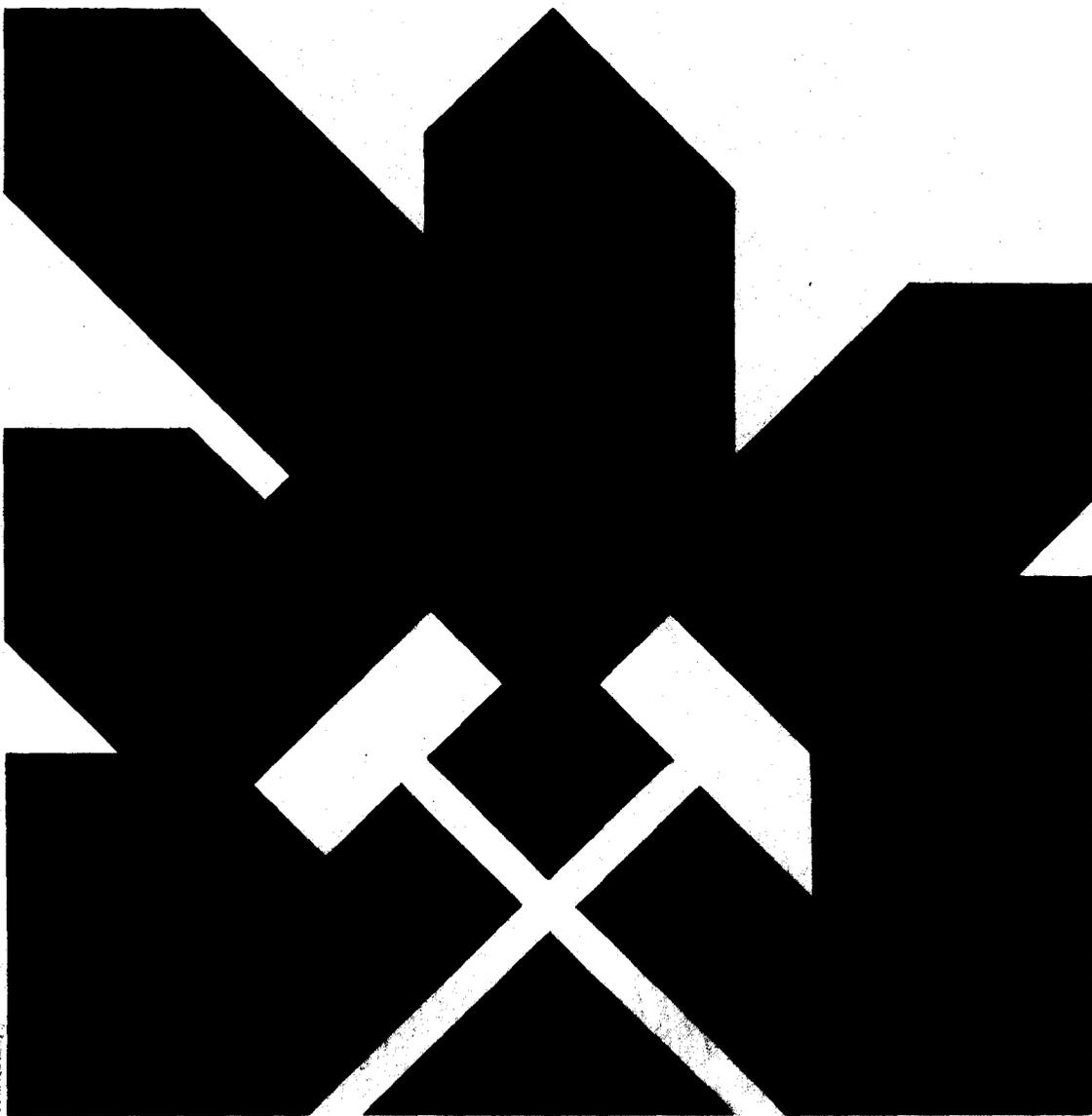


MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA
COMISARIA DE LA ENERGIA Y RECURSOS MINERALES

(~~CONVENIO CON LA EMPRESA NACIONAL ADARO~~
~~DE INVESTIGACIONES MINERAS, S.A.~~)

~~PARA EL~~ ESTUDIO GEOMECANICO DE SUBSIDENCIA
EN MINAS DE ANDORRA



INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

00757

Este estudio ha sido realizado por la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras S.A. (ENADIMSA) en regimen de contratación con el Instituto Geológico y Minero de España, siendo Jefe de Proyecto D. A.J. Campos de Orellana Pardesa, Dr. Ingeniero de Minas y Director del Estudio, D. J. M. Pernia Llera, Ingeniero de Minas.

I N D I C E

	<u>Pág.</u>
1.- INTRODUCCION	1
1.1.- ASPECTOS GENERALES	2
1.2.- ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION	4
1.3.- OBJETIVOS DEL PROYECTO	17
1.4.- PLAN DE TRABAJOS	18
1.5.- DESARROLLO DEL TRABAJO	21
1.6.- FUNCIONAMIENTO Y ORGANIZACION DEL BERGBAU - FORSCHUNG GmbH	22
1.6.1.- Necesidad e importancia de un sis- tema de control de estratos	22
1.6.2.- Desarrollo del Sistema de Control de Estratos en R.F.A.	24
1.6.3.- Organización del Sistema de Control de Estratos	27
2.- PROGRESOS Y DESARROLLOS EN EL ANALISIS DE DEFORMA CIONES DEL TERRENO DEBIDOS A OPERACIONES MINERAS ...	30
2.1.- INTRODUCCION	31
2.2.- METODOS EMPIRICOS	32
2.2.1.- N.C.B.	32
2.2.2.- Formulas empíricas	32
2.3.- MEDIOS ESTOCASTICOS	37
2.4.- MECANICA DEL DISCONTINUO	39
2.4.1.- Conclusión	40
2.5.- TEORIAS DEL CONTINUO	40
2.6.- EL MOVIMIENTO DEL TERRENO COMO DEFORMACION ELASTICA	41
2.6.1.- Terreno trasnversalmente Isotrópico ..	42
2.7.- METODO DE ELEMENTOS FINITOS	45

	<u>Pág.</u>
2.8.- TIEMPO DEPENDENCIA	48
2.8.1.- Análisis viscoelástico del movimiento del terreno	49
2.9.- CONCLUSION	49
3.- CONTROL DE ESTRATOS EN GALERIAS EN CAPA Y TAJOS	51
3.1.- INTRODUCCION	52
3.2.- REDUCCION DE LA PRESION DEL TERRENO MEDIANTE EL DISEÑO MINERO	53
3.2.1.- Situación de galerias	54
3.2.2.- Longitud del tajo y presión del terreno.	61
3.2.3.- Capas protegidas y presión del terreno .	62
3.3.- REDUCCION DE PRESION EN LAS GALERIAS EN CAPA ...	65
3.3.1.- Esquemas de deformación en las galerias.	65
3.3.2.- Influencia de la conducción de galerias, por delante, por detrás o en línea con - el tajo	67
3.3.3.- Métodos de excavación, Packing. Conver- gencia	71
3.3.4.- Consolidación del muro de las galerias .	73
3.3.5.- Relleno de los arcos metálicos en las galerias	77
3.3.6.- Planificación de la entibación en las galerias	80
3.3.7.- Entibación lateral en las galerias (packing)	83
3.3.8.- El bulonaje como suplemento a la enti- bación con arcos metálicos	86
3.4.- CONTROL DE ESTRATOS EN EL TAJO	87
3.4.1.- Efectos de aumento de presión	87
3.4.2.- Requerimientos para autorización autodesplazable	88
3.4.3.- Entibación autodesplazable a grandes profundidades	90
3.5.- SUMARIO	91
4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
5.- BIBLIOGRAFIA	99

1.- INTRODUCCION

1.1.- ASPECTOS GENERALES

La magnitud y extensión de cualquier fenómeno de subsidencia del terreno debida a procesos de excavación subterránea y operaciones mineras, depende como todos sabemos de una serie de factores, los más importantes de los cuales son:

- Angulo de Arrastre y Límite
- Profundidad
- Anchura del tajo o labor de explotación
- Potencia de la capa explotada
- Tipo o clase de entibación usada en los tajos
- Inclinación o buzamiento de la capa o capas en explotación.
- Velocidad de avance del tajo o frente de arranque
- Factor tiempo. Evolución de la subsidencia y del perfil de la misma en el tiempo; esto es, la "subsidencia residual".

A su vez el ángulo límite (α) está fuertemente condicionado por la profundidad, potencia de capas, inclinación o buzamiento de las mismas y por condiciones geológicas locales (estratigrafía, litología, presencia de estratos arcillosos o arenosos, fallas, planos de fracturas, estratos o formaciones auto-soportantes por encima de la explotación, tales como ciertas areniscas fuertemente cementadas o calizas, etc).

La profundidad incide fuertemente sobre el Factor de Subsidencia, disminuyendo éste a medida que aumenta la profundidad. El tipo de entibación afecta también fuertemente al Factor de Subsidencia, aumentando ésta al pasar de explotaciones por cámaras y pilares a tajos largos y dentro de éstas al usar hundimiento libre, llaves de madera y rellenos hidráulicos, neumáticos o sólido.

La anchura de los tajos influye en el Factor de subsidencia por su efecto y relación directa con la formación de anchos subcríticos, críticos y supercríticos.

La inclinación de las capas afecta a los ángulos superiores e inferiores límites y al perfil general de la cuenca de subidencia.

El avance rápido en los tajos dá lugar a unos mejores efectos inmediatos en superficie, pero aumenta luego la "subsidencia residual", dando lugar a una mayor influencia del tiempo en la subsidencia total.

El factor de tiempo o la "subsidencia residual", o dicho de otra forma la "duración de la subsidencia", depende en gran medida del tipo de roca que componen el paquete de formaciones que cubren las capas; así como el estado de la explotación, esto es si ésta se encuentra por debajo o ha sobrepasado el área crítica. Cuanto más competentes sean los materiales de recubrimiento mayor es la "subsidencia residual", a su vez ésta es menor en explotaciones que han sobrepasado el área crítica.

Todo esto que se ha venido exponiendo es el resultado de muchos años de observación, experiencias y estudios, desarrolla-

dos en las principales cuencas carboníferas y distritos mineros - de los más importantes países productores del mundo: cuencas inglesas, alemanas (Ruhr), francesas (Norte y Pas de Calais), polacas (Silesia), rusas (Dunbass, Lvov-volyn, Kizelov, Donets, Kuznetsl, Karaganda, Moscú, Cheliabinsky y Pechora), americanas - (Pennsylvania, Virginia, W. Virginia, Kentucky, Tennessee, Ohio, Indiana, Illinois, North Dakota, Wyoming, Colorado, etc).

1.2.- ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION

En orden a evaluar los efectos que la subsidencia lleva - consigo, debemos de considerar no solamente los efectos de los - desplazamientos verticales, sino tambien los horizontales, defor - maciones unitarias, giro o basculamiento del terreno (tilting) y curvatura del mismo.

Los desplazamientos verticales aunque no sean muy críticos en cuanto al daño que puedan inferir a edificios, si en cambio - pueden crear serios problemas en los sistemas de drenaje superfi - cial natural o hechos por el hombre, cursos de ríos, canales, al - caltarillano, etc, así como en el trazado de autopistas, carrete - ras y líneas de ferrocarril.

Las deformaciones horizontales (tracción o compresión) - crean distorsión y fracturación y aparición de grietas en edifi - cios; el giro o inclinación del terreno dá lugar a inestabilida - des de edificios altos (chimeneas de fundición), mal funcionamien - to de máquinas, molinos, grúas, ascensores, máquinas de extracción guías de pozos, espesadores, etc.; por último la curvatura del te - rreno afecta y crea flexiones en estructuras civiles, similares a

a las producidas por las deformaciones horizontales.

En su conjunto vemos como la subsidencia es un fenómeno - geomecánico asociado a la actividad minera, con enorme repercusión en la distribución y disposición de las estructuras civiles superficiales y en el impacto que pueden producir en el medio ambiente.

El interés de disponer de algún medio que permita poder - valorar a priori las características, grado, magnitud y extensión de los aspectos relacionados a la subsidencia, es de vital importancia no solo para la planificación de las instalaciones y servicios en superficie, sino por la repercusión que puede tener para las mismas explotaciones, en especial los riesgos de inundación por fracturación de capas acuíferas que quedan afectadas por la subsidencia.

La responsabilidad recogida por la industria carbonera española, y con características especiales la relacionada con la - producción de lignitos, tanto pardos (minería a cielo abierto) como negros (minería subterránea), fue la causa por la que ENADIMSA, ante el requerimiento de la administración, a través del Instituto Geológico y Minero de España, realizase durante 1981 un proyecto geomecánico sobre los factores más fuertes incidentes en los fenómenos de subsidencia en la minería del carbón. Este trabajo ("Proyecto para el Control de Subsidencia Minera en Andorra (Teruel)") llegó a conclusiones muy interesantes de relación entre la disposición geométrica de la cuenca de subsidencia y la actitud especial de los aspectos geológico-estructurales relacionados a la explotación de tajos en capas de lignitos de poca inclinación y de gran potencia explotados por "soutirage".

Las conclusiones a que se llegaron en ese anterior proyecto, pueden resumirse en la siguiente forma:

Del programa de Control de Movimientos del Terreno asociado a las explotaciones por tajos de 100 m divididos en subtajos cortos de 50 m y explotados por "soutirage", junto con las características geológicas, estructurales, sedimentológicas y litológicas del yacimiento (Fig. 1), así como del carácter de las formaciones en que se desarrolla la cuenca lignitífera de Andorra y de las operaciones mineras que se llevan a cabo en la explotación (plano 1) concluimos con el siguiente conjunto de conclusiones:

- El ángulo límite inferior o de arrastre que se ha podido detectar durante el programa de control de movimientos del terreno, nos orienta hacia un valor superior a los 25°, aproximadamente entre 25 y 30°.

El ángulo límite superior, dada las especiales configuraciones y condicionamientos del terreno no se pudo definir numéricamente, pero dada la experiencia en este tipo de problemas en otras cuencas extranjeras, con capas de 10° de pendiente, pudimos valorar este ángulo superior límite en unos 15 o 20° por debajo del inferior; esto es alrededor de los 10° o 15°.

- El valor del ángulo límite superior de tan solo 10° o 15°, junto con la prácticamente no existencia de subsidencia residual, coincide con las características conocidas de las formaciones geológicas de Mina Innominada, en donde fue realizado el estudio, materiales estos de poca consistencia, poco consolidados y rigidez baja.
- La profundidad (325 m) de las explotaciones del tajo S-2 de 100 de ancho en total, así como la existencia de ángulos límites de

Areniscas + conglomerados + pizarras

65m

300m

325m

Calizas

Arenas arcillosas y areniscas

Capa O

25m. Arenas

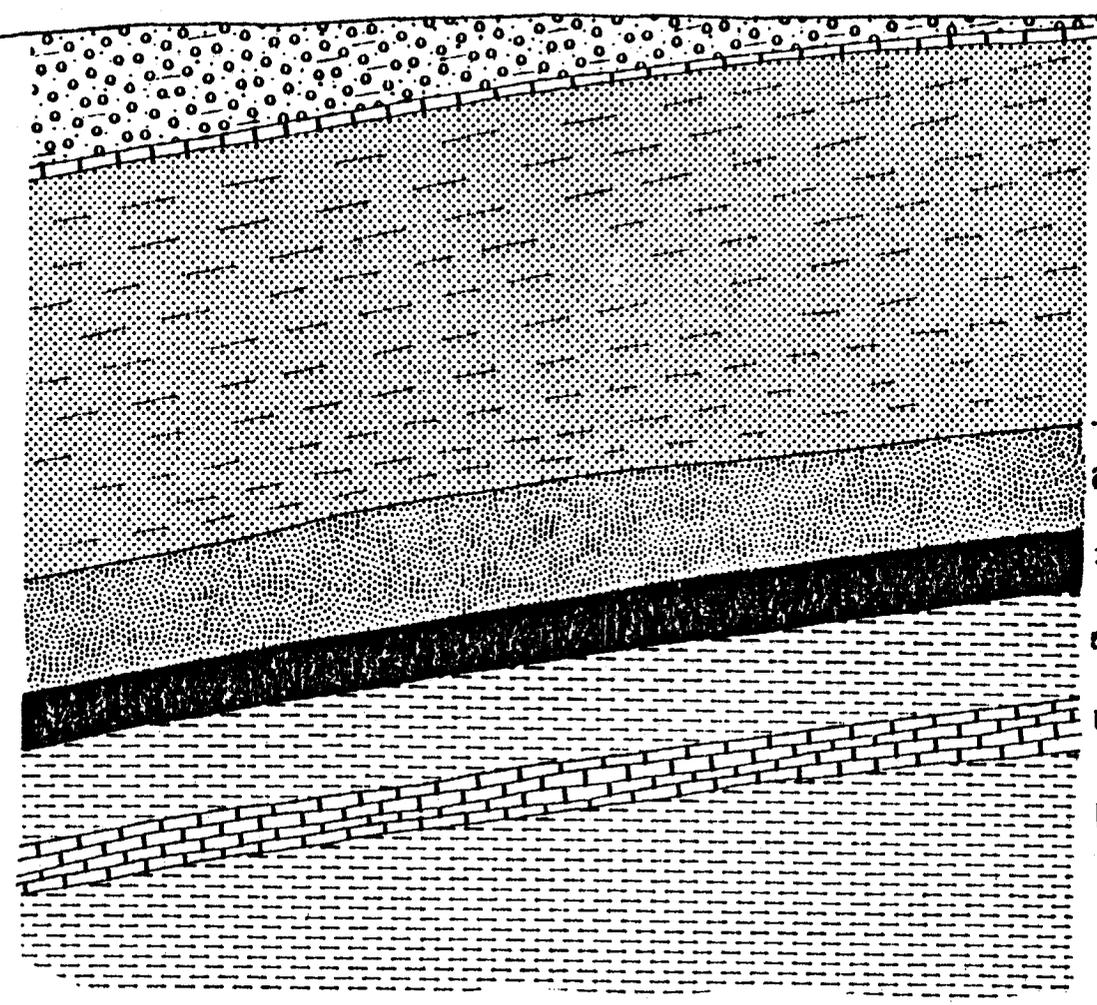
3-15m Lignitos (Capa P)

5-30m. Margas

15m. Calizas

100m. Margas

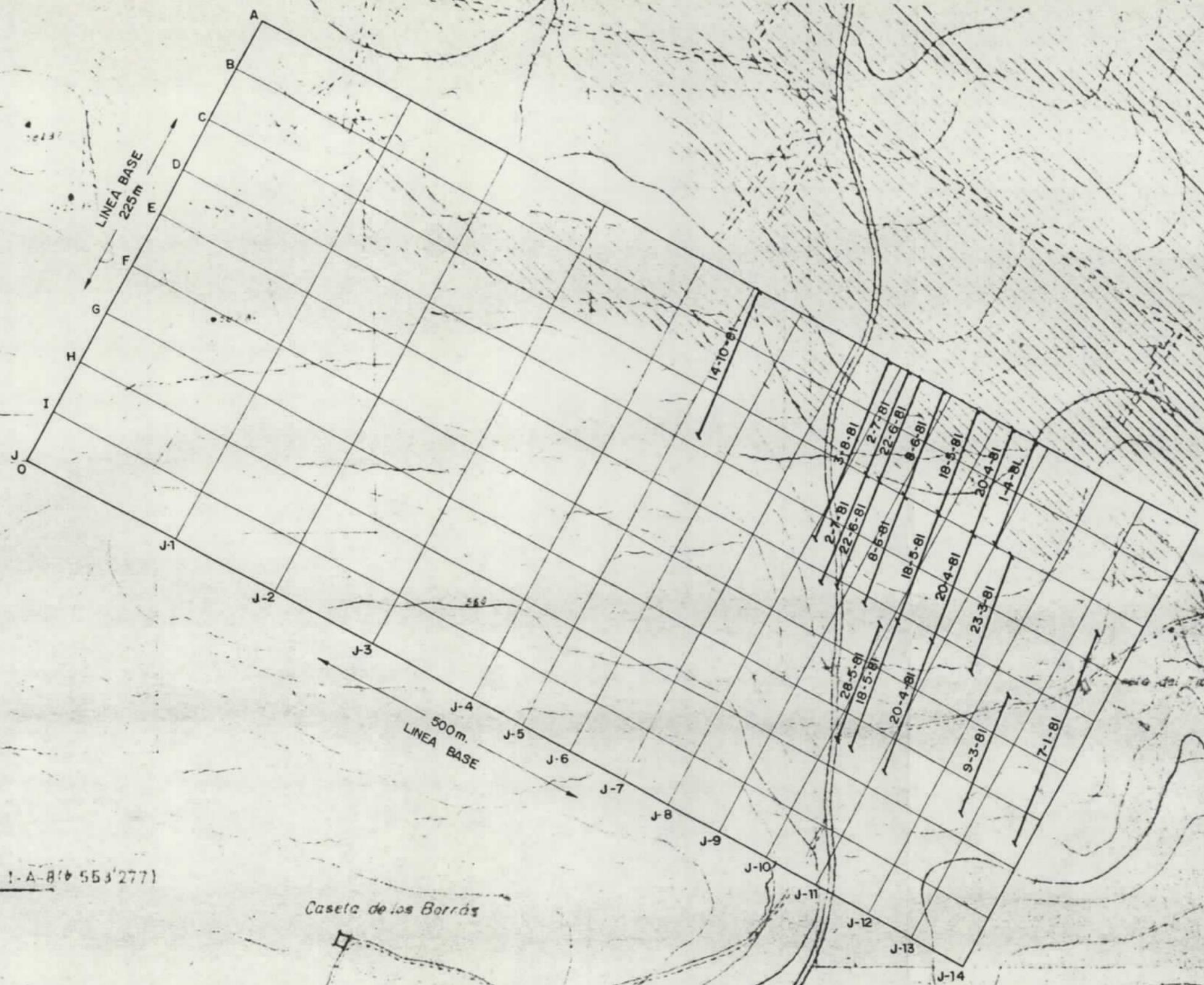
FIG. 1



ESTUDIO DE SUBSIDENCIA MINA INNOMINADA DE ANDORRA (TERUEL)

PLANO DE SITUACION DE LA CUADRICULA DE CONTROL DE SUBSIDENCIA

ESCALA 1:2.000



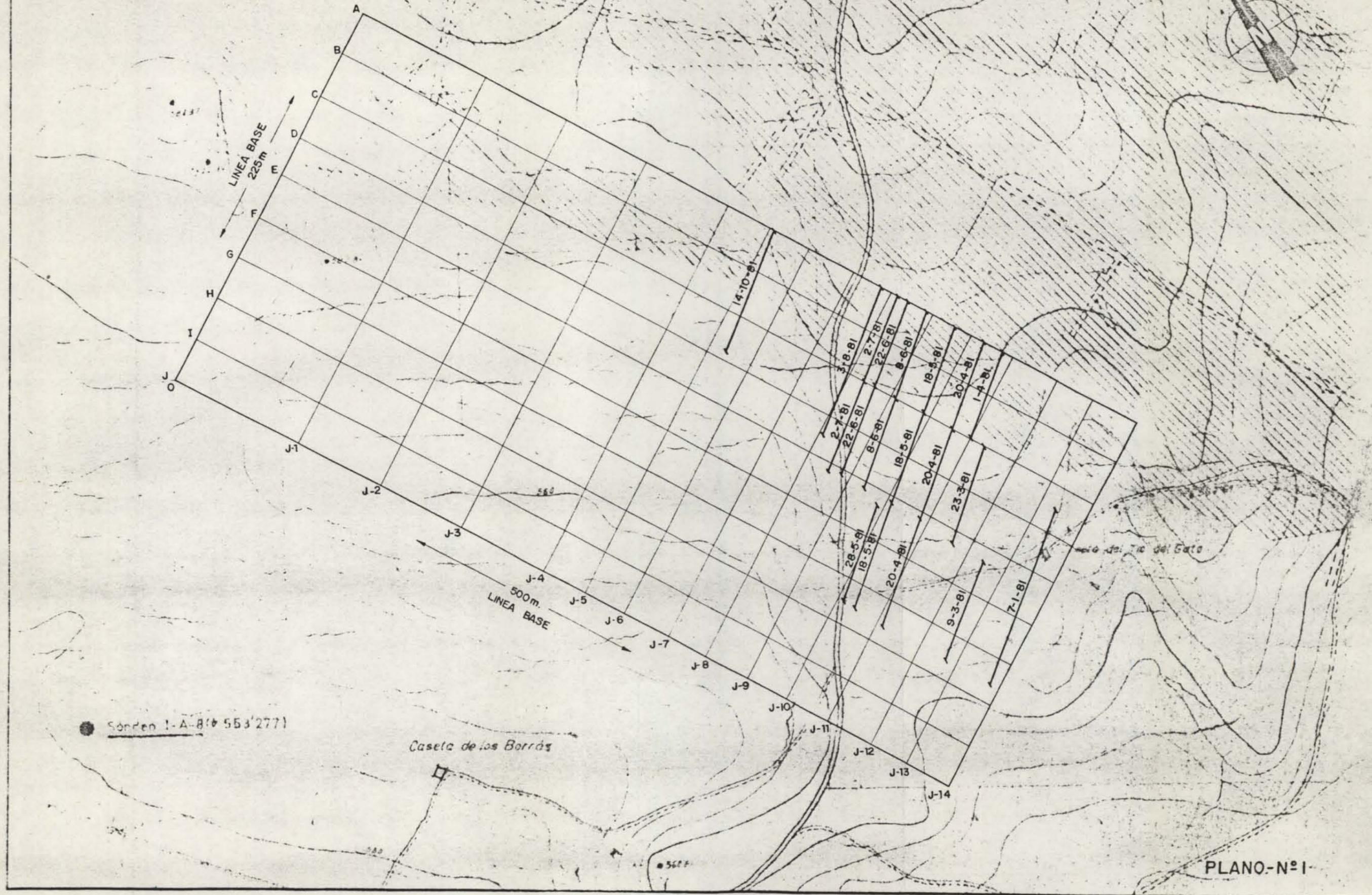
● Sonda 1-A-81 (553'277)

Caseta de los Borrás

ESTUDIO DE SUBSIDENCIA MINA INNOMINADA DE ANDORRA (TERUEL)

PLANO DE SITUACION DE LA CUADRICULA DE CONTROL DE SUBSIDENCIA

ESCALA 1:2.000



30° y 10°; nos llevó a considerar áreas críticas del orden de los 200 ó 250 m. de ancho, dimensiones estas nunca alcanzadas en la explotación de S-2; por lo que a subsidencia se refiere, este tajo se encuentra en condiciones subcríticas.

- La relación W/D (ancho/profundidad) del tajo, del orden de 0,3, nos conduce a considerar valores de Factores de Subsidiencias del orden de 0,2 dado el proceso de hundimiento total y extracción del carbón por el método de "soutirage".

Este valor del Factor de Subsidiencia unido a una potencia de 8 m. de carbón, da como resultante un valor de la Subsidiencia Máxima del orden de metro a metro y medio, en condiciones de explotación crítica.

El hecho de encontrarnos en condiciones subcríticas, hace muy improbable que se superen los valores de metro o metro y medio en la Subsidiencia Máxima esperada. De hecho el valor máximo detectado fue de 925 mm (Fig. 3, 4, 5).

- Aunque nos encontramos en condiciones subcríticas de explotación los valores máximos de la subsidencia detectada (925 mm), relativamente próximos a los máximos esperados de uno a metro y medio en condiciones críticas, nos lleva a considerar la existencia de enormes bóvedas de relajación con fuertes deformaciones y dilataciones en el subsuelo. Esta enorme bóveda viene definida por la poca competencia, falta de rigidez y fuerte grado de fracturación de los materiales que sobreyacen a las capas de carbón.
- Estas fuertes deformaciones de la bóveda de relajación, llevan consigo e inducen a la producción de golpes de techo de estratos más competentes y cementados (bancos de areniscas y calizas) que al romper dan lugar a fuertes entradas de agua de formaciones acuíferas superiores menos consolidadas y muy permeables.

ESTUDIO DE SUBSIDENCIA MINA INNOMINADA DE ANDORRA (TERUEL)

PLANO DE SITUACION DE LINEAS ISOPACAS, COTAS (\pm) EN mm., AL 5-VI-81

ESCALA 1:250

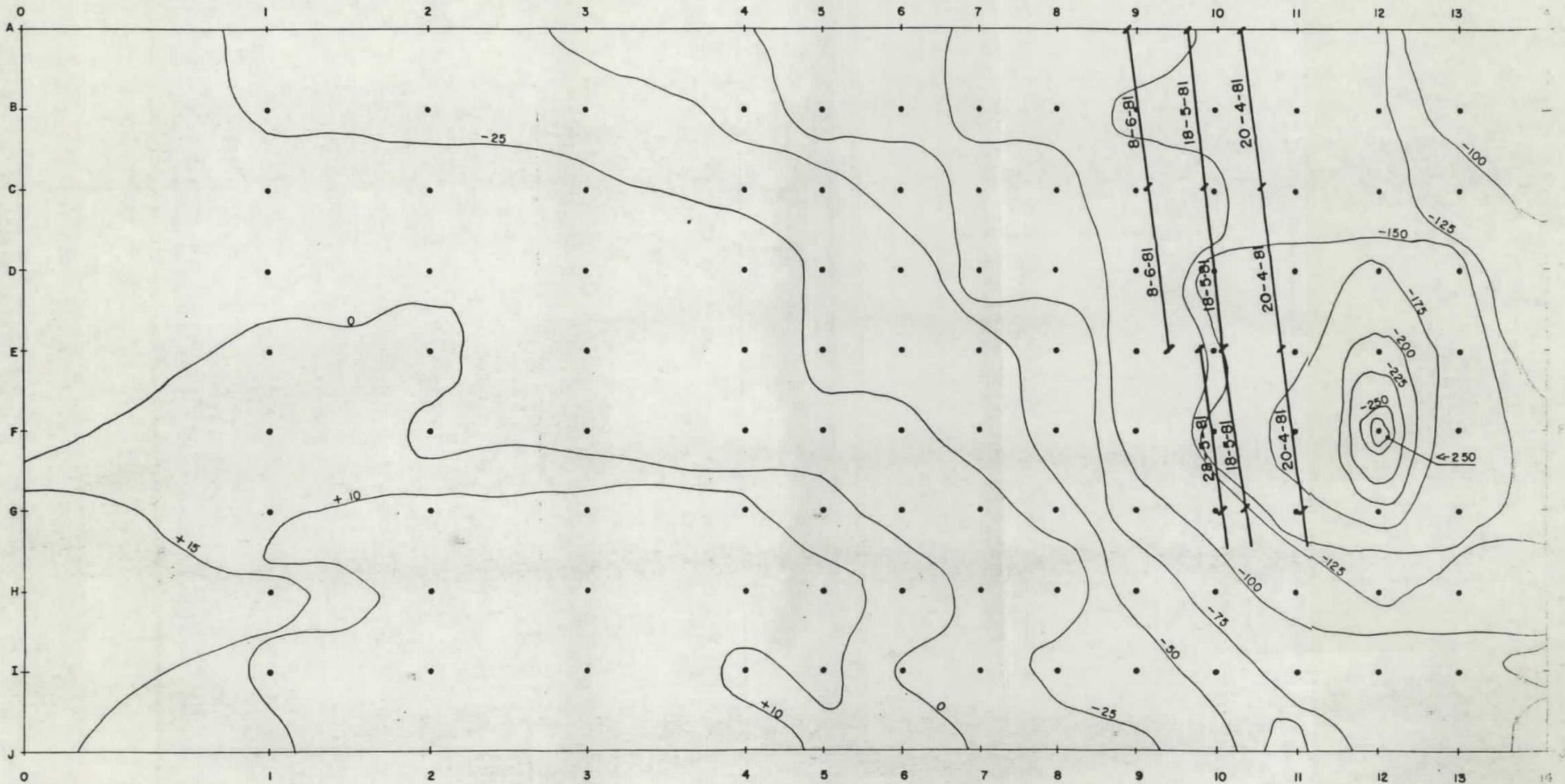
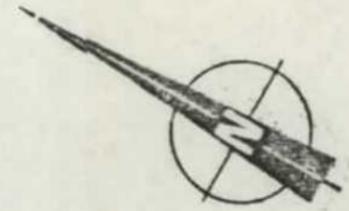


FIG. N^o 3

ESTUDIO DE SUBSIDENCIA MINA INNOMINADA DE ANDORRA (TERUEL)

PLANO DE SITUACION DE LINEAS ISOPACAS, COTAS (\pm) EN mm., AL 16-VII-81

ESCALA 1:1250

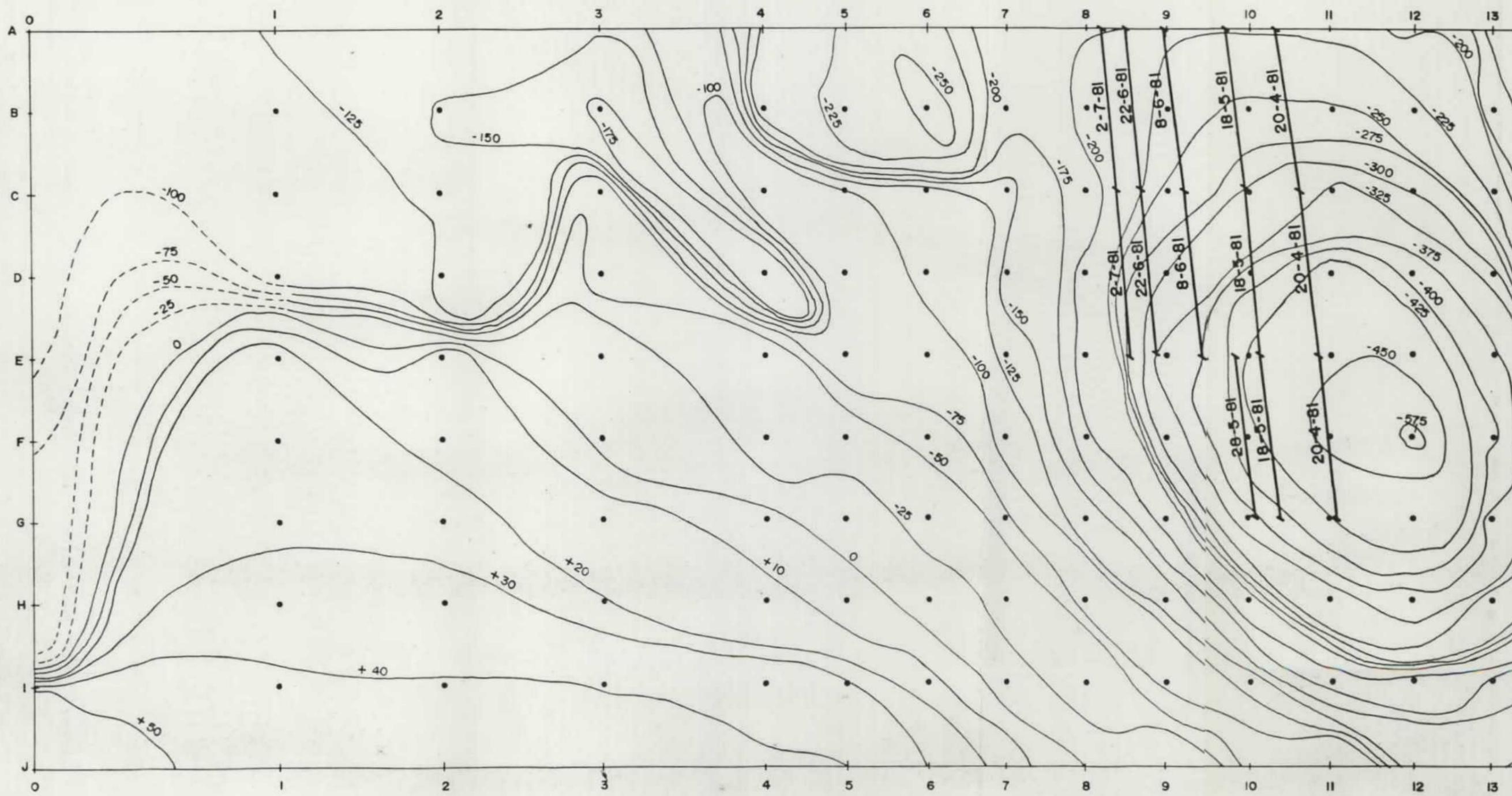
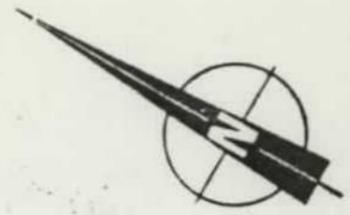


FIG. N° 4

ESTUDIO DE SUBSIDENCIA MINA INNOMINADA DE ANDORRA (TERUEL)

PLANO DE SITUACION DE LINEAS ISOPACAS, COTAS (±) EN mm., AL 15-X-81

ESCALA 1:1250

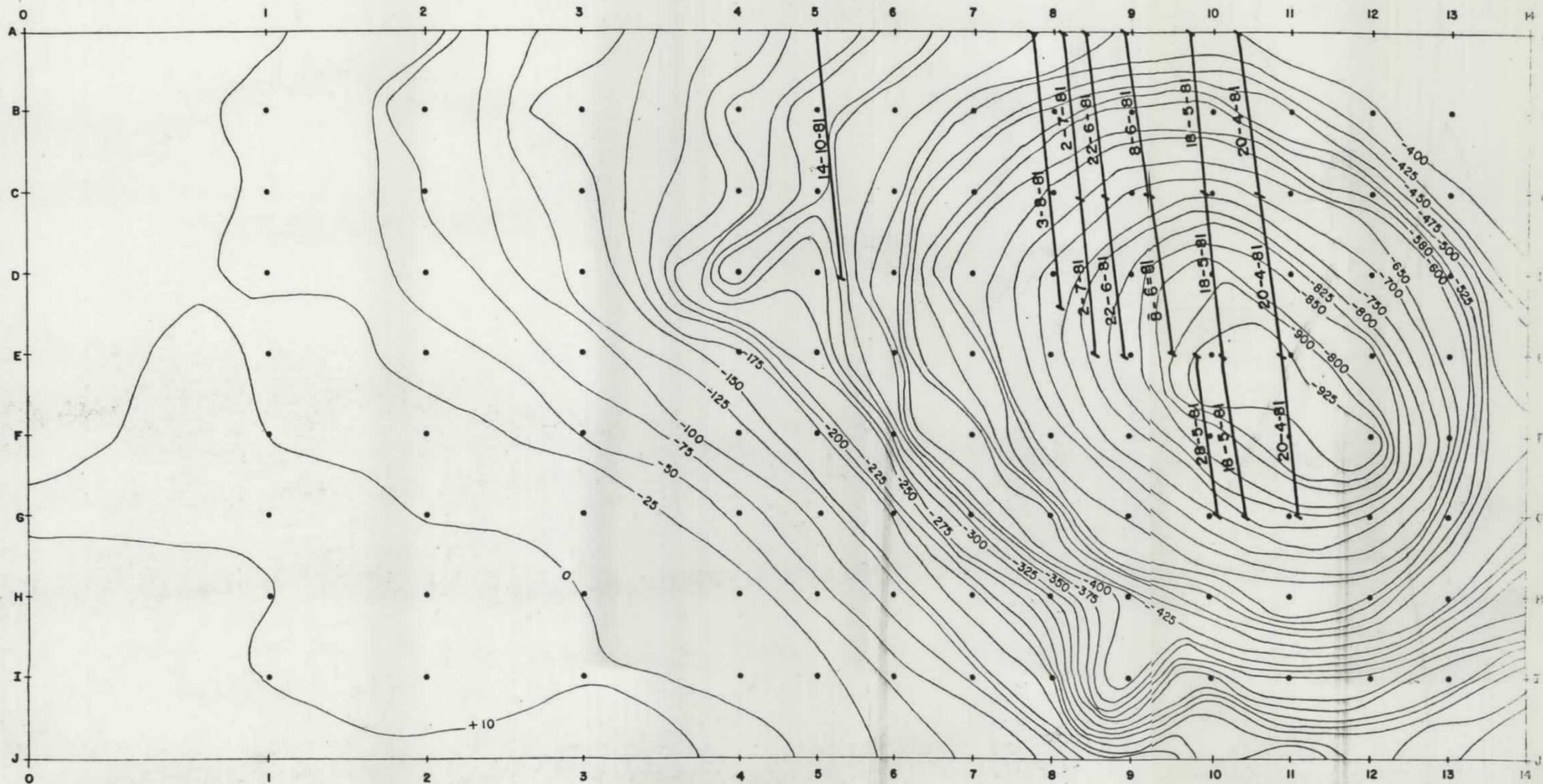
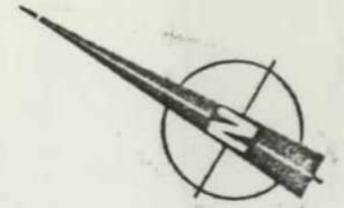


FIG. Nº 5

La realidad de los acontecimientos observados durante la primavera y el verano de 1981, ponen de manifiesto nuestras interpretaciones.

Los pequeños conos "satélites" de subsidencia observados durante el mes de Julio, con vértices de B6 y B3/D4, deformaciones de 250 y 175 mm respectivamente y localizado por delante del frente del tajo, podrían estar relacionados a los golpes de techo e irrupciones de agua que tuvieron lugar con fuerte intensidad a comienzos del verano, e inducidos por una excesiva bóveda o zona de relajación.

Estos fueron fenómenos locales y transitorios que desaparecieron al acabar los golpes de techo y entradas de agua y que quedaron absorbidos por el cono principal de subsidencia (ver líneas de isopacas de Octubre).

- Es curioso observar como el cono de subsidencia del tajo S-2, presenta su vértice o punto de máxima deformación, en la estación F-12; el cual ocupa con respecto al frente del tajo una posición geométrico-espacial que orienta el eje del cono según un azimuth de 20° y con una inclinación o buzamiento de 72° NE. Esta línea de máxima subsidencia, cae dentro del área de mayor concentración de líneas de intersección de diaclasas más sistemáticas y predominantes en el área (J_1 y J_2) que se detectan en el anterior estudio.

La excepcional coincidencia de los aspectos geométricos espaciales de los fenómenos de subsidencia con los aspectos estructurales, es un dato de extraordinario interés, jamás observado por lo que a nuestra información concierne, en explotaciones carboníferas.

Un conocimiento detallado de la evolución de los aspectos estructurales en el subsuelo, puede deducirnos a una valoración a priori de la magnitud a nivel cualitativo y disposiciones

geométrico-superficiales atípicas de la cuenca de subsidencia. La falta de tipicidad se ha detectado, así como su relación en tre los fenómenos de subsidencia y estructurales en Mina Innominada queda probada.

No queremos con esto indicar que el factor estructural sea el primario en el desarrollo del cono de subsidencia, pero si está íntimamente asociado a la configuración geométrico-espacial del mismo.

- La observación de las líneas Isopacas de subsidencia, nos permite ver como la tendencia general de la cuenca de subsidencia es la de tomar una disposición alargada con eje a 10° de azimuth en dirección NE; esto es coincidente con la orientación de los principales sistemas estructurales J_1 y J_2 .

Este fenómeno confirma lo expuesto en el punto anterior.

De todo el conjunto de conclusiones más significativas se desprenderá un importante dato en cuanto a la nueva forma de explotación por "soutirage" del tajo S-2 y a sus repercusiones en fenómenos asociados a la subsidencia. El "soutirage" lleva consigo a un hundimiento total y muy rápido sobre un volumen equivalente a toda la potencia de la capa, lo cual lleva consigo el desarrollo de subsidencias muy rápidas y altas, fenómeno este que unido a fuertes avances en los tajos, da como resultado una zona de relajación extremadamente voluminosa y desarrollada en muy breve espacio de tiempo, lo cual favorece e induce la producción de fuertes golpes de techo sobre estratos más cementados y consolidados y a las inherentes y peligrosas entradas de agua de efectos desastrosos, como los que se han observado.

Por el contrario, los tajos largos, siempre y cuando no se sobrepase el área crítica de los 200 m, permite debido a una explotación por pasadas de 2 a 3 m, el trabajador con valores máximos de subsidencias (S_{max}) menores, lo que implica la crea-

ción de una zona de relajación de evolución más lenta y de menor amplitud y magnitud de las deformaciones, todo lo cual lleva consigo a una disminución de los fenómenos de golpes de techo y de las entradas de agua inherentes a los mismos.

Por otra parte los fenómenos de subsidencia superficial quedan disminuidos al usar tajos largos en vez de "soutirage", eliminándose en gran medida todo el conjunto de problemas en superficie que conlleva una fuerte subsidencia de rápida evolución.

La información, resultados y conclusiones desprendidas de dicho proyecto, han sido lo suficientemente alentadoras e interesantes, como para que el Instituto Geológico y Minero de España, considerase apropiado el desarrollar los conceptos y datos aportados en el proyecto anterior, a la luz de los nuevos aportes tecnológicos llevados a cabo en la interpretación y análisis de problemas mineros de subsidencia.

En el proyecto se pretende establecer una metodología, la más adecuada a seguir en el caso de las explotaciones lignitíferas de Andorra Teruel, a la vista y basándonos en los resultados y conclusiones hasta ahora recogidas en el proyecto anterior a éste, realizado en 1981, y que ya hemos comentado.

Esta metodología o forma de atacar el problema de Subsidencia de Andorra, se realizará haciendo una recopilación de la información tecnológica existente, estableciendo contactos con instituciones y centros de investigación especializados en el tema y con el suficiente prestigio internacional reconocido como para que los datos que se han recopilado relacionados a los fenómenos de Subsidencia de Mina Innominada de Andorra, sean visualizados e interpretadas y sacadas las conclusiones y recomendaciones de máxima fiabilidad y pragmatismo que el caso requiere.

1.3.- OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo fundamental como ya hemos expresado, es aplicar a la fenomenología observada en la subsidencia de Mina Innominada, una forma de acción o metodología más adecuada a las características particulares y peculiares de este problema, enriqueciendo todo lo que ya sabemos sobre los fenómenos de subsidencia de Andorra, con una visualización la más adecuada, apropiada y de mayor pragmatismo y fiabilidad, para lo cual pretendemos establecer contactos con instituciones prestigiosas a nivel internacional.

Es obvio, ya que este proyecto va a consistir en una continuación del anterior de subsidencia en Andorra, que este se realice sobre los datos aportados por el proyecto anterior y por tanto en la misma localidad de Teruel.

El plan de trabajo consistirá en una revisión de los centros más acreditados en el terreno de la subsidencia minera, seguida por una serie de visitas a los mismos, en donde se planteará el problema de Andorra, y donde se irán recogiendo recomendaciones y puntos de vista, desde distintas ópticas y que recaigan sobre el proyecto.

De todos estos contactos, visitas y asesoramientos, se establecerá una metodología y plan de acción que mejor enfoque el tema en cuanto a líneas de actuación posteriores que mejor direccionen el problema, en cuanto a la geometría, disposición y forma de explotación de los tajos o frentes de trabajo.

1.4.- PLAN DE TRABAJOS

Nuestro primer paso fue hacer una revisión de la literatura existente en relación al problema de subsidencia en capas potentes de poca inclinación y con techos flojos y muy friables, - así como en aquellos aspectos en los que la subsidencia afectada de forma muy directa a otros problemas existentes en la problemática de las explotaciones lignitíferas de Andorra, en especial - las irrupciones de agua procedentes de areniscas y acuíferos en niveles superiores, el problema de la autocombustión, también - presenta en Andorra, y del mantenimiento de galerías en carbón - y entibación de los tajos.

Una vez realizada esta revisión, nos pusimos en contacto con cuatro centros de investigación minera del carbón, de prestigio internacional, con relación al tema de subsidencia. Estos - centros fueron el U.S. Bureau of Mines, en su centro de Pittsburgh, íntimamente ligado a la minería del carbón subterránea - del Este de U.S.A. (Apalaches) (Pittsburgh Mining and Safety Research Center); en segundo lugar contactamos con el Mining Research and Development Establish. (Organización para el Desarrollo e Investigación Minera) del National Coal Board en Londres; en tercer lugar con el Centro de Investigación Tecnológica Minera - del Instituto Central de Minería de Katowice, Polonia, y en cuarto lugar con el Bergabu-Forschung GmbH (Intituto de Investigación Minera) de la Asociación de Minería del Carbón (Steinkohlen-bergbauvereins) de la R.F.A., situado en Essen en la cuenca carbonífera del Ruhr.

Una vez realizados estos contactos, rechazamos la propuesta del centro de Pittsburgh del U.S. Bureau of Mines, por considerar que la minería carbonífera en U.S.A., presenta unos problemas de subsidencia no muy graves y siempre relacionados con minería por cámaras y pilares, ya que en este país de los 310 millones de toneladas producidos en 1981, solo un 10% procede de explotaciones subterráneas por tajos largos con hundimiento, por lo que su asesoramiento aunque siempre valioso, iba a estar falto de esa experiencia y falta de contacto diario con la problemática real, tan enriquecedora y necesaria en el buen juicio geotécnico.

En Polonia, si bien el 97% de la producción procede de tajos largos con hundimiento y la problemática de deformaciones en superficie ha sido fuerte, dada la incidencia en zonas altamente pobladas, la relación con el Instituto Central de Minería no pudo conseguirse, probablemente debido a los recientes acontecimientos socio-políticos que han venido teniendo lugar en dicho país, y que han conducido al hundimiento de la industria carbonífera polaca, que hace pocos años se aproximaba a los 200 millones de toneladas, siendo uno de los principales exportadores del mundo.

Nuestro primer contacto personal con el National Coal Board y con el Bergbau-Forschung, lo tuvimos en Lieja (Bélgica) en el mes de Septiembre con ocasión del 7^a Conferencia Internacional de Control de Estratos. Allí tuvimos ocasión de discutir el tema con Mr. A.H. Wilson, Director de la División de Mecánica de Rocas y del Carbón del Mining Research and Development Establishment del National Coal Board. El National Coal Board, ha venido utilizando un sistema de control de subsidencia puramente estadístico-experimental, que se aplica muy bien a las características bastante uniformes y homogéneas de las cuencas ingle-

sas, pero que ellos son conscientes, y así nos lo expuso Mr. Wilson de su falta de aplicabilidad y fiabilidad a condiciones diferentes a las británicas, tal como las nuestras de Andorra, con explotaciones de gran potencia y techos extraordinariamente sensibles. En cualquier caso Mr. Wilson, nos puso en contacto con representantes de British Mining Consultants, consultores profesionales, que estaban dispuestos a desarrollar todo un estudio de detalle para las condiciones particulaes de Andorra, pero con la inconveniencia que para nosotros tenia la brevedad y el poco tiempo con que se contaba para la ejecución de este proyecto, en la que nuestra intención era la de un contacto puntual, orientado a un cambio de impresiones, puntos de vista y sugerencias, basadas en una experiencia prestigiada como era la de estos organismos, y que nos sirviera para orientar y contrastar nuestras opiniones, en base a lo que ya conocíamos del comportamiento de los tajos de Andorra y su repercusión en los fenómenos de subsidencia.

En Lieja, tuvimos tambien la oportunidad de comentar el problema con una figura tan prestigiosa como el Dr. Bieniawski, antiguo Director del CSIR Sudafricano (Council for Science and Industrial Research) actualmente profesor del Departamento de Ingeniería Minera de Pennsylvania State University, universidad enclavada en una zona eminentemente carbonera de U.S.A., y el cual asentia en nuestra decisión y observaciones ya comentadas con el centro de Pittsburgh del U.S. Bureau of Mines.

Finalmente, tambien en Lieja, pudimos exponer nuestro caso a los Drs. Everling y M. Irresberger del Departamento de Entibación Minera y Mecánica de Rocas (Grubenausbau und Gebirgsmechanic) del Instituto de Investigación Minera (Bergbau-Forschung) de la Asociación de la Minería del Carbón de Alemania (Stein-Kohlenbergbauvereins).

El Dr. Irresberger, es director de dicho departamento, habiendo sustituido al Dr. Jacobi, universalmente conocido en la geotecnia carbonífera, recientemente retirado. Dr. Irresberger, es probablemente la primera autoridad mundial en temas relacionados con entibación autodesplazable (pilas y escudos) en tajos largos de carbón.

En el departamento del Dr. Irresberger se encuentran Dr. G. Everling, autoridad mundial en el análisis y distribución de presión de estratos y del terreno en galerías y tajos del carbón; así como Dr. G. Braüner, experto internacionalmente reconocido por sus aportaciones a los métodos de funciones de Perfil y de Influencia en el estudio y predicción de fenómenos de subsidencia. Dr. Braüner, ha sido durante la década de los 70, profesor en el Departamento de ingeniería minera de Michigan Technical University en U.S.A.

Estas características, hicieron que nos centrasemos en los contactos con el Bergbau-Forschung, y de nuestro primer encuentro en Lieja, fijamos una fecha en Octubre para una reunión en Essen, R.F.A., con los expertos de dicha organización de la minería del carbón alemana.

1.5.- DESARROLLO DEL TRABAJO

Durante nuestra estancia en Essen, aparte de nuestras reuniones con los Drs. Irresberger, Everling y Braüner tuvimos reuniones con Mr. Kaulfuss, Director del Departamento de Control de Subsidencia y con Dr. Zischinsky, experto en sostenimiento de galerías. Las reuniones se extendieron ocho horas diarias durante tres días, y en donde se plantearon la problemática de Andorra, pero no tratando el fenómeno de subsidencia, en su forma aislada

"quimicamente puro", sino teniendo en cuenta otros problemas asociados al mismo, creados por la subsidencia, pero de incidencia mucho más importante y significativa en la explotación de lignitos de Andorra, como son la entrada de agua, autocombustión, sostenimiento de galerías y entibación de tajos así como método de explotación que optimice todo este sistema unificado de problemas íntimamente relacionados.

En los capítulos siguientes se hace una exposición del estado actual en el desarrollo de la ingeniería de subsidencia, así como el punto alcanzado por el "Bergbau-Forschung" en temas tan íntimamente relacionados a la problemática de Andorra, como es el Control de Estratos en el mantenimiento de galerías en capa y el de entibación del carbón, para acabar con un capítulo de conclusiones y recomendaciones derivados de estos contactos.

1.6.- FUNCIONAMIENTO Y ORGANIZACION DEL BERGBAU-FORSCHUNG GmbH.

1.6.1.- Necesidad e importancia de un sistema de control de estratos.

En la cuenca minera del Ruhr, el avance que ha tenido lugar en la tecnología minera en las últimas décadas, ha conducido a conceder una gran importancia a los temas de Mecánica de Rocas por las siguientes causas y razones:

- Se ha incrementado la mecanización y concentración de trabajo; aumentando las necesidades de inversión y mano de obra para equipar los frentes de trabajo, y mantener un nivel de producción uniforme. Esto puede estar sometido a un gran riesgo, por imprevistos efectos de presión del terreno.

- La reparación de la entibación y maquinaria, se hace cada vez mas complicada y requiere una especial preparación y formación. No solo es difícil encontrar personal preparado, sino que los aspectos puramente manuales del trabajo, se han hecho extramadamente costosos, de tal forma que las reparaciones y el mantenimiento debe ser evitado en todo lo posible.
- Las medidas tomadas para el control de estratos están adaptadas a las condiciones operacionales, tanto en la fase de desarrollo como en investigación, y sus efectos pueden ser predichos en gran medida.

La planificación en Mecánica de Rocas, ha gozado de gran prominencia en Alemania, y los métodos tendrán que ser perfeccionados en los próximos años, en vista del incremento en profundidad de las explotaciones y desarrollo de la tecnología minera.

Así por ejemplo, vemos como en R.F.A., cada año 50 km² de techo se abren a producción, y a pesar de los nuevos tipos de entibación con pilas y escudos, una media de 16% de los techos sufren desprendimientos, distorsionando multitud de operaciones y disparando los costes de operación.

Por otro lado, en RFA, cada año se abren 500 km de galerías y aunque el 90% de ellas son entibadas con arcos metálicos deslizantes, como media sufren una deformación de un tercio de su altura inicial, esto proporciona interrupciones en el transporte - movimiento de personal, ventilación, labores de ripado, etc., dando como resultado, unos costes extras de explotación.

En R.F.A., se tiene estimado que en 1980 el coste absorbido por mantener las galerías abiertas y los tajos en condiciones de trabajo, alcanzó la cifra de 32 DM/t (vendida), lo cual representa el 16% del coste de explotación. A medida que las ope-

raciones aumentan en profundidad, esta suma se disparará al menos que sea posible adoptar medidas que contrarresten la relación costes-beneficios, en otras palabras, la minería del carbón en Alemania puede quedar fuera de mercado si no se toman medidas sistemáticas que minimicen los efectos de las presiones del terreno. Estas son palabras textuales recogidas por Dr. H. Irresberger, en nuestra visia al Bergbau-Forschung.

1.6.2.- Desarrollo del Sistema de Control de Estratos en R.F.A.

El Departamento de Entibación Minera y Mecánica de Rocas - (Grubernausbau und Gebirgsmechanik), del Bergbau-Forschung, fue establecido hace 22 años, durante los cuales valiosos resultados han sido alcanzados.

El punto principal, es la forma en la que la roca y la fortificación se comporta en la mina. El conocimiento de este comportamiento, junto a las características de la entibación definidas en ensayos en máquinas especiales de testificación, y el cálculo de las presiones del terreno, forman la base para la planificación de las labores y su fortificación. Exitos y fracasos, se repitén en ensayos y pruebas in-situ, hasta proporcionar una firme base operacional.

Una vez que un buen número de medidas y pruebas se han realizado in situ, se realiza el primer análisis de regresión y los más importantes factores que inciden en el problema quedan cuantificados. Con estos resultados se hizo posible el realizar una mejora continuada en la predicción del comportamiento de los terrencs.

Actualmente el Departamento de Entibación Minera y Mecánica de Rocas, bajo en dirección de Dr. Irresberger, cuenta con los siguientes servicios:

- Medición y evaluación de los efectos de la presión del terreno en labores subterráneas.
- Recopilación de información geológica y tectónica de las explotaciones.
- Valoración de las propiedades de las rocas y de la entibación en máquinas de ensayo, especialmente diseñadas para ello.
- Cálculo de la presión del terreno por modelos numéricos.
- Investigación de los efectos de la presión del terreno en tajos y frentes, en estaciones de ensayo en superficie, con modelos gigantes a escala 1:10.
- Investigación de la entibación en frentes y galerías en modelos a escala 1:10.

El conocimiento adquirido por los métodos matemáticos, en ensayos a gran escala en unidades especiales de testificación, y los resultados de estaciones de observaciones subterráneas, son corregidas y vueltas a ensayar hasta conseguir un buen ajuste operacional. Esto nos viene a decir, que de esta forma, el sistema nos proporciona información no solo en términos de experiencias vividas, sino, también en relación a una planificación futura.

Las distintas fases de cualquier operación minera, están - como sabemos, íntimamente relacionadas, de tal forma que en la fase de planificación se asume que las presiones del terreno y las propiedades de la entibación están perfectamente conocidas; cuando es necesario desarrollar un cierto tipo de entibación, se necesita tener información sobre la forma en que los estratos reaccionaran en las operaciones de avance en galerías, producción

y fortificación; así como la auscultación o "monitoring" de la roca y la entibación, solo tiene sentido si la naturaleza y causa de los efectos han sido diagnosticados.

En este grado de interdependencia el que fuerza a que el control de estratos sea visualizado como un sistema integral; - esto evita el peligro de concentrarse solamente en supuestos - puntos principales de interés.

Esta solución "integrada", es la que desarrolla el sistema de Control de Estratos implantado por el Bergbau-Forschung - el cual combina los siguientes objetivos interconectados:

- Calcular o evaluar la presión del terreno.
- Planificar las labores, con el fin de ubicar galerías de larga duración en zonas de baja presión y en rocas competentes.
- Planificar y diseñar los tajos minimizando la presión efectiva del terreno.
- Planificar la entibación basándose en estudios previos, aplicando medidas costosas en áreas de alta presión y utilizar - una fortificación más ligera en zonas de baja presión.
- Un plan en el desarrollo de la entibación, basado en los condicionamientos y capacidad probada de la entibación para hacer frente a los mismos.
- Establecer un comportamiento en el servicio de esta entibación mediante ensayos en unidades especiales, simulando las condiciones reales existentes, con el objeto de detectar y eliminar defectos antes de bajarlos a la mina.

- Control de la entibación y de la roca mediante criterios standards.
- Centralización y evacuación de la experiencia ganada en las minas y en las unidades de ensayos especiales.
- Resolver problemas especiales de la minería del carbón, como resultado de la tecnología de entibación y Mecánica de Rocas.

El Sistema de Control de Estratos, es pues un proyecto flexible, abierto y capaz de adaptarse a las necesidades que vayan originándose con el tiempo.

1.6.3.- Organización del Sistema de Control de Estratos

El sistema es parte de una organización que proporciona la estructura necesaria para los trabajos implicados.

Los cuatro Comités Técnicos o grupos de trabajo, (Mecánica de Rocas, Entibación de Tajos, Entibación de Galerías, Ingeniería de Entibación), están presididos por miembros del Comité principal de Tecnología Minera de la Asociación de la Minería del Carbón en Alemania (Steinkohlenbergbauverein). Los Comités Técnicos, están compuestos por Directores de Minas de Carbón.

El Departamento de Entibación Minera y Mecánica de Rocas (Grubenausbau und Gebirgsmechanik) fue organizado para delinear coordinar y desarrollar los distintos objetivos de los Comités Técnicos.

El Comité Principal de Tecnología Minera, tiene el cometido de asegurar que toda la investigación y desarrollo de trabajos se realiza simulando con precisión las condiciones exigidas, y que los resultados se presenten sin demoras a las compañías mineras. Esto significa que el Comité Principal de Tecnología Minera, tiene que coordinar las actividades de las compañías mineras, del Bergbau-Forschung y de los fabricantes de equipos, de forma en que los resultados van a ser llevados a la práctica, y es finalmente responsable de la publicación de los resultados en la literatura técnica, conferencias, clases, seminarios, etc.

Los cuatro grupos de trabajo o Comités Técnicos comentados asisten al Comité Principal, en la elaboración de los trabajos y objetivos. El cuarto grupo o Comité (Ingeniería de Entibación) está formado por representantes de los grupos de trabajo regionales, los cuales están formados a su vez por los Ingenieros de Entibación que poseen todas las minas de carbón en R.F.A.

El Bergbau-Forschung, cuenta en Essen, con personal, equipo e instrumentación necesarios para llevar a cabo todo el trabajo de investigación que tanto el se proponga como el que requieran las diversas compañías mineras. El Departamento de Entibación Minera y Mecánica de Rocas, trabaja íntimamente en contacto con los ingenieros de entibación de las minas y colabora con otras instituciones, en especial con universidades técnicas e institutos de investigación de otros países, dando lugar a un doble flujo de información, comunicación e intercambio, y así mismo mantiene un contacto íntimo con las autoridades federales de forma que las nuevas normas y regulaciones de las leyes mineras puedan ser consideradas e incluidas en el desarrollo de la investigación.

Los programas planificados y basados en esta investigación son implementados por los ingenieros de entibación de las minas, con o sin especialistas de Bergbau-Forschung, los cuales son llamados en casos en los que aquellos no vean una solución fácil a un problema específico de presión del terreno o de operaciones de explotación relacionadas con el control de estratos. También se llama a estas consultas a los fabricantes de equipo para un mejor veredicto y consejos al problema.

Para el buen funcionamiento de esta organización, es fundamental que aquellos que tengan que tomar decisiones en las compañías mineras, conozcan perfectamente los trabajos que se están realizando, para lo cual se le hace llegar a través de los grupos de trabajo los informes correspondientes, así como seminarios, cursos abreviados, etc, que se organizan con gran frecuencia.

2.- PROGRESOS Y DESARROLLOS EN EL ANALISIS DE DEFORMACIONES DEL
TERRENO DEBIDOS A OPERACIONES MINERAS.-

2.1.- INTRODUCCION.-

Los movimientos en superficie debido a operaciones mineras son un gran problema, especialmente cuando se trata de la total extracción de depósitos estratificados, e incluso en estos casos los fenómenos observados varían ampliamente dependiendo de las condiciones geológicas de los estratos y de las características particulares de la explotación minera.

La explotación de capas de gran potencia o grupos de capas dentro de rocas blandas, dan lugar muchas veces a una intensa fracturación y hundimiento de la zona explotada (caving), mientras que la explotación en áreas vírgenes en roca dura o en capas inclinadas a gran profundidad puede no representar movimientos apreciables.

El caso más normal, es que se manifiesta una relativa deformación continua en superficie, deformación que presenta claramente dos componentes medibles, uno vertical y otro horizontal.

Este caso ha sido especialmente investigado en los campos carboníferos europeos, de forma tal que las deformaciones en superficie pueden ser precalculadas dentro de ciertos límites. Los métodos de precalculación que se vienen usando en la práctica de hoy día, se basan en dichas investigaciones y hacen referencia a:

- (1) Depósitos estratificados, principalmente capas de carbón.

- (2) Extracción total.
- (3) Areas de extracción con dimensiones y profundidades suficientemente grandes cuando se comparan con la potencia de las capas.

2.2- METODOS EMPIRICOS.-

2.2.1.- N.C.B.-

Quizás el método empírico más ampliamente usado y desarrollado es el elaborado por el National Coal Board, suficientemente conocido.

El método se basa en el análisis de datos procedentes de numerosas operaciones sobre tajos largos en Inglaterra, principalmente en las cuencas de Midlands y Yorkshire. Los tajos se encuentran a profundidades entre 25 y 750 metros, con ratios ancho/profundidad (w/h) que oscilan entre 0.16 y 4.

A partir de este conjunto de datos e información, se han confeccionado una serie de tablas y gráficos para determinar el movimiento del terreno en superficie. Si el panel excavado es rectangular en planta y suficientemente largo, el primer gráfico se usa directamente para predecir el ratio de máxima subsidencia/potencia extraída, en función del ancho (w) y profundidad (h) de la excavación. Este valor debe de ser reducido si la longitud del panel no es suficientemente grande. El siguiente gráfico se usa para predecir un perfil completo de subsidencia a través del panel. Así mismo, existen gráficos similares para la predicción de deformaciones unitarias en superficie y nomogramas para estimar el tiempo desarrollado para alcanzar la total subsidencia, una vez que ha pasado el frente de trabajo.

Basicamente, los gráficos se aplican, solamente a paneles -

rectangulares, pudiéndose introducir correcciones para los efectos producidos por pilares entre paneles.

La información y datos sobre los cuales se basan estos esquemas de predicción son muy heterogéneos. Muchas de las situaciones se complican por la presencia de antiguas explotaciones, o de nuevas y actuales en las proximidades, y muchas observaciones son incompletas. Sin embargo, el método pretende dar predicciones razonablemente aproximadas, con valores de máxima subsidencia con desviaciones del 10% "en la gran mayoría de los casos". Consideraciones geológicas locales, no se tienen en cuenta, sin embargo su aplicación en las cuencas carboníferas inglesas, con características muy homogéneas tienen resultados, bastantes ajustados dentro de la zona inglesa de donde los datos han sido recogidos.

2.2.2. Fórmulas Empíricas.

Son muchos los autores que han sugerido fórmulas para la predicción de movimientos del terreno en superficie. Una gran mayoría de ellos han sido tratados, analizados y criticados por G. Brauner, del Bergbau-Forschung GmbH.

Las fórmulas y expresiones son de dos tipos, frecuentemente denominadas Funciones de Perfil ("Profile Functions") y Funciones de Influencia ("Influence Functions") respectivamente.

De forma análoga al método empírico del N.C.B. no presentan dependencia explícita con factores geológicos, aunque la variedad de fórmulas y expresiones probablemente este reflejando en cierta extensión las diferentes condiciones geológicas de una cuenca a otra.

Las Funciones de Perfil corresponden a paneles de extrac-

ción largos, y suficientemente anchos como para que la Subsistencia Máxima Posible (S_{max}) tenga lugar sobre la parte central de la cuenca de Subsistencia. La anchura mínima que hace que se produzca esta máxima, es conocida como anchura crítica, mientras que anchos inferiores y superiores al mismo, se denominan Subcríticos y Supercríticos (Fig. 6). Un ejemplo de tal tipo de función es la establecida por H.J. King y J.T. Whetton (1958) y discutida más recientemente por H.J. King, B.N. Whittaker y C.H. Shadbolt (1975) así como por G. Braüner (1973):

$$S(x) = 1/2 S_{max} \{ 1 - Th(5x/h) \}$$

en donde h es la profundidad de la capa y x es la distancia medida desde el punto de subsistencia mitad ($S = 1/2 S_{max}$) en el sentido de disminución de subsistencia.

Evidentemente, que esta expresión no toma valores es $S = S_{max}$ para valores finitos de X , pero la Subsistencia total en fines prácticos puede considerarse cuando $S = 0.98 S_{max}$. Cuando el ancho del panel es subcrítico, el perfil de subsistencia puede determinarse estableciendo ciertas correcciones, de forma similar ocurre cuando se intenta investigar capas inclinadas.

Las Funciones de Influencia, por su parte, son expresiones que determinan el efecto en superficie producido por la extracción de un elemento diferencial de área (dA) en la capa. Se supone que el principio de superposición se puede aplicar de forma tal que el efecto total de todos estos elementos es aditivo.

Luego por integración de la función sobre todo el ancho de la capa, el perfil de subsistencia para una extracción completa queda determinado. Nos referimos aquí a fórmulas empíricas, aunque más adelante haremos referencia a fórmulas y expresiones similares obtenidas como soluciones de ecuaciones que representan el comportamiento mecánico de la roca.

Una ventaja de las Funciones de Influencia, es que estas pueden ser integradas sobre toda el area de extracción (numericamente, si es necesario), dándonos pues predicciones de subsidencia para extracciones de diversas formas geométricas, así mismo la función puede ser ponderada con el fin de tener en cuenta las variaciones en la potencia de la capa extraida y la magnitud de la convergencia entre el techo y el muro de la excavación.

Aparte del "factor de ponderación", la Función de Influencia para una excavación en una determinada capa horizontal en una región dada, nos proporciona la contribución a la subsidencia en un punto P de la superficie, debida a un elemento de extracción infinitesimal dA situado en P', como función de r (Fig. 7 y 8).

Por tanto, si P tiene coordenadas x, y referidas a ejes en superficie y P', ϵ, η referidas a ejes similares en capa, la Función de Influencia toma la forma:

$$S(x, y) = w(\epsilon, \eta) F \left[\{(x-\epsilon)^2 + (y-\eta)^2\}^{1/2} \right]$$

en donde $w(\epsilon, \eta)$ es el factor de ponderación y $r^2 = (x-\epsilon)^2 + (y-\eta)^2$

Considerando que $dA = d\epsilon d\eta$, la subsidencia debida a la extracción de un area A puede ser calculada por integración de la expresión anterior sobre el area A, dándonos:

$$S(x, y) = \iint_A w(\epsilon, \eta) F \left[\{(x-\epsilon)^2 + (y-\eta)^2\}^{1/2} \right] d\epsilon d\eta$$

Las funciones de Influencia no han tenido mucha aceptación en Inglaterra, en cambio en la Republica Federal Alemana, G. Braüner ha utilizado estas funciones en las cuencas del Rhur.

No es difícil de ver que la integración sobre un area A suficientemente grande (teoricamente un semiplano), nos da una Fun-

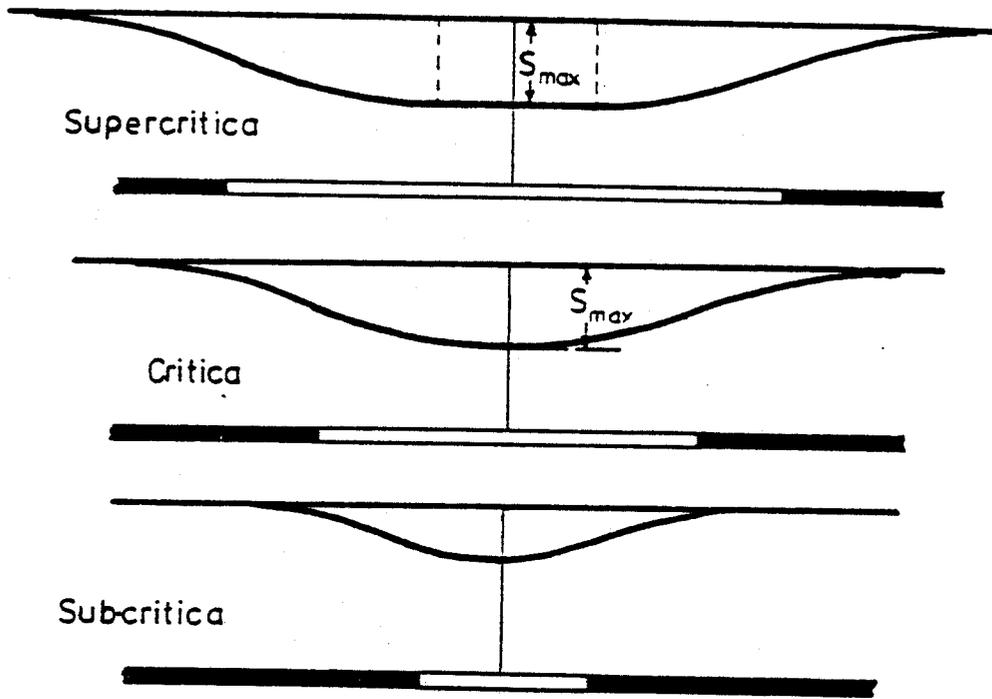


Fig. 6

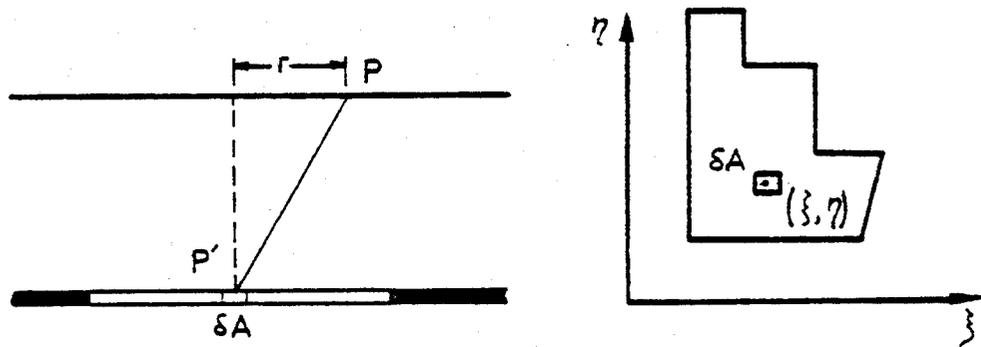


Fig. 7

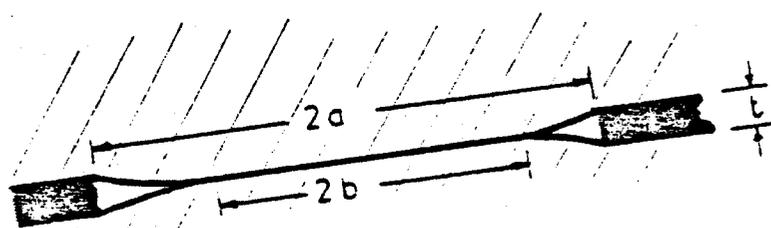


Fig. 8

ción de Perfil, derivada de una Función de Influencia, por tanto, los dos tipos de expresiones no son enteramente distintos.

Cuando existe el posible daño a estructuras civiles de superficie, es útil el ser capaz de predecir el basculamiento o "Tilt" de la superficie, así como de las deformaciones unitarias horizontales. Se considera que el desplazamiento horizontal en un punto determinado es proporcional a la pendiente de la curva de subsidencia en dicho punto (G. Braüner), o lo que es lo mismo, la deformación unitaria horizontal es proporcional a la curvatura del terreno. Este último ha tratado de ser justificado por la teoría elemental de flexión de vigas, lo cual no parece que esté muy alejado de la realidad, pero la carencia notoria de uniformidad en las curvas de deformaciones unitarias medidas, comparadas con las curvas de Subsidencia, hace difícil comprobar esta aseveración.

2.3.- MEDIOS ESTOCÁSTICOS.-

La teoría de los "medios estocásticos", ocupa un lugar único en la predicción de subsidencias.

Como cualquier teoría analítica, se ha desarrollado partiendo de supuestas formulaciones matemáticas. Estos supuestos, no están conectados con propiedades básicas medibles del terreno.

El mismo nombre es un poco desafortunado, ya que un proceso estocástico, es un proceso conforme a leyes estadísticas, con el tiempo como variable independiente dominante. J. Litwiniszyn, que originó la teoría, adoptó el título de "Mecánica de Medios Estocásticos", debido a la similaridad entre sus ecuaciones y las de los procesos estocásticos, sin embargo, en las ecuaciones de Litwiniszyn, la verdadera variable estocástica, tiempo, es sustituida por coordenadas verticales.

La teoría ha sido tratada aparte de su autor, por C. Daunesse y Y. Rambaud (1963), D.S. Berry (1964), B. Voight y W. Parissean (1970) y otros.

A diferencia de la Teoría de Medios Continuos, esta teoría no se basa en una consideración de componentes locales de tensiones y deformaciones, ya que su comportamiento físico reside en un modelo estadístico de esferas uniformes que caen hasta bloquearse en su movimiento, dentro de un proceso totalmente aleatorio. Sin embargo, este último concepto no es un aspecto explícito de la formulación teórica, la cual se basa en suposiciones matemáticas a cerca de la naturaleza de la relación entre la componente vertical del desplazamiento a un nivel con la de otro. Se desprende de esta formulación que el desplazamiento vertical a un nivel determinado queda afectado solo por la distribución de desplazamientos en niveles inferiores.

En esencia, la teoría no hace referencia con cantidades otras que el desplazamiento vertical, y es solamente en el caso de incomprensibilidad que el movimiento horizontal puede ser introducido através de la condición de que la suma de las deformaciones unitarias horizontales y verticales es cero.

Es probable que la popularidad que ha gozado esta teoría en ciertos sectores se deba a su aparente dependencia de la "pura" matemática, sin tener que acudir a ningún tipo de comportamiento idílico del material, totalmente ajeno al terreno real.

Sin embargo, la teoría lleva implícita los dos supuestos comentados, más la existencia de tres funciones arbitrarias, que depende en último término de propiedades del terreno. Litwiniszyn, considera que dos de estas funciones son idénticas a cero, implicando pues que el medio es incomprensible y transversalmente isotrópico.

El resultado expresado en función de una Función de Influencia para desplazamientos verticales a un nivel Z, es:

$$W(X,Z) = \frac{W_0}{2\{\pi\varepsilon(Z)\}^{1/2}} \exp\left\{-\frac{X^2}{4\varepsilon(Z)}\right\}$$

en donde W_0 es el desplazamiento vertical a $Z=0$ (nivel arbitrario puede ser el nivel de la capa) y $\varepsilon(Z)$ es una función a determinar.

La expresión anterior presenta una gran semejanza a las Funciones de Influencia que tanto se han prodigado en Europa Continental (G. Braüner, L. Obert y W.I. Duvall), habiéndolo contribuido al interés despertado por la teoría. Sin embargo, la naturaleza de la función $\varepsilon(Z)$ no ha sido definida de forma apropiada, variando de nivel a nivel desde la excavación hacia arriba, mientras que en la predicción de la subsidencia superficial es meramente un valor adecuado a las condiciones geológicas locales.

J. Litwiniszyn (1964) encontró ciertas confirmaciones experimentales de su teoría en modelos de arena, procediendo a la introducción de modificaciones que considerasen los efectos no lineales a que presentaban. A.L. Sweet y J.L. Bogdanoff (1965), han elaborado la teoría de los Medios Estocásticos, en conexión con el comportamiento de arenas y esferas de cristal.

2.4.- MECANICA DEL DISCONTINUO.-

D.H. Trollope (1966) mantiene que "la clásica teoría elástica y elasto-plástica tienen un interés muy limitado" en el campo del comportamiento de la masa rocosa y presenta una teoría que llama "Mecánica del Discontinuo" o Mecánica clástica.

Esta teoría es fundamentalmente una teoría geométrica en la cual es importante conocer la forma de bloques separados de ro

ca que pueden moverse relativamente unos con respecto a otro. Según Trollope el movimiento de estos bloques, que nos llevan a un flujo de materiales, se gobierna por la teoría de Medios Estocásticos de Litwiniszyn, no contribuyendo pues nada nuevo a la problemática de la subsidencia.

2.4.1.- Conclusión.-

En general, poco se ha ganado con la teoría de Medios Estocásticos, excepto el potenciar los métodos empíricos de Funciones de Influencia de aceptación en la Europa continental.

2.5.- TEORIAS DEL CONTINUO.-

La explotación de capas próximas a superficie suelen resultar en el colapso, en las zonas fortificadas, del techo en las zonas explotadas. Conforme la mina se hace más profunda, tal fenómeno ocurre más raramente, aunque la idea de una rotura limpia desde el extremo de la excavación hasta superficie persiste.

Hoy en día nos encontramos con situaciones complejas en las que, la deformación del terreno se debe a varios mecanismos diferentes, existentes en las diversas regiones de acuerdo a la naturaleza de los estratos; así por ejemplo un muro arcilloso debajo de una capa de carbón fluye hacia las galerías, mientras que un techo de arenisca, rompe típicamente con un ángulo inclinado hacia el frente. En Inglaterra, se piensa que la fracturación masiva del techo no se extiende más de tres veces la potencia de la capa, y aunque una fracturación menor y separación de estratificaciones puede continuar en niveles superiores, es probable que el terreno se deforme siguiendo las ecuaciones constitutivas de la mecánica continua.

La dificultad está, aparte de la dificultad en resolver al

gunas de estas ecuaciones de la Mecánica Continua, en saber definir con cierta certeza, cual ecuación ha de aplicarse a cada tipo de comportamiento.

El interés de estar teorías se ha dirigido generalmente hacia la comprensión de los movimientos del terreno en la proximidad de la explotación, más que a la predicción de la subsidencia en superficie.

2.6.- EL MOVIMIENTO DEL TERRENO COMO DEFORMACION ELASTICA.-

Una de las primeras teorías para la descripción del fenómeno de subsidencia fue "la teoría de la viga", en la que la fragmentación del techo en el centro de la excavación, da lugar a zonas intactas del techo inmediato, libres de flexar como vigas en voladizo, hasta que se fracturan sobre los límites de la excavación y subsidir en ella. El proceso se repite sucesivamente, extendiéndose la línea de ruptura más hacia fuera con el tiempo, de forma tal que cuando la distorsión ocasionada alcanza la superficie, cubre un área mucho mayor que la excavación original. Esta sucesión de roturas fue una alternativa más sofisticada que la idea de un solo plano de rotura a ángulo límite.

El siguiente paso fue suponer que el proceso no continuara sin interrupción hacia arriba, sino que parara cuando se alcanzara algún estrato suficientemente resistente. El paquete de estratos por encima de este nivel hasta la superficie se comportaría como una viga elástica empotrada en sus extremos.

Se ha observado, en explotaciones profundas, que la mayor parte de la deformación del terreno tiene un comportamiento elástico, al menos en una primera aproximación. Este hecho condujo a J.T. Whetton y H.J. King (1957) a construir modelos en el que una "capa" soportaba un recubrimiento de gelatina que se deformaba cuando parte de la "capa" se extraía. Posteriormente P. Hackett -

(1959) introdujo la representación de la excavación de una capa delgada como una fractura en un medio elástico. Este trabajo fue luego elaborado en Sudáfrica por M.D.G. Salomon, dando lugar a un trabajo analítico sobre movimientos del terreno debido a la minería, a gran profundidad.

2.6.1.- Terreno Transversalmente Isotrópico.-

Con el fin de aproximarnos al comportamiento físico del terreno, D.S. Berry y T.W. Sales (1961) desarrollaron un análisis similar utilizando las relaciones Tenso-deformacionales de un medio transversalmente isotrópico con planos de simetría paralelos a la superficie del terreno.

Un medio elástico transversalmente isotrópico tiene cinco constantes elásticas distintas, C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{33} y C_{44} , las cuales aparecen en las relaciones tenso-deformacionales de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= C_{11} \epsilon_x + C_{12} \epsilon_y + C_{13} \epsilon_z & \gamma_{yz} &= 2 C_{44} \gamma_{yz} \\ \sigma_y &= C_{12} \epsilon_x + C_{11} \epsilon_y + C_{13} \epsilon_z & \gamma_{xz} &= 2 C_{44} \gamma_{xz} \\ \sigma_z &= C_{13} \epsilon_x + C_{13} \epsilon_y + C_{33} \epsilon_z & \gamma_{xy} &= (C_{11} - C_{12}) \gamma_{xy} \end{aligned}$$

obviamente C_{44} es el Módulo Cortante, mientras que los otros son funciones complicadas de C_{44} , del Módulo de Young (horizontal y vertical) y de los correspondientes ratios de Poisson.

La solución implica a dos parámetros α_1 y α_2 , los cuales son las raíces de la ecuación característica:

$$C_{11} C_{44} \alpha^4 + \{ C_{13} (2C_{44} + C_{13}) - C_{11} C_{33} \} \alpha^2 + C_{33} C_{44} = 0$$

con soluciones reales positivas. Es conveniente utilizar los parámetros K_1 y K_2

$$K_1 = \alpha_1 \alpha_2 = (1 - \nu_1^2)^{1/2} (E_1/E_2 - \nu_2^2)^{1/2}$$

$$K_2 = 1/2 (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) = \{1/2 E_1/M - \nu_2 (1 + \nu_1)\} (E_1/E_2 - \nu_2^2)^{-1}$$

en donde E_1 y E_2 son los Módulos de Young en direcciones vertical y horizontal respectivamente, ν_1 y ν_2 son los ratios, $-\epsilon_x/\epsilon_y$ y $-\epsilon_z/\epsilon_y$ con carga según el eje y , y M es el Módulo Cortante en un plano vertical (Fig. 9. 10 y 11) .

Cuando la excavación es suficientemente larga, su sección central puede ser considerada en estado de deformación plana; y si esta es paralela a la superficie a una profundidad h y se encuentra totalmente cerrada, el desplazamiento vertical y la deformación horizontal en superficie, vienen dadas por:

$$V_0(x) = - \frac{t}{\pi(\alpha_1 - \alpha_2)} \left\{ \alpha_1 t_g^{-1} \frac{2 ah_1}{x^2 - a^2 + h_1^2} - \alpha_2 t_g^{-1} \frac{2 ah_2}{x^2 - a^2 + h_2^2} \right\}$$

$$\epsilon_0(x) = \frac{2a \alpha_1 \alpha_2 t}{\pi(\alpha_1 - \alpha_2)} \left\{ \frac{x^2 - a^2 - h_1^2}{(x^2 - a^2 - h_1^2) + 4h_1^2 x^2} - \frac{x^2 - a^2 - h_2^2}{(x^2 - a^2 - h_2^2) + 4h_2^2 x^2} \right\}$$

en donde t representa la potencia extraída y $h_i = h/\alpha_i$ ($i=1,2$).

α_1 y α_2 se obtienen a partir de la ecuación característica comentada o mejor de las ecuaciones en K_1 y K_2 .

En la realidad, el cierre entre techo y muro nunca es total pero esto no afecta grandemente a la forma de las curvas de subsistencia y deformaciones cuando h es suficientemente alto.

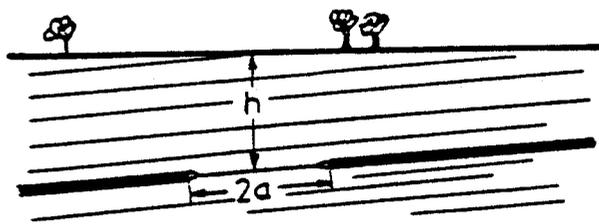


Fig. 9

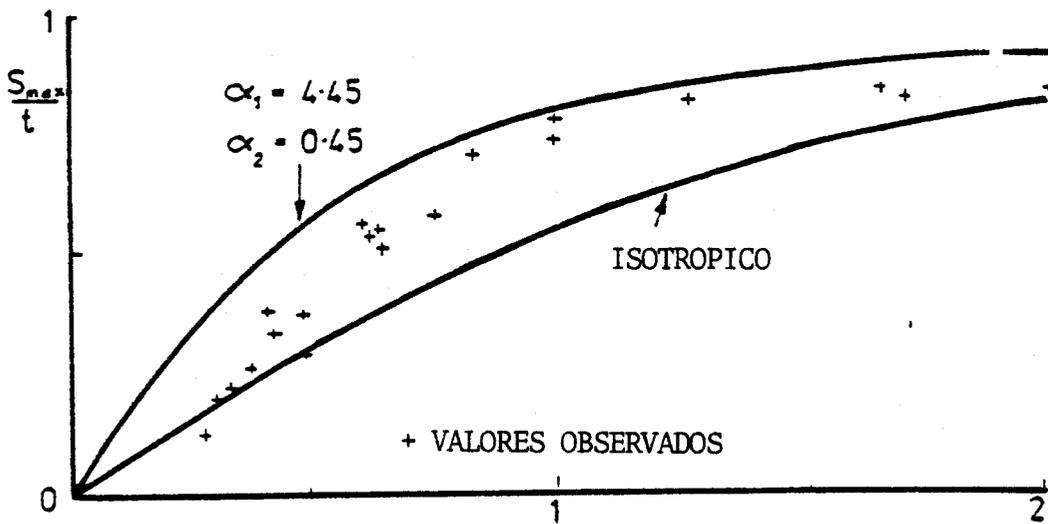


Fig. 10

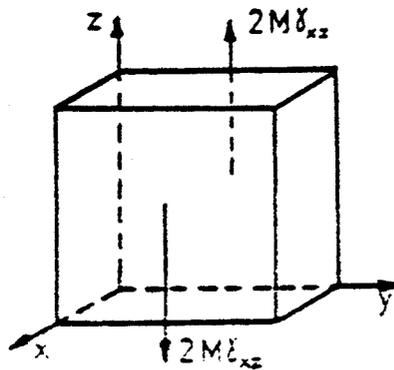
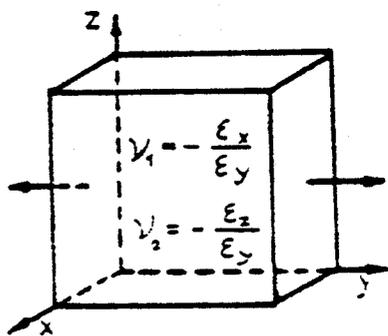
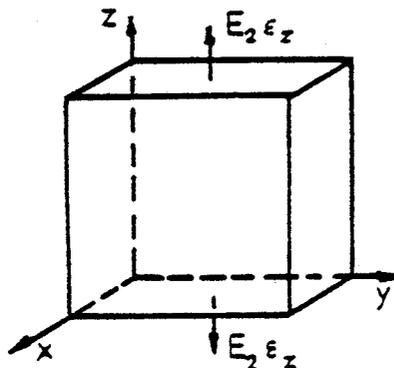
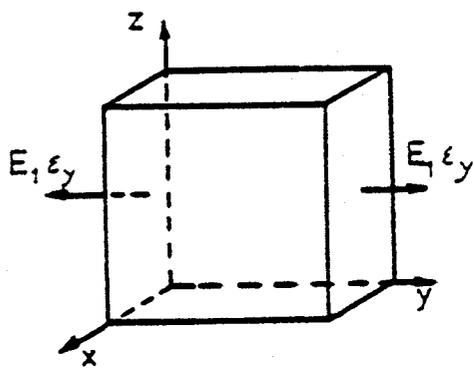


Fig. 11

Si en la expresión anterior de $V_0(x)$, el origen de coordenadas se desplaza hacia el punto $X = -a$, sobre el límite del panel excavado, y si hacemos $a \rightarrow \infty$, obtenemos la Función de Perfil, definida por G. Braüner:

$$- \frac{V_0(x)}{t} = 1 - \frac{1}{\pi(\alpha_1 - \alpha_2)} \left\{ \alpha_1 t_g^{-1} \frac{h}{\alpha_1 x} - \alpha_2 t_g^{-1} \frac{h}{\alpha_2 x} \right\}$$

La dirección X es tal que $V_0 \rightarrow 0$ cuando $x \rightarrow -\infty$ y $V_0 \rightarrow -t$ cuando $x \rightarrow \infty$, mientras que por supuesto $V_0(0) = -1/2 t$.

El problema tridimensional ha sido tratado por D.S. Berry y T.W. Sales (1962) mediante la introducción de soluciones por la Función de Green, dando resultado y expresiones del tipo de las Funciones de Influencia especificadas por G. Braüner.

2.7.- METODO DE ELEMENTOS FINITOS.-

Incluso cuando la deformación debida a explotaciones subterráneas sea elástica, en la mayoría de los casos, el terreno no será lo suficientemente homogéneo, como para ser tratado por los métodos ya considerados.

En tal situación, varios métodos pueden considerarse. Si el terreno puede dividirse en dos o tres formaciones, cada una de ellas homogéneas, todavía pueden utilizarse los métodos analíticos y semi-analíticos, el principal problema residirá en acomodar las tensiones y las deformaciones en las entrefases. Esto puede resolverse en casos simples por el Método de la Transformada de Fourier, o en configuraciones más complicadas mediante métodos numéricos.

El Método de Elementos Finitos para la solución de problemas en elasticidad, se ha utilizado para problemas de movimientos

de terrenos por autores tales como, O.C. Zienkiewicz, V.K. Chennng y K.G. Stagg (1966), R.W. Blake (1966), G.K. Shippam (1970) y T.R. Stacey (1972). El método tiene la gran ventaja de que las constantes elásticas pueden ser diferentes para cada elemento, en los cuales se ha dividido toda la masa rocosa.

La teoría del método se basa en el hecho de que la solución a un problema elástico puede ser obtenida en forma de función de tensión, que minimizan una cierta integral sobre la región en estudio. La solución exacta la dá la única función, entre todas las posibles con valores de contorno correcto, que confieren a la integral su mínimo valor. Si, la clase de función está limitada de alguna forma (polinomios de un cierto grado), la función minimizante es una aproximación a la solución exacta.

En el Método de los Elementos Finitos, las funciones usadas son simples funciones algebraicas, pero las constantes de las mismas se les permite ser distintas para cada elemento. La solución, aproximada, es pues aquella cuyas constantes hacen a la integral mínima. Esto implica, la resolución de un gran número de ecuaciones algebraicas, una para cada constante. Las técnicas para alcanzar las soluciones son muy sofisticadas y han sido expresadas en la literatura del método, en el que las ventajas y admisibilidad de diferentes formas geométricas de elementos y los problemas asociados a grandes sistemas de ecuaciones se comentan en detalle.

En gran parte, el gran número de ecuaciones que se generan en el método, limita la capacidad del mismo. A diferencia de otros muchos problemas de ingeniería, los relacionados con movimientos y tensiones del terreno, hacen referencia a grandes zonas y volúmenes de materiales geológicos, y se hace difícil tener certeza definir cual es el límite dentro del cual los efectos que tengan lugar son significativos en el análisis.

Una práctica útil, es el desarrollar un cálculo preliminar utilizando algunos de los metodos comentados anteriormente; estos resultados pueden usarse bien para estimar el volumen a analizar comprendido entre condiciones de contorno nulas, o bien para aproximar estas condiciones de contorno y utilizar volúmenes más reducidos.

El trabajo de G.K. Shippam (1970), es una simulación bidimensional, con una distribución de desplazamientos y tensiones, sobre un plano central, a través de una larga excavación paralela a la superficie. Con un modelo homogéneo, él usó la flexibilidad del método para simular comportamientos más realísticos que los realizados por los anteriores trabajos analíticos, pero encontrando que los movimientos superficiales eran substancialmente idénticos.

En sus modelos no-homogéneos introdujo capas muy delgadas de Módulos Cortantes muy bajos, con el fin de simular planos sobre los cuales tuviesen lugar deslizamientos. Esto alteró notablemente la curva de subsidencia, aproximandola a las curvas reales observadas, sin la necesidad de tener que utilizar constantes elásticas totalmente faltas de realidad, como muchos han tenido que considerar.

El Método de Elementos Finitos en tres dimensiones sufre de un mayor número de elementos que el caso bidimensional, dando lugar a unas grandes necesidades de almacenamiento y tiempo de computación. Cuando las dimensiones de la región a estudiar se limitan, por simetria y otras consideraciones, estas dificultades se mitigan; sin embargo para estimación de subsidencia, la región se extiende necesariamente hasta la superficie y a considerables distancias por debajo y a los lados de las zonas explotadas de la capa de carbón, y la viabilidad de los Elementos Finitos puede ser cuestionables. H.D. Dahl (1973) ha utilizado Elementos Finitos Tridi-

mensionales con comportamiento elasto-plástico, utilizando criterios de plasticidad para materiales anisótropos desarrollados por W.G. Pariseau (1969), y con excelentes resultados.

2.8.- TIEMPO DEPENDENCIA.-

Se ha observado en algunos casos, que los movimientos superficiales continúan aun después de cesar los trabajos de explotación, sin que ninguna teoría lo explicase. En realidad, es probable que no exista una razón simple para la explicación del fenómeno.

Son causas posibles, una continua fracturación de la roca de techo, el flujo de rocas ya fracturadas aún sin cesar, el deslizamiento de capas de arcillas bajo pequeñas tensiones diferenciales, y la deformación visco-elástica de las grandes masas de rocas. Excepto esta última razón, las demás presentarían para su tratamiento considerables dificultades, por el contrario el tratamiento de masas de rocas como medios lineales viscoelásticos, no es muy complejo y merece cierta consideración.

2.8.1.- Análisis Viscoelástico del Movimiento del terreno.-

Las relaciones tenso-deformacionales para materiales lineales viscoelásticos y transversalmente isotrópicos, pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\sigma_x(t) = C_{11}\epsilon_x + C_{12}\epsilon_y + C_{13}\epsilon_z \quad / \quad \gamma_{yz}(t) = 2C_{44}\gamma_{yz}$$

$$\sigma_y(t) = C_{12}\epsilon_x + C_{11}\epsilon_y + C_{13}\epsilon_z \quad / \quad \gamma_{zx}(t) = 2C_{44}\gamma_{zx}$$

$$\sigma_z(t) = C_{13}\epsilon_x + C_{13}\epsilon_y + C_{11}\epsilon_z \quad / \quad \gamma_{xy}(t) = (C_{11} - C_{22})\gamma_{xy}$$

en donde C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{22} y C_{44} no son constantes sino operadores integrales, tal como:

$$C_{11} \varepsilon_x = C_{11}(0) \varepsilon_x(t) + \int_{-\infty}^t C'_{11}(t-u) \varepsilon_x(u) du$$

$C_{11}(t)$ es una Función de Relajación de Tensión y el primer conjunto de ecuaciones expresados, es el resultado de aplicar el principio de superposición de Boltzmann a deformaciones tiempo-dependientes gobernadas por cinco de tales funciones.

Un sistema inverso de ecuaciones en las que las componentes de deformación, vengan en función de las componentes tensionales, puede derivarse utilizando Funciones de Fluencia, en vez de Relajaciones de Tensión.

La incorporación de análisis viscoelásticos en el movimiento de terrenos es totalmente viable, aunque existen ciertas indicaciones en cuanto a su adecuación. R.W. Blake (1966) y J. Astin, (1968).

2.9.- CONCLUSION.-

Podemos concluir este resumen sobre el "estudio del arte" de la ingeniería de subsidencia, resultando en el considerable progreso que se ha realizado sobre el tema en los últimos 20 años, principalmente en el campo de métodos analíticos para estimar grandes deformaciones del terreno creadas por explotaciones mineras.

El comportamiento del terreno en estas condiciones depende de sus características mecánicas y de geometría de la explotación, pudiendo ser o bien elástica o, elasto-plástica o en menor cuantía, al menos en fenómenos de subsidencia, viscoplástica. En

este sentido se han hecho considerables avances como hemos visto.

Hoy en día los métodos experimentales de Funciones de Perfil e Influencias, se vienen utilizando en muchas cuencas carboníferas, así como los métodos estadísticos del N.C.B.

Una combinación de todos ellos, junto con una detallada atención a las condiciones geológico-estructurales, y una gran dosis de sentido común, deben de utilizarse, cuando nos encontremos ante problemas como el aquí planteado, en los que no existía una experiencia pasada, y en el que las condiciones particulares de la cuenca y la explotación, hacía muy difícil buscar una referencia o punto de comparación que nos permitiera primero diagnosticar causas y segundo aplicar la terapéutica más apropiada.

3.- CONTROL DE ESTRATOS EN GALERIAS EN CAPA Y TAJOS.-

3.1.- INTRODUCCION.-

Las dos principales características de la minería del carbón en la República Federal Alemana, son su gran profundidad, actualmente a un valor medio de 900 metros, con explotaciones que alcanzan 1.400 metros, e incrementándose anualmente, y en segundo lugar la relativa falta de resistencia y consistencia de las rocas de caja, constituidas principalmente por esquistos arcillosos y pizarras arcillosas.

El método standard de explotación es el Tajo Largo, en capas de 0.8 a 4.0 metros de potencia.

Estas circunstancias, han hecho que los efectos de la presión del terreno sean evidentes en las explotaciones afectando tanto a la seguridad como a las labores mineras en sí.

Una gran presión se está realizando sobre la información que la Mecánica de Estratos pueda darnos, a medida que los tajos altamente mecanizados con grandes volúmenes de producción, se hacen mucho más sensibles a interrupciones y paradas, obligando a que estas sean evitadas en todo lo posibles a fin de mantener la producción de la explotación en su conjunto.

Todo esto ha dado lugar, a que el control de estratos en la minería del carbón alemana, se haya convertido en uno de los principales objetivos de dicha industria y haya dado lugar a multitud de proyectos de investigación conjunta realizados por el Bergbau - Forschung, y patrocinados por el Ministerio de Comercio,

Economía y Transportes del North-Rhine Westphalia, por el Ministerio Federal de Investigación y Tecnología, y por la European Community for Coal and Steel.

El sistema de control de estratos actualmente existente en R.F.A. y desarrollado por el Bergbau-Forschung, se ha llevado a cabo con una íntima cooperación con las compañías mineras. El sistema requiere una continua puesta al día, y el instituto provee de los medios físicos y humanos para llevarla a cabo.

Lo que a continuación comentamos es una breve reseña sobre el estado actual del Control de Estratos, tal y como se ha desarrollado hasta la fecha en la República Federal Alemana.

3.2.- REDUCCION DE LA PRESION DEL TERRENO MEDIANTE EL DISEÑO MINERO.

El diseño minero, puede ejercer una influencia positiva o negativa, sobre la presión del terreno en galerías y frentes de trabajo (Tajos), dentro de límites muy amplios. El Control de Estratos pues, debe empezar en la fase de planificación, debiéndose, de analizar los siguientes aspectos:

- Evitar las zonas de alta presión en tajos y galerías mediante un adecuado diseño de labores mineras.
- Eliminar en lo que sea posibles estas zonas de alta presión con una apropiada distribución de las labores.
- Aceptar las altas presiones, cuando no puedan ser evitadas ni eliminadas, y considerarlas cuando se diseñe y planifique los tajos y galerías.

Ingeniería seleccionará el diseño y plan de labores que -

ofrezca el más bajo coste de extracción, en el cual habrá que considerar los costes de entibación (normalmente altos) apropiados - para contrarrestar los perjuicios económicos, que las altas presiones del terreno pueden ocasionar en todo el sistema de explotación.

3.2.1.- Situación de galerías.-

La fig. 12, muestra los efectos que los pilares de protección y residuales en las proximidades de una falla, ejercen en - las presiones de los hastiales de las galerías en capa, en el caso de que la producción se realizase en uno o en los dos lados de la falla, y esta con distintos buzamientos.

La figura relaciona el incremento que se produce en la presión sobre las galerías en la capa más profunda al existir o no pilares de seguridad en las capas superiores.

Cuando la falla toma mayor inclinación, la presión tiende a incrementarse menos sin pilares de protección (izquierda) que - con los mismos (derecha). En situaciones en las que la inclinación de la falla es baja, ocurre al revés, esto es los pilares - tienen un efecto de liberación de tensiones sobre las galerías, debido a la explotación a ambos lados de la falla.

Vemos claramente pues, como la presión del terreno está gobernada en una gran parte por la geometría de los tajos y explotaciones en relación a los planos de estratificación y discontinuidades geológicas. En casos en que existan varias capas en explotación, estos factores son más complejos de analizar, teniéndose en tonces que tener en cuenta en la planificación de los tajos, las secuencias correspondientes de las explotaciones. En la República Federal Alemana el Departamento de Entibación Minera y Mecánica de Rocas (Grubenasbau und Gebirgsmechanik) del Instituto de

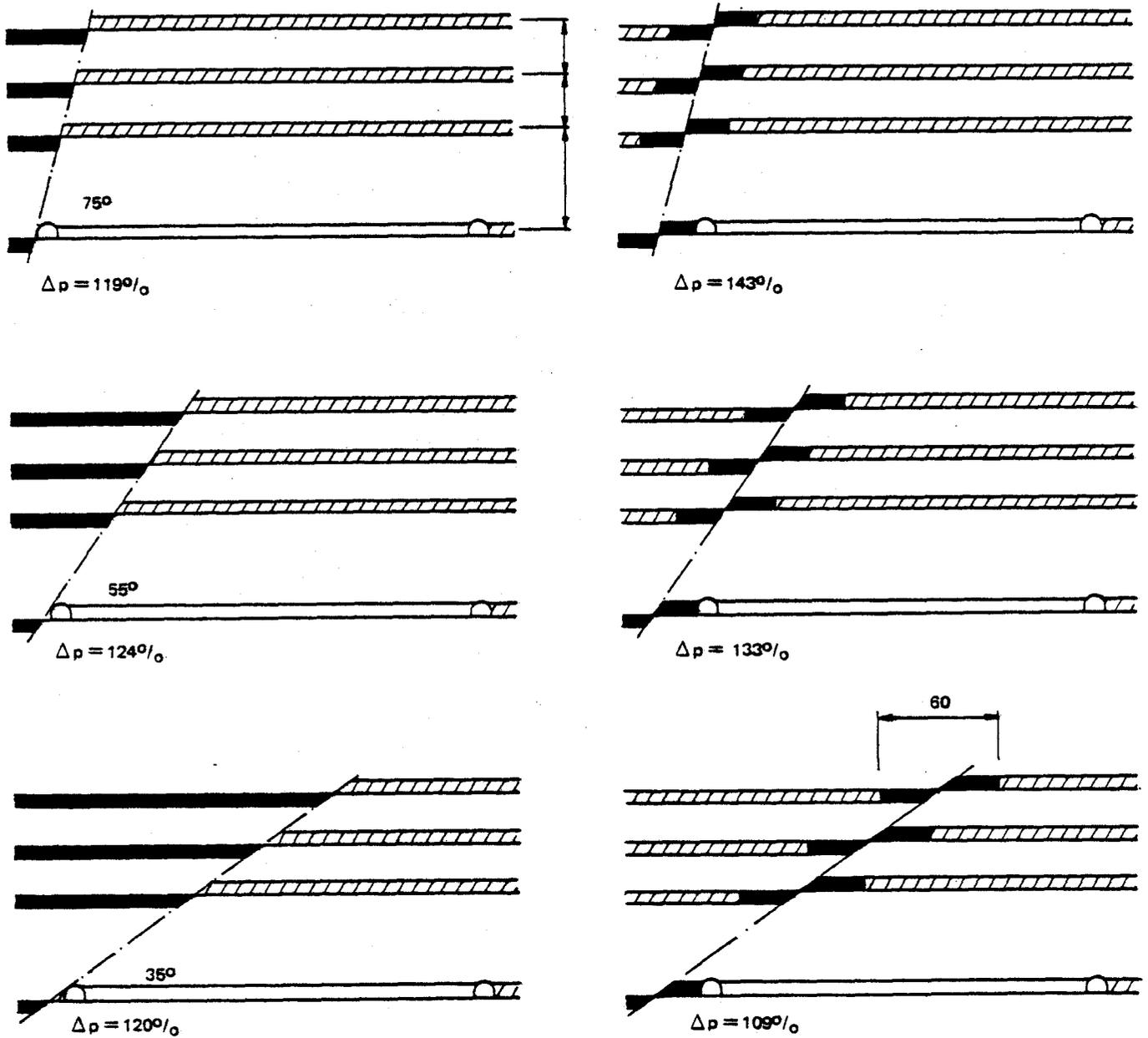


FIG: 12

EFFECTO DE PILARES DE PROTECCION Y FALLAS EN LAS PRESIONES SOBRE GALERIAS

(Medidas en metros)

Investigación Minera (Bergbau - Forschung) lleva a cabo estos análisis para las explotaciones de la Asociación de la Minería del carbón (Steinkohlebergbauverein).

En la práctica minera, los pilares tienen que ser a menudo abandonados por presencia de fallas y distorsiones geológicas, creando zonas de altas tensiones, con efectos más críticos en las galerías en capa que en los tajos, por tanto en la planificación y diseño de galerías, un objetivo primordial es colocar a estas, de forma que se encuentren situadas fuera de la esfera de influencia del pilar. La Fig. 13, representa cuatro casos de situación de una galería en capa, 40 metros por debajo de otra capa en explotación, en relación a un pilar de 50 metros de ancho.

Las cifras porcentuales que aparecen en la Fig. 13, muestran el incremento de la presión en las paredes de la galería a 300 metros por detrás del tajo en comparación con el incremento normal que experimentaría la presión sobre una galería sin pilar de protección, a una distancia de 100 metros por delante del frente del tajo. Como era de esperar, la mejor posición corresponde a aquella en que el pilar se sitúa sobre el tajo inferior.

La segunda mejor posición es aquella en la que las galerías se sitúan en el lado del tajo en relación al pilar.

Resumiendo podemos establecer las reglas para la situación más favorable de las galerías en capa en zonas de baja presión, con el siguiente comentario.

Si consideramos que estamos a una profundidad de 800 metros tendremos una "presión de profundidad" del orden de 2.000 Mp/m^2 .

Tan pronto como sea abierta una galería en capa a esa profundidad, la presión alrededor de la galería se eleva, afectando a

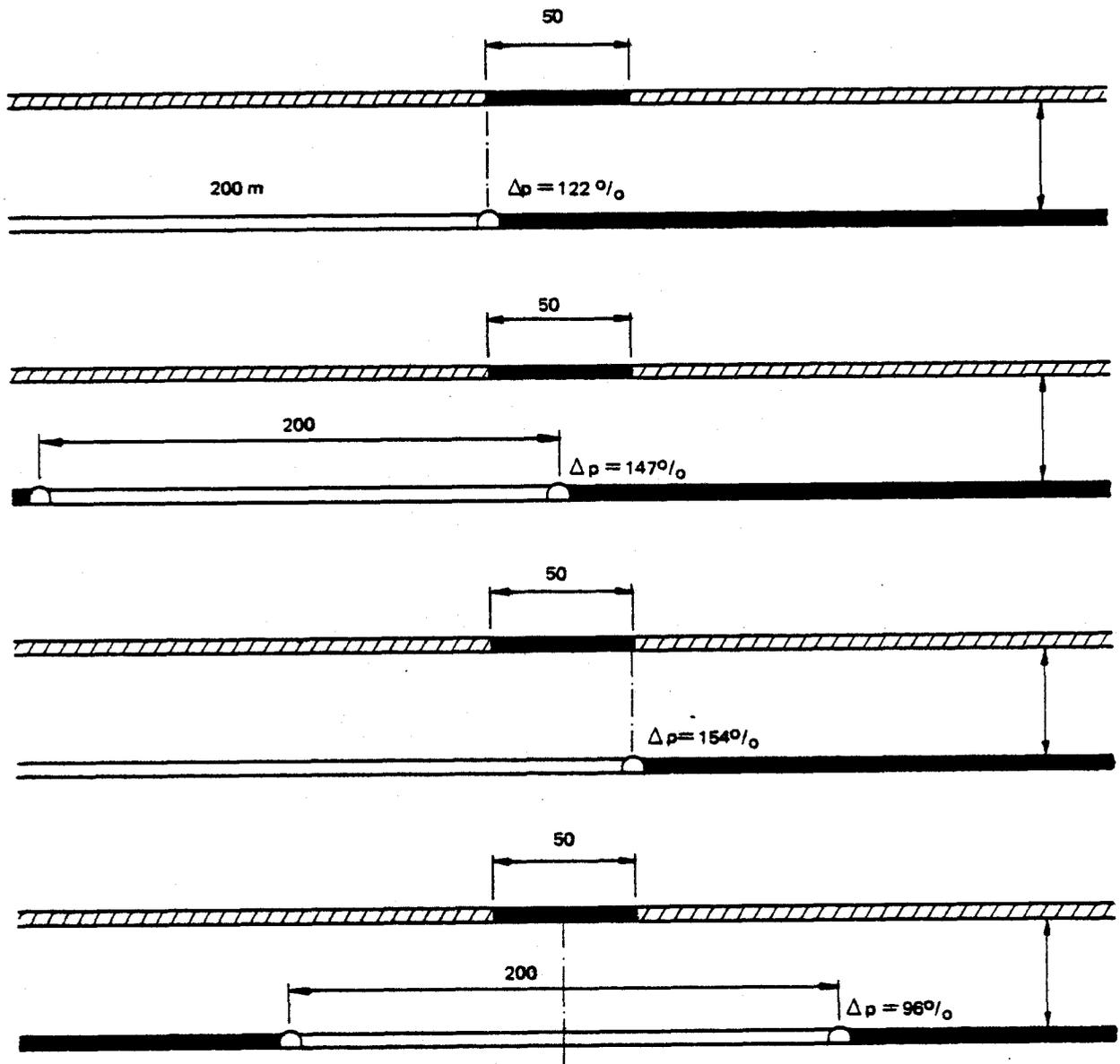


FIG: 13
 PRESIONES DE ESTRIBO EN UNA GALERIA EN AVANCE DEBAJO DE UN PILAR
 (medidos en metros)

ambos lados de la galería en una profundidad de unos 10 metros dentro de la roca, a cada lado. La presión resultante en esa banda de 10 metros, vendrá a ser del orden de 1.3 veces la "presión de profundidad".

Esta presión se incrementa extraordinariamente en las proximidades del frente del tajo, causando daños muy fuertes en la formación de la galería, sin embargo, ésta presión puede reducirse extraordinariamente, si la capa de carga inferior (si existe) ha sido previamente explotada, por el contrario, esta presión se incrementaría aún más de lo comentado, si se hubiesen dejado pilares de protección y seguridad entre los paneles de la capa inferior.

El objetivo es pues localizar galerías y puntos de trabajo, en zonas de baja presión. En la Fig. 14 es un ejemplo para capas echadas e inclinadas de lo que hemos venido comentando.

Actualmente es posible para cada caso específico calcular la presión de forma anticipada mediante modelos matemáticos, como los desarrollados por Dr. G. Everling. Así tenemos, por ejemplo, en la Fig. 15, un ejemplo de galería abierta a 800 metros de profundidad, paralelamente a un pilar en capa superior, y en la que se observan perfectamente las líneas de isopresión.

Con una distancia entre capas de 60 metros, la galería A, se sitúa muy desfavorablemente con presiones 13.4 veces la de referencia. Si la galería se desplazara 35 metros hacia la izquierda (B), la presión sería de 10.2 veces la referencia, situación más favorable.

Cálculos de este tipo se han realizado por el Departamento de Entibación Minera y Mecánica de Rocas del Bergbau-Forschung, para muchas y diferentes situaciones, por lo que se ha hecho posible establecer unas reglas o normas generales relativas a la ubicación

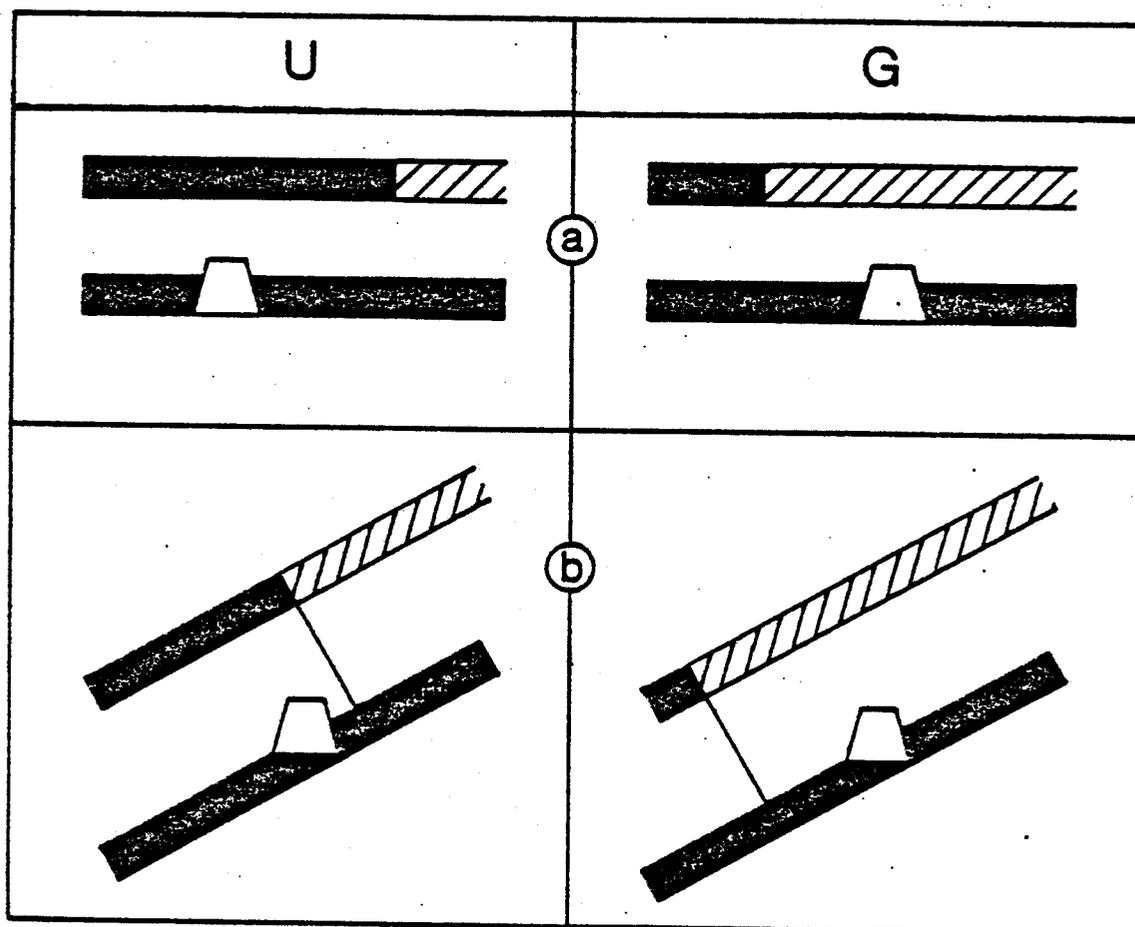


FIG. 14.- POSICION DE GALERIAS EN RELACION A LABORES ANTIGUAS.

- U = Posición Desfavorable
- G = Posición Favorable
- a = Capa echada
- b = Capa inclinada

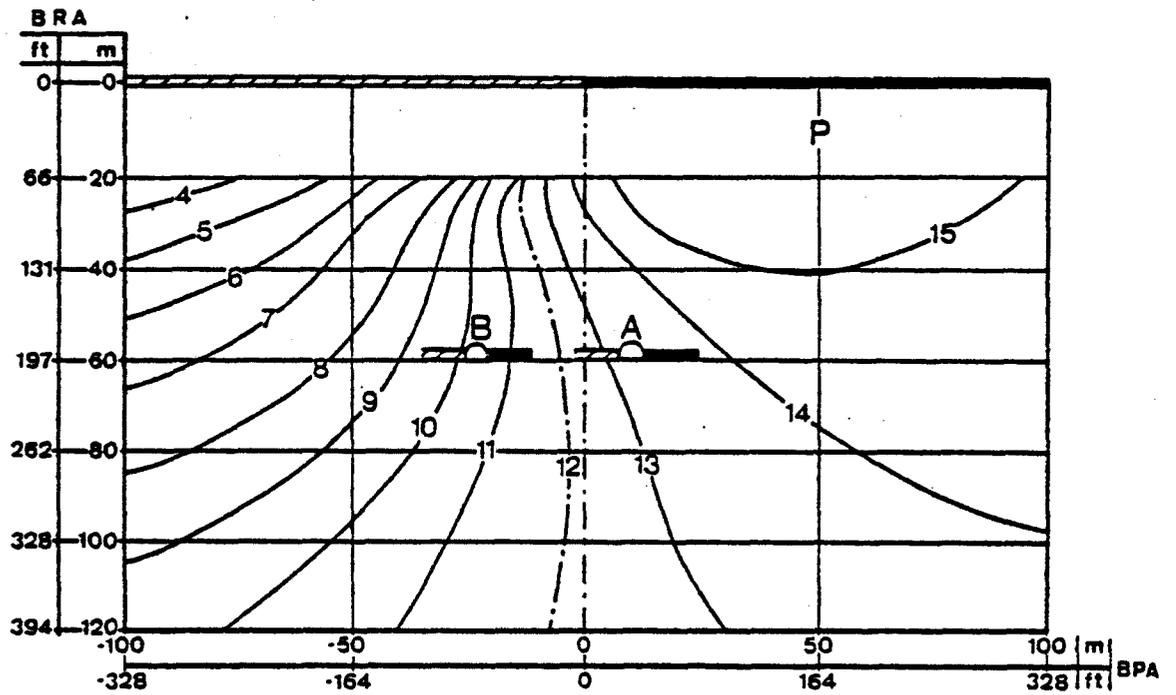


Fig. 15.- LINEAS DE ISOPRESION SOBRE UNA GALERIA CONDUCTIDA 300 m. POR DETRAS DEL TAJO Y POR DEBAJO DE UN PILAR DE SEGURIDAD PARALELA A LA GALERIA.

- P = Presión en 1.000 Mp/m^2
- BRA = Distancia normal a la estratificación.
- BPA = Distancia paralela a la estratificación.
- A = Posición desfavorable de la galería.
- B = Posición favorable de la galería.

de galerías. A la luz del conocimiento actual, estas reglas pueden establecerse de la siguiente forma:

- El incremento de presión, es de mucha más importancia que la presión absoluta, en relación a su efecto en la convergencia de las galerías.
Las galerías pues, a nivel de planificación, nunca deberán situarse en zonas en donde se esperen una alta concentración e incremento de presiones.
- En situaciones de gran profundidad, con rocas de caja poco consolidadas y con trabajos superiores difíciles (pilares, etc), se deben de realizar cálculos previos de Mecánica de Rocas para definir esta distribución de tensiones y presiones.
- Si la capa superior explotada ha dejado un pilar con carbón aún sin explotar en el mismo lado en donde se va a trabajar en la capa inferior, las galerías pueden abrirse paralelamente al pilar inferior y debajo del mismo, sin - que se aprecien incrementos de presión.
- Si las capas están en el lado opuesto, las galerías deberán situarse al menos 30 metros desde la proyección perpendicular del pilar, en el sentido de la zona superior - explotada.
- En casos en donde la distancia vertical sea más de 100 metros, se apreciarán efectos de presión si las galerías se abren debajo de la parte aún sin explotar de la capa superior.

3.2.2.- Longitud del Tajo y Presión del Terreno.-

En cualquier consideración relacionada con esquemas mineros

para baja presión, suele frecuentemente, surgir la pregunta de si un frente más corto (Tajos Cortos), podría reducir la carga de presión sobre las galerías en capas.

Por otro lado, es bien conocido, que la presión del terreno es particularmente severa, en las esquinas extremos de los frentes de los tajos, tal como se observa a lo largo del hundido, a medida que avanza el tajo. Cualquier reducción que se haga sobre la presión del terreno en este punto, sería extraordinariamente atractiva, bajo el punto de vista de avance uniforme del tajo.

Dr. Everling (Fig.16), ha calculado la presión en las esquinas de un tajo corto usando un modelo digital, en función de la longitud del tajo y el grado de hundimiento. Dr. Everling señala que la reducción en la longitud de un tajo de 200 a 50 metros tiene efectos muy pequeños en la presión del terreno en las esquinas, y que se requiere reducciones mayores, para apreciar reducciones significantes en dicha presión. Tajos con longitudes tan cortas solo pueden ser implantadas en casos excepcionales, debido a los altos costes de desarrollo que implican. El relleno neumático, (factor de relleno $q=0.5$), reduce la presión en un 30%, en comparación a hundimiento libre ($q=1$).

3.2.3.- Capas protegidas y presión del terreno.-

La presión que actúa directamente sobre la pared del frente del tajo puede ser reducida muy significativamente por explotación en capas protegidas.

La descarga producida por esta operación de protección depende del área extraída en la capa de protección, de la potencia, de la misma del intervalo entre los tajos y del diseño del tajo.

La Fig. 17, representa un ejemplo gráfico, de la aliviación

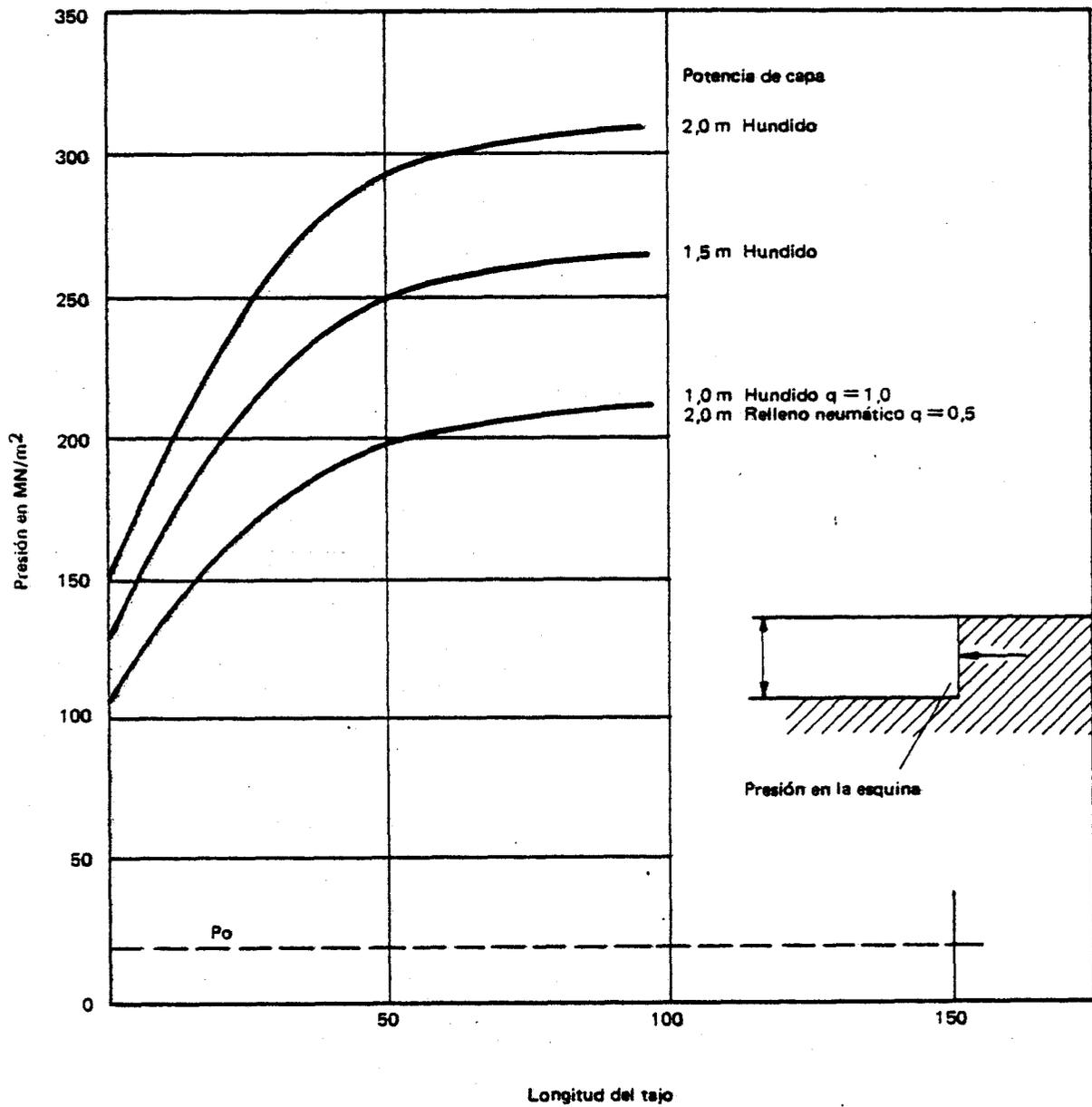


FIG: 16. PRESIONES DE ESQUINA EN UN TAJO CORTO

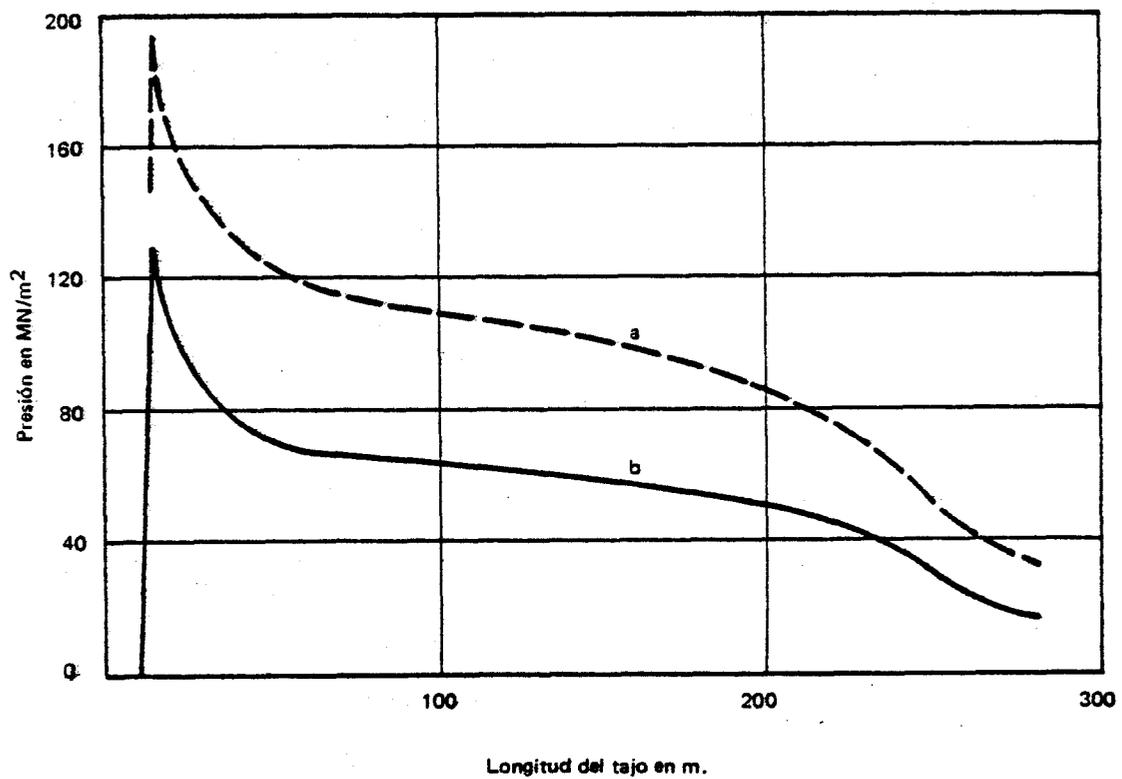
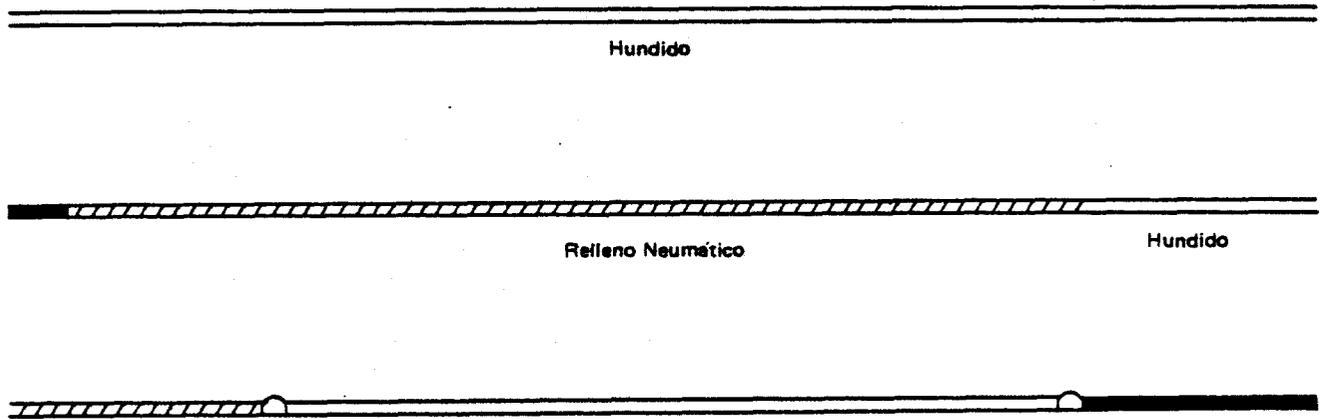


FIG: 17. PRESION EN EL FRENTE DEL TAJO. CON (a) Y SIN (b) PROTECCION

de presión, en el frente del tajo, con o sin explotaciones de protección en capas superiores. (60 metros por encima).

La presión disminuye en un 40% como resultado de la explotación de capas superiores. Esto es particularmente interesante - en la parte superior del tajo donde la proximidad de la zona hundida da lugar a altas presiones. Es precisamente aquí, donde se desarrollan los efectos de altas presiones, en especial con rocas poco resistentes y fiables.

3.3.- REDUCCION DE PRESION EN LAS GALERIAS EN CAPA.-

3.3.1.- Esquemas de deformación en las galerías.-

La convergencia en las galerías en capa, en las investigaciones llevadas a cabo en la industria minera del carbón alemana, depende no tanto de la presión bajo la cual la galería ha sido - abierta, como del aumento y concentración de tensiones producidas por labores próximas.

La relación de la convergencia como porcentaje de la altura inicial, con el incremento en la presión del terreno, es conocida como "convergencia comparativa" y define la forma en la cual la galería se deforma. Esta convergencia se ve afectada por la composición geológica de la roca circundante y por la forma de - llevar a cabo la excavación.

Así por ejemplo, en las galerías en capa de algunas minas de la Ruhrkohle AG, la convergencia comparativa fue medida utilizando estaciones de observación en las galerías y las presiones - por modelos digitales desarrollados por Dr. Everling. La Fig. 18, da la convergencia comparativa encontrada de esta forma, en ella podemos ver como la convergencia comparativa es mayor en galerías abiertas por delante de la línea del frente del tajo y es menor -

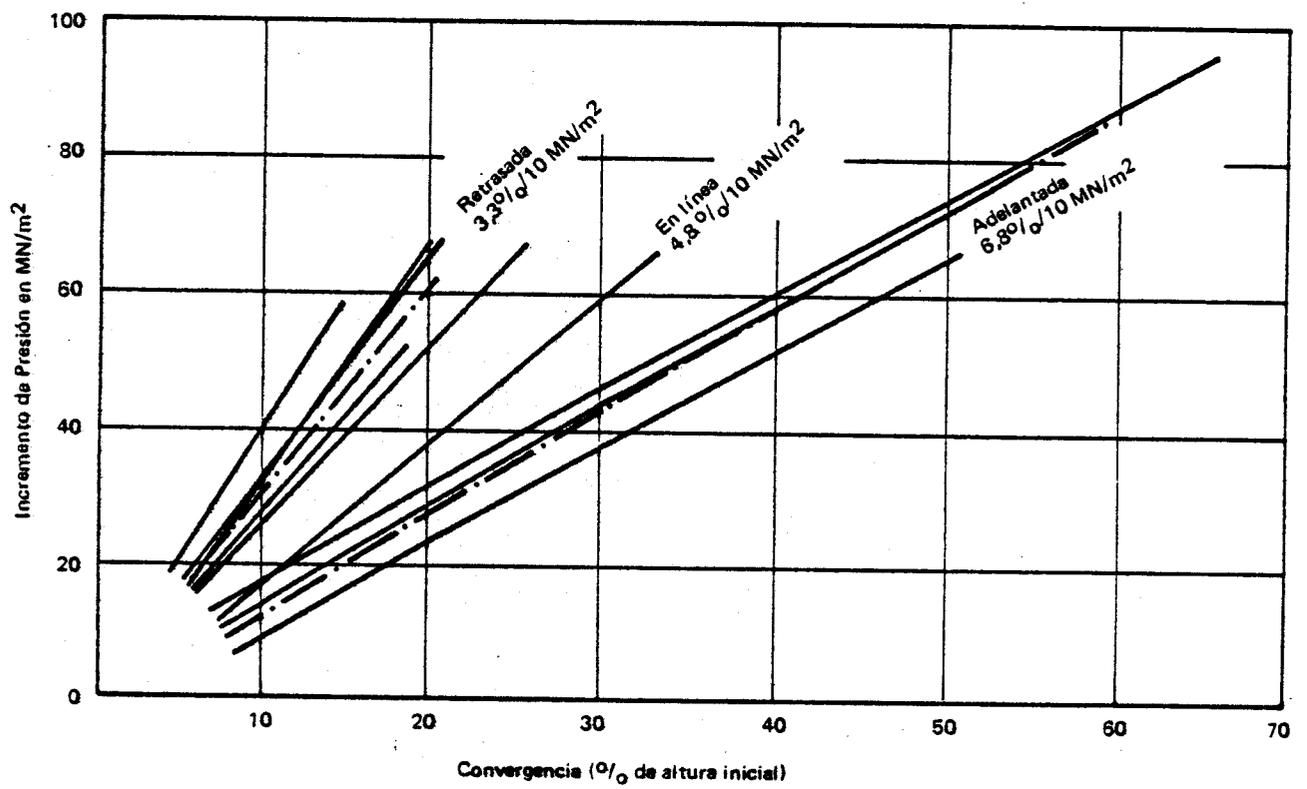


FIG: 18. INCREMENTO DE PRESION Y CONVERGENCIA EN GALERIAS

para aquellas abiertas por detras del frente. El llevar las galerías en línea con el frente reduce la convergencia comparativa en $2/3$ a sí la llevasemos por delante, mientras que el llevarlas por detrás reduce a la mitad esta convergencia.

La razón para la mejora en el comportamiento en el caso de galerías abiertas con y por detrás del tajo, podría ser la reducción de fracturas en el techo y muro y en el hastial del carbón de la galería. El incremento de la presión en una galería abierta por detrás del tajo es del 60% en relación al incremento experimentado cuando aquella va por delante, de forma tal que la convergencia total en galerías por detrás del tajo es del orden de $1/3$ de la observada en galerías por delante.

3.3.2.- Influencia de la conducción de galerías, por delante, - por detrás o en línea con el Tajo.-

Las primeras investigaciones sobre la relación convergencia-presión de estratos, reveló que la convergencia incrementaba en proporción directa con el incremento de presión causado por la extracción. Esto condujo a la definición de la llamada "convergencia de referencia", esto es a la reducción en centímetros de la altura de la galería, que tiene lugar a un incremento de presión de 1.000 Mp/m².

La "Convergencia de Referencia", es específicamente para cada capa y por lo tanto varía considerablemente. Normalmente es del orden de 4 a 32 cm. por 1.000 Mp/m² de incremento de presión.

Con el fin de analizar las repercusiones de conducir las galerías en capa en relación al tajo, sin hacer referencia a las condiciones específicas de la capa, definiremos la "Convergencia de Referencia" con un valor al 100%, así por ejemplo, si el incremento de presión se incrementara en 3.000 Mp/m², la convergencia sería

tres veces la de referencia.

En la Fig. 19, la galería en el diagrama superior está 100 metros por delante de la línea del tajo (A). En este punto una célula de convergencia (K) es instalada directamente después de haberse hecho la excavación.

A medida que el tajo avanza desde A hacia B, 300 metros, la presión se eleva de 2.000 Mp/m² a 9.500 Mp/m², esto es en 7500 Mp/m², dado una convergencia de 7.5 veces la de referencia.

En el diagrama inferior, se representa una galería conducida a 25 m. por detrás de la línea del tajo. La presión de los estratos se eleva de 6.000 Mp/m² a 9.500 Mp/m², esto es un incremento de 3.500 Mp/m², dándonos una convergencia 3.5 veces la de referencia, o de otra forma 47% de la experimentada por la galería en avance.

Cuando la galería se abre en línea con el tajo, la convergencia es de 5 veces la de referencia, o 64% la experimentada por la galería en avance.

La Fig. 20, nos muestra priméramente la sección de una galería abierta 50 metros por delante del tajo y en segundo lugar una galería a 6 metros por detrás de la línea del frente. En la primera, la sección final fué 54% de la inicial una vez que el suelo fue ripado tres veces, en la segunda la sección final fue del 78% de la original, sin que se hiciese necesario el ripado del suelo.

Observaciones operacionales se han venido realizando sistemáticamente, y se ha podido comprobar, que la convergencia en galerías en avance es del 49% (como media) y en galerías por detrás del tajo de sólo 10%, esto es que la convergencia en el segundo -

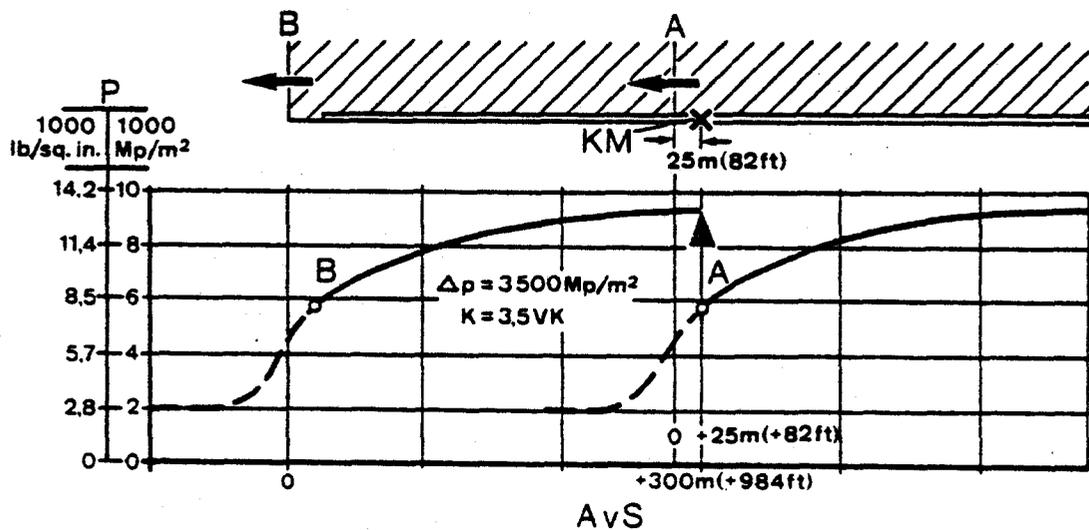
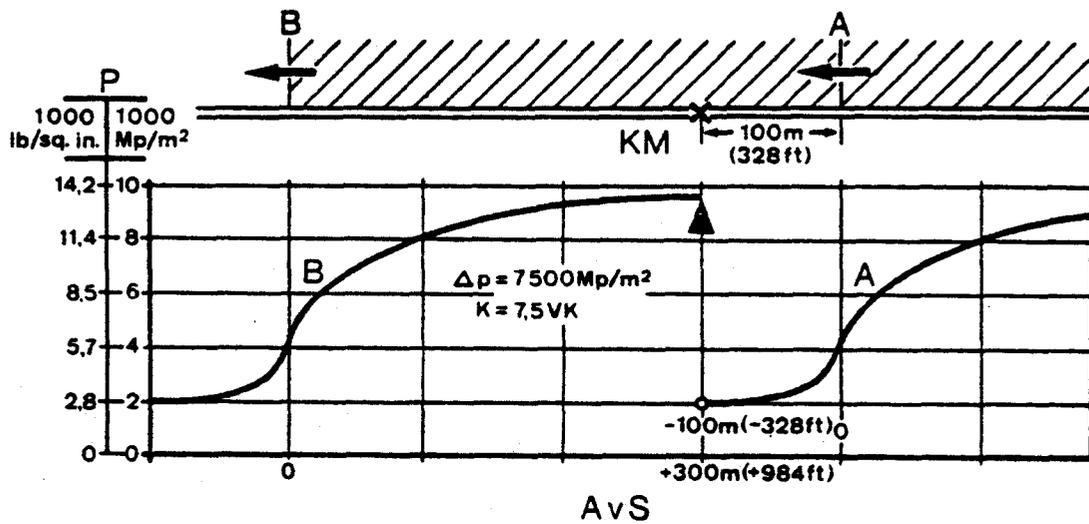


FIG. 19.- INCREMENTO DE PRESION EN UNA GALERIA ABIERTA 100 m. POR DELANTE DEL FRENTE Y EN OTRA GALERIA A 25 m. POR DETRAS DEL FRENTE.

- A = Posición inicial del Frente.
- B = Posición final del Frente.
- KM = Punto de Medida de Convergencia.
- P = Presión.
- Δp = Incremento de Presión.
- K = Convergencia.
- VK = Convergencia Referencia.
- AVS = Distancia del Frente.

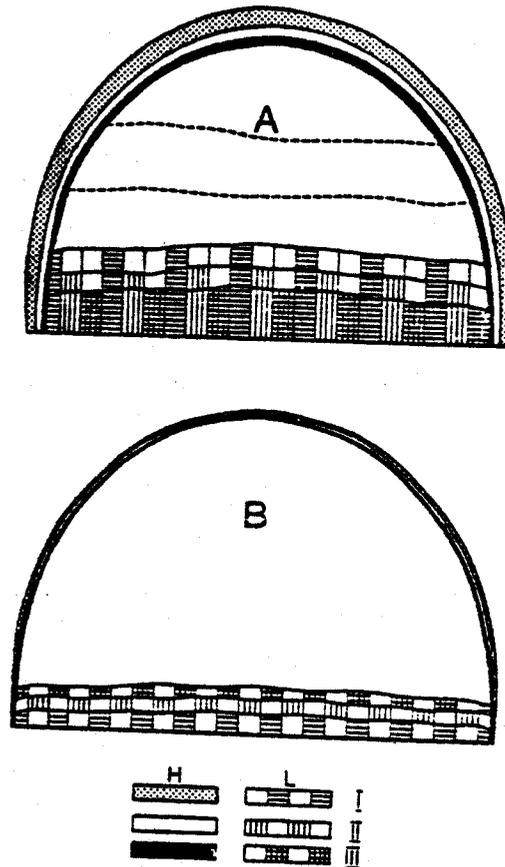


Fig. 20.- SECCION DE GALERIA CONDUCTIDA EN AVANCE (A) Y EN RETROCESO (B).-

A = Galería a 50 m. por delante del Tajo.

B = Galería a 6 m. por detrás del Tajo.

I = 150 m. detrás del Tajo.

II = 400 m. detrás del Tajo.

III = 800 m. detrás del Tajo.

H = Techo

L = Muro

--- = Posición del muro en el caso A, si el mismo no fuese ripado.

caso es del orden del 46% en relación al primero, lo cual concuerda con el valor teórico comentado del 47%.

En situaciones en la que las condiciones de estratos son buenas, y la profundidad no es muy grande, la convergencia es de pocos centímetros, por lo que la diferencia entre un caso y otro no es muy importante, sin embargo, cuando este no ocurre y la convergencia es fuerte, la decisión en la forma de conducir una galería es de gran importancia para el comportamiento de la galería.

La ventaja práctica de llevar las galerías por detrás del tajo, es que el perfil inicial puede ser más pequeño que en galerías en avance, aunque alcanzando el mismo perfil final, esto reduce considerablemente los costes de entibación.

3.3.3.- Métodos de excavación. Packing. Convergencia.-

La convergencia final en las galerías, viene gobernada por factores, tales como

- Profundidad (T).
- Potencia de la capa (m).
- Resistencia del muro (GL).
- Tipo de fortificación lateral de la galería-packing-(SV).
- Dimensiones de la galería (A).

El análisis de regresión que relaciona estos factores con la convergencia final, viene definido por:

$$K = -78 + 0.066 T + 4.3 M \cdot SV + 7.7 \sqrt{10GL}$$

La Fig. 21, capacita al ingeniero de producción en elegir el método de excavación y el tipo de fortificación (packing) a utilizar. La fortificación puede ser rígida, realizada hidráulicamen-

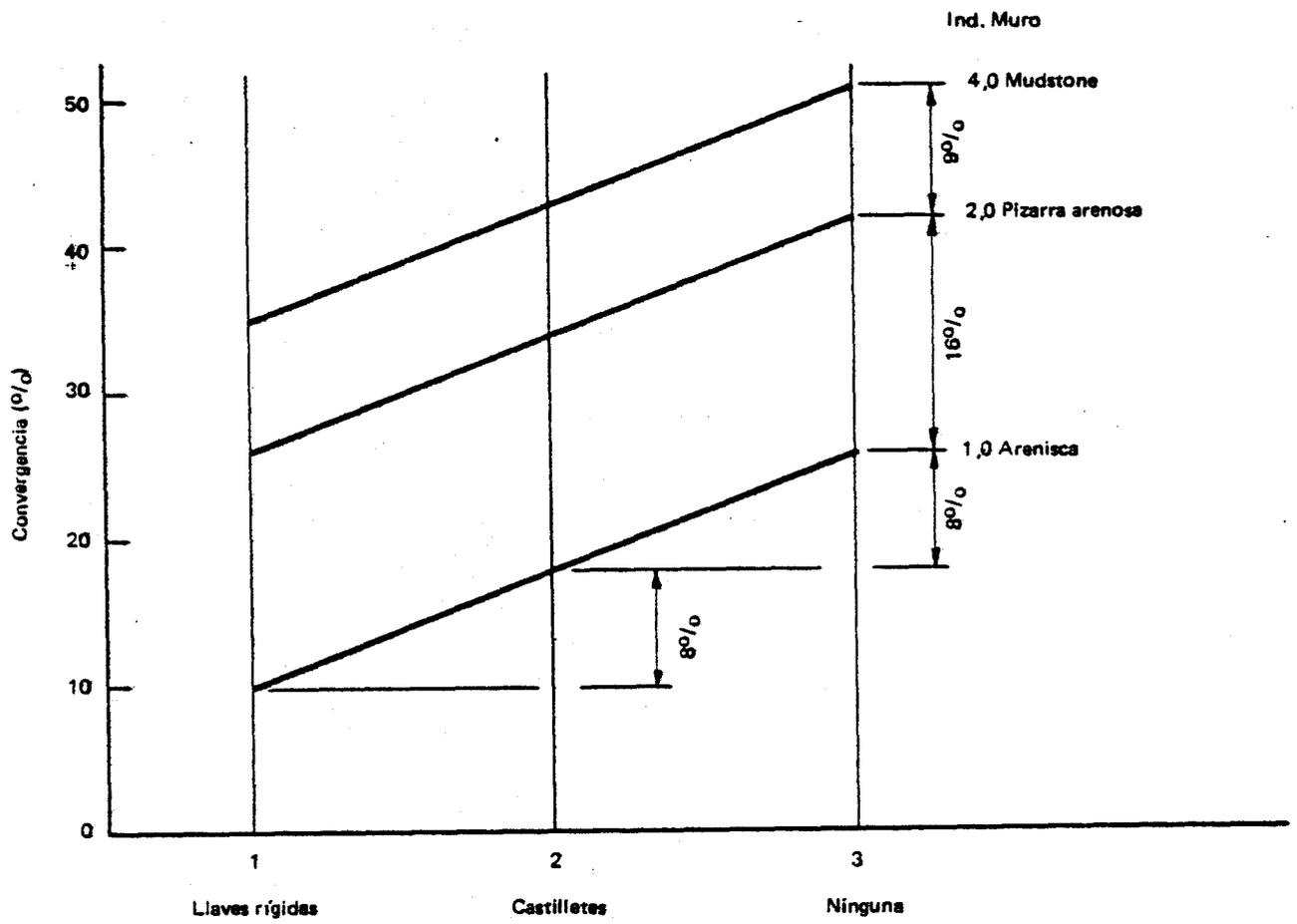


FIG: 21. EFECTO DE LA FORTIFICACION LATERAL Y COMPOSICION DEL MURO EN LA CONVERGENCIA

te, castilletes de madera, o ninguna fortificación. En la Fig. 21, se considera que la extracción se hace solo en uno de los hastiales de la galería, en ella podemos ver como por ejemplo, que con una capa de 1.85 m. de potencia a 850 m. de profundidad con un muro con índice 2.7, la máxima convergencia (42%) se daría con galería por delante del tajo y sin fortificación, y la mínima (6%), en galerías por detrás del tajo con relleno sólido como fortificación.

3.3.4.- Consolidación del muro de las galerías.-

En la minería alemana, el hinchamiento del suelo de las galerías, muy dependiente del tipo de roca del mismo, es responsable de las dos terceras partes del volúmen del convergencia en las galerías en capa, habiéndose realizado repetidos intentos, con el objetivo de mejorar la consistencia del suelo por técnicas de consolidación.

La reducción en la convergencia, que puede ser alcanzada por consolidación, se deduce de los resultados detectados en las campañas realizadas en la cuenca del Ruhr. La Fig. 22 no muestra la convergencia esperada en el cabo de una galería abierta por delante del frente, a unos 850 m. de profundidad con una capa de 1.85 metros de potencia, con suelo de "mudstone" (índice 4), pizarra arenosa (índice 2.7) y arenisca (índice 1.0). Así por ejemplo, la convergencia instantánea puede ser reducida a un 16% de la altura de la galería, si el índice de la roca del suelo pudiese ser elevada por consolidación desde el valor 2.7, al nivel de las areniscas (1.0).

Como puede verse en la figura, la sustitución de un castillete de madera por uno rígido, reduce la convergencia en la misma magnitud que la consolidación de un "mudstone" a nivel de pizarra arenosa (2.7).

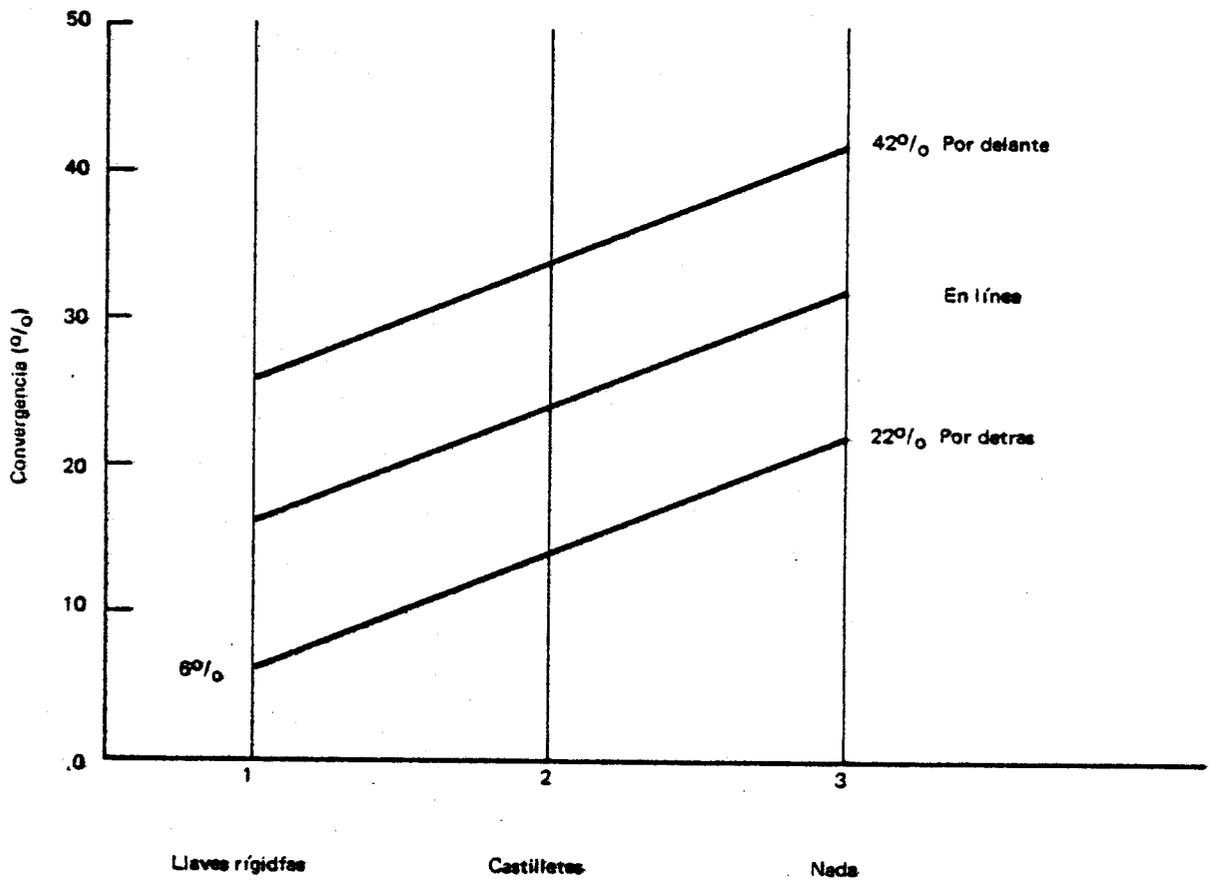


FIG: 22

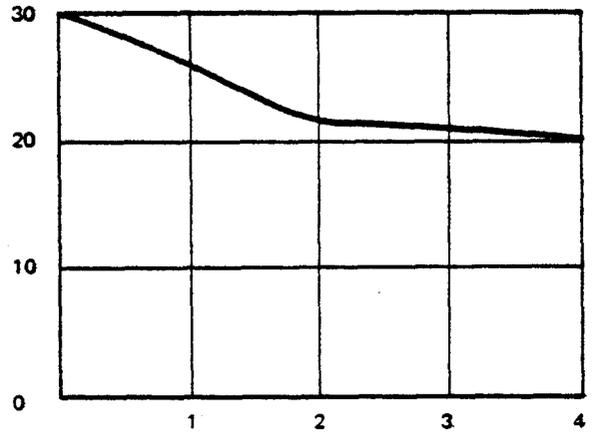
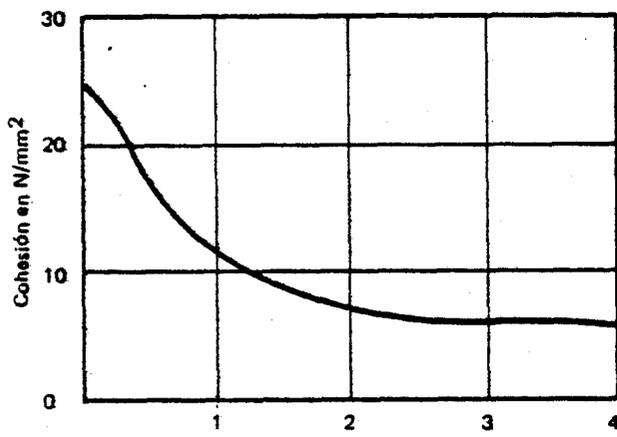
Los ensayos realizados hasta la fecha con el objetivo de consolidar el carbón en las galerías, mediante inyección de sustancias aglutinantes especiales, no ha tenido ningún éxito apreciable hasta el momento presente.

Cuando el cemento se inyecta, cuando comienza el avance, aparecen pocas fracturas en el suelo de las galerías que permitan la formación de una estructura autosoportable, mientras que si la inyección se realiza una vez el suelo ha empezado a plegarse, las cavidades y espacios creados en la roca del muro son demasiado amplias, como para poder rellenarse.

Otra forma de aumentar la resistencia de la roca del muro de las galerías, es por bulonaje. El efecto del bulonaje ha sido investigado en modelos a escala 1:10; en los que un suelo estratificado fue sometido a carga en una máquina de comprensión, paralelamente al plano de estratificación. Sin bulonar, el suelo experimentó un triple plegamiento, mientras con bulonaje, el plegamiento fue eliminado, y queda sustituido por leves desplazamientos superficiales.

La cohesión inicial del suelo fue elevada en un 20% por el bulonaje y la resistencia a la deformación en las fracturas se multiplicó por tres (fig. 23). Los ensayos con modelos a escalas: 1:10 realizados en el Bergbau-Forschung, indican que el bulonaje, en galerías en capa, con el fin de evitar hinchamiento del suelo, sólo ofrece resultados, cuando la longitud de los bulones anclados en el suelo supera la mitad del ancho de la galería.

Un método para reducir el arqueado del suelo de las galerías es el de "bulonajes ocultos", con el fin de evitar las dificultades que estos bulones tendrían en las operaciones de conservación del nivel del suelo con ripadoras. Con este propósito se abren sondeos de 4 metros de profundidad en el muro de la galería en



Compresión en cm

FIG: 23. EFECTOS DEL BULONAJE EN LA COHESION Y RESISTENCIA A LA DEFORMACION

una distribución en abanico. En la mitad inferior de los mismos, se instalan bulones de resina, rellenándose la mitad superior con cementos (grout).

3.3.5.- Relleno de los arcos metálicos en las galerías.-

La convergencia también puede ser aliviada mediante un apropiado relleno de los huecos existentes entre los arcos metálicos de sostenimiento y las paredes de roca de la galería.

La intención es la de transferir el empuje del arco directamente a las paredes, una vez este ha sido instalado protegiendo al arco de cargas puntuales.

El efecto de este relleno en la convergencia de galerías, y en la deformación de los arcos, se ha podido apreciar en una amplia serie de ensayos operacionales y pruebas realizadas en las cuencas carboníferas alemanas. El resultado aparece reflejado en forma resumida en la Tabla I.

TABLA I

Relleno de arcos	Packing	Factor convergencia	de deformación de arcos
Manual con roca	Madera	1	1
Sin relleno	"	1.1	1.1
Anhidrita	Anhidrita	0.6	0.5
Anhidrita	Madera	0.75	0.8

Por motivos de comparación, la convergencia y la deformación de arcos con relleno manual de roca y castilletes de madera, se indican con un índice 1. Sin relleno, la convergencia y la de-

formación de los arcos es un 10% superior. La unión directa de los arcos a las paredes con anhidrita, reduce la convergencia - en un 25%, pudiendo llegar a un 40% si se combina con un packing de anhidrita.

Todas estas observaciones han conducido a la industria minera alemana del carbón a establecer los siguientes aspectos fundamentales en relación al relleno.

Si los arcos metálicos deslizantes fallan bajo fuerte presión de los estratos del terreno, se pueden establecer dos métodos para tratar de evitarlo.

El primero y más normalmente utilizado es el de instalar un arco metálico más pesado y reducir los centros. El segundo método, raramente usado, es el de rellenar el espacio arco-roca lo más pronto posible con un cemento (grout) de alta resistencia y de rápido fraguado.

El resultado en cada caso es que la entibación mejora en su situación. El relleno con cementos preparados reduce adicionalmente la convergencia, esto parece ser que se puede atribuir, a la decisiva mejora en la curva de característica funcional del arco metálico. La fig. 24, compara las curvas de características funcionales de un arco deslizante, con y sin relleno.

El efecto de este relleno, es que incluso con convergen--cias del techo de sólo un 3%, una muy alta capacidad portante(T) de 280 Mp (320 toneladas) es alcanzada, rompiendo el relleno rí--gido, sin embargo la capacidad portante del sistema global, nun--ca cae por debajo de los 80 Mp (90 toneladas).

De esta forma, el sistema de entibación tiene una curva - característica funcional casi ideal, en donde la mayor resisten--

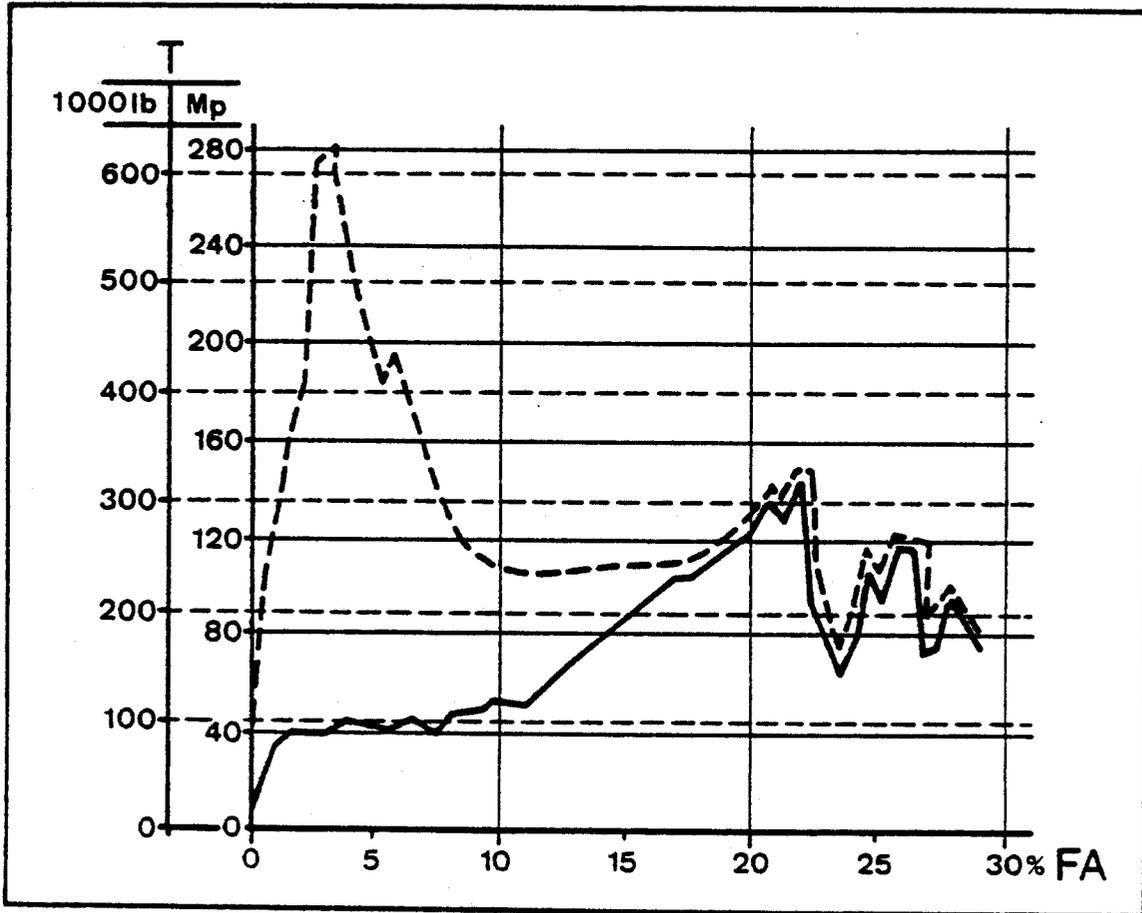


FIG. 24.- CURVA DE CARACTERISTICA FUNCIONAL DE ARCOS METALICOS DESLIZANTES.-

- T = Capacidad soportante.
- FA = Desplazamiento vertical del techo (%).
- = Arco metálico deslizante sin cementado.
- - - = Arco metálico con cementado.

cia de la fortificación se desarrolla rápidamente, al mismo tiempo las buenas características de deslizamiento se mantienen en un amplio rango de deformaciones con suficiente y alta resistencia de la fortificación.

El relleno en galerías con cementos hidráulicos, puede realizarse con los mismos equipos utilizados para la fortificación lateral. No hay que olvidar que el relleno de galerías tiene que ser realizado directamente en el frente de la galería; en este sentido es particularmente útil una unida de soplado, con la que el mortero puede ser transportado por tubería al frente de la galería y colocado detrás de los arcos.

Debido al alto coste del relleno mecánico, solo unos pocos intentos se han hecho hasta la fecha, sin embargo este sistema parece tener muy buen futuro usado en forma de rutina, en aquellas galerías que solamente puedan ser mantenidas muy insastifactoriamente o a costes prohibitivos.

3.3.6.- Planificación de la entibación en las galerías.-

La entibación se planifica en términos de la convergencia. Ya hemos visto como esta puede ser calculada a partir de factores geológicos y mineros y como puede ser influido por decisiones operacionales, y así mismo como de forma sorprendente ni el peso de los arcos ni el espaciamiento de los mismos tienen ningún efecto significativo en la convergencia final.

A parte de factores cuantitativos medibles tales como, profundidad, potencia de capa extraída, dimensiones de la galería, existen dos factores cualitativos: estratos del muro (GL) y packing (SV).

Los estratos del muro de la galería se dividen en seis ca-

tegorías, desde 1 para arenisca, hasta 6 para esquistos arcillosos físicamente estratificados "mudstone" o carbón.

El packing de las galerías se divide en tres categorías:

- 1.- Materiales hidráulicos.
- 2.- Castilletes de madera.
- 3.- Sin packing.

Con el fin de hacer la fórmula de convergencia (K) más fácil de usar, la figura 25, presenta un monograma desarrollado al respecto por el Departamento de Fortificación Minera y Mecánica - de Rocas (Grubenausbau und Gebirgsmechanik) del Bergbau-Forshung.

Si en dicho monograma, ignoramos el cuadrante superior derecho, los otros tres cuadrantes, representan los factores mencionados. La línea de puntos indica una predicción, en una galería en capa de 1.30 m. de potencia, con castilletes de madera como packing, con un muro de esquistos arcillosos ligeramente arenosos (2.5) y a una profundidad de 850 m.

Facilmente vemos como podemos esperar una convergencia del 32%. El cuadrante superior derecho indica el tipo de entibación a usar.

Es importante hacer constar, que en este tipo de análisis, sólo el tipo de "packing" es variable y que presenta una fuerte influencia en la convergencia final (coeficiente de correlación - 4.3.)

Ha sido posibles establecer, así mismo, una fórmula de regresión y un nomograma similar, para el hinchamiento del suelo, - aunque menos preciso que la convergencia (80%). Los mismos factores comentados, son los que presentan máxima correlación con el

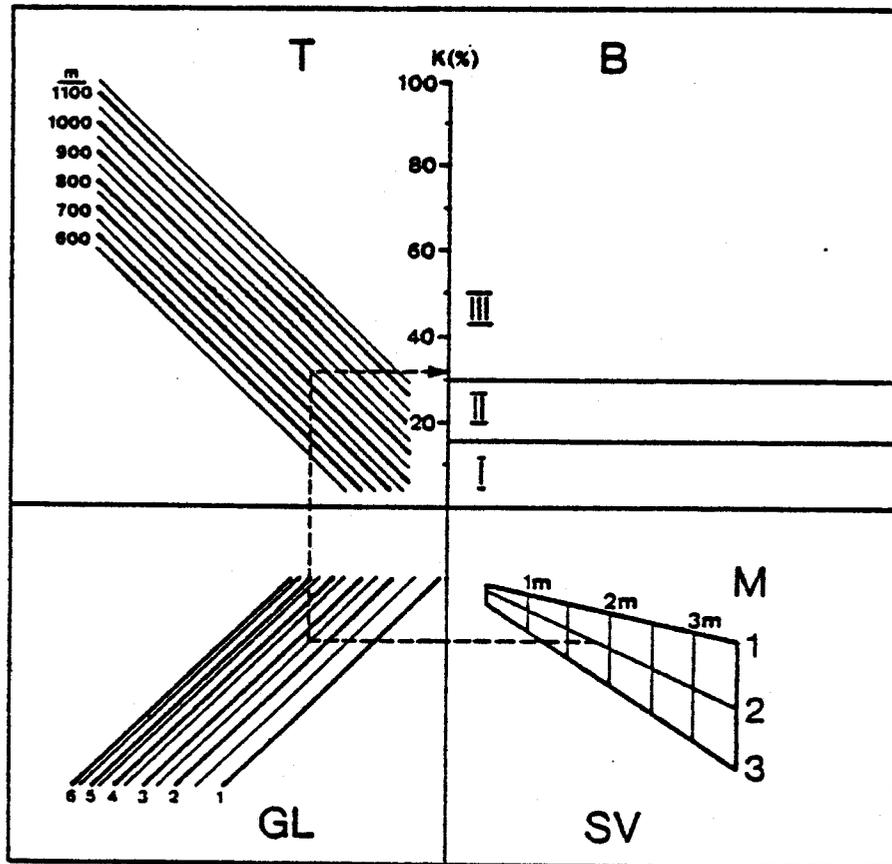


FIG. 25.- PREDICCIÓN DE CONVERGENCIA Y PLANIFICACION DE LA ENTIBACION PARA GALE
RIAS EN AVANCE.-

- M = Potencia de Capa extraída (m).
SV = Coeficiente de entibación lateral.
 1 = Llaves rígidas.
 2 = Castilletes de madera.
 3 = Sin fortificación.
GL = Coeficiente del muro.
T = Profundidad (m).
K = Convergencia (%).
B = Resistencia de los arcos metálicos.
 I = Arcos rígidos.
 II = Arcos deslizantes ligeros.
 III = Arcos deslizantes pesados.

hinchamiento o bajamiento del suelo.

En casos en los que la convergencia o el hinchamiento supere al 30%, una fuerte y pesada entibación debe de ser usada, con el fin de aminorar la distorsión de la misma. Por otra parte, es muy ventajoso el conducir las galerías en línea o por detrás del frente del tajo, como ya hemos comentado.

La elección de las contramedidas viene determinada por la mejora anticipada que se pueda tener en la sección de la galería y por el coste requerido para tales contramedidas.

El propósito de la planificación de la entibación, no es pues, reducir la convergencia sino la de elegir una solución que sea capaz de absorber la convergencia esperada al mínimo coste, sin excesiva deformación y daños. La investigación llevada a cabo, a mostrado que esto puede conseguirse hasta con una convergencia del 15% mediante arcos rígidos y con arcos deslizantes con convergencias entre 15 y 30% con un Factor de Acero* de 25 Kg/m³ en las galerías.

3.3.7.- Entibación lateral en las galerías (packing).-

Ya hemos visto como este tipo de fortificación ejerce una tremenda influencia en la convergencia final.

En el ejemplo que hemos visto en la sección anterior, se usan castilletes de madera, dando como resultado una convergencia final del 32%. Si los castilletes de madera se hubiesen reemplazado por llaves de materiales hidráulicos, la convergencia final podría haber sido del 24%, esto es una mejora del 25%.

Se han realizado ensayos, en donde la convergencia final ha sido del 12% de la altura inicial, correspondiendo pues a una re

(*) Factor de Acero = $\frac{\text{Longitud del Arco} \times \text{Peso de la sección}}{\text{Espaciamiento} \times \text{Sección galería}}$ (Kg/m³)

ducción del 32 al 20%.

Para conseguir estos resultados tan favorables, la roca de caja circundante debe de ser suficientemente firme. En galerías con rocas de caja de baja resistencia, la convergencia no puede reducirse significativamente mediante llaves rígidas, incluso en muchos casos las llaves rígidas, dan convergencias superiores a los castilletes de madera, dado que las llaves rígidas se clavan en el suelo, forzando a este a deformarse sobre la galería.

En tales situaciones es aconsejables, utilizar llaves deformables y mantener las galerías en línea o por detrás del frente del tajo.

La Fig. 26, presenta como el encabezamiento en avance en rocas de caja friables, sometidas a gran convergencia, no pueden mantenerse de forma segura, mientras aquellas por detrás del frente en rocas de resistencia media, con llaves rígidas y arcos metálicos rígidos pueden mantenerse eficazmente.

Esta experiencia ha llevado al desarrollo de entibación lateral de galerías mediante materiales hidráulicos, que tan extensivamente se ha venido utilizando.

Para mantener la estabilidad de las galerías, es importante que las llaves adquieran una suficiente resistencia a la comprensión de forma rápida, esto solo se puede conseguir con materiales gruesos. Las partículas finas de los materiales, que pueden ser procesadas hidráulicamente, necesitan más tiempo para que adquieran su resistencia a la comprensión, sin embargo nuevas investigaciones han demostrado que incluso en estas condiciones, se puede conseguir una pronta resistencia si el uso de aditivos permite la reducción en las necesidades de agua. Esto ha permitido reusar la misma galería para un segundo tajo después de un cierto

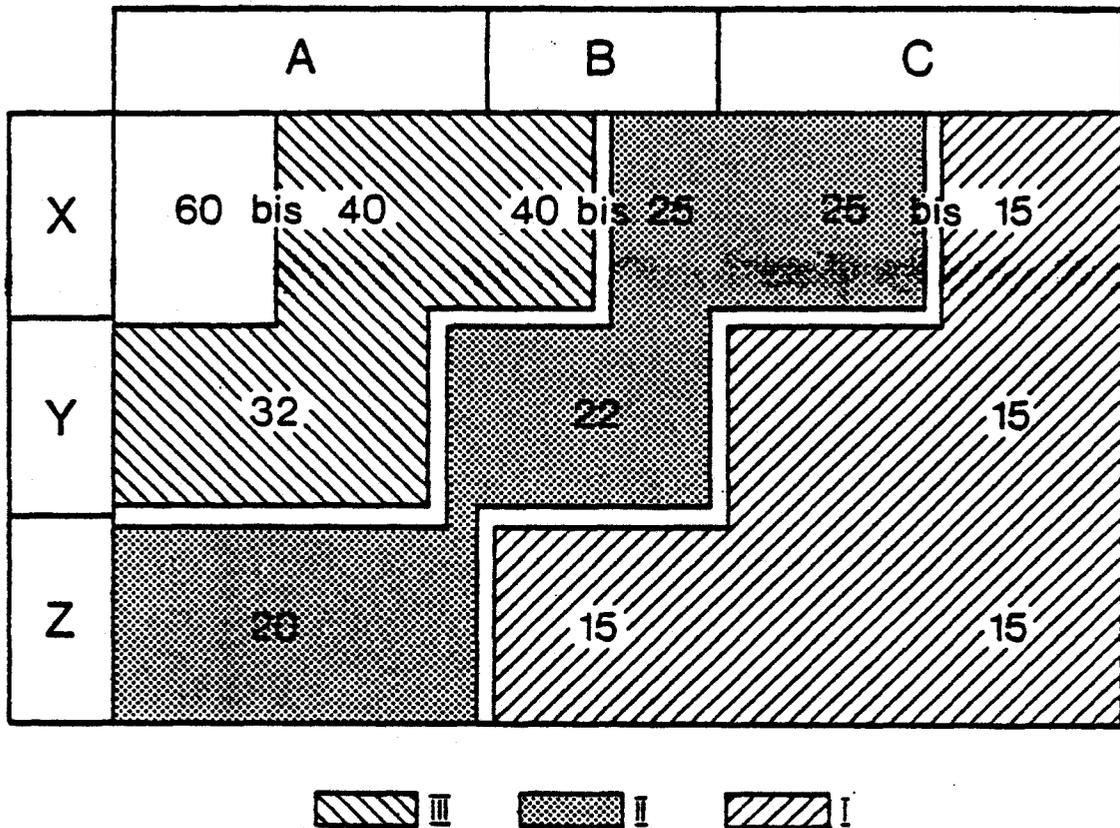


FIG. 26.- INFLUENCIA DE LA CONDUCCIÓN DE LA GALERÍA Y DE LA FORTIFICACION LATERAL EN LA CONVERGENCIA.-

- A = Galería en avance.
- B = Galería en línea.
- C = Galería en retroceso.
- X = Castilletes de madera o llaves de escombros con estratos fiables.
- Y = Castilletes de madera o llaves de escombros con estratos de resistencia media.
- Z = Llaves rígidas con estratos de resistencia media.
- I = Arcos rígidos.
- II = Arcos poco deslizantes o ligeros.
- III = Arcos deslizantes pesados.

paso del tiempo. Las ventajas de este re-uso son logicamente consi-
derables.

3.3.8.- El bulonaje como suplemento a la entibación con arcos me- tálicos.-

La proporción de galerías con secciones rectangulaes o tra-
pezoidales, es de alrededor del 20% en el área del Ruhr, con una
tendencia a la disminución. Diversas pruebas y ensayos operaciona-
les se han llevado a cabo para sostener este tipo de sección con
bulones solo, habiéndose conseguido éxito solamente en aquellos -
casos en donde fuertes, competentes y potentes estratos de techo y
muro se encontraban presentes. En todos los demas casos ha sido ne-
cesario el uso de fortificación adicional.

Un desarrollo diferente ha tenido lugar en la zona de Saar,
en particular a profundidades de 700 metros. Después de una fuerte
disminución entre 1964 y 1968, los métodos de bulonaje han cobrado
mayor importancia después de que los bulones con resina a columna
completa, fueron introducidas con resultados satisfactorios. Desde
entonces el uso de bulones en la región del Saar, ha sobrepasado -
el 30%.

Desde el punto de vista de la seguridad, las galerías que--
dan perfectamente controladas, con una mejora en sus comportamien-
tos y en la reducción de costes.

Con la excepción de la región del Saar, cabe decir que en
la industria minera del carbón en R.F.A. las galerías rectangulares
con o sin bulonaje, han causado tales dificultades, en especial a
profundidades superiores a los 800 metros, que la entibación con
áreas metálicas se usa en una gran mayoría, en especial los desli-
zantes.

Los ensayos de simulación con modelos a escala y verifica--

dos en pruebas individuales in-situ aún en desarrollo, han venido mostrando que la combinación arcos, relleno y bulonaje, produce los mejores resultados en cuando a reducción de la sección en las galerías.

En las galerías, sujetas a fuertes y altas presiones, en las que se espera unos muy altos niveles de convergencia, el desarrollo de bulones deslizantes, pueden ser muy necesarios, dado que los bulones convencionales rígidos, rompen cuando son tensionados fuertemente y se excede el límite de rotura, perdiendo obviamente su capacidad portante. Los bulones deslizantes, se están usando extensivamente en la minería del hierro alemana, siempre que la roca no esté estratificada.

El desarrollo de estos bulones para la minería estratificada, es necesario para su utilización en carbón, debido a los deslizamientos paralelos a la estratificación que el bulón debe de acomodar.

El bulonaje parece pues, que irá ganando su importancia en la minería del carbón, como fortificación complementaria a los arcos metálicos.

3.4.- CONTROL DE ESTRATOS EN EL_TAJO.-

3.4.1.- Efectos de aumentos de presión.-

En el frente de los Tajos, una mayor presión significa mayor frecuencia de caída de techos (>50 cm).

El incremento en la caída de techos se ha confirmado en un estudio realizado sobre 132 tajos, con profundidades entre 300 y 1.100 metros, estudio realizado y dirigido por Dr. Irresberger.

El objeto de este estudio fue el de encontrar la proporción

de tajos que presentasen unos desprendimientos de techos de más de 50 cm. en una extensión superior al 10% de la longitud del tajo (Fig. 27). La información fue dividida en los grupos, por debajo y por encima de los 850 metros de profundidad. La proporción de tajos con desprendimientos a profundidades superiores a 850 m. alcanzó un 40%, el doble que en tajos por debajo de esa profundidad.

La entibación por su parte fue dividida en base a sus resistencia, por encima y por debajo de 250 KN/m², encontrándose que una resistencia inadecuada, era más perjudicial a mayores profundidades. Por tanto, a presiones por debajo de 250 KN/m², la proporción de tajos con desprendimientos de techos fue del 19% por encima del nivel de 850 m. y del 52% en niveles inferiores.

Si además la información la volvemos a dividir, en base al intervalo entre el extremo del bastidor superior y el frente, en distancias superiores o inferiores a 65 cm., se observa como intervalos amplios crean efectos más severos en los niveles más profundos.

A profundidades extremas, la resistencia de la entibación solo afecta a la incidencia de desprendimientos de techo, cuando aquella cae por debajo de un valor crítico, establecido para la minería alemana en 250 KN/m².

Resistencias superiores a estos valores solo son utilizadas en especiales circunstancias, tales como presiones del terreno bajas, y potentes formaciones de areniscas en el techo.

3.4.2.- Requerimientos para entibación autodesplazable.-

La entibación autodesplazable o marchante, debe de ser capaz de evitar interrupciones en la producción creadas por la pre

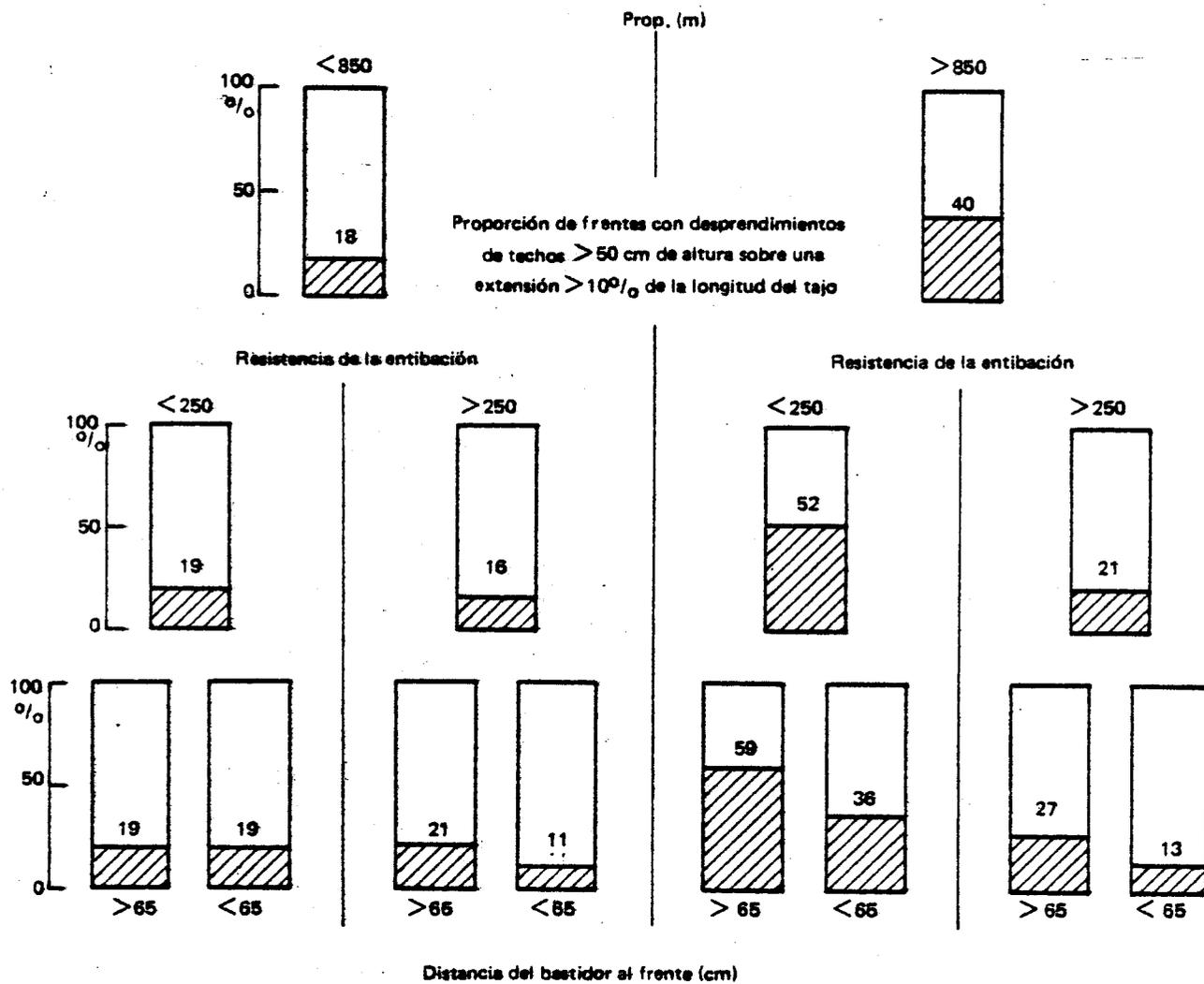


FIG: 27

si3n del terreno. La entibaci3n debe de satisfacer las demandas de la Tabla II.

TABLA II

PROPOSITO	REQUERIMIENTO
Evitar desprendimientos por delante de la entibaci3n	Intervalo bastidor-frente - < 30 cm.
Evitar escalonamiento del techo	Resistencia de la entibaci3n > 250 KN/m ²
Protecci3n del frente de desprendimientos	Cobertura total por bastidores
Eliminaci3n de desprendimientos sin trabajo adicional o da1o a la entibaci3n	Dise1o de la entibaci3n resistente a la flexi3n-torsi3n.

3.4.3.- Entibaci3n autodesplazable a grandes profundidades.-

Los tipos de escudos, mejor adaptados para el control de estratos en tajo a gran profundidad, son de dos o cuatro estem-ples y articulaciones tipo lemuniscata. Este tipo de entibaci3n, presenta las siguientes ventajas:

- Puede prevenir los desprendimientos del techo, mediante resistencia de 250 KN/m², as3 como escaloramientos con 400 KN/m².
- La articulaci3n tipo lemuniscata mantiene bajo el intervalo bastidor-frente.
- Los bastidores articulados o telesc3picos, se adaptan a la inclinaci3n del frente y evitan los desprendimientos.

- El ancho diseño del escudo proporciona una cobertura total del techo.

Los diversos y diferentes diseños de escudos, difieren en su comportamiento, siendo examinados en el Departamento de Entibación Minera y Mecánica de Rocas (Grubenasbau und Gebirgs-mechanik) del Bergbau-Forschung, en máquinas de comprensión especialmente diseñadas para tal fin, y forma la base para la selección del tipo de entibación en cada caso particular.

3.5.- SUMARIO.-

Como resumen de la presentación aquí realizada, sobre el control de los estratos en galerías y tajos, cabe señalar como la industria minera del carbón de la Comunidad Económica Europea, ha desarrollado un sistema mediante la investigación y el estudio intensivo.

El sistema se basa en un precálculo de la presión del terreno por métodos numéricos, asistido por observaciones in-situ, sobre el comportamiento de la roca y la entibación.

El ingeniero se encuentra pues en una posición, de evitar concentración de presiones mediante una adecuada distribución y diseño de labores mineras, localizando sus galerías y tajos, de forma tal que se eviten las presiones creadas por la explotación.

Los efectos de la presión, tales como la convergencia y la deformación de la entibación puede ser calculada, y sus efectos aminorados mediante entibación lateral de galerías con castilletes y llaves, relleno del espacio arco-roca, bulonaje y mediante la adaptación de la entibación autodesplazable a situaciones particulares de los tajos.

4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los principios expuestos en los capítulos anteriores, - que forman la base de la filosofía sobre el Control de Estratos de sarrollada por el Departamento de Entibación Minera y Mecánica de Rocas (Grubenausbau Und Gebirgsmechanik) del Bergabau Forschung GmbH, de la Asociación de la Minería del Carbón (Steinkohlenbergbauverein) de R.F.A., y de las reuniones mantenidas con representantes de dicho organismo, como ya hemos comentado, llegamos a definir una serie de consideraciones que resultaban ser un paquete - de recomendaciones con el objetivo de optimizar todo el sistema - operativo de la explotación de lignitos en Mina Innominada, - partiendo del estado actual de las explotaciones, operadas por "soutirage", y no olvidando otros aspectos fundamentales de la explotación, que podrían perjudicarse al solo visualizar el problema de subsidencia de forma "aislada" "quimicamente puro", como podriamos calificar.

Desde el primer momento se hizo ver que a pesar de los elevados valores detectados en los desplazamientos verticales de la - subsidencia superficial, esta hoy por hoy, tenía poca incidencia - en las obras civiles de superficie por ser zona poco poblada, y - por afectar a estructuras poco importantes (pista de camiones, etc) por lo que no era de gran preocupación para la Dirección la mina ni incidencia en la marcha operativa de sus explotaciones. Sin embargo esta subsidencia si llevaba consigo unas muy fuertes deformaciones de los materiales del techo de la capa, originando ruptura de acuíferos, y consecuentemente entradas e inundaciones de los tajos y

galerías, junto con tremendo arrastre de arenas. Esto si representaba inquietud a la mina y requería una solución.

Las fuertes deformaciones del muro y las irrupciones de agua consiguientes, eran imposibles de evitar. Si la capa tiene 8 m. de potencia y una minería de pilares, o relleno no es factible económicamente, como ocurre en Andorra, la Subsistencia tendrá lugar inexorablemente, cualquiera que sea la longitud de los tajos. Las rocas de techo se ven afectadas hasta una altura de 3-5 veces la longitud del tajo, esto es que con incluso tajos de 50-60 m, - quedarían afectados todos los acuíferos situados en los 200 m. - por encima de la capa.

Todo esto nos lleva a que sería muy recomendable el ensayar la explotación por tajos cortos en dirección, con desfase entre los mismos (el máximo que se pueda), con lo que las "interferencias" entre las distintas bóvedas de deformación de los tajos cortos de forma individual, tardaría más a lo largo del tiempo en efectuarse, demorándose pues esta "interacción de bóvedas" en el tiempo, haciendo que estas tangen lugar con menos repercusiones e incidencias sobre la entrada de agua, ya que cada tajo corto individualmente habría desarrollado su propio drenaje.

Los tajos cortos de 50-60 m., con desfase en dirección de capa, se consideran por tanto para el caso de Andorra, un tema de interés a estudiar.

Por otro lado el desarrollo de las bóvedas de deformación del techo, se verían frenadas en el tiempo con la introducción de pilares de protección entre los distintos tajos, sin embargo la presencia de estos pilares, si bien favorecerían en cierta forma el retraso de la formación de bóvedas de deformación en el techo, darían lugar a tremendas concentraciones de tensiones en los pilares, haciendo totalmente inestable las galerías abiertas en él.

o creándose fuertes hinchamientos del muro de las galerías, si estas se abriesen fuera del pilar, entre él y el tajo, por efecto de indentación del pilar en el muro, tanto si este fuese carbón como margas. En este sentido tendría que pensarse en estudiar el dimensionamiento de pilares de protección entre tajos para evitar las concentraciones de presiones comentados. Las dimensiones de estos pilares del orden de 50-60 m. serían totalmente prohibitivas para una explotación de lignitos con tajos cortos. Por tanto la idea de pilares entre paneles se rechaza y no es recomendada para las explotaciones de Andorra.

Volviendo a la forma de llevar los tajos cortos en dirección y desfasados, sería necesario también, dentro del programa de ensayos, definir si el desfase se ha de hacer con los tajos altos (según la inclinación de la capa) más adelantados que los más bajos, o bien al revés, llevando los más bajos de forma más adelantada. Esta segunda forma de operación, parece más adecuada, ya que facilita el drenaje del techo, de forma tal que los tajos inmediatamente más altos, en su avance se encontrarían con techos ya drenados por el tajo inferior, de forma menos abrupta, de menor magnitud y más controlada. Existen aspectos operativos de acceso a este tipo de labores, que evidentemente tendrían que ser estudiadas y valoradas oportunamente para una decisión final.

También con el fin de favorecer el drenaje del techo realizado por los tajos cortos desfasados, se recomendó y consideró oportuno aconsejar llevar los tajos no exactamente en dirección de capa, sino unos 5°-10° desviados con relación a la línea de máxima pendiente. Esto por su parte traería problemas en la estabilidad del carbón del frente con derrabes más frecuentes que los ya existentes, pero que podría paliarse con una adecuada entibación automarchante en los tajos, que redujese el intervalo entre el bastidor superior del escudo y el frente de carbón, así como el tiempo que

éste intervalo permaneciese abierto libre de ser sostenido. Este punto no fue posible poder definirlo con más detalle y precisión recomendándose para ello una labor de consulta a más largo plazo, que el permitido por nuestros contactos actuales.

La recomendación de los tajos cortos en dirección desfasados, abogaba aún más en la no utilización de pilares. La galería superior de un tajo, debía de permanecer abierta para ser utilizada como galería de cola del tajo siguiente (más alta en la capa) que venía desfasada. La presencia de pilares, machacaría totalmente las galerías, haciendo imposible la explotación de los tajos - más retrasados.

Cabría todavía definir otro punto muy importante en cuanto a la explotación de los tajos cortos desfasados, y era si estos deberían de llevarse en "soutirage" partiendo desde el muro de la capa, y hundiendo los 8 metros de carbón, o bien, llevando los tajos por pasadas de 2,3 m. de potencia, iniciándolos en la proximidades del muro, y continuando con sucesivas pasadas hasta acabar con la potencia del carbón. En éste punto, y con el fin de minimizar la perturbación de los acuíferos del techo, era evidente que el "soutirage" iba a crear una fuerte y rápida deformación y ruptura de acuíferos, al extraer y producir el hundimiento rápido de los 8 m. de carbón, por el contrario el llevar los tajos por pasadas de 2 - 3 m, empezando por las proximidades del techo, producirían unas perturbaciones en las rocas del techo más suaves, y menos intensas que con el "soutirage", aunque a la larga el volumen de deformación sea el mismo, pero ya en unas condiciones en las que los techos han sido en gran parte drenados y consolidados por las pasadas anteriores.

Es recomendable pues, desde el punto de vista geomecánico ensayar la explotación por tajos cortos desfasados en dirección,

por pasadas sucesivas de arriba a abajo de 2-3 m. por ser la que menos repercusión tiene en los acuíferos. En éste sentido las experiencias anteriores de la empresa minera puede ser muy provechosa.

Esta explotación por pasadas, favorecía también a la autocombustión y a la provocación de incendios del carbón, gran problema éste también presente en Andorra. El "soutirage" dejaba una gran cantidad de volumen de carbón fracturado hundido, con un intervalo largo de extracción, favoreciendo la oxidación del mismo y su autocombustión, aunque este efecto está condicionado a la velocidad de la explotación. Obviamente también es favorecedor en la prevención de incendios la minería en retroceso, por lo que este tema no se acometió y se afirmó en la conveniencia del mismo tal y como se estaba desarrollando en Andorra.

Otro aspecto importante en la marcha de los tajos, era la velocidad de avance, que era necesario definir al menos cualitativamente. En este sentido se abogó por avances lentos, con el fin de evitar un rápido desarrollo de la fracturación en las rocas del techo y consecuente entrada de agua, esto por su parte podría traer inconvenientes para la entibación de los tajos, ya que las pilas, escudos o las mamostas podrían clavarse en el suelo de los tajos, sin embargo esto no iba a ser así, ya que los avances lentos a que se referían nuestros interlocutores alemanes, eran del orden de 2 m. diarios, un autentico máximo para las operaciones realizadas por ahora, en nuestras condiciones. Este avance podría dar una producción de 450 t/día por tajo corto, equivalente a 900 t/día por tajo largo de 120 m.

En principio la producción con tajos cortos de la forma expuesta conllevaría mayor mano de obra y un aumento en este sentido de estos gastos, incidiendo necesariamente en la productivi-

dad y en definitiva en el coste total de explotación. El balance entre ambos aspectos debería ser valorado antes de tomar ninguna decisión operativa.

El conjunto de recomendaciones aquí recogidas de nuestras reuniones en el Bergbau-Forschung, de Essen (RFA), deben de tomarse como grandes líneas maestras o directrices estratégicas en la organización de la producción de los tajos en lignitos de Andorra.

Su cuantificación, previsión y afino de muchos otros aspectos, relacionados con la explotación, como tipo de entibación de los tajos, fortificación específica de galerías y cruces con tajos etc, son aspectos que aunque se han comentado en los capítulos anteriores como más favorables en forma general, al nivel desarrollado por este estudio, se encuentran fuera actualmente del marco - los objetivos del mismo.

Con el objeto de poder en un futuro próximo, continuar estos estudios, optimizando con más detalles el sistema operacional de las minas de Andorra, partiendo de las líneas maestras aquí expresadas, nos pusimos en contacto con MONTAN CONSULTING, empresa consultora, que utiliza los servicios de miembros de Bergbau-Forschung y a proyectos a más largo plazo y de más profundidad, ya que el Bergbau-Forschung, como tal no puede hacer esta labor. Montan Consulting, como ya hemos comentado es la oficina comercial internacional del Bergbau-Forschung, y en este sentido nos entrevistamos con H. Rehpohler al cual le explicamos la situación actual y las posibles acciones a desarrollar en el futuro, ofreciendonos su colaboración junto con miembros del Bergbau-Forschung, para el análisis e implantación de las mismas en la minería subterránea - de lignitos de Andorra.

En el Desarrollo de este estudio, hemos podido observar como un problema de subsidencia superficial, en principio con pocas repercusiones dada la infraestructura de superficie de las Minas de Andorra, conlleva consigo una compleja actividad en la Mecánica de los Estratos que gravitan sobre la explotación, dando lugar esta subsidencia a "Subproductos", como entradas de agua entibación de tajos, fortificación de galerías, avances en los frentes, autocombustión, etc que conducen a una necesidad del mismo sistema de explotación, tal y como hemos expuesto.

Este hecho nos muestra la tremenda incidencia operativa a que puede dar lugar, fenómenos geomecánicos aparentemente no muy significativos, como la subsidencia superficial aquí detectada.

5.- BIBLIOGRAFIA

- Berry, D.S. "A Discussion of the "Stochastic" theory of ground movement". Rock Mechanics, II63-4, 1964.
- Berry, D.S., Sales, T.W., "An elastic treatment of ground Movement due to Mining" II Transversely Isotropic ground, Jr. - Mech. Phy. Solids, 9, 1961.
- Berry, D.S. Sales, T.W., "An elastic Treatment of ground Movement due to Mining" III. Three Dimensional Problem, Jr. Mech. Phy. Solids, 10, 1982.
- Blades, M.J., G, "Anhydrite Packing in the Ruhr Coalfield", Colliery, Guardian, April 1974.
- Blake, R.W., "Application of the Finite Element Method of Analysis in solving boundary value problems in Rock Mechanics;" Int. Jr. Rock. Mech. Min. Sci., 3, 1966.
- Brauner, G, "Subsidence due to Underground Mining", IC 8571, U. S. Bureau of Mines, 1973.
- Dahl, H.D., Choi, D.S "Some Cases Studies of Mine Subsidence and its Mathematical Modelling", 15 th U.S. Rock Mech. Symp, South Dakota School of Mines, 1973
- Daunesse, C., Rambaud, Y., "Les affaisements manier dans le bassin du Nord et du Pas-de-Calais", Annales des Mines, 152, 1963.
- Everling, G., Jacobi, O, "Rock Pressure and Design of Mine Layouts" 6 th. Int. Strata Control. Conf., Banff, Canada, 1977.

- Everling, G., "Applications of Rock Mechanics in Deep Coal Mines in west Germany", 3rd Int Cong. Rock Mech., Denver, Colo, 1974.
- Grotowsky, U, "The Strata Control System and its application in West German Coal Mining", 7th Int. Strata Control Conf., Liege Belgium, 1982.
- Hackett, P., "An Elastic Analysis of Rock Movements caused by Mining", Trans. Inst. Min. Eng. 118, 1959.
- Hahn, L. "Recent Developments of Face Supports", 6th Int. Strata Control Conf., Banff, Canada, 1977.
- Irresberger, H., "Strata Control in the Face", Gluckauf, Jun. 1981.
- Irresberger, H., "Improved Roof Control in the Face, Gluckauf June 1981.
- Irresberger, H., "New Planing Models for Winning, Roadway and Face Support", 7th Int. Strata Control Conf. Liege, Belgium, 1982.
- King, H.J., Whetton, J.T. "Mechanics of Mining Subsidence", Colliery Engineering, 35, 1958.
- King, H.J. Whittaker, B.N. Shadbolt, C.H. "Effects of mining subsidence on surface structures", Minerals and the Environment, Int. Symp, London, 1974.
- Litwiniszyn, J., "Application of the equation of stochastic

processes to mechanics of granular "bodies", 9 th. Int. Congr. Appl. Mech., Brussels, 1957.

- Litwiniŝzyn, J., "Statistical Methods in the mechanics of granular bodies", Rheological, Acta 1, 1958.
- Litwiniŝzyn, J., "On certain linear and nonlinear strata theoretical models", 4 th. Int. Conf. Strata Control, New York, - 1964.
- Obert, L, Duvall, W.I., "Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock", Wiley Sons, New York, 1967.
- Pariseau, W, G. "Plasticity theory for Anisotropic Rock and Soils", 10 th U.S. Symp. Rock Mech, Austin, Texas, 1969.
- Shippam, G.K., "Numerical Investigation of Elastic Behavior around longwall extractions", Ph. D. Thesis, University of Nottingham, 1970.
- Stacey, T.R., "Three-dimensional finite Element Stress Analysis applied to two problems in rock mechanics", Jr. South African Inst. Min. Met., 72, 1972
- Sweet, A.L., Bogdanoff, J.L., "Stochastic Model for Predicting Subsidence" Jr. Eng. Mech. Div. ASCE, 91, 1965.
- Trollope, D.H., "Underground excavations in deep borings". 1 st. Int. Congr. Rock. Mech. Lisbon, 1966.
- Voight, B., Pariseau, W., "State of Predictive art in Subsidence engineering, Jr. Soil Mech., Found, Div., ASCE 96, 1970.

- Whetton, J.T., King, H.J. "Mechanics of Mine Subsidence" European Congr. Ground Movements, University of Leeds, 1957.
- Wilson, A.H., "Various Aspects of Longwall Roof Supports", Colliery Guardian, April, 1958.
- Whittaker, B.N., Woodrow, G.J.M., "Design Loads for gateside packs and support Systems" Mining Engineer, Febr. 1977.
- Zienkiewicz, O.C., Cheung, V.K., Stagg, K.G., "Stresses in anisotropic media with particular reference to problems of rock mechanics", Jr. Strain Analysis 1, 1966.