando surgen grietas en la zona de tracción del terreno de superficie. Estas grietas, que pueden tener profundidades de 1,0 a 3,0 m o algo más y se manifiestan en forma inclinada con respecto a la dirección del frente de trabajo, surgen en aquellos casos de curvatura convexa en que la deformación a tracción del terreno excede de una magnitud límite de 5 a 7 mm/m a la cual se sobrepasa el límite de resistencia al cortante del terreno.

Para los especialistas que se ocupan de los problemas relacionados con el desplazamiento de los terrenos de superficie, tiene también un gran interés el estudio de la presión complementaria que actúa sobre las construcciones, o sea, la presión pasiva del terreno.

En la zona de compresión para una curvatura cóncava del terreno la presión que él ejerce sobre la pared del cimiento alcanza su máxima magnitud. Durante la acción de una carga creciente sobre el terreno él puede perder su resistencia al cortante y al alcanzar el límite de resistencia se produce el corte del terreno según dos planos de deslizamiento, que forman, con las direcciones de las tensiones horizontales máximas, un ángulo igual a $45 - \frac{\rho}{2}$ grados.

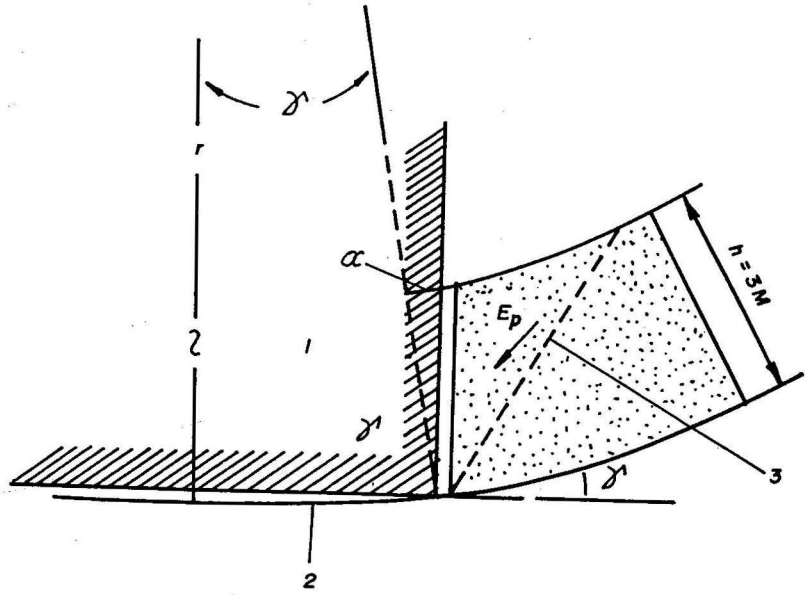


FIGURA 5.3. Esquema de la presión del terreno sobre la pared del cimiento al deformarse el terreno con una inclinación cóncava: 1) cimiento, 2) flecha, 3) superficie de corte, γ) ángulo de inclinación, a) magnitud de compresión

Según la teoría de destrucción de la roca de Coulomb-Mohr este plano de deslizamiento surge en el terreno cuando la relación entre la tensión tangencial y la normal alcanza un valor de:

Para terrenos deslizados:

$$Tg\,\rho = \frac{\tau}{\sigma_n} \qquad (5.1)$$

Para terrenos ligados:

$$Tg\,\rho = \frac{\tau - C}{\sigma_n} \qquad (5.2)$$

donde:

ρ: ángulo de fricción interna del terreno;
C: fuerza de cohesión.

La condición límite a la ruptura, según Coulomb-Mohr puede expresarse por la función:

$$\tau = f(\sigma,\rho,c) \tag{5.3}$$

Esta función se puede dar en un gráfico (ver Figura 5.4) que habitualmente se denomina pasaporte de resistencia de la roca (del terreno).

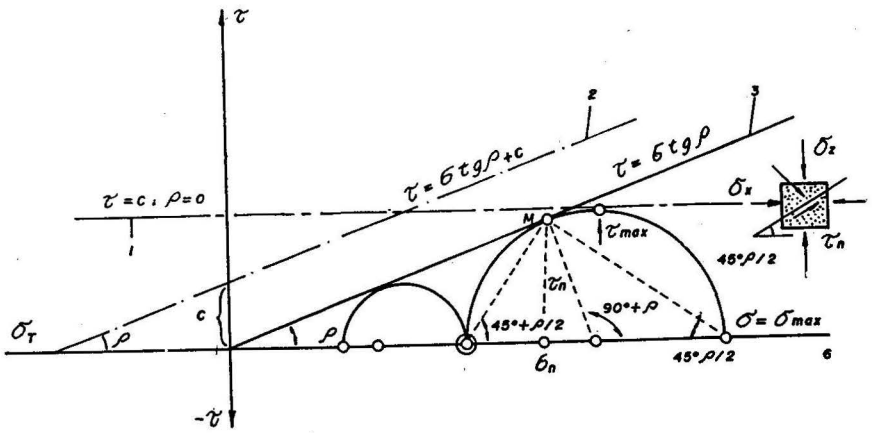


FIGURA 5.4. Condición límite de Coulomb-Mohr para los terrenos: 1) plásticos, 2) ligados, 3) desligados

La relación λ_c entre las tensiones principales (σ_v y σ_h) se puede determinar por la expresión:

$$\lambda_c = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = Tg^2\left(45 + \frac{\rho}{2}\right) \tag{5.4}$$

Así tenemos que:

Para $\rho = 20^o$; $\lambda_c = 2$; arcilla normal.
Para $\rho = 25^o$; $\lambda_c = 2{,}5$; arcilla de grueso a fino.
Para $\rho = 35 - 38^o$; $\lambda_c = 3{,}8\text{-}3{,}85$; arena-grava.

La presión pasiva que actúa por 1 m de la pared del cimiento es:

Para terrenos desligados:

$$E_\rho = \int_o^h \sigma_h \, d_z = 1/2\, \sigma_h \cdot h \tag{5.5}$$

pero:

$$\sigma_h = \sigma_v \cdot \lambda_c \tag{5.6}$$

Y se conoce que:

$$\sigma_v = \gamma \cdot h \tag{5.7}$$

donde:

γ: masa volumétrica del terreno;
h: altura del cimiento.

Por lo que:

$$E_p = 1/2\ \gamma h^2\ \lambda_c \tag{5.8}$$

Para terrenos ligados:

$$E_p = 1/2\ \gamma h^2\ \lambda_c + 2 \cos\ hip \sqrt{\lambda_c} \tag{5.9}$$

La práctica demuestra que la presión que ejerce el terreno sobre los cimientos de las construcciones, cuando se produce deslizamiento de los terrenos de superficie, excede en varias veces, la que actúa en condiciones de no existir esa afectación, pudiendo esta presión en determinadas situaciones alcanzar altos valores.

Por esta razón se recomienda que a la hora de calcular el espesor de las cimentaciones se utilice la magnitud de presión pasiva doble de la obtenida por la expresión (5.5).

Del análisis hecho sobre el comportamiento del terreno de superficie en relación a la cimentación de las obras en él ubicadas se pueden señalar los siguientes aspectos:

- La presión lateral del terreno crece proporcionalmente al cuadrado de la profundidad de ubicación de la cimentación.
- Antes de iniciarse el proceso de desplazamiento de los terrenos sobre los cimientos actúa una presión E_o ($\sigma_h = 0{,}5\ \sigma_v$).
- Cuando surgen en el terreno deformaciones o tracción, la presión lateral que se ejerce sobre el cimiento (E_a) (presión activa) va a ser menor que la que se producía antes del desplazamiento, o sea, $E_a > E_o$
- En la zona de deformaciones a compresión la presión lateral del terreno se hace mayor que la inicial. Para los casos de grandes desplazamientos relativos cimiento-terreno esta presión alcanza sus máximos valores.

CAPITULO VI

VIAS PARA LA PROTECCION DE LAS OBRAS DE SUPERFICIE

Para la protección de las obras y construcciones de superficie de la influencia de los trabajos subterráneos se pueden emplear diferentes medidas de protección, las cuales convencionalmente se dividen en cuatro grupos: profilácticas, minero-técnicas, constructivas e integrales.

Medidas profilácticas. Estas medidas tienen un significado especial y están enmarcadas a evitar o disminuir las afectaciones negativas que pueden provocar sobre las construcciones de superficie la realización de los trabajos subterráneos. Estas medidas pueden ejecutarse incluso desde el período de confección del proyecto de los trabajos subterráneos, siendo esta la variante más favorable, ya que nos brinda una mayor eficiencia en los trabajos subterráneos y un gasto mínimo en recursos en las medidas de protección.

Medidas minero-técnicas. Estas medidas de protección están orientadas a la disminución de la deformación del terreno de superficie y de las construcciones sobre él situadas. Estas medidas incluyen el empleo de métodos específicos en la realización de los trabajos subterráneos y el empleo de pilares de protección.

Medidas constructivas. Estas medidas están encaminadas a adecuar las construcciones y edificaciones de superficie para recibir las deformaciones con un mínimo de secuelas. Para la posterior reparación (una vez que cesa la afectación por la deformación del terreno de superficie) de estos edificios y construcciones, es necesario gastar mucho menos recursos que en la reparación de edificios y construcciones que no hayan recibido el beneficio de tales medidas. Estas medidas se consideran aún más afectivas, si ellas se preveen y realizan durante el período de construcción de dichas obras y edificios.

Medidas integrales de protección. Se producen cuando se hace una combinación entre dos o los tres grupos de medidas vistas. Estas medi-

das de protección habitualmente son acompañadas de un control visual e instrumental de los objetos de obras.

La elección de la medida (o medidas) a emplear se hace a partir de los siguientes aspectos:

- Categoría de la obra que se va a proteger.
- Deformación esperada del terreno de superficie.
- Condiciones hidrogeológicas del sector en estudio.
- Particularidades constructivas, dimensiones y características de explotación de la obra.

Y otras más.

Una protección total de la obra (o sea, el empleo de medidas que tiendan a evitar cualquier deformación) se emplea raramente debido a que a esto va ligado un mayor gasto de recursos, que es difícil de realizar y no siempre es necesario. Más frecuentemente se emplea una protección parcial que permite que se produzcan en los edificios y construcciones deformaciones de tal índole que no provoquen la destrucción de dichas obras y por ende el cese de su explotación y no sean peligrosas para las personas que laboren o vivan en ellas.

Por lo antes expuesto cuando se realizan los proyectos de trabajos subterráneos en zonas que existan construcciones y edificaciones en la superficie, es necesario diferenciar la deformación permisible y la deformación límite del terreno de superficie que sirve de base a dichas obras.

Cuando se producen deformaciones permisibles tienen lugar afectaciones en las obras que son relativamente poco significativas no creando estos problemas que afectan sustancialmente la explotación posterior de dicha obra.

Por el contrario, cuando se producen deformaciones que sobrepasan los valores límites, la afectación a las obras pueden ser considerables e incluso provocar que cese su explotación o sea peligrosa para la vida del personal.

Cuando la magnitud de la deformación que se calcula es mayor que la permisible, pero menor que la límite, entonces se pueden prever medidas minero-técnicas o constructivas de protección que garantice una explotación segura de la construcción.

6.1. MEDIDAS PROFILACTICAS DE PROTECCION

La medida de protección profiláctica que se considera fundamental es la construcción de un plano con las deformaciones esperadas del terreno

de la superficie en la zona de estudio. En este plano, en primer lugar, debe estar bien definido que área de la superficie queda fuera de la influencia de los trabajos subterráneos y el área que está en un sector donde el proceso de desplazamiento ya cesó, o sea, debe quedar bien claro el área de la superficie que se puede emplear para la construcción de obras y edificación sin tener en cuenta ningún tipo de restrinción en relación al proceso de desplazamiento.

El territorio restante se divide en los siguientes sectores:

- Sectores en los que se producen deformaciones relativamente no muy grandes. En este sector se pueden ubicar obras que no sean de 1er orden y no muy sensibles a las afectaciones por los desplazamientos y deformaciones del terreno de superficie.
- Sectores con un proceso amortiguado de deformación del terreno de superficie en los que después que cese totalmente el proceso de deformación se pueden realizar construcciones.
- Sectores con una deformación intensa donde se considera no adecuado hacer construcciones en un determinado período.

A este plano se le puede agregar información sobre las características tectónicas del macizo y las zonas de afectaciones geólogicas y de debilitamiento estructural que él posea, así como, sobre las zonas de concentración de tensiones, siendo todos estos aspectos de gran importancia, ya que ellos influyen sobre el grado de afectación que puede sufrir la obra.

6.2. MEDIDAS MINERO-TECNICAS DE PROTECCION

El grado de afectación de las obras de superficie en gran medida depende: del lugar de ubicación de los trabajos subterráneos, del orden en que se realizan dichos trabajos, del método de dirección de la presión minera empleado y de la velocidad del frente de trabajo entre otros factores minero-técnicos.

La elección de una adecuada combinación de estos factores, o sea, de las medidas minero-técnicas de protección, es parte esencial del proyecto de realización de los trabajos subterráneos en zonas en los que en la superficie existan construcciones y edificaciones.

La definición del empleo de uno u otra medida de protección minero-técnica o incluso de la combinación de varias de ellas se debe fundamentar por los cálculos técnico-económicos.

La elección del lugar de ubicación de los trabajos subterráneos es un factor esencial a la hora de analizar las medidas de protección minero-técnicas que se puedan utilizar. Es necesario buscar que el eje longitudinal

de la obra de superficie, dentro de las posibilidades, quede en la zona de menor afectación y deformación del terreno de superficie. Aquí además es necesario tener en cuenta las características constructivas de la obra de superficie, por ejemplo, es conocido que las obras de piedra y hormigón resisten mucho menos los esfuerzos a tracción que los de compresión, por lo que lógicamente debe tratarse que una obra de este tipo no sea afectada por esfuerzos a tracción.

Es frecuentemente el caso en que los trabajos subterráneos se planifican buscando que la obra de superficie que es afectada "caiga" en el fondo plano de la zona de depresión, ya que ahí la deformación residual es mucho menor.

Para cumplimentar este objetivo es necesario que la dimensión (D) del frente de trabajo subterráneo ubicado bajo las obras de superficie satisfagan las siguientes condiciones:

$$D_1 = a + b + \frac{l_1}{\cos \alpha} + 2\,\Delta \qquad (6.1)$$

$$D_2 = 24 \cot x_3 + l_2 + 2\,\Delta \qquad (6.2)$$

donde:

D_1: dimensión del frente de trabajo en una dirección perpendicular al rumbo;

D_2: dimensión del frente de trabajo según el rumbo;

a y b: distancia desde los bordes de la proyección de la obra de superficie afectada, hasta los límites de la zona trabajada (por la parte superior e inferior respectivamente, ver Figura 6.1);

l_1 y l_2: dimensión de la obra de superficie afectada según una dirección perpendicular al rumbo y según el rumbo respectivamente;

Δ: magnitud que sirve para corregir los errores en el cálculo de los ángulos de desplazamiento límite;

H: profundidad media de los trabajos subterráneos;

α: ángulo de buzamiento del cuerpo mineral.

Las magnitudes de a y b se pueden calcular por las expresiones:

$$a = \frac{(H + 0{,}5\ l_1\ Tg\ \alpha) \cos (x_1 + \alpha)}{sen\, x_1} \qquad (6.3)$$

$$b = \frac{(H - 0{,}5\, l_1\, Tg\, \alpha) \cos (x_2 - \alpha)}{sen\, x_1} \qquad (6.4)$$

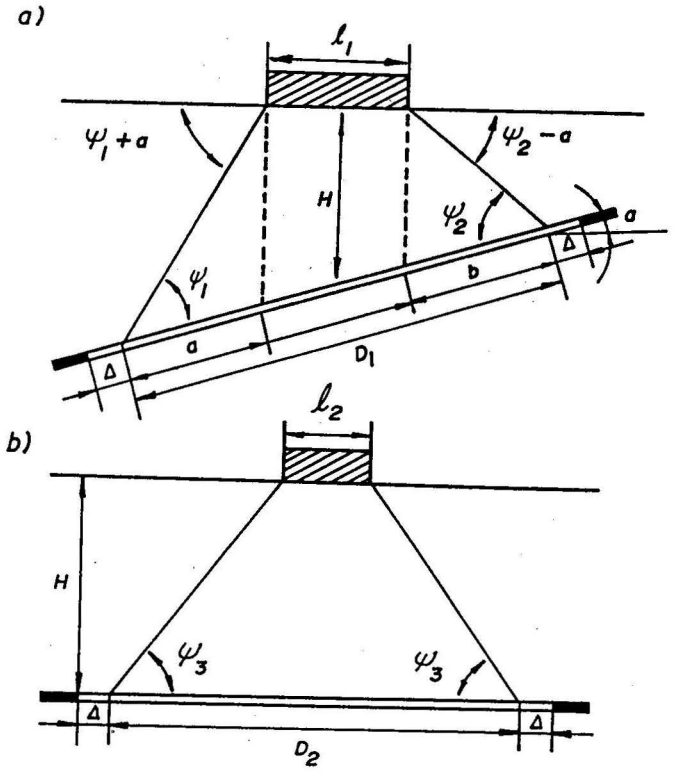


FIGURA 6.1. Esquema de cálculo de la ubicación de la obra de superficie afectada sobre la parte plana de la zona de depresión: a) perpendicular al rumbo, b) por el rumbo

Lograr conformar un fondo plano de la zona de depresión para el caso de trabajos subterráneos a poca profundidad habitualmente no es difícil, sin embargo, con el aumento de la profundidad alcanzar ese objetivo se va haciendo más difícil, ya que para ello es necesario aumentar significativamente las dimensiones de la zona trabajada en subterráneo, lo cual por una serie de razones técnicas no siempre es factible.

Cuando no es factible cumplimentar los objetivos señalados anteriormente puede suceder que la ubicación de los trabajos subterráneos conduzcan a que la obra de superficie experimente desplazamientos y deformaciones significativas. Así por ejemplo, si la construcción de superficie se ubica en el punto I (Figura 6.2), ella va a experimentar los máximos esfuerzos a tracción y la máxima curvatura convexa (ver Figura 6.3).

En tanto si la obra se ubica en el punto II (Figura 6.2) tiene lugar la máxima inclinación de la superficie, pero las menores deformaciones a tracción y compresión y la menor curvatura del terreno (ver Figura 6.4).

Cuando la obra se ubica en el punto III tiene lugar la mayor deformación a compresión y la máxima curvatura cóncava (Figura 6.5).

Si durante la elección del lugar de realización de los trabajos subterráneos la magnitud y tipo de deformación de los terrenos de superficie sólo se tiene en cuenta en el estudio final de ese proceso, esto no sucede así cuando se va a estudiar el orden de realización de los trabajos subterráneos, ya que en ese caso es necesario prestar atención al significado dinámico (variable) de los parámetros del proceso de desplazamiento que corresponden a diferentes intervalos de dicho proceso. Este aspecto, orden de realización de los trabajos subterráneos, reviste gran importancia, ya que de su correcta elección puede depender una mayor o menor afectación de las obras de superficie.

Así tenemos, por ejemplo, que si se van a realizar trabajos subterráneos directamente dispuestos debajo de obras de superficie no es lo mismo iniciar los trabajos desde la línea I (ubicado debajo de la obra de superficie) que desde el punto II (ubicado fuera de ella) ver Figura 6.6.

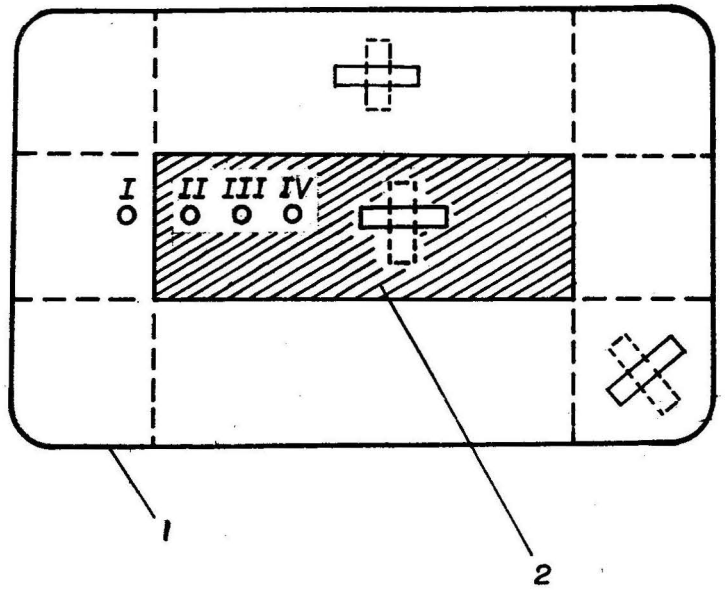


FIGURA 6.2. Características de la afectación de las obras de superficie en dependencia de su ubicación relativa a la de los trabajos subterráneos. 1) Límite de la zona de depresión, 2) área de trabajo subterráneo

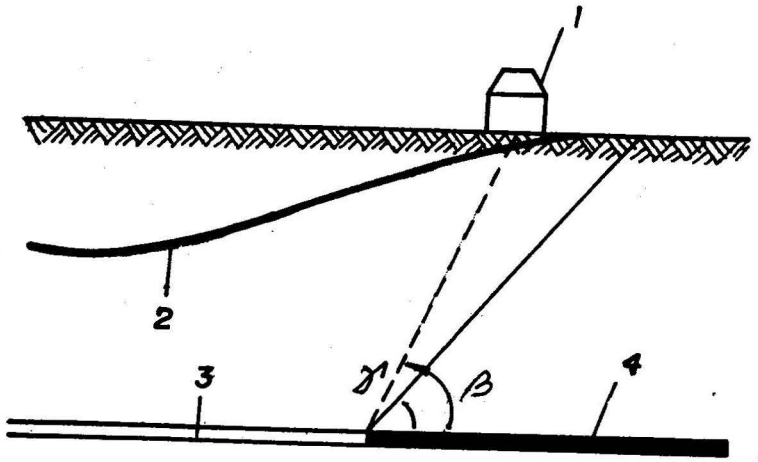


FIGURA 6.3. Esquema de ubicación que corresponde a la mayor curvatura convexa y los máximos esfuerzos a tracción. 1) Edificio, 2) perfil de la zona de depresión, 3) frente de trabajo, 4) cuerpo minero

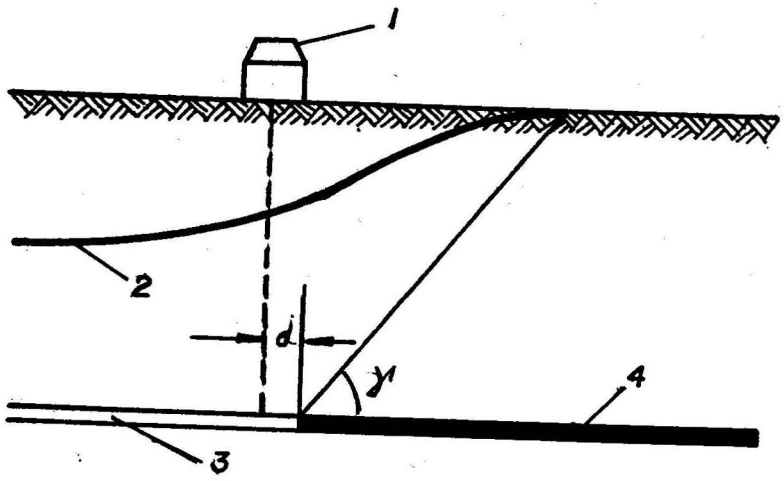


FIGURA 6.4. Esquema de ubicación que corresponde a la mayor inclinación del terreno y a las menores deformaciones. 1) Edificio, 2) perfil de la zona de depresión, 3) frente de trabajo, 4) cuerpo minero

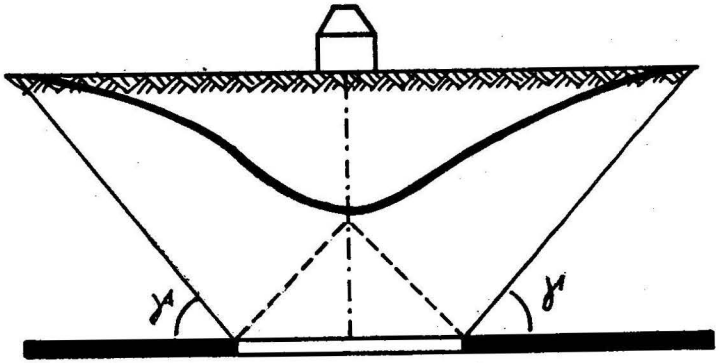


FIGURA 6.5. Esquema de ubicación que corresponde a la mayor curvatura cóncava y a las mayores deformaciones a compresión

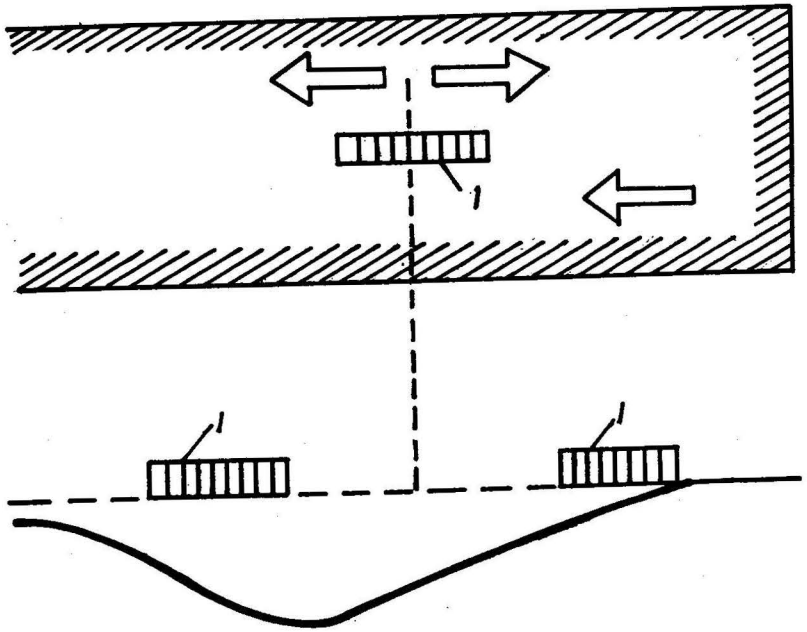


FIGURA 6.6. Características de las afectaciones que sufren las obras de superficie en dependencia del lugar de inicio y orden de los trabajos subterráneos.
1) Obra de superficie

De tal forma si los trabajos se inician desde la línea II, inicialmente la obra va a experimentar esfuerzos a tracción y más tarde (cuando la zona de depresión debajo de ella se desarrolla) esfuerzos a compresión. Este cambio de tipo de carga, de tracción a compresión y después a la inversa, para la obra es más peligroso, que cuando es sometida a la acción de un solo tipo de carga.

El lugar desde donde se inician los trabajos subterráneos (frente inicial de trabajo) y su dirección, son factores que inciden significativamente en la magnitud del desplazamiento de los terrenos de superficie. Es conocido que los terrenos ubicados encima del frente inicial de trabajo tienen un perfil de la zona de depresión más inclinado que los situados encima de frentes en desarrollo. Por esta causa en ocasiones, no se considera recomendable iniciar los trabajos debajo de la obra de superficie.

El aumento de la velocidad de avance de los frentes de trabajo subterráneos conduce habitualmente, a que las deformaciones a tracción y compresión y la curvatura que sufre el terreno de superficie disminuya, debido a que en tales casos la zona de depresión se desarrolla más rápidamente según su ancho, que según su profundidad y por ende dicha zona se hace más plana.

Sin embargo, esta disminución de las deformaciones y de la curvatura del terreno de superficie, para las velocidades de avance de los frentes de trabajo que se alcanza como promedio en la actualidad (2 a 3 m/día), se considera que no tiene una gran influencia como medida de protección. A esto hay que añadir que esta velocidad de avance se elige fundamentalmente a partir de las particularidades de los trabajos subterráneos y no atendiendo al aspecto más arriba señalado.

Por otra parte, las investigaciones han demostrado que una alta velocidad de avance de los frentes de trabajo puede conducir al desarrollo del agrietamiento del macizo, lo que puede a su vez traer consecuencias negativas sobre las obras de superficie.

Por último, los cambios sucesivos de tipo de formación (compresión-tracción) son más dañinos a las obras de superficie mientras más rápido ellas se produzcan, o sea, mientras mayor sea la velocidad de avance.

6.3. MEDIDAS CONSTRUCTIVAS PARA LA PROTECCION DE LAS OBRAS DE SUPERFICIE

Las medidas constructivas de protección pueden ser realizadas tanto en el período de construcción de la obra de superficie, como preliminarmente antes de su afectación en el período de explotación de la obra.

Se considera más efectiva y simple la aplicación de estas medidas en la etapa de construcción de la obra. Sin embargo, el empleo de medios y

recursos que durante años pueden estar inactivos no siempre se consideran utiles. Atendiendo a esto en muchos casos se considera más útil no aplicar las medidas de protección inicialmente, sino en la etapa previa a la afectación de la obra y entonces en ese momento hacer las reparaciones o mantenimientos necesarios.

Habitualmente cuando se construyen obras de superficie que van a sufrir las afectaciones de los trabajos subterráneos en un *lapsus* de tiempo de 15 o 25 años después de su construcción, ellos se hacen normalmente y en la etapa que van a empezar las afectaciones se aplican las medidas de protección.

La reacción de las edificaciones y construcciones, durante las deformaciones del terreno de superficie, en dependencia de sus características constructivas puede oponerse a estas deformaciones (si la construcción es rígida) o asimiladas en determinados límites (si la obra se hace flexible).

Cuando las obras se proyectan, según un esquema rígido, se prevee un reforzamiento de dichas obras con el objetivo de elevar su rigidez y resistencia con vista a que tengan una capacidad portadora tal, que sean capaces de resistir las afectaciones producidas por las deformaciones del terreno.

Por su parte, cuando estas obras se proyectan según un esquema flexible a la obra, se le debe dar una flexibilidad constructiva tal que ella se acomode en la zona de deformación sin que lleguen a producirse en sus elementos tensiones peligrosas.

La proyección de obras según un esquema de trabajo rígido habitualmente exige el empleo de elementos de gran sección y por ende un alto consumo de materiales. Esto se puede reducir si la obra se divide en partes y descansa en cimientos separados.

Muchas obras, a causa de la economía de recursos, se hacen con una limitada rigidez y en tales casos un desplazamiento irregular del terreno de superficie puede provocar su deformación, sin embargo, la destrucción de estas obras sucede solamente cuando su deformación excede de una magnitud dada.

Las medidas constructivas de protección, según un esquema de trabajo flexible, no se deben limitar solamente al aumento de la flexibilidad de los cimientos y elementos de la obra, sino deben tener además en cuenta la construcción de las ranuras de deformación y deslizamiento y de apoyos móviles (en particular cuando hay deformaciones horizontales), así como el hecho de apoyarse la obra en tres puntos (ante la acción de la curvatura). Este conjunto de medidas aplicadas eficazmente, le dan a la obra una ilimitada flexibilidad ante la acción de cualquier tipo de afectación.

Cuando las medidas empleadas están encaminadas a una total protección de la obra, debe estar excluida la posibilidad de que en la obra aparezcan deformaciones a flexión o torsión así como horizontales. De la deformación a flexión y torsión la obra puede ser protegida solamente dándole a los elementos portadores grandes dimensiones. De tal forma, para una protección total de la obra, se desprende que ella debe poseer una alta rigidez y para ello dicha obra debe hacerse en forma de una construcción maciza, que descanse en cimientos de áreas comparativamente no muy grandes (dos cimientos de alta rigidez). Esta obra puede hacerse también apoyándose en cuatro cimientos, con el objetivo de disminuir el área de apoyo y por ende aumentar la presión sobre el terreno, lo cual debilita el grado de acción de su desplazamiento sobre la obra.

Los esfuerzos que surgen en el plano horizontal pueden ser asimilados construyendo una ranura de desplazamiento o con el empleo de apoyos móviles (ver Figura 6.7).

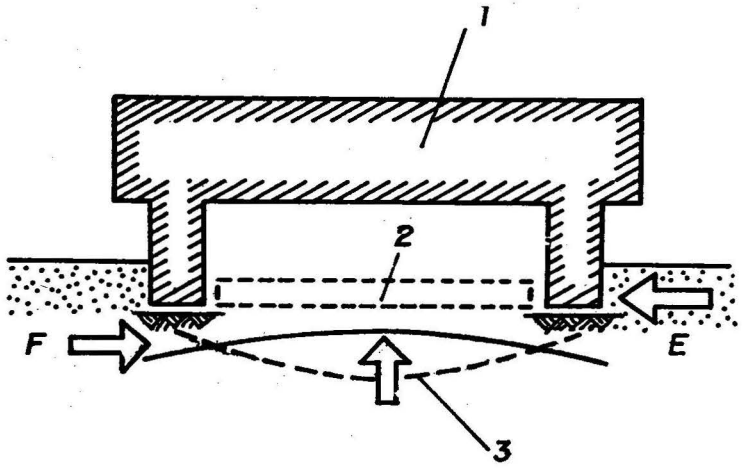


FIGURA 6.7. Esquema de protección total de una obra con alta rigidez. 1) Construcción, 2) las ranuras, 3) curvatura de superficie, F) fuerza de fricción, E) presión del terreno.

Una construcción que posea una pequeña rigidez puede ser solamente protegida en forma parcial, ya que en tal caso la variante anteriormente vista de apoyo de la obra en cimentaciones de pequeña área no se puede emplear.

Por esta causa, cuando se emplea la protección parcial de la obra, se admite hasta un cierto grado que se formen grietas en la obra, pero sin que esto conlleve a la afectación de sus condiciones de explotación.

En estas construcciones se prevee una determinada flexibilidad (Figura 6.8) de la obra, pero al mismo tiempo se limita el desplazamiento horizontal de la cimentación (con el empleo de cimientos rígidos o con la colocación de una ranura de deslizamiento entre el cimiento y el terreno).

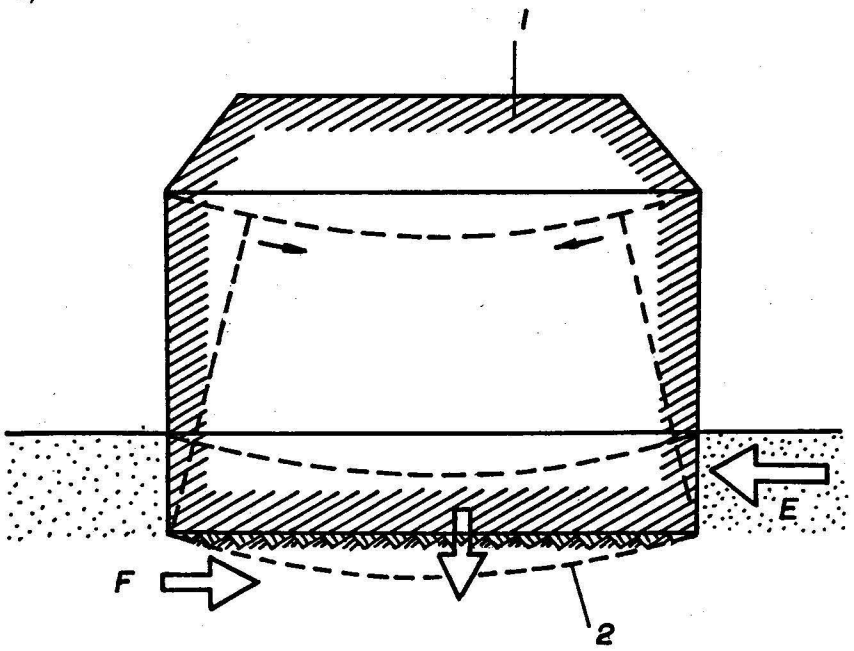


FIGURA 6.8. Esquema de protección total de una obra con baja rigidez. 1) Construcción, 2) curvatura del terreno de superficie, E) presión lateral, F) fuerza de fricción

Una protección total de construcciones industriales de alto valor y de cimentaciones de máquinas, ante la acción de la curvatura y deformación horizontal del terreno de superficie habitualmente se logra aumentando su rigidez.

A continuación se ofrecen algunas variantes de protección total de construcciones de superficie de una alta rigidez.

En la (Figura 6.9) se muestra una construcción que descansa en un apoyo (una torre, una cimentación de máquina, un tanque de agua). Aquí el área del cimiento (en el plano) es menor que la de construcción.

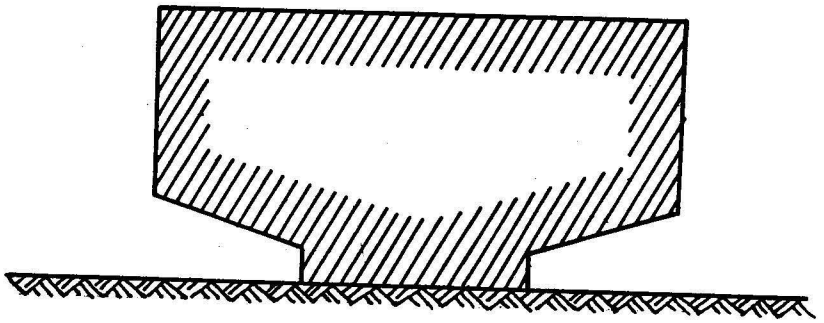
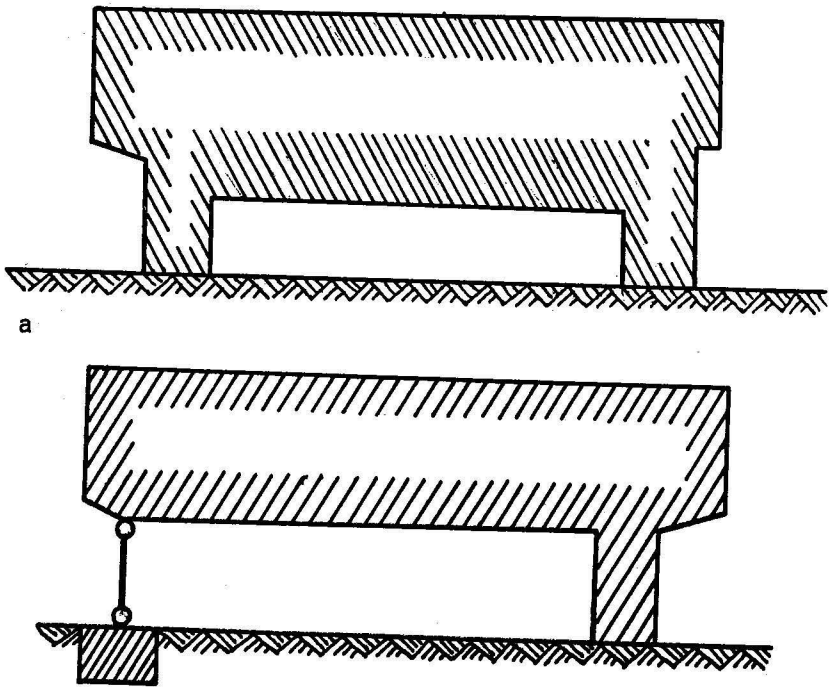


FIGURA 6.9. Esquema de una obra descansando en un apoyo



a

b

FIGURA 6.10. Esquema de una obra descansando en dos apoyos: a) sobre dos apoyos rígidos, b) sobre un apoyo rígido y otro móvil

Para el caso de construcciones alargadas es favorable el apoyo en dos planos (ver Figura 6.10) aquí se pueden dar algunas variantes. En la Figura 6.10a se señala una construcción con dos apoyos rígidos, en tanto que en la Figura 6.10b una construcción sobre un apoyo rígido y otro móvil.

Un especial interés reviste la protección de obras de transporte y tuberías magistrales ante las afectaciones producidas por la influencia de los trabajos subterráneos.

Para las vías férreas en particular es peligroso el asentamiento que puede sufrir el terreno de superficie, ya que esto va a influir sobre la inclinación de la vía y las condiciones normales de su explotación.

En la Figura 6.11 se muestran algunas afectaciones que pueden tener una vía. Así se ve (señalado con el no.1) una elevación del terreno, una variación de la posición del puente (no.2) y un asentamiento (no.3).

Otras afectaciones que pueden sufrir las vías férreas se señalan en la Figura 6.12.

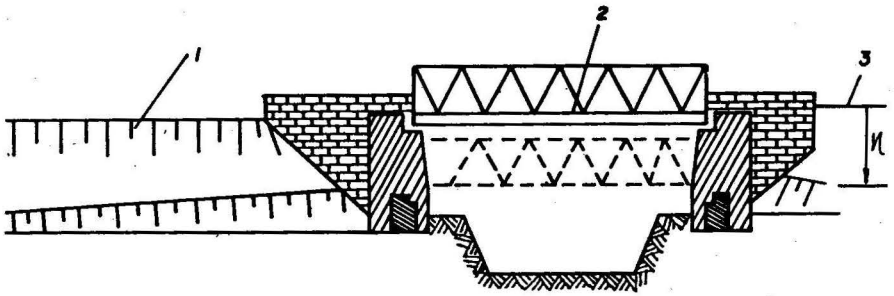


FIGURA 6.11. Asentamiento del puente y sus accesos

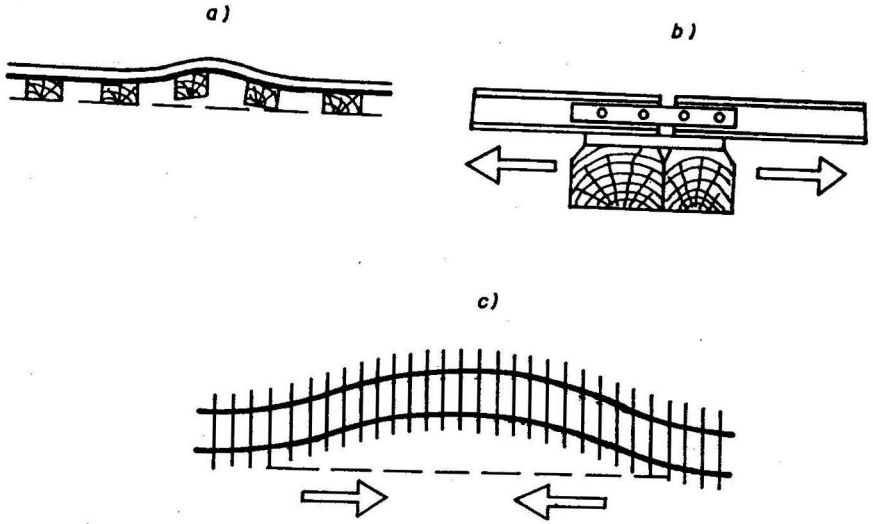


FIGURA 6.12. Afectaciones de las vías férreas por la deformación del terreno de superficie: a) elevación de los rieles, por la deformación a compresión del terreno de superficie, b) rotura de las uniones de los rieles por las deformaciones a tracción, c) desvío transversal de la vía

BIBLIOGRAFIA

1. Belsky, G.G.: "Determinación de la duración del proceso de desplazamiento de los terrenos de superficie afectados por los trabajos de arranque", revista *Construcción de minas,* no. 8, pp. 17-19, Moscú, 1988.
2. ————.: "Sobre la deformación de los terrenos de superficie durante la explotación de carbón", revista *Construcción de minas*, no. 7, pp. 18,19, Moscú, 1987.
3. Belolikov, A.N. y otros: *Asuntos topográficos*, parte II, 3ra edición, Editorial Nedra, Moscú, 1989.
4. Blanco Torrens, Roberto: "Influencia de los trabajos subterráneos sobre el terreno de la superficie", publicaciones internas, ISMM, Moa, 1987.
5. Borsch-Komponiest, B.I.; A.M. Navíthy y J.M. Knish: *Asuntos topográficos*, 2da edición, Editorial Nedra, Moscú, 1986.
6. Klepikov, S.N.: "Método para determinar la deformación máxima relativa de los terrenos de superficie por los trabajos subterráneos", revista *Construcción de minas*, no. 12, pp. 16 y 18, Moscú, 1986.
7. Kratzch, H.: *Desplazamiento de las rocas y protección de las obras erigidas*, Editorial Nedra, Moscú, 1978.
8. Krupennikov, T.A. y otros: *Presión minera, desplazamiento de las rocas y metodología de los trabajos topográficos*, Editorial VNIMI, Leningrado, 1970.
9. Kositsin, B.A.: "Protección de edificios y construcciones afectadas en Polonia y Checoslovaquia", revista *Construcción de minas*, no. 12, pp. 23-28, 1962.
10. Maevsky, F.M.: *Reglas para la conservación de construcciones y objetos naturales de la influencia de los trabajos subterráneos durante la explotación de yacimientos de carbón*, Editorial Nedra, Moscú, 1991.
11. Müller, R.A.: "Algunas preguntas sobre la protección de edificios y construcciones de la influencia de los trabajos subterráneos en la URSS", trabajos del Simposio Internacional sobre Topografía, Geología Minera y Geometría Minera, Praga, 1969.

12. Turchaninov, I.A.; M.A. Iosis, y E.V. Kasparin: *Fundamentos de mecánica de roca*, 2da edición, Editorial Nedra, Leningrado, 1989.

Este libro ha sido impreso
Combinado Poligráfico
«Evelio Rodríguez Curbelo
se terminó de imprimir
en el mes Julio del 1995
«Año del Centenario de la caída
de Jose Martí»