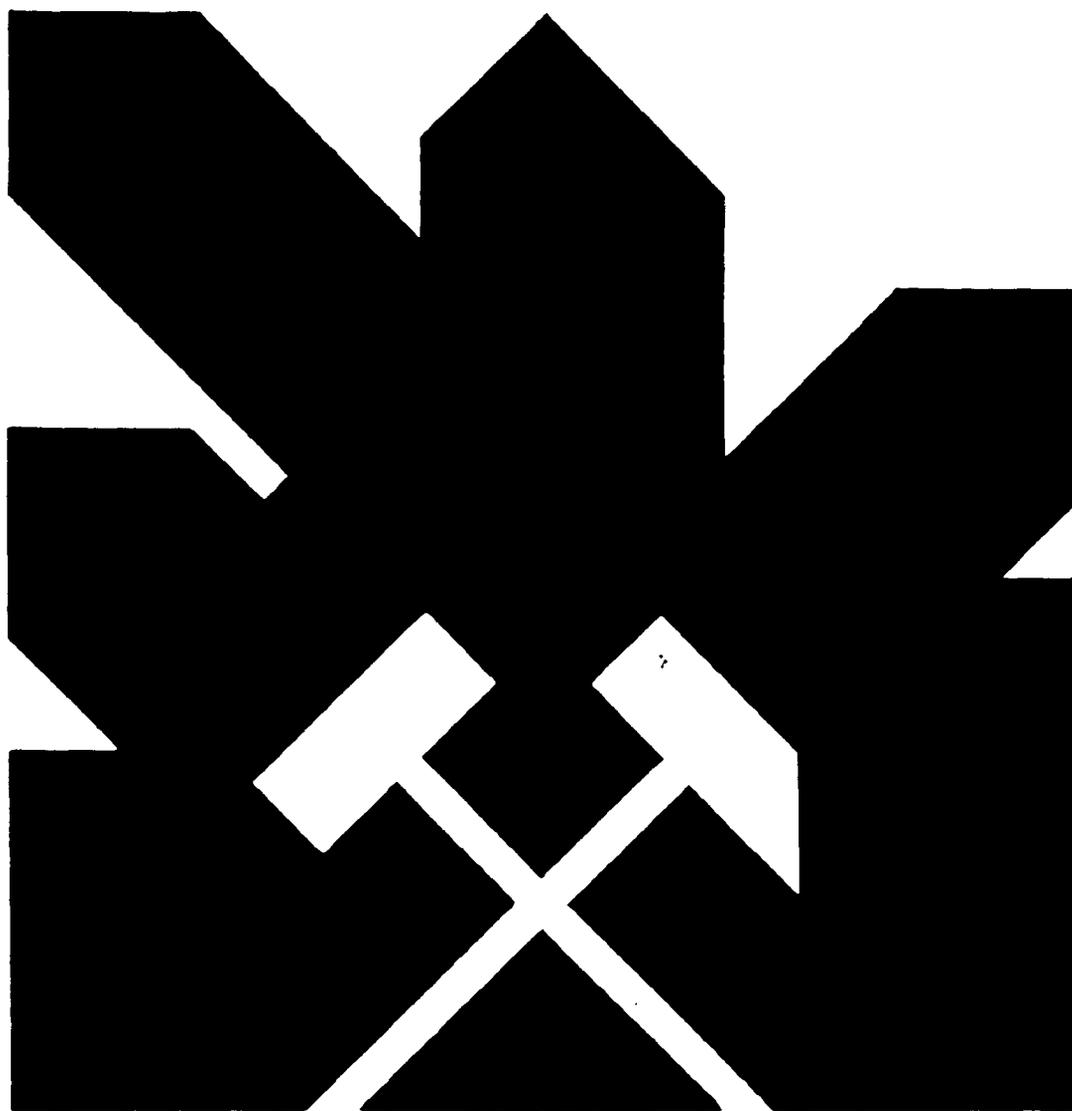


MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA
SECRETARIA DE LA ENERGIA Y RECURSOS MINERALES

INVESTIGACION GEOMECANICA DE
DEFORMACIONES GRANDES Y SU CAUSALIDAD
Y DISEÑO DE LABORES MINERAS
BAJO LAS MISMAS

Vol. I MEMORIA



1 INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

Diciembre 1983

00791

INVESTIGACION GEOMECANICA DE DEFORMACIONES
GRANDES Y SU CAUSALIDAD Y DISEÑO DE LABORES
MINERAS BAJO LAS MISMAS

Este trabajo ha sido realizado por la División de Geología Aplicada a la Ingeniería del Instituto Geológico y Minero - de España (IGME), en regimen de convenio con la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A., (ENADIMSA) con la participación de:

Por parte del IGME:

- D. José María Pernía Llera. Director del Estudio

Por parte de ENADIMSA:

- D. Antonio J. Campos de Orellana Pardesa. Jefe del Proyecto.

- D. José Luis Herrera

- D. Juan Herrera

- D. José Barbero

- Dña. Julia Saint-Aubin

Asímismo han colaborado en la realización los señores, J.A. Manrique y L. Osorio de la Empresa Nacional Carbonífera del Sur (ENCASUR).

INDICE

	<u>Págs.</u>
1.- INTRODUCCION	1
1.1.- ANTECEDENTES	2
1.2.- JUSTIFICACION DEL PROYECTO	3
1.2.1.- Necesidad y utilidad del Proyecto ...	3
1.2.2.- Justificación del Proyecto dentro de los planes nacionales y del plan de actividades del IGME	3
1.2.3.- Resultados que se esperan alcanzardel Proyecto	4
1.3.- OBJETIVOS DEL PROYECTO	5
1.4.- AREA DE ESTUDIO	6
1.5.- PLAN DE TRABAJOS	8
1.6.- AGRADECIMIENTOS	8
2.- DEFINICION DEL PROBLEMA	10
2.1.- PROBLEMÁTICA	11
2.2.- SECUENCIA HISTORICA	13
3.- VALORACION DEL PROBLEMA	19
3.1.- DIAGNOSTICO PRELIMINAR	20
3.2.- COMPLEJIDAD DEL PROBLEMA.....	23
4.- PLAN DE ACCION	25
4.1.- CRITERIOS	26
4.2.- ANALISIS GEOLOGICO ESTRUCTURAL	26
4.2.1.- Análisis Estructural Regional	27
4.2.2.- Análisis Estructural de Area	27

	<u>Págs.</u>
4.2.3.- Análisis Estructural Local	28
4.3.- ANALISIS CON DILATOMETRO	29
4.3.1.- Características Elásticas	29
4.3.2.- Anisotropía	30
4.3.3.- Comportamientos Plásticos. Análisis - de Carga y Descarga	30
4.4.- ANALISIS DE LABORATORIO	30
4.4.1.- Resistencia a la Compresión Uniaxial.	31
4.4.2.- Densidades	31
4.4.3.- Cohesión y Fricción Interna	31
4.4.4.- Análisis Mineralógico (Rayos X)	32
4.5.- MEDIDAS DE TENSIONES IN-SITU	32
4.6.- ANALISIS MICROSISMICO	34
4.7.- COMPORTAMIENTO TIEMPO-DEPENDIENTE (VISCO-ELAS- TICIDAD). ENSAYOS DE FLUENCIA TRIAXIALES	36
4.8.- ZONIFICACION GEOTECNICA DE LOS MATERIALES GEO- LOGICOS DEL MURO DE LA CAPA	38
4.9.- ANALISIS NUMERICO POR ELEMENTOS FINITOS	41
4.9.1.- Modelo General de la Estructura Mine- ra	41
4.9.1.1.- Condiciones de Contorno de la Estructura General	41
4.9.1.2.- Análisis de sensibilidad ..	45
4.9.2.- Localización de la galería de arras- tre	47
4.9.2.1.- Modelo Reducido Elasto-Plás- tico	47
4.9.2.2.- Análisis de la posición l - (primitiva de la galería)..	47
4.9.2.3.- Situación óptima de la gale- ría	52
4.9.3.- Diseño de la entibación	62
4.9.3.1.- Definición del problema ...	62
4.9.3.2.- Modelo Estructural. Crite- rios	62

	<u>Págs.</u>
4.9.3.3.- Análisis de Sensibilidad - del Espaciamiento	65
4.9.3.4.- Análisis de Tipos de Cuadro	65
4.9.3.5.- Análisis del tipo de perfil	66
5.- CONCLUSIONES	67
6.- RECOMENDACIONES	70
7.- BIBLIOGRAFIA	73

1.- INTRODUCCION

1.1.- ANTECEDENTES

El problema de las grandes deformaciones experimentadas en los huecos subterráneos y, específicamente, en las labores mineras en ciertos ámbitos geológicos requiere una previa y atenta consideración de las condiciones bajo las cuales se manifiestan aquéllas. En realidad, la Geomecánica está hoy dotada de la herramienta conceptual y práctica que permite una relativa aproximación a las mismas y, consecuentemente, su, en buena medida, identificación objetiva.

Aunque esta identificación no sea la exacta y cabal que sería de desear, sí va a permitir, en cualquier caso, la elaboración de criterios con que afrontar la inserción de una explotación minera en un ámbito en que, potencialmente, se registre una concentración elevada de tensiones, traducible en las aludidas deformaciones; específicamente, criterios con que abordar la disposición o localización de las labores, su diseño y hasta la estrategia de su ejecución.

Todo ello redundable en una contribución a la optimización técnica y económica de la explotación, en una seguridad mayor en las condiciones de trabajo personal y en una protección, obligada, del medio exterior en que, eventualmente, puede tener repercusión los efectos de laboreo.

En España no se han efectuado, que se sepa, estudios de

determinación de estos campos de esfuerzos regionales y locales orientados básicamente a: 1) la investigación de configuraciones anómalas de los mismos -concentraciones de tensiones residuales, por ejemplo- y la problematización de la apertura y conservación de excavaciones y huecos mineros; 2) la neutralización o remedio de estas operaciones problematizadoras.

1.2.- JUSTIFICACION DEL PROYECTO

1.2.1.- Necesidad y utilidad del Proyecto

Al instalarse en un yacimiento de carbón la localización del ámbito en que debe desarrollarse el Proyecto, resulta evidente la adecuación de la asignación de recursos que éste entraña con las necesidades planteadas en el sector energético y, concretamente, en el del carbón, sector urgido de una rápida puesta en activo de sus recursos ante el imperativo de disminuir al mínimo posible la dependencia energética de España.

Pero esta potenciación de los recursos energéticos y de sacentación de la dependencia de recursos exteriores debe, obviamente, efectuarse con el menor coste posible: la adopción de las conclusiones del Proyecto en el proceso de diseño y en la conducción de la explotación va a significar una mejora del sistema conjunto, aún en el caso de que la implantación de soluciones afecte sólo a subsistemas parciales del conjunto.

1.2.2.- Justificación del Proyecto dentro de los planes nacionales y del plan de actividades del IGME

La necesidad existente de cargar sobre el carbón gran parte de la responsabilidad del consumo energético primario y de atender a las circunstancias concretas de los yacimientos y

explotaciones respalda el propósito del Instituto Geológico y Minero de España de acometer un estudio geomecánico de las deformaciones grandes, y de su causalidad, de un lado, y, de otro, el diseño de labores mineras bajo las condiciones de estas deformaciones grandes, considerándose simultáneamente la conveniencia de situar este estudio en la Cuenca del Guadiato -provincia de Córdoba- por estimarse que en las explotaciones de hullas y antracitas de esta Cuenca se dan las circunstancias de que precisa la investigación o estudio propuesto, contribuyéndose, de paso, a facilitar la puesta en juego de importantes recursos - carboníferos para el país y para la provincia en cuestión: la pretensión de implantar una galería general de arrastre -por ejemplo-, de imperativa disponibilidad para una explotación racional, se ha visto permanentemente obstaculizada por las presiones presentes y las grandes deformaciones generadas, culminantes siempre en la ruina de la labor cuestionada y en la imposibilidad de proseguirla.

1.2.3.- Resultados que se esperan alcanzar del Proyecto

Los resultados de este Proyecto deben redundar en una importante contribución al conocimiento de la configuración de - los esfuerzos tectónicos y sus operaciones sobre los huecos o labores, básicamente de los esfuerzos residuales potencialmente presentes en la zona donde se ha decidido centrar el estudio, inferible de las manifestaciones exhibidas por las labores mineras allí insertas.

Pueden ser muy reveladores estos resultados en el cuadro de una estrategia metodológica con que afrontar problemas similares en otras latitudes de nuestra minería y ayudar así a la solución de problemas cuya causalidad no se ha identificado aún en la mayoría de los casos.

La seguridad de definir criterios o directrices con que operar en los trabajos de diseño y explotación es, desde un ángulo práctico, un resultado imperativamente subseguible del Proyecto en cuestión.

Dada la interrelación de los distintos elementos de un sistema de explotación, dispuesto en un ámbito geológico caracterizado por ciertas regularidades como suele ser el de estos yacimientos tabulares de carbón, la investigación considerada debe traducirse, al final de la misma, en un tratamiento global y eminentemente dinámico de la evolución de la explotación y su influencia sobre las restantes labores.

1.3.- OBJETIVOS DEL PROYECTO

Los objetivos del estudio proyectado estriban, prioritariamente, en:

- Identificar las interrelaciones potenciales de la explotación "sensu stricto" con las restantes labores del sistema de explotación.
- Elaboración de criterios para el establecimiento de las secuencias de explotación y/o programas de construcción de las labores en cuestión.
- Definir los niveles adecuados para la disposición de labores mineras: galerías, transversales, etc.
- Dimensionamiento y fortificación pertinentes: secciones, tipo, espaciamiento, especificaciones, etc.

Secundariamente, pero no menos trascendente no sólo para la zona en cuestión sino para muchas otras explotaciones mineras:

- Definición del campo de esfuerzos tectónicos regionales y, en función de las singularidades introducidas por las estructuras de la zona en consideración, orientación tentativa del elipsoide de tensiones.

- Establecimiento de relaciones de carácter geotécnico - que vinculen estos sistemas de esfuerzos regionales y locales con la creación de huecos subterráneos y la mecánica operativa de su ejecución.

Resulta evidente que el logro de estos objetivos va a incidir en la disponibilidad, en la zona, de mayores recursos - carboníferos a costes económicamente asimilables al posibilitar se la implantación de sistemas técnicamente viables, hecho hoy contradicho por las dificultades ofrecidas por el medio geológico: caso de las galerías de arrastre o el de ciertas modalidades del laboreo puestas en entredicho por la incertidumbre de las respuestas geotécnicas de este medio.

1.4.- AREA DE ESTUDIO

El estudio se acometerá en la Cuenca del Guadiato, concretamente en el ámbito correspondiente al pozo San José, interesando probablemente al del pozo Cervantes: desde los pisos superiores las galerías de arrastre han tenido problemas graves de conservación y, en el nivel 325 -cota de profundidad-, todos los empeños de disponer de una galería tal han fracasado : las presiones del terreno y, en especial, las del piso y las laterales han arruinado este empeño, al operarse en dirección, según la disposición de las capas.

Por otro lado, no resulta posible sin una cierta investigación establecer la existencia de unas interacciones entre las

labores de consecución de estas galerías y la evolución de los tajos de la explotación: objetivos también, como se ha visto , del estudio.

Las reservas de carbón en la zona de repercusión del estudio, de acuerdo con la última cubicación efectuada en 1979 , asciende a unos 16,5 Mt.

El yacimiento se sitúa en la ya citada Cuenca del Guadiato y, por tanto, en la parte de las Mariánicas Occidentales. Data del viseense - westfaliense, con sedimentación muy irregular del tipo fluvio - lacustre, con movimientos singenéticos de diferente alcance. Posteriormente, en etapas diferentes, la serie carbonífera experimentó diversas sollicitaciones tectónicas adoptando una disposición sinclinal con grandes fallas inversas, seguidas, a su vez, de otros avatares de descompresión y fractura o fallamiento.

En conjunto: irregularidad y heterogeneidad de las condiciones geológico-mineras originadas por trastornos de operaciones, a su vez, muy diferenciadas.

Las capas alcanzan hasta más de los 30º de pendiente, disponiéndose, a veces, ya verticalmente ya horizontalmente. Los techos y muros consisten en pizarras, de competencias muy diversas: se requiere una identificación cabal de las mismas así como de sus propiedades mecánicas. También se da la existencia de conglomerados y hasta de pórfidos, con presencia registrada en el muro de las propias capas de carbón. Debe tenerse en cuenta el proceso de metamorfismo que originó las actuales antracitas de la zona específica de estudio del pozo de San José en consideración.

En cuanto al método de explotación, el normalmente utilizado consiste en el trazado de capa de unos niveles horizontales -galerías de cabeza y base- que se comunican entre sí mediante rampas inclinadas -unos 30º cada 70-150 m- , según los casos. Con explosivos y a través de una suerte de souritage, el carbón va por gravedad al nivel inferior de donde, por transportador, va a las rampas y galerías de base, respectivamente; de aquí, lógicamente, a las galerías de arrastre general hacia los pozos, situados, en general y en lo posible, al muro de las capas para evitar incendios y los mayores costes de conservación de toda la galería en carbón.

1.5.- PLAN DE TRABAJOS

El plan de trabajos -de una duración de tres años- vertebrado para la materialización de los objetivos propuestos es el que, concisamente, se describe a continuación, plan consciente de que se dan en su desarrollo, forzosamente, puntos críticos en los que debe prestarse concreción a las fases siguientes presuntas de la investigación. Dado, por otro lado, la complejidad de los objetivos propuestos, el estudio ha de extenderse a lo largo de tres años, debiendo definirse al final del 1^{er} año, a partir de la información colectada y de su pertinente tratamiento y análisis, las actuaciones necesarias para el 2º año, intuidas desde la perspectiva presente pero no susceptibles de un diseño concreto. Igualmente, a finales del 2º año -1982- en relación a los trabajos requeridos para el 3^{er} año.

1.6.- AGRADECIMIENTOS

A lo largo de los tres años de este proyecto, quisiera agradecer la colaboración prestada en el desarrollo de los mismos, en especial a:

- D. José María Pernía Llera, del Instituto Geológico y Minero por la facilitación y adecuación a las necesidades que este proyecto ha experimentado durante su desarrollo.
- D. Juan Ignacio Artieda, Presidente de ENCASUR, por su interés en el desarrollo de estos trabajos.
- D. José Antonio Manrique y D. Longinos Osorio, Director de Minas y Jefe del Pozo San José de ENCASUR en Peñarroya, por sus múltiples ayudas, colaboración, asistencia e información, que han sido necesarias en múltiples facetas de este proyecto.
- D. Juan Herrera, D. José Luis Herrera, D. Juan Barbero y a la Srta. Julia Saint-Aubin de ENADIMSA, por su valiosa colaboración y cooperación en aspectos específicos de este estudio.
- D. Mario Xavier de Faría, representante del Laboratorio Nacional de Enghenaria Civil de Lisboa, por su eficiente colaboración en la organización y planificación de los trabajos con dicha institución.
- A nuestra Secretaria Angela Rubio por su paciente labor en la mecanografía de todo el informe.

A todos muchas gracias les son debidas.

2.- DEFINICION DEL PROBLEMA

2.1.- PROBLEMATICA

En el pozo S. José que la Compañía ENCASUR explota en las proximidades de Peñarroya, Córdoba; se decidió hace algunos años definir las labores y el programa de explotación del carbón de la capa Cervantes existente por debajo del nivel 325.

La Compañía intentó repetidamente la apertura de una galería a muro de la capa Cervantes con el objetivo de utilizarla como galería de arrastre de todo el mineral que se explotase por debajo del nivel 325.

Esta galería de arrastre de 9 m^2 de sección ha venido experimentando muy fuertes problemas de estabilidad con fuertes levantamientos del suelo de la galería y convergencias laterales, teniéndose que llegar al abandono de la misma.

La galería se había intentado abrir a unos 16 metros en sentido perpendicular a la capa, y curiosamente los problemas de estabilidad aparecían cuando la galería se encontraba en dirección es decir paralela a la capa, no así cuando tomaba una orientación transversal, perpendicular a la dirección de la capa.

Los perfiles de los arcos metálicos usados eran standards 2 UA (TH - 21), y no daban el resultado esperado para soportar las presiones originadas.

El problema planteado era el de definir la posición óptima de situación de la galería, al muro de la capa, si existía, de forma que se minimizasen las deformaciones y permitiese la apertura de la galería. Para ello era necesario hacer esta valoración para situaciones comprendidas entre los 5 metros y los 25 metros en dirección perpendicular a la capa. Situaciones fuera de este rango, según nos informó el personal directivo de la mina, no eran consideradas factibles por la empresa por razones técnicas y principalmente económicas, de alejamiento de la galería sobre la capa.

En segundo lugar, sería conveniente estudiar además de la ubicación óptima de la galería en el muro de la capa, el tipo de entibación que mejores resultados diese en términos de rigidez y minoración de deformaciones. Para ello se pensó de acuerdo con los intereses de la empresa minera, estudiar los efectos desarrollados al utilizar cuadros 2 UA (TH-21) ; 2 UB (TH-21) y (TH-29). Se trataría de definir cual de estos cuadros se ajustaba mejor a los condicionantes geotécnicos específicos de la galería de arrastre en su posición óptima, así como definir el tipo de espaciamiento entre cuadros, dentro de un rango lógico que se consideró entre 0.8 metros y 1.20 metros, con el fin de detectar la influencia de este factor en todo el sistema estructural de la galería.

A continuación exponemos una secuencia histórica de los fenómenos ocurridos de inestabilidad al intentar abrir la galería, tal y como ha venido ocurriendo en la mina.

7.2.- SECUENCIA HISTORICA

Se comenzó la excavación en el mes de Abril de 1976, efectuándose en ese mes 15,50 m lineales, trabajando a dos y tres relevos. La sección de excavación era de unos 9 m², con perfil tipo de 3,5 x 2,50 (h). El avance unitario era de un metro (1 m). Los barrenos promedio eran 3 ó 4 uds por m² y una vez desescombrado se colocaban los cuadros metálicos cada metro lineal de la forma que arroja la Fig. 1.

Los cuadros eran de 4 cuerpos, de perfil standard, - sin contrabóveda.

El terreno era del tipo de lutita masiva arenosa - que se fracturaba de forma cristalina y de manera instantanea en tamaños entre 10 y 20 cm.

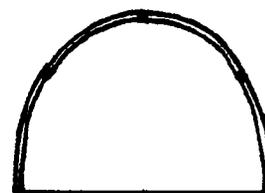


Fig. 1

Durante la excavación no se observaron ni fallas, ni pliegues importantes.

Las labores de recuperación eran fundamentalmente las de "banqueo", en base a un picado de la solera y pala mecánica.

A medida que la galería avanzaba y aumentaban los problemas, disminución ostensible de la sección, se introdujo un cuadro intermedio más.

Durante el mes de Mayo se avanzaron otros 27 m lineales más, llegándose a 42,50 m. Las características del trabajo y del terreno eran las mismas que la anterior.

Durante el mes de Junio se avanzaron 50 m lineales más en las mismas condiciones que los anteriores.

A partir del mes de Julio-76, se presentan problemas notables en la sección de la galería, que hemos representado en la Fig. n° 2. Se efectúa un banqueo de 35 m y un avance de 8,10 m.l. quedando en 100,60 m.l.

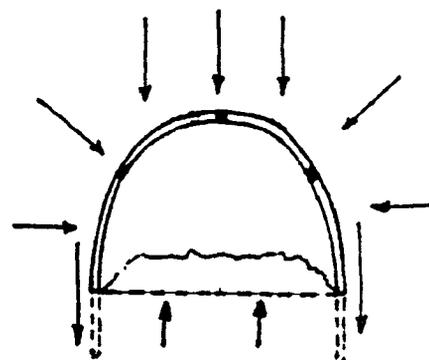


Fig. 2

Los problemas que se presentaron en la excavación de la galería, desde el principio de la misma hasta el abandono de las labores, fueron fundamentalmente de este tipo. En la Fig. n° 3 se hace una representación del terreno y de la estratificación en ese tramo de galería, que es sensiblemente paralelo a la misma y con buzamiento entre 19° y 22° S.

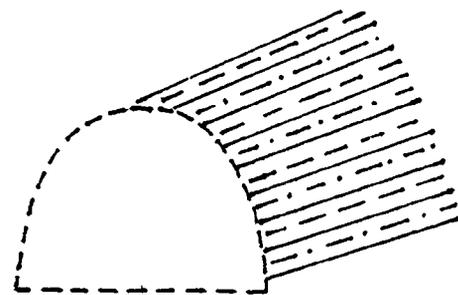


Fig. 3

Los empujes lógicos en un material con el buzamiento indicado tendrían que haber producido una deformación lateral del tipo que se representa en la Fig. 4. Pero prácticamente, salvo contadas excepciones, las deformaciones observadas se traducen a dos. Un empuje vertical descendente, manifestado en la clavazón de los cuadros

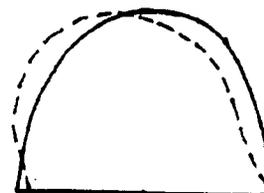


Fig. 4

metálicos, entre 10 y 90 cm y una elevación del terreno de la solera, vertical ascendente, de mayor o igual magnitud que el señalado antes.

En cuanto a la forma de manifestarse estas deformaciones, presentaron una secuencia del siguiente tipo. Una vez abierto un tramo se producían simultáneamente fracturaciones masivas de la roca, de manera instantánea, sin responder a un sistema de finido de diaclasas ó fracturaciones preexistentes. Estas fracturaciones concluían o al menos disminuían grandemente al cabo de unas decenas de horas, produciendo una ligera sobreexcavación y continuando a lo largo del tiempo sin mayor importancia. A medida que se atenuaban las fracturaciones comenzaban lentamente, y en algunos tramos a mayor velocidad, los dos tipos de deformaciones señalados antes, que poco a poco aumentaban sus efectos, agravados por la inundación de Febrero -77, hasta hacer imposible, aun aumentando al doble la densidad de cuadros metálicos, el mantenimiento de un perfil mínimo de galería y la continuación de la excavación de la misma.

Durante el mes de agosto -76, de disminuyeron el número de horas y relevos -vacaciones estivales- y solo se hicieron 25 m de banqueo de recuperación y 5,00 m.l. de avance, quedando la galería en 105,60 m.l. Los problemas de clavazón de cuadros y elevación de solera aumentaban paulatinamente.

En el mes de Septiembre-76, sólo se pudieron hacer labores de recuperación y banqueo en 25 m, quedando a finales de mes la galería más o menos saneada

En el mes de Octubre-76, se hicieron, con relevos normalizados 22,50 m.l. de avance, pero con los mismos problemas -apuntados anteriormente.

Durante el mes de Noviembre-76, se hicieron 33 m.l. de avance, quedando la galería en 160,60 m en total, pero con tan fuertes problemas en la sección tipo que se decidió abandonar la excavación en el ataque y comenzar por la zona Oeste a contra-ataque.

El el mes de Diciembre-76, se comenzó la excavación por el contraataque, a muro colindante con la traza de la capa Norte de Cervantes y con unas características muy similares a las apuntadas para el ataque. El terreno era prácticamente el mismo, aumentando ligeremante las fracciones de lutita de menor espesor en los bancos. En este mes de hicieron 30 m.l. de avance.

Durante el mes de Enero de 1977, se prosiguió la excavación de la galería en 20 m.l., haciendo un total de 50 m.l. ya durante este mes los problemas de la sección tipo eran graves y hubo que hacer una recuperación de 15 m.

Durante los meses de Febrero y Marzo-77, por otras razones que no vienen al caso, la mina permaneció inundada durante una gran parte del tiempo y prácticamente salvo algunas labores de recuperación y banqueo a finales de Marzo no se pudo hacer nada.

En Abril-77 se hicieron labores de banqueo en ambos avances por un total de 98 m.l., sin avanzar en ninguna de las galerías.

Durante el mes de Mayo-77, se continuó en el contraataque, efectuándose un avance de 35 m.l., con problemas en la sección tipo. La galería queda en 85 m.l.

En el mes de Junio-77, solo se pueden hacer 20 m de banqueo en el contraataque y se abandona la ejecución de la misma hasta la fecha.

Estos hechos y fenómenos observados nos llevan a poder - hacer las siguientes recapitulaciones:

- 1.- Todas las galerías en dirección (E-W) realizadas en esta zona de la mina presentaron en más o en menos este tipo de problemas.
- 2.- Hay que analizar los problemas que pueden derivarse por efecto de la inundación de la mina, (presencia de minerales arcillosos expansivos), pero también no olvidar que hubo que abandonar las labores de ataque estando la mina desde el punto - de vista de presencia de aguas en condiciones óptimas, sin ninguna existencia de humedad del terreno.
- 3.- Los cuadros metálicos, a nuestro juicio, se comportaron francamente bien al resistir y transmitir empujes, sin grandes - deformaciones parciales ostensibles; aunque evidentemente los fuertes levantamientos de la solera de la galería producían las complicaciones comentadas en los cuadros.
- 4.- Los empujes, en gran parte importantes en direcciones paralelas a la capa (convergencias laterales observadas), terminaron absorvidos por las cerchas, dando una componente vertical que agravaba el fuerte levantamiento del suelo de la galería.
- 5.- Los fenómenos de inestabilidad se manifestaban de dos formas o modos:
 - a) Fracturación con instantánea de las paredes de la galería, conducentes a ligeras sobreexcavaciones, y que desaparecían al cabo de unas horas, sin mayor importancia.

b) A medida que desaparecían las fracturaciones anteriores, iban apareciendo las fuertes deformaciones laterales y de levantamiento del piso a lo largo del tiempo, indicándonos una componente en el mecanismo de deformación de tipo plástico y tiempo-dependiente (viscoelástico) que habría que investigar y definir.

3.- VALORACION DEL PROBLEMA

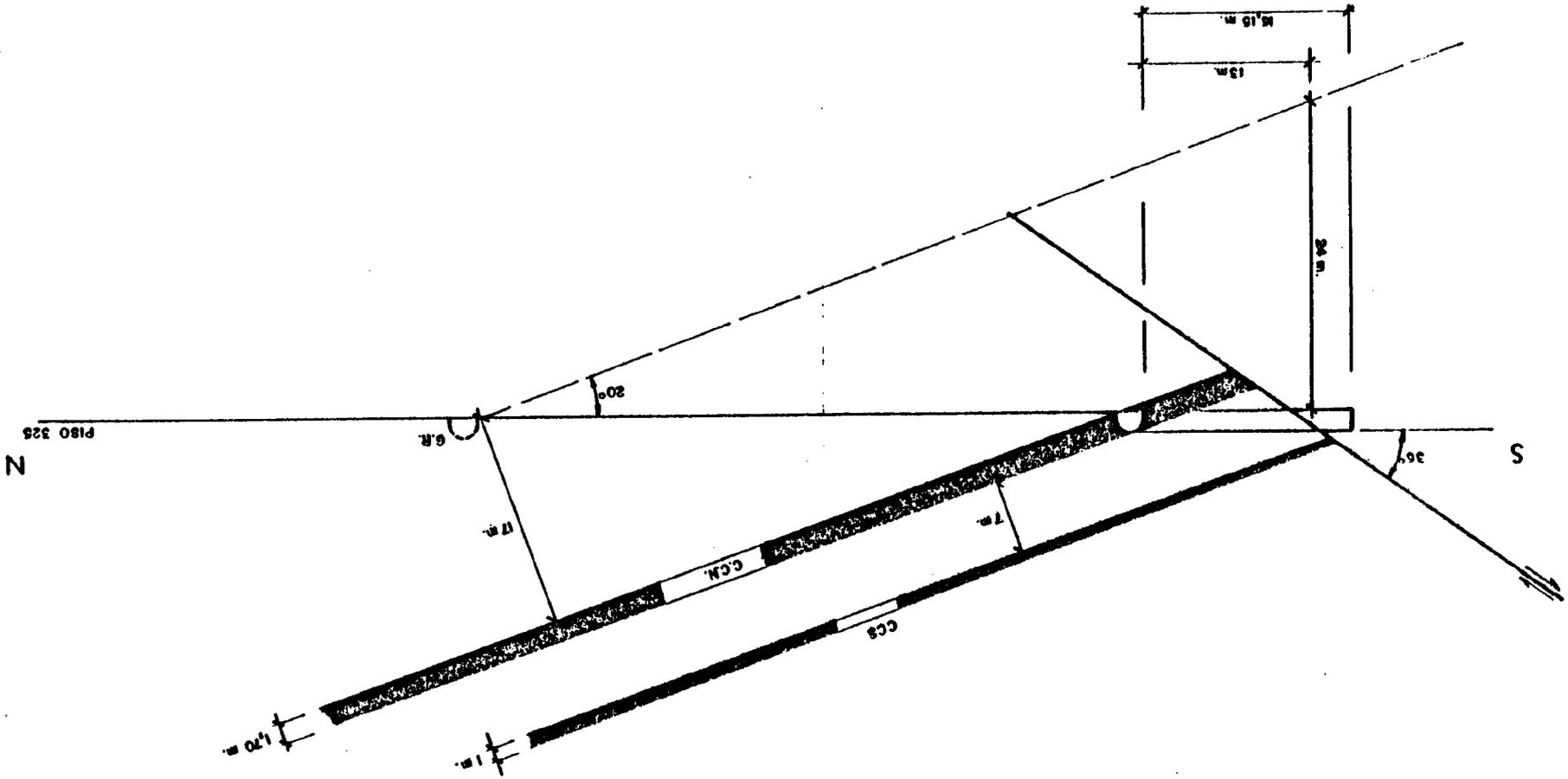
3.1.- DIAGNOSTICO PRELIMINAR

La fracturación inmediata inicial observada al abrir la galería de arrastre al muro y la sobreexcavación a que daba lugar, y teniendo en cuenta que nos encontrábamos por debajo de una capa explotada, hasta el piso 325, con la consiguiente descarga de tensiones verticales a que esta configuración daba lugar (Fig. 5), nos hacía pensar en la presencia de fuertes tensiones horizontales de origen tectónico asociado al plegamiento de la estructura (sinclinal), o residual, de forma que originase una fuerte concentración de tensiones inducidas asociadas a la apertura de la galería, dando lugar a la fracturación rápida del material circundante a la galería, por rebasamiento de la capacidad resistente de estos materiales.

Por otro lado, la deformación irre recuperable en el tiempo y las fuertes convergencias laterales y levantamiento de la so lera de la galería, nos llevaba a tener que estudiar las características de un comportamiento elasto-plástico y visco-elástico (tiempo dependiente) de los materiales del muro de la capa de carbón, con el fin de encontrar una posición óptima en que las características de los materiales nos minimice las deformaciones experimentadas por la galería.

Por otro lado podría haber un efecto empeorante de la situación, si hubiese existencia de materiales arcillosos en las pizarras de muro de carácter expansivo (montmorillonita), que -

Figura nr 5



con la presencia de agua diese lugar a fuertes deformaciones . Esto sería un agravante a la situación, la cual claramente manifestaba de por sí un fuerte estado tensional por la ruptura instantánea de la roca que formaba las paredes de la galería.

Teníamos en definitiva que analizar la estabilidad de una galería en las pizarras del muro de la capa de carbón, en las siguientes posibles condiciones a analizar.

- a) Estado tensional atípico. Posibles fuertes tensiones horizontales.
- b) Influencia de la geología estructural de la región, del área y de forma local en la mina sobre este estado tensional.
- c) Influencia de la estructura geológica de los materiales en el problema de estabilidad. Cosa no probable dado el fuerte comportamiento plástico y visco-elástico que aparentemente presentaban los materiales que constituían el entorno de la galería.
- d) Comportamiento elasto-plástico de las pizarras del muro, hasta una profundidad de 25-30 metros (entorno posible de ubicación económica de la galería) por debajo de la capa.
- e) Comportamiento tiempo-dependiente de los mismos materiales - del apartado (d), para conocer sus características visco-elásticas.
- f) Grado de falta de homogeneidad en las pizarras de muro, en cuanto a sus características geomecánicas, y su influencia en las condiciones deformantes.

- g) Anisotropía de los materiales del muro, tanto en un plano horizontal como en planos verticales.
- h) Interacción de capas explotadas ("efecto paraguas") en el estado tensional en la zona de situación de la galería, esto es geometría no convencional.

3.2.- COMPLEJIDAD DEL PROBLEMA

Todos estos aspectos que se manifestaban o que podían estar actuando e incidiendo en el comportamiento de las galerías, debían de ser analizados y estudiados, con el fin de evaluar su incidencia en la estabilidad de las galerías y el comportamiento de la entibación.

En principio y aunque solo parte de los supuestos enumerados se confirmasen, la existencia posible de un estado tensional atípico, de una falta de homogeneidad en los materiales del muro de la capa, el comportamiento elasto-plástico y visco-elástico de los mismos, la posible anisotropía horizontal y vertical, la interacción de capas explotadas y la geometría poco convencional de la estructura o arquitectura minera, nos estaba - llevando forzosamente a la necesidad de un análisis del problema mediante métodos numéricos con el soporte informático de ordenadores de gran capacidad capaces de tratar programas numéricos de Elementos Finitos de grandes estructuras, con comportamientos no lineales y tiempo - dependiente.

No creemos que nunca se halla presentado en nuestro país un problema de geotecnia minera, con la complejidad que este caso presentaba en principio, a falta de confirmar por una instrumentación y un programa de consecución de datos geotécnicos apropiados; y en el que se ha tratado de utilizar las técnicas más

modernas de análisis y diagnóstico existentes en el momento.

El proceso aquí desarrollado tanto en las técnicas de diagnóstico como en el análisis de la estabilidad estructural de la galería y el dimensionamiento y definición de su entibación, pueden perfectamente considerarse típico y perfectamente aplicable como metodología general en el estudio de estabilidad de labores subterráneas con materiales no-líneales y tiempo-dependientes tan frecuentes y normales en la minería del carbón y en general en la de todos los yacimientos sedimentarios.

4.- PLAN DE ACCION

4.1.- CRITERIOS

Una vez definido el diagnóstico y la complejidad del problema, se hacía evidente que los criterios a que teníamos que ajustarnos para establecer el plan de acción, dada la posible existencia de tensiones horizontales atípicas y de comportamientos elasto-plásticos y viscoelásticos, era el centrarnos de entrada en el análisis de estos temas y como medida preliminar sería el análisis geológico-estructural de la zona con el fin de definir la posible incidencia de la configuración estructural en el estado tensional del terreno y en el mecanismo de fracturación, deformación y colapso de la galería.

Para ello comenzamos con un estudio general de la historia geológica de la región, que aparece detallado en el Anexo 1 del volumen de anexos que acompaña a esta memoria. En ella se recogen las distintas evoluciones orogénicas y tectónicas, que pudieran influir o hallan influido en la estructura geológica - que se aprecia actualmente a niveles regionales en la cuenca del Guadiato.

4.2.- ANÁLISIS GEOLOGICO ESTRUCTURAL

Este análisis se dividió su estudio a tres niveles distintos, regional, de área y local en las mismas labores del pozo San José; con el objeto de ir pasando desde una visión "macro" del tema a una escala "micro", entendiendo por "micro",aque

llos aspectos estructurales detectables a nivel de galerías y labores subterráneas.

4.2.1.- Análisis Estructural Regional

En el Anexo 2 de este trabajo, se encuentra todo este aspecto del proyecto, incluyendo un estudio de la litología, estratigrafía, discontinuidades y fallas principales, pliegues, fallas longitudinales y fallas transversales que están afectando a todo lo que se conoce como cuenca del Guadiato, haciéndose especial hincapié en la dinámica estructural del sistema, esto es tratar en lo posible de definir el sentido de los desplazamientos de las fallas más significativas.

4.2.2.- Análisis Estructural de Area

Se hizo un estudio semejante al anterior, pero de más detalle concentrándonos en la zona de Peñarroya-Pueblonuevo, e igualmente recogido en todos sus aspectos en el Anexo 2.

Los materiales son todos paleozoicos y comprendidos en los pisos: Devoniano Inferior/Superior, Viseano Medio/Superior, Namuriense y Westfaliense B; con materiales que variaban desde brechas hasta pizarras (lutitas) pasando por conglomerados y areniscas; si bien a techo y a muro de la capa Cervantes son todo pizarras (masivas, tableadas y hojosas) y algunos muy reducidos estratos de areniscas.

En cuanto a los pliegues, el principal y que condiciona a toda la estructura es E-W y los conjugados, si existen, están volcados al norte con ejes cabeceantes.

Las fallas longitudinales, predominantemente en el flanco

co sur, son posteriores a los pliegues y hundien el flanco sur - dentro de aquel mismo.

Las fallas transversales son abundantes en ambos flancos no presentando direcciones predominantes; siendo de reajuste y por tanto posteriores a los pliegues y fallas longitudinales. Estas fallas tienen una componente de desgarre y otra de gravedad, desplazando el bloque occidental hacia el norte, al mismo tiempo que lo hundien y a veces lo basculan.

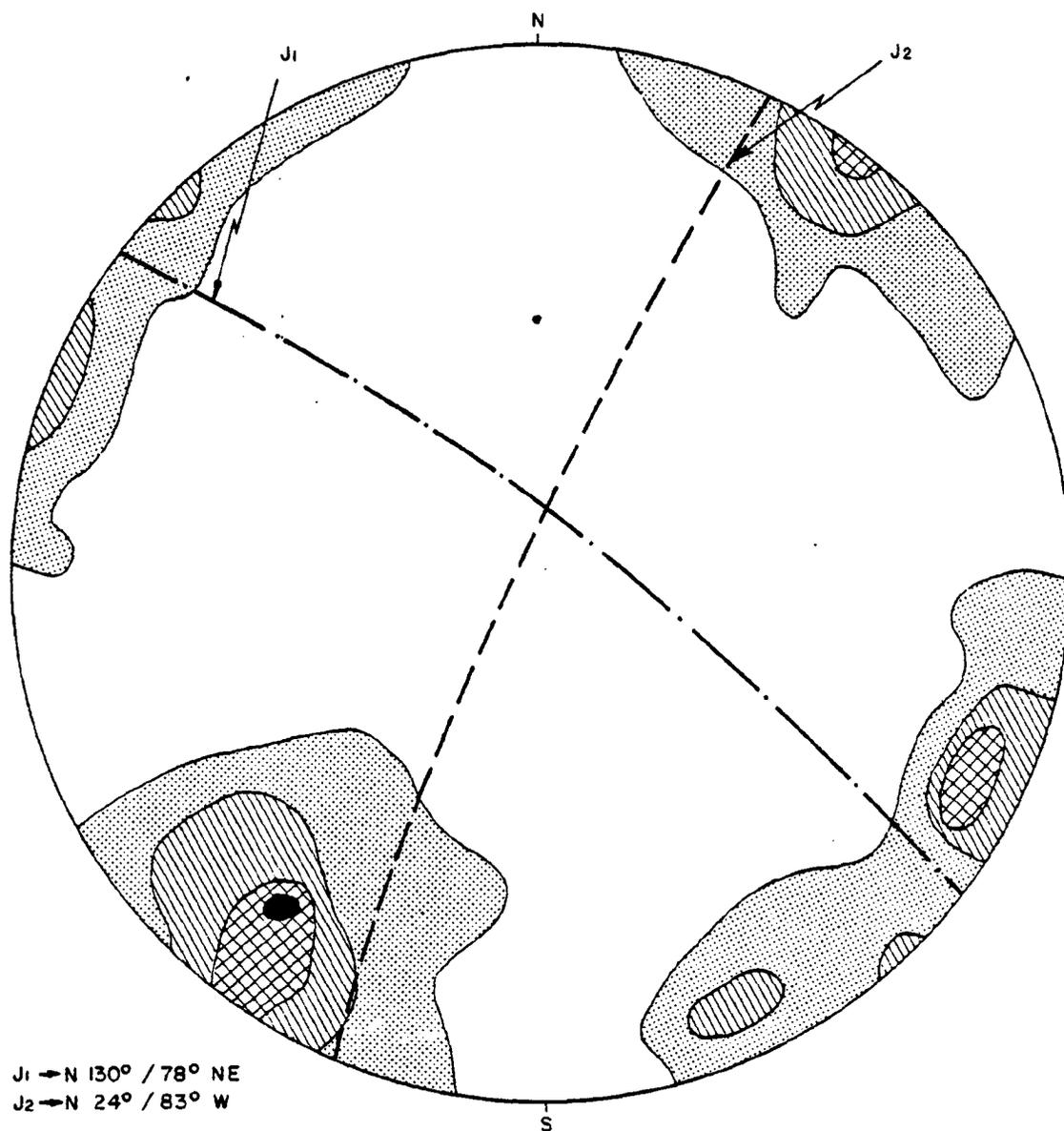
4.2.3.- Análisis Estructural Local

Este análisis, también incluido con detalle en el Anexo 2 nos situa en el flanco norte del sinclinal del Porvenir que es donde se encuentra la Unidad Cervantes y el Pozo San José.

Se realizó un estudio de superficie y se exploraron dos zanjas (estaciones de superficie ES-1 y ES-2) al techo de la capa Cervantes.

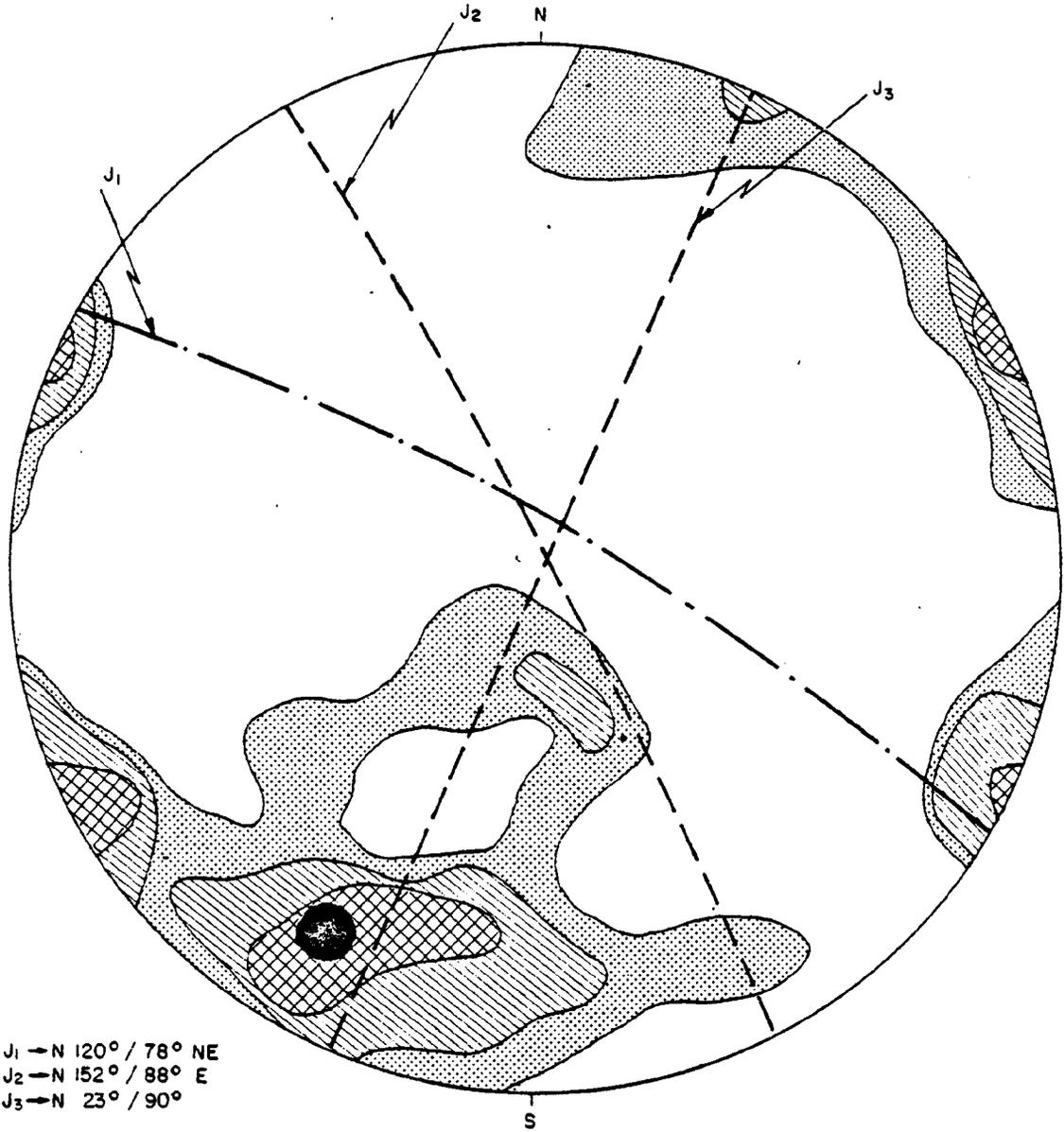
En el interior se hizo una cartografía estructural en las estaciones EI-I, II, III, IV, V y VI, correspondientes a culatones y tramos de galerías del piso 325 y del piso 283, es decir en aquellos puntos y zonas en las que la galería y su entibación permitiesen un facil reconocimiento de las condiciones estructurales de la roca.

De los resultados de este análisis estructural y de las actitudes geométrico-espaciales de las principales fallas y sistemas de fracturas más destacables, presentados en las proyecciones estereográficas aquí adjuntas y en el Anexo 2, se tratará de definir la correlación e incidencia de las mismas en el estado tensional del terreno, así como la incidencia de todo el sistema de pliegues



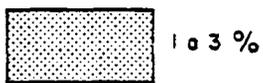
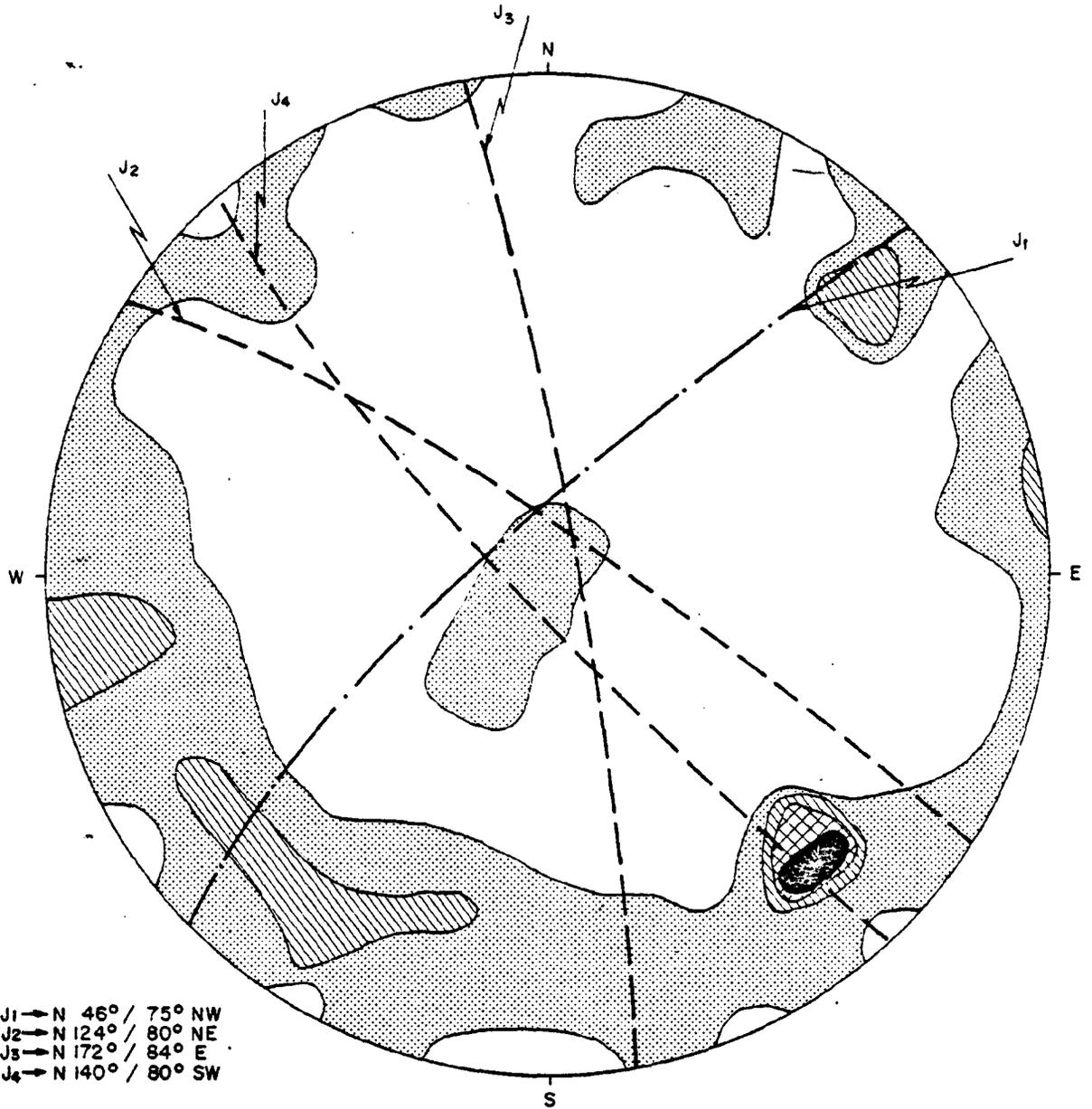
ZANJA AL W DEL PORVENIR (TRAMOS N.y.S.)

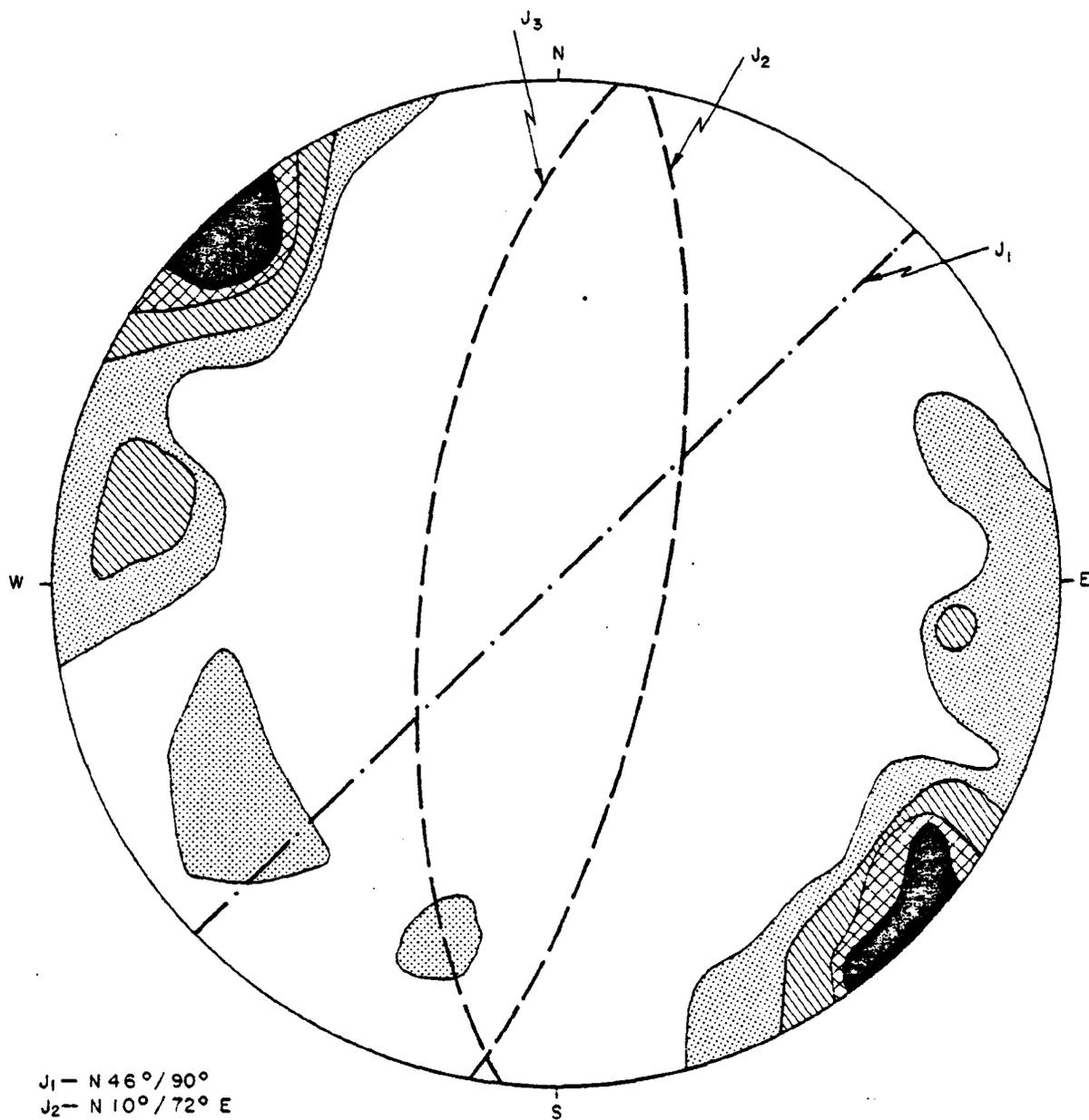




1er CULATON GALERIA 325







J₁ - N 46° / 90°
 J₂ - N 10° / 72° E
 J₃ - N 6° / 68° W

GALERIA 283 NW (GLOBAL)



sinclinales que caracterizan a la zona.

Antes de pasar a una campaña de medidas de tensiones in-situ, se realizó un análisis con dilatómetro para definir las características geomecánicas elásticas y plásticas de los materiales de techo y principalmente del muro de la capa Cervantes.

4.3.- ANALISIS CON DILATOMETRO

Este análisis con todos sus pormenores se comenta en el - Anexo 3. En él vemos como este análisis se realizó en un sondeo de 76 mm \emptyset y 31.50 metros de profundidad abierto en el cula^un t^on intermedio (Fig. 5) del piso 325, correspondiente a la esta^ución interior de análisis estructural ES-II, de esta forma se analizaba y estudiaba tanto el techo inmediato a la capa de car^ubón, como la misma capa y unos 25 metros por debajo de la capa que era la zona donde se encontraba la galería de arrastre y - que era el entorno donde la misma podía colocarse dentro de las limitaciones económicas propias de las labores subterráneas y aconsejadas por la dirección de ENCASUR. En el estudio se realizaron 15 ensayos de dilatometría, utilizando el dilatómetro (BHD) (Borehole Deformation Gage) desarrollado por M. Rocha (pri^umer presidente de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas).

4.3.1.- Características Elásticas

Este análisis tenía la ventaja de poder definirnos los módulos elásticos de los materiales en estudio (pizarras de te^ucho, carbón, areniscas, pizarras masivas y pizarras tableadas - de comportamiento plástico, con valores que oscilaban desde - 3.000 kg/cm² para el carbón hasta 200.000 kg/cm² para la arenis^uca de muro.

4.3.2.- Anisotropía

El método dilatométrico también nos permitió definir el grado de anisotropía horizontal de los materiales ensayados, siendo las pizarras de techo, el carbón y las pizarras masivas las que presentaban mayor anisotropía, en especial las dos primeras formaciones que detectan una mayor deformabilidad en el plano horizontal en dirección de capa que perpendicular a la misma en una relación de 2 a 3.

Las areniscas y las pizarras de fondo (plásticas) presentaban un comportamiento prácticamente isótropo.

4.3.3.- Comportamientos Plásticos. Análisis de Carga y Descarga

El análisis de carga y descarga nos permitió definir con el dilatómetro, aquellos materiales en la zona en estudio con un comportamiento plástico claramente definido en las pizarras arenosas plásticas a 15.5 metros de profundidad y en las pizarras de fondo plásticas, con puntos de fluencia de 300 y 250 kg/cm² y, módulos elásticos (E) de 140.000 y 27.000 kg/cm², plásticos (E_t) de 70.000 y 13.500 kg/cm² y Strain Hardening Factor ($H' = \frac{E_t}{1-E_t/E}$) de 2 y 5 respectivamente. Este factor H', es una medida del grado de aumento de la deformabilidad pasado el punto de fluencia o límite entre el comportamiento elástico y el elasto-plástico.

4.4.- ANALISIS DE LABORATORIO

Aprovechando un conjunto de sondeos realizados por ENCASUR en las proximidades del pozo S. Rafael, se tomaron muestras

de los mismos y se realizaron 483 ensayos de laboratorio (Anexo 4), con el fin de enriquecer las características geomecánicas de los materiales de la cuenca del Guadiato, en especial, aquellos que hacían referencia a la resistencia uniaxial, densidad, velocidad sónica, cohesión y fricción interna.

4.4.1.- Resistencia a la Compresión Uniaxial

Los resultados de estos ensayos, tienen los siguientes valores para los principales materiales del techo y muro de la capa:

Pizarra de techo	350 kg/cm ²
Carbón	300 kg/cm ²
Pizarra Arenosa	400 kg/cm ²
Pizarra Masiva	550 kg/cm ²
Pizarras Arenosas Plásticas	450 kg/cm ²
Pizarras de Fondo Plásticas	375 kg/cm ²

4.4.2.- Densidades

Las densidades tienen valores que exceptuando la antracita para la que se tomó un valor igual a 1.0, podían considerarse en su conjunto como valor medio el de 2.4, y éste es el que se aceptó para el cálculo del peso de la columna.

4.4.3.- Cohesión y Fricción Interna

Los valores de estos parámetros para los seis materiales definidos por el sondeo 1 de dilatometría, y luego confirmados por la microsísmica, de la que luego hablaremos, fueron los siguientes en su valor medio ponderado:

	<u>c (kg/cm²)</u>	<u>φ (gr)</u>
Pizarra de techo	75	25
Carbón	65	25
Pizarra Arenosa	75	25
Pizarra masiva	110	30
Pizarra Arenosa Plástica	85	30
Pizarra de Fondo Plástica	85	20

4.4.4.- Análisis Mineralógico (Rayos X)

Este análisis demostró la total ausencia de minerales arcillosos tipo montmorilonita en las pizarras de muro de la capa Cervantes, y por tanto quedó excluida la hipótesis de presencia de arcillas expansivas como causa del fuerte levantamiento del suelo de la galería, teniendo que ser explicado el mismo por condicionamientos tenso-deformacionales y comportamientos plásticos y tiempo-dependientes, como nos parecía que podrían ser - en el diagnóstico preliminar comentado y basado en los fenómenos históricos ocurridos en la apartura de la galería de arrastre.

4.5.- MEDIDAS DE TENSIONES IN-SITU

Una vez terminadas las pruebas de dilatometría y los análisis de laboratorio, era necesario de acuerdo a los criterios del plan de acción definir el estado tensional existente en el muro de la capa Cervantes, eligiéndose para ello los culatones del piso 325, al igual que se hizo con la dilatometría (Anexo 5).

La primera campaña se realizó sobre el sondeo 2 en el culatón intermedio, con un diámetro de 115 mm y 26 metros de profundidad y dos con el mismo diámetro (sondeo 3 y 4) en el primer culatón a 120 metros del primero con profundidades de 25 y

20 metros respectivamente. Se realizaron 75 metros de sondeo, 71 a 115 mm \emptyset y 4 metros de 37 mm \emptyset para la instalación de los aparatos de medida (STG - Stress Tensor Gage), con un total de 21 ensayos.

Los sondeos fueron todos verticales y cubrieron la zona del muro que interesaba estudiar. El equipo utilizado fue el -STG, del Laboratorio Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Lisboa.

En el anexo 5, se recoge con detalle toda la metodología y técnica de realización de estas pruebas, de las cuales podemos establecer las siguientes conclusiones:

- 1^o) En el 75% de los resultados la tensión vertical medida es igual ($\pm 5\%$) a la teórica, y en el restante 25% esta tensión medida es un 20% superior al peso de la columna teórica.
- 2^o) De forma semejante para las tensiones horizontales, éstas presentan valores el 75% de las veces igual al 70-80% de la tensión vertical y en un 25% de las veces esta tensión es un 30% por encima de la vertical, indicándonos como diagnosticábamos fuertes tensiones horizontales atípicas, superiores a lo normal, que es del orden del 30% de la tensión vertical.
- 3^o) La actitud espacial de las tensiones de campo está fuertemente condicionada a la geometría del sinclinal, con una Tensión Principal Intermedia horizontal o subhorizontal y en dirección de la capa y una Tensión Principal Mínima siguiendo la línea de máxima pendiente o buzamiento de la formación carbonífera.

4^o) La presencia de fallas importantes y significativas, fuerza localmente y en sus proximidades la disposición geométrica del estado tensional, como es lo que se ha observado en una de las pruebas del sondeo 2, ante la presencia de una falla (N 10^o SE / 33^o N) en el culatón intermedio (ES-I).

Queda pues definido que el estado tensional es atípico, con fuertes tensiones horizontales de origen tectónico o residual; que este estado tensional está íntimamente ligado a la geometría del sinclinal y que solo queda afectado por la presencia de fuertes fallas en forma muy local y no por el conjunto de sistemas de discontinuidades que en este caso puedan existir.

4.6.- ANALISIS MICROSISMICO

Se consideró que los datos sobre características geomecánicas y en los de medidas de tensiones (sondeos 2 y 4), nos proporcionaba una información el primero local para los puntos y cotas definidos y los segundos junto con el sondeo 1, nos mostraban la existencia por debajo de los 20 metros de un material (pizarras de fondo) de una gran deformabilidad. Nos interesaba confirmar estos resultados al mismo tiempo que ampliar esta información a un entorno de masa rocosa del muro más amplio en sentido horizontal, al mismo tiempo nos interesaba conocer el grado de anisotropía en sentido vertical que tuviesen estos materiales. Para ello se pensó y se realizó un análisis microsísmico de la forma explicada en el anexo 6, sobre tres sondeos verticales de 76 mm Ø realizados en el culatón intermedio del piso 325, para lo cual se utilizó el sondeo 1 utilizado en la dilatometría más dos sondeos nuevos el 5 y el 6 que se abrieron con el diámetro dicho alineados con el 1, y con profundidades de 17 y 16.5 metros.

Este ensayo permite mediante la generación de un impulso sísmico en el interior de los sondeos o en la superficie de los mismos, detectar la velocidad de transmisión de ondas longitudinales y de corte mediante un sistema de geofonos, en las distintas formaciones que están formando el muro de la capa Cervantes. Estas velocidades nos permiten definir los Módulos de Deformación y ratios de Poisson de la forma expresada y desarrollada - en el Anexo 6.

De los resultados de estos ensayos y de su comparación - con los ensayos ultrasónicos desarrollados en el LNEC y con los de la dilatometría, llegamos a las siguientes conclusiones:

- 1º) Las pizarras de techo próximas a la capa de carbón están - fuertemente fracturadas y alteradas.
- 2º) El carbón se encuentra ante un fuerte estado tensional (probablemente residual).
- 3º) Las pizarras arenosas están poco comprimidas y ligeramente fracturadas.
- 4º) Las pizarras masivas están algo más comprimidas y muy poco fracturadas.
- 5º) Las pizarras arenosas plásticas, presentan una mayor discrepancia entre sus módulos de deformación dinámicos y dilatómétricos, lo cual corrobora y está de acuerdo con su comportamiento plástico, presentando fuertes caídas en su deformabilidad ante cargas estáticas (dilatómetro) en comparación con cargas dinámicas (microsísmica).
- 6º) El perfil de características deformantes de los materiales

ensayados , tanto el obtenido por dilatometría como el obtenido por microsísmica, presentan una misma configuración , confirmando los datos dilatométricos, salvo las desviaciones normales comentadas debido al grado de fracturación y estado tensional que detecta obviamente el ensayo dinámico.

7º) Se ha determinado un grado de anisotropía entre la dirección horizontal (1) y la vertical (2) en cuanto a Módulos de Deformación del orden de 0.8 (E_1/E_2) por lo que esta anisotropía vertical es poco significativa a efectos de cálculo e incidencias en los resultados.

4.7.- COMPORTAMIENTO TIEMPO-DEPENDIENTE (VISCO-ELASTICIDAD). ENSAYOS DE FLUENCIA TRIAXIALES

El hecho de que la galería presentase fenómenos observables de deformación con el tiempo, junto con el conocimiento de la no existencia de minerales arcillosos expansivos tipo montmorilonita, nos condujeron a la necesidad de tener que investigar este comportamiento a través de ensayos de fluencia triaxiales - con confinamiento lateral y control de humedad, tal y como se especifica en el anexo 7, con el fin de simular las condiciones tensionales existentes en el terreno y detectada en las campañas de medidas explicadas.

Estos ensayos, en número de 28 testigos de pizarra del muro, procedentes de los sondeos 1 y 2, se desarrollan en las máquinas de fluencia especiales que tiene el LNEC en Lisboa, y por un espacio de más de dos meses, con cargas axiales que iban de 35 a 300 kg/cm² y confinamientos laterales desde 0 a 70 kg/cm²

Los resultados de estos ensayos nos llevaron a las siguientes conclusiones:

- 1^o) Las deformaciones en todos los casos quedaban estacionadas a los 10-15 días permaneciendo así durante el resto del ensayo, indicándonos pues un comportamiento visco-elástico, sin llegar nunca al colapso de la muestra, por disparo exponencial de las deformaciones.
- 2^o) El Módulo de Elasticidad evoluciona con el tiempo con valores comprendidos entre el 55% y el 85% de los valores instantáneos ($t = 0$), no detectándose variaciones con el incremento de la compresión lateral. Es destacable el hecho de que las muestras sometidas a ensayos de fluencia uniaxiales presentan menos reducción en el módulo de elasticidad.
- 3^o) El ratio de Poisson, aumenta con el tiempo, siendo este aumento menos marcado en compresión uniaxial. Los incrementos fueron del 12% en compresión uniaxial y de más del 100% en triaxial.
- 4^o) En forma reducida podemos establecer que la reducción del módulo de elasticidad con el tiempo en función del Desviador de Tensiones ($s = \sigma_1 - \sigma_3$) es tal que, se experimentan por encima de un S superior a 180 kg/cm^2 disminuciones del 25% y de más del 40% para S menores de 180 kg/cm^2 .
- 5^o) También se observó que el Módulo de Elasticidad instantáneo ($t = 0$) aumenta con muy pequeños confinamientos laterales manteniéndose prácticamente estable para confinamientos mayores, dando unos valores del mismo orden y semejantes a los desarrollados por la dilatometría y microsísmica; lo cual es lógico ya que estos ensayos se hacen in-situ con condiciones de confinamiento; tal y como los ensayos de fluencia.

4.8.- ZONIFICACION GEOTECNICA DE LOS MATERIALES GEOLOGICOS DEL MURO DE LA CAPA

De los resultados obtenidos con los ensayos comentados - (BHD, STG, Microsísmica, Fluencia, análisis de laboratorio, testigos de sondeos, ultrasónicos, etc.), llegamos aunando la información por ellos recogida a una zonificación geotécnica de los materiales que forman el entorno que estamos estudiando. Esta zonificación (Fig. 6), con materiales que vienen a tener de 2 a 3 metros de espesor, con características geomecánicas bien diferenciadas, aunque aparentemente tengan una apariencia homogénea de pizarras más o menos arenosas, se definen de la siguiente manera:

Material 1: Pizarras de Techo

$$E = 70.000 \text{ kg/cm}^2, \quad q_u = 350 \text{ kg/cm}^2, \quad \nu = 0.2$$

$$\phi = 25^\circ, \quad C = 75 \text{ kg/cm}^2$$

Comportamiento Elástico

Material 2: Carbón

$$E = 13.500 \text{ kg/cm}^2, \quad q_u = 300 \text{ kg/cm}^2, \quad \nu = 0.3$$

$$\phi = 25^\circ, \quad C = 65 \text{ kg/cm}^2$$

Comportamiento Elástico

Material 3: Pizarra Arenosa

$$E = 70.000 \text{ kg/cm}^2, \quad q_u = 400 \text{ kg/cm}^2, \quad \nu = 0.2$$

$$\phi = 25^\circ, \quad C = 75 \text{ kg/cm}^2$$

Comportamiento Elástico

Material 4: Pizarras Masiva

$$E = 200.000 \text{ kg/cm}^2, \quad q_u = 550 \text{ kg/cm}^2, \quad \nu = 0.15$$

$$\phi = 30^\circ, \quad C = 110 \text{ kg/cm}^2$$

Comportamiento Elástico

Material 5: Pizarra Arenosa Plástica

$$E = 140.000 \text{ kg/cm}^2, \quad E' = 70.000 \text{ kg/cm}^2, \quad H' = 2, \quad Y = 300 \text{ kg/cm}^2$$

$$q_u = 450 \text{ kg/cm}^2, \quad \nu = 0.15, \quad \phi = 30^\circ, \quad C = 85 \text{ kg/cm}^2$$

Comportamiento Elasto-Plástico

Material 6: Pizarras de Fondo

$$E = 27.000 \text{ kg/cm}^2, \quad E' = 13.500 \text{ kg/cm}^2, \quad H' = 5, \quad Y = 250 \text{ kg/cm}^2$$

$$q_u = 375 \text{ kg/cm}^2, \quad \nu = 0.15, \quad \phi = 20^\circ, \quad C = 85 \text{ kg/cm}^2$$

Comportamiento Elasto-Plástico

Todo presentan un comportamiento viscoelástico con reducciones en los Módulos Elásticos del orden del 40% para desviaciones de tensiones inferiores a 180 kg/cm^2 .

Con esta caracterización de los materiales así como con el estado tensional descrito, con variaciones de las tensiones horizontales entre 0.7 y 1.0 la vertical y tensiones verticales iguales a 1.0 ó 1.2 veces la del peso teórico de la columna, pasamos al tratamiento numérico del problema, que comentamos y desarrollamos en el capítulo siguiente.

4.9.- ANALISIS NUMERICO POR ELEMENTOS FINITOS

4.9.1.- Modelo General de la Estructura Minera

En la Figura 7, vemos en un corte vertical a la altura del culatón intermedio cual es la estructura minera existente , junto con la zona explotada de carbón. La galería en estudio - estaría situada al nivel 325 y a 18 metros de distancia vertical al muro de la capa de carbón.

Esta estructura era necesaria conocer en cuanto a su estado tensional y deformacional, partiendo de todos los datos e información recogidos. Para ello se definió el modelo de la Figura 8, en el que aparece una malla de 272 elementos y 309 nodos (Fig. 9) y con unas dimensiones de 62 metros de altura por 70 metros de ancho. La posición de la galería de arrastre, el culatón, los sondeos realizados en el mismo, los puntos donde se hicieron mediciones de tensiones y los distintos tipos de materiales, quedan también expresados en la Figura 8. La forma angular del contorno AFE, simula, como comentaremos, la zona que ha estado sometida a hundimiento por extracción de la capa de carbón (material 2) hasta el punto F. Por debajo de F, el carbón no ha sido aún extraído.

4.9.1.1.- Condiciones de Contorno de la Estructura General

Lógicamente hay contornos en la estructura cuyos condicionamientos están claros, como son la pared BC, que ha de ser libre en sus desplazamientos y sobre la que actúan unas tensiones horizontales definidas. La pared ED, tampoco presenta ninguna duda sobre sus condiciones de restricción de desplazamientos horizontales (soporte en rodillos). La arista AB, igualmente tiene que estar sometida a una carga vertical y totalmente -



Primo 2200. Elevación en coordenadas

CORTE POR LA COORDENADA 6.200
E=1:200

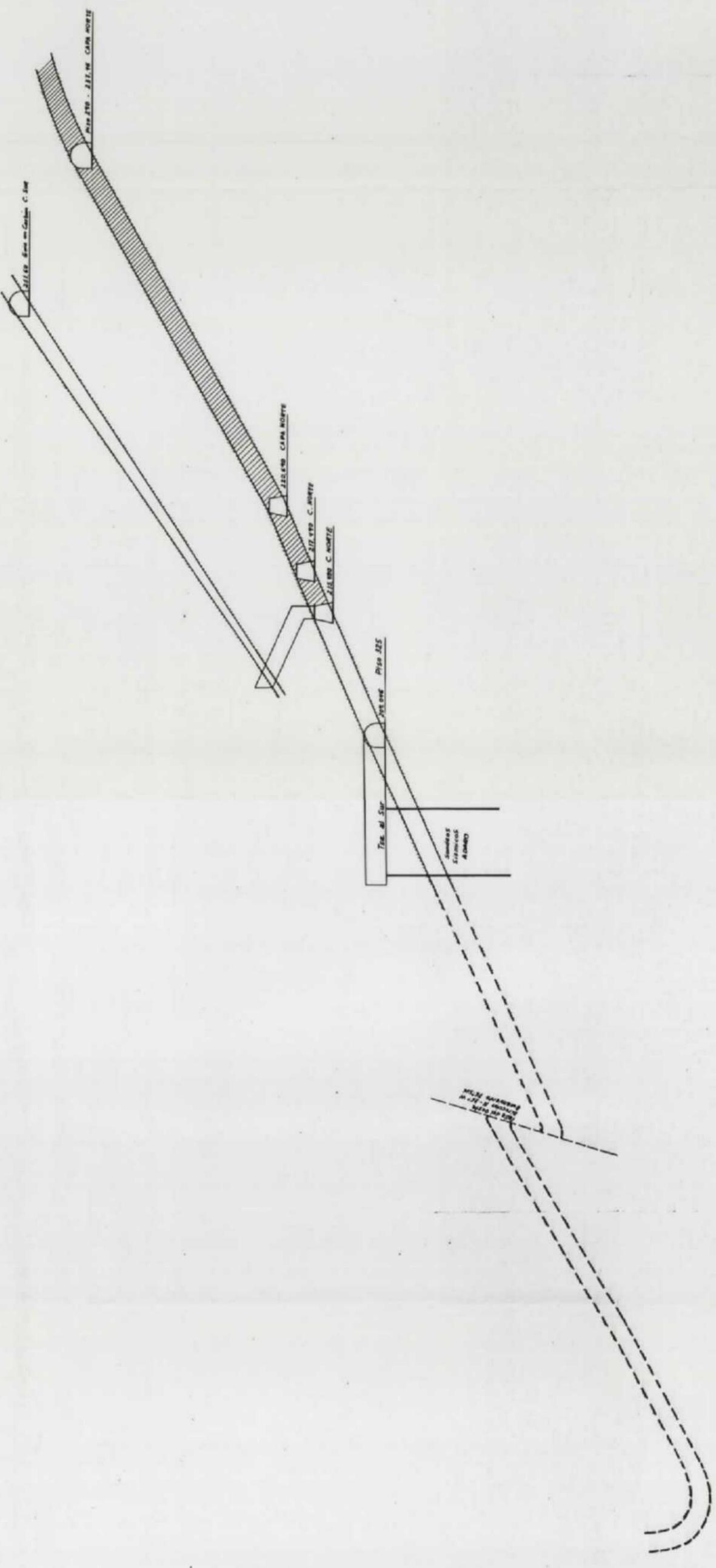


FIG. 7

libre en sus desplazamientos horizontales y verticales. La pa red EF es totalmente libre en sus desplazamientos, y sometida a una carga igual al peso de la masa del techo que halla hundido y gravite sobre el muro de la capa. Este peso, suele ser alre dedor de 2 veces el espesor de la capa, y así se considera uni versalmente en el diseño de la entibación automarchante, noso tros como veremos en el análisis de sensibilidad realizado hici mos variar esta carga desde 1.5 veces la potencia de la capa , hasta 2.5 y 3.5 veces. Ahora en este estadio de definición de condiciones de contorno, consideramos una carga sobre el muro - de la capa de 6.200 kg / m^2 correspondiente al supuesto de 1.5 ve ces la capa.

El problema crucial estaba en definir las condiciones de contorno en cuanto a los desplazamientos permisibles en los con tornos CD (base) que podía ser fijo o sobre rodillos (solo des plazamientos horizontales) y en AF. Este último contorno debía tomar una posición intermedia, ya que está afectada por el hun dimiento, entre la de total libre desplazamiento como si no exis tiera nada en el entorno AFE, a la de fijo empotrado como si no hubiera existido ningún hundimiento ni extracción de carbón.

En el anexo 8, se presentan el estado tensional y las de formadas de la estructura para las distintas condiciones de con torno de la base (CD) y de la pared vertical AF, con cargas ho rizontales de 0.7 veces el peso de la columna actuando sobre BC, el peso de la columna actuando sobre AB y 6.200 kg / m^2 sobre el muro de la capa de carbón FE.

Del resultado de este análisis se ha obtenido como con clusión que las condiciones de contorno que mejor simulan las tensiones medidas en los elementos 97, 113 y 121 (Fig. 8), co rresponden a base (CD) libre sobre rodillos y la aplicación de

resortes-muelles sobre la pared vertical AF que permitan unos desplazamientos que sean el 5% de los que presentaría tal pared si fuese totalmente libre. De esta forma el modelo de la estructura quedaba perfectamente calibrado en sus condiciones de contorno, utilizando las tensiones calculadas para los elementos 97, 113 y 121 como medio de control sobre las tensiones medidas en esos mismos puntos, hasta la total coincidencia.

4.9.1.2.- Análisis de sensibilidad

Una vez fijadas las condiciones de contorno tal como se ha comentado en el punto anterior, era necesario realizar un análisis de sensibilidad para definir como las variaciones o grado de incertidumbre de las medidas realizadas podrían afectar al estado tenso-deformacional de la estructura.

Para ello se supuso que la tensión vertical podía variar entre 1 y 1.2 el peso de la columna, la tensión horizontal se variaría entre 0.7 y 1.0 veces la vertical, tal y como eran los datos de medidas in-situ realizadas (STG) y el peso del techo hundido y que gravita sobre el muro de la capa de carbón (EF) podía variar desde 6.200 kg/m^2 (1.5 veces la capa) hasta 14.500 kg/m^2 (3.5 veces la capa) (ver anexo 9). Con estos campos de variabilidad o incertidumbre y con las condiciones de contorno definidas anteriormente llegamos a las siguientes conclusiones:

Las variaciones (1-1.2) en las tensiones verticales y (0.7-1) en las horizontales tienen muy poca influencia (despreciable) en las tensiones verticales inducidas en la zona de la galería de arrastre, aumentándolas tanto si son compresiones como tracciones, pero en un rango muy pequeño.

Las variaciones en las tensiones verticales y horizonta

les que actúan en la estructura, tienen en cambio más incidencia en las tensiones horizontales inducidas, tendiendo siempre a aumentarlas, tanto una como la otra. El efecto conjunto de ambas ($\sigma_v = 1.2$ columna y $\sigma_h = \sigma_v$) caso más desfavorable elevaría las tensiones horizontales inducidas en 40-45 kg/cm² lo cual tampoco es mucho para los materiales que estamos tratando.

El efecto de la carga sobre el muro de la capa de carbón debido a la zona hundida es totalmente despreciable, no llegando a significar incrementos de 1 kg/cm² en las zonas más próximas a la explotación.

Todo esto nos ha llevado a considerar como condiciones - "standards" de contorno y de carga sobre la estructura:

- Carga vertical: 1.1 columna
- Carga horizontal: 0.8 vertical
- Carga sobre muro de la capa: 10.400 kg/m² (2.5 veces la potencia)
- Base Inferior: libre sobre rodillos
- Pared EF (zona hundida): Resortes con 5%, desplazamiento libre
- Pared ED: Libre sobre rodillos

los demás contornos son totalmente libres.

Tanto el análisis de definición de condiciones de contorno como el de sensibilidad, fueron realizados utilizando el programa de Elementos Finitos SAP-IV (Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems) desarrollados por E.L. Wilson, K.I. Bathe y F.E. Peterson de la Universidad de California, Berkeley. Cada pasada de ordenador ha necesitado la resolución de 571 ecuaciones con un ancho de banda de -

116, unas necesidades de memoria de 600 k y 1.25 minutos de CPU. Para su realización se ha utilizado un ordenador IBM 4341 de 8.192 k de memoria.

4.9.2.- Localización de la galería de arrastre

4.9.2.1.- Modelo Reducido Elasto-Plástico

En la Figura 6, se definían las 5 posiciones en las que era factible económicamente la ubicación de la galería de arrastre a distintas distancias de la capa (14, 10, 6 y 20 m).

Para el análisis tenso-deformacional de estas galerías - en cada una de estas posiciones, con la complejidad de heterogeneidad de los materiales, comportamientos no-lineales (elastoplasticidad y viscoelasticidad), estados tensionales atípicos e interacción de labores de explotación, se hizo necesario crear una estructura, más pequeña que la anterior y que analizase con mayor detalle el entorno de la galería. Para ello se eligió la estructura de la Figura 10 y 11 (red de elementos y nodos respectivamente) de 12 x 13 metros, 144 elementos y 169 nodos. Esta estructura reducida lleva impuesta en su contorno unas condiciones de deformación definida para esos puntos (nodos) por el modelo de la estructura general que ya hemos analizado.

4.9.2.2.- Análisis de la posición 1 (primitiva de la galería)

En el análisis de la galería se hicieron dos consideraciones:

- 1^a) Era necesario conocer el comportamiento de la galería, prácticamente en el momento de apertura de la galería ($t = 0$) y a un tiempo de más de 10-15 días, lo cual dadas las curvas

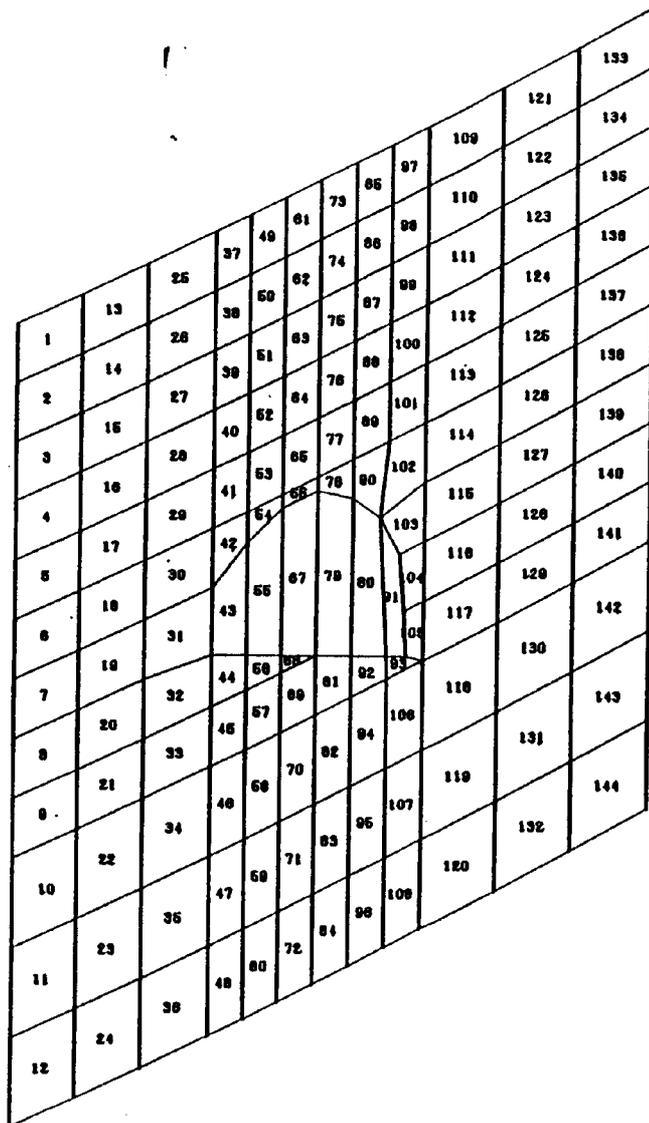


Fig. 10

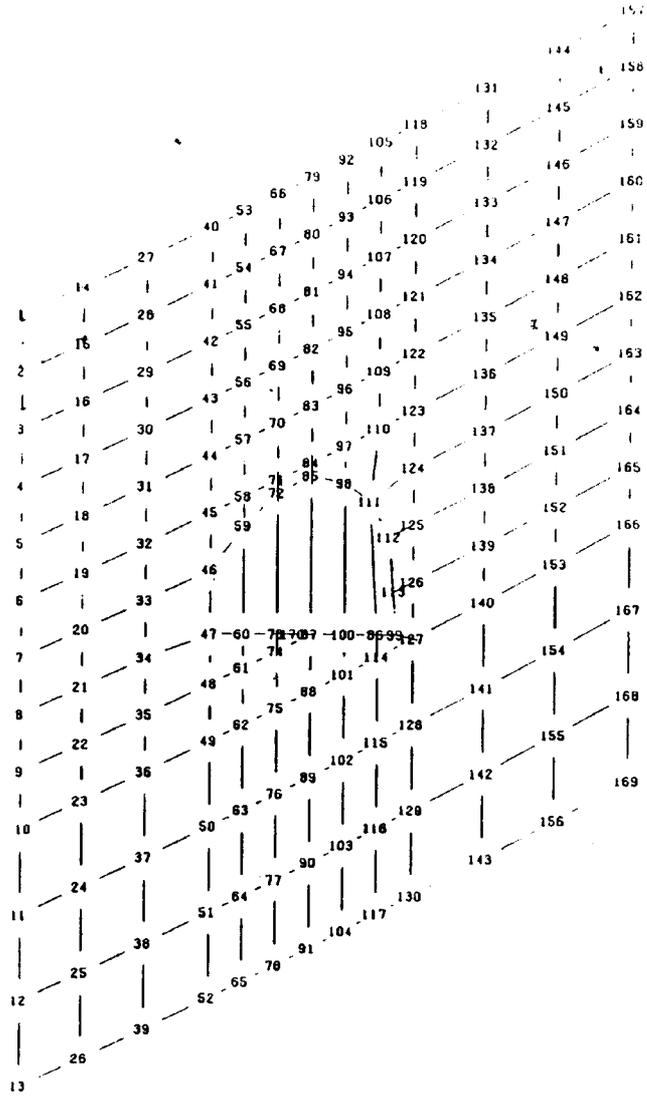


Fig. 11

de fluencia observadas equivale a $t = \infty$. Esto implicaba dadas las características viscoelásticas de los materiales una reducción en los Módulos de Elasticidad (E y E_T) y del punto de Fluencia del 40%, esto es dejarlos al 60% del correspondiente a $t = 0$.

- 2^a) Los valores de cohesión definidos para los materiales aquí estudiados han sido analizados en ensayos de laboratorio sobre probetas intactas. La experiencia en el tratamiento por Elementos Finitos ha probado que estos valores, para simular y asemejarse al comportamiento real in-situ deben reducirse al 30 o al 20% de su valor detectado en laboratorio.

Al analizar la galería a $t = 0$ con la cohesión reducida al 30% y al 20% se observó que no se producía ninguna plastificación ni deformación considerable. Se hizo, consecuentemente, la reducción del 40% para los Módulos de Elasticidad y Puntos de Fluencia correspondientes a $t = 20$ días (infinito), y se observó que para una cohesión del 30% se producía una ligera plastificación (Fig. 12) y para una cohesión del 20% se producía ya - una mayor plasticidad a una carga del 80% (Fig. 13) y una práctica total plastificación en la primera iteración a carga 100% (Fig. 14).

Se probaba pues numericamente, y mediante una simulación por Elementos Finitos, que la galería en su posición inicial(1) entra en un proceso de plastificación con el tiempo y de inestabilidad estructural total, tal y como se había observado en el terreno.

En las Figuras 15 y 16, se presentan el estado tensional originado en la estructura alrededor de la galería en la posición 1 a 16 metros de la capa, y la deformada de la galería, en la que se detectan fuertes levantamientos del suelo y convergen

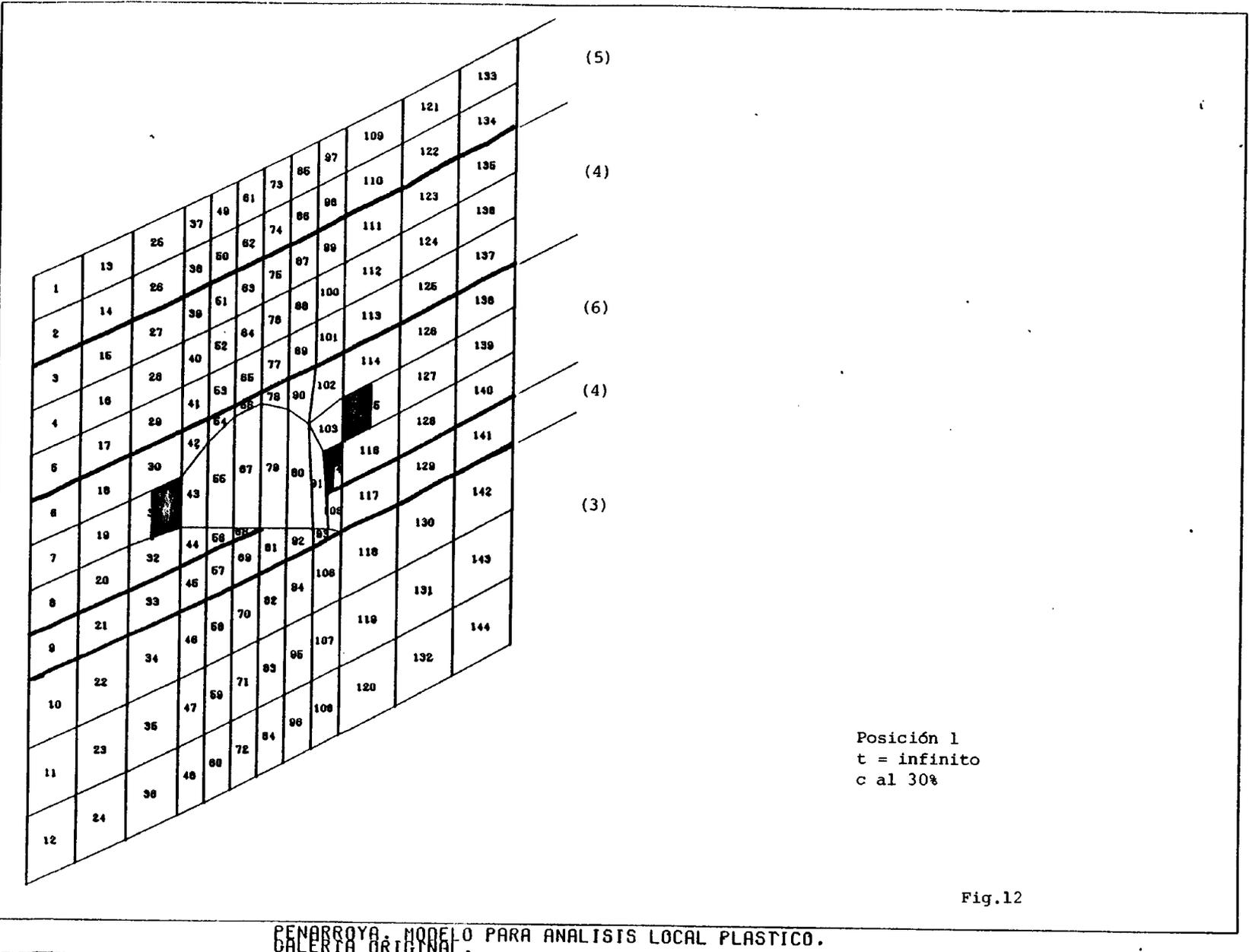


Fig.12

cias laterales como se observaba en la apertura de la galería.

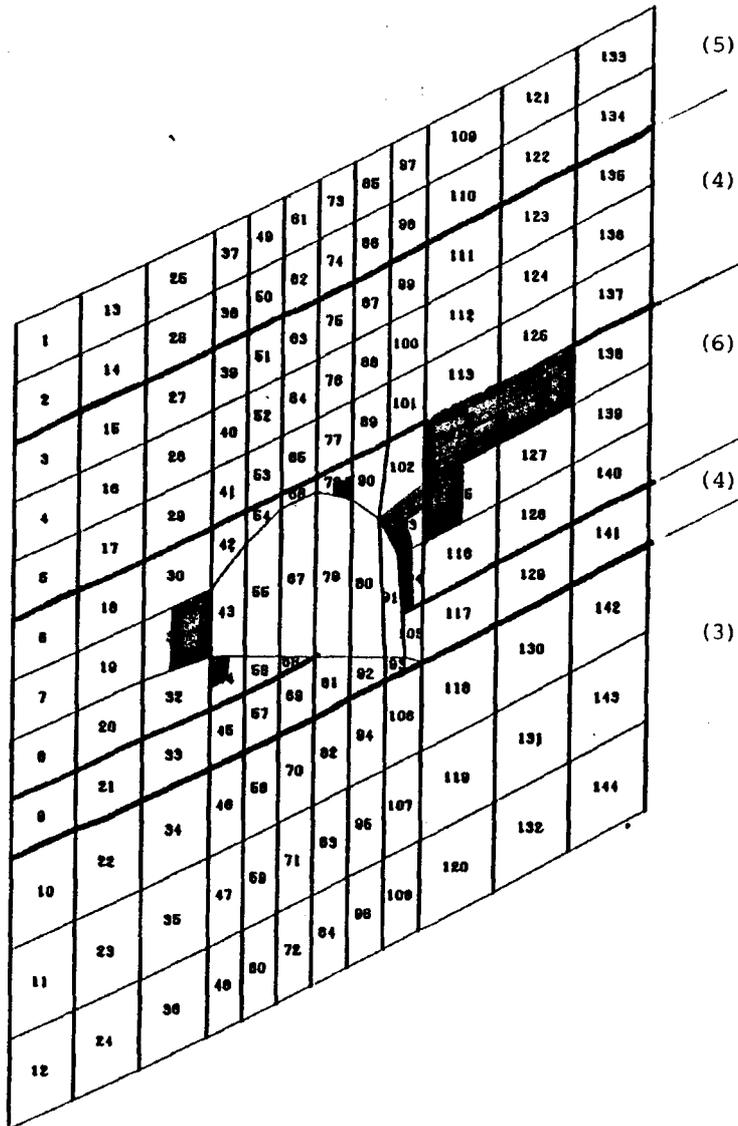
Esta zona donde se encontraba ubicada la galería era una zona que en los resultados y ensayos realizados en los sondeos daban unas características muy pobres y de gran deformabilidad (BHD, STG, Microsísmica, Sondeos 1, 2, 3 y 4), a su vez recientemente (Julio 83) un sondeo horizontal (S. José 5) de 80 metros, en el piso 325 desde la galería en carbón (Fig. 6) daba para el tramo de 35 a 45 metros, zona donde está ubicada la galería unas condiciones muy pobres de recuperación (ver plano - SJ-5 del Anexo 2).

4.9.2.3.- Situación óptima de la galería

Una vez analizada la situación tenso-deformacional de la galería en su posición original 1, y vista su total falta de estabilidad estructural, se analizaron cuatro posiciones más en el muro de la capa (posiciones 2, 3, 4 y 5, Fig. 6), a 14, 10, 6 y 20 metros respectivamente.

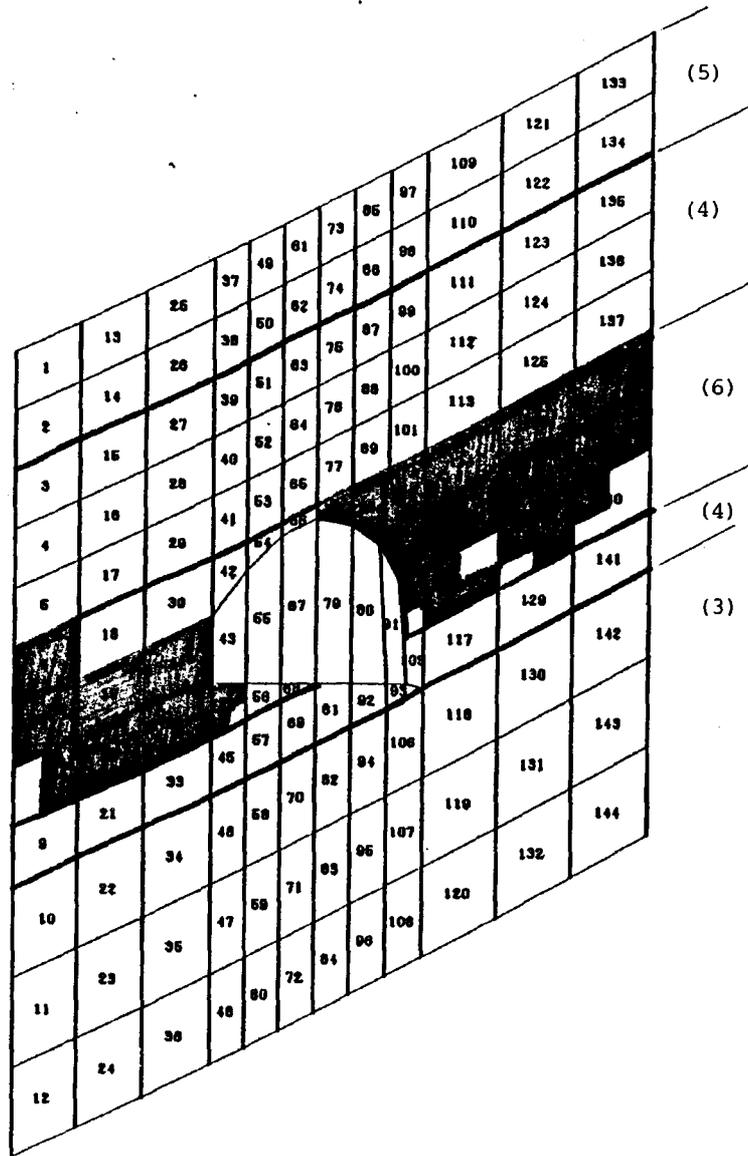
Las condiciones de tensión y deformadas de cada una de estas posiciones así como las mallas empleadas aparecen en el Anexo 10.

Las Figuras 17, 18, 19 y 20, representan el grado de plastificación del entorno de la galería en las posiciones 2, 3, 4 y 5 respectivamente. En todas ellas se observa un levantamiento del suelo y una convergencia lateral, (ver Anexo 10) al igual que en la posición 1 (Fig. 16), sin embargo de todas ellas es la posición 4, situada a 7 m de la capa la que presenta las mínimas deformaciones de las 5 posiciones posibles y económicamente ensayadas e indicadas por la dirección de ENCASUR.



Posición 1
 $t = \text{infinito}$
 c al 20%
 carga al 80%

Fig. 13



Posición 1
 t = infinito
 c al 20%
 carga al 100%
 1ª Iteración

Fig. 14

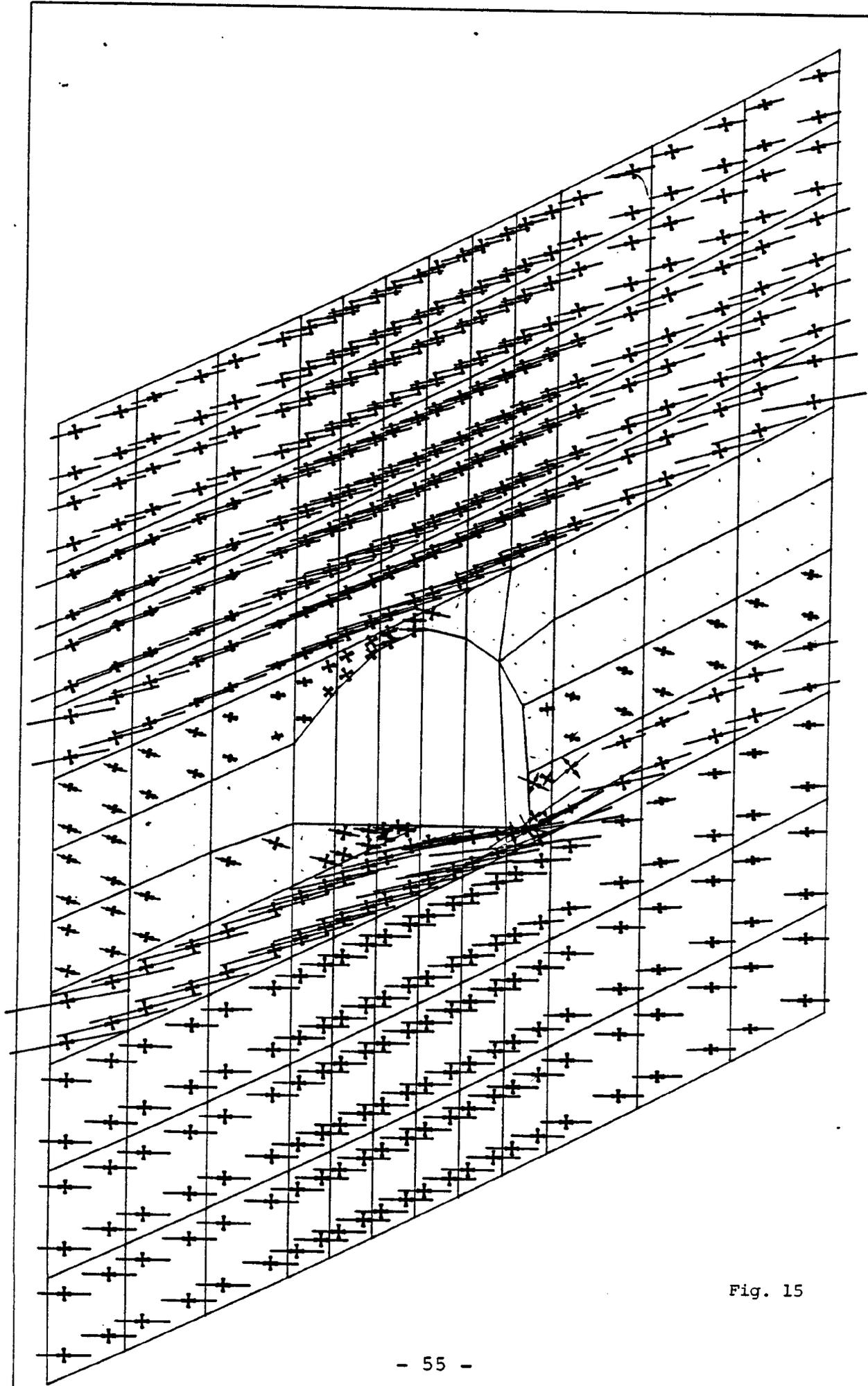
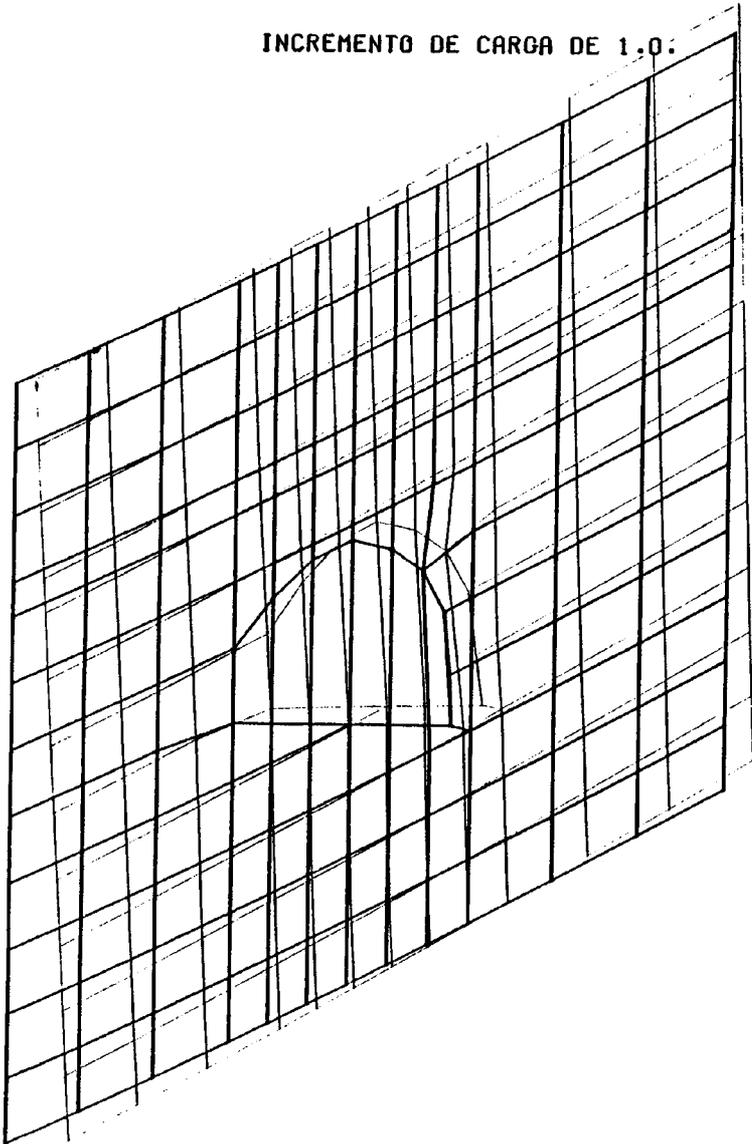


Fig. 15

INCREMENTO DE CARGA DE 1.0:



- 56 -

Fig. 16

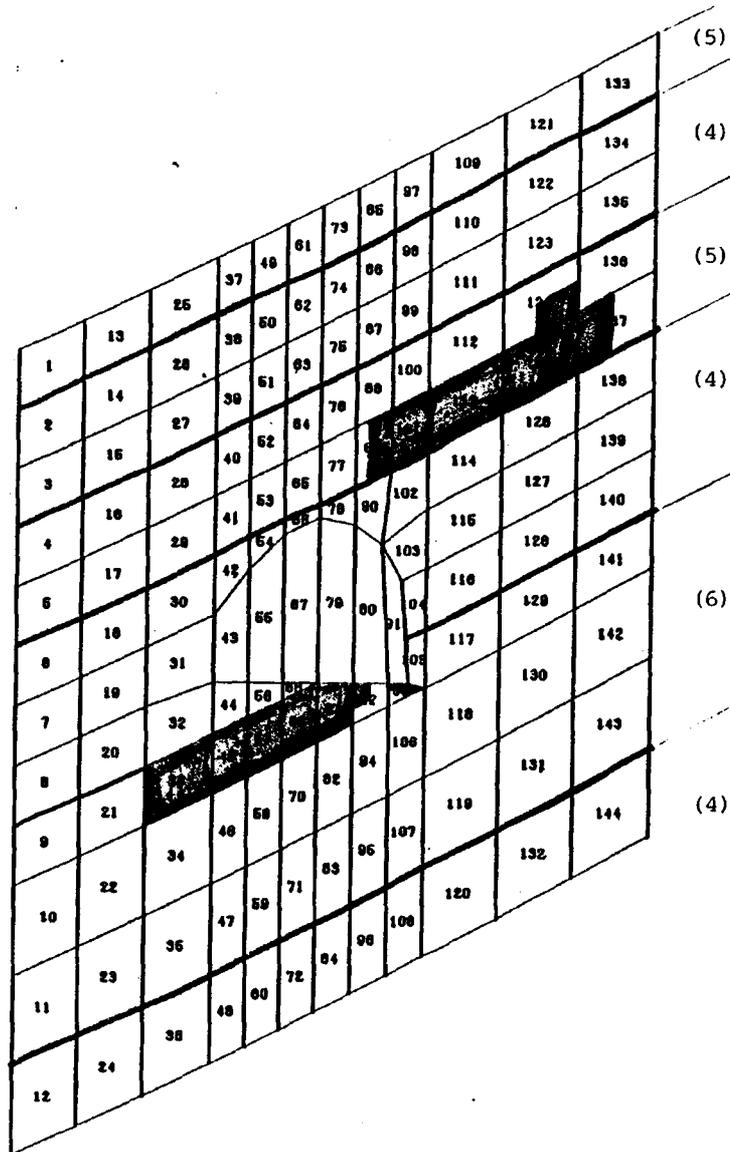
PENARROYA: MODELO PARA ANALISIS LOCAL PLASTICO.
GALERIA EN POSICION 1.

En la posición 4, no se detecta ninguna convergencia vertical, con valores por debajo de 1 mm, mientras que en las restantes posiciones esta convergencia vertical se hace 100% ó 200% veces mayor y en la posición 1 como vimos el colapso es total, con deformaciones fortísimas, que hacían perder convergencia de los resultados obtenidos iterativamente por el tratamiento - computarizado con Elementos Finitos.

El hinchamiento de la solera en esta posición es también mínimo, siendo un 15%, 35%, 50% y 70% mayores en las posiciones 5, 3, 2 y 1. Así mismo la convergencia lateral de la galería es un 500%, 200%, 600% y 600% mayor en las mismas posiciones con respecto a la de la situación 4.

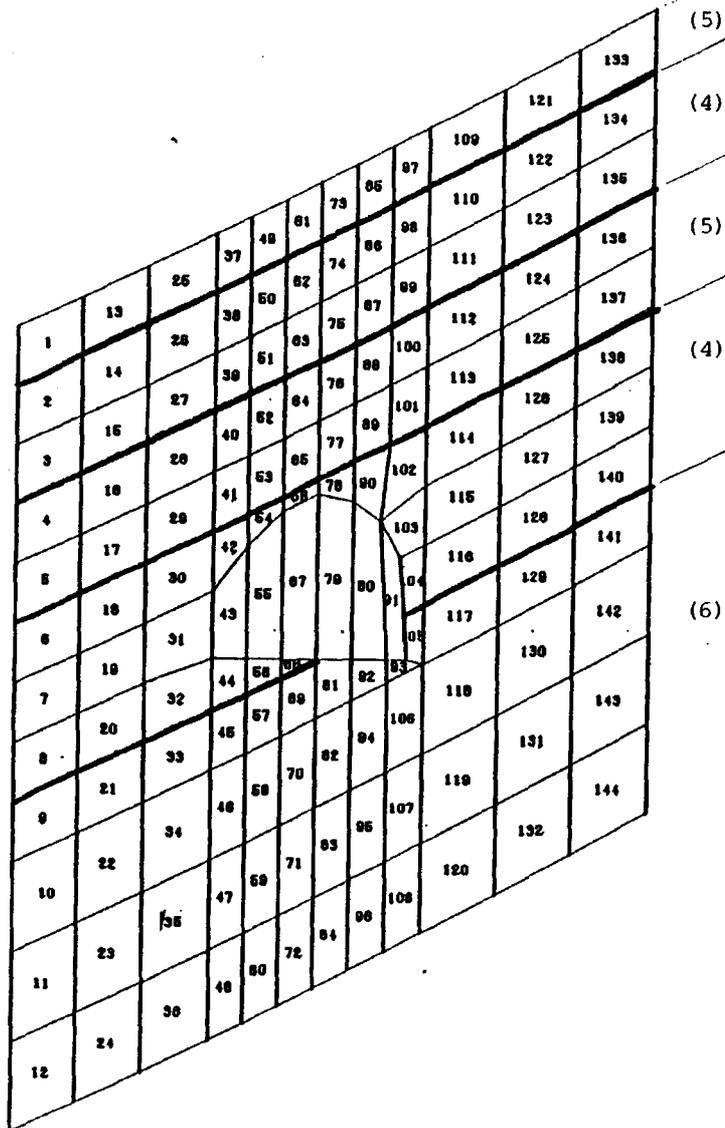
Quedaba pues definida la posición 4 a 7 metros del muro de la capa ubicada en un banco de 3 metros de pizarras masivas (material 4) con 3 metros de pizarras arenosas en el techo inmediato y dos metros de pizarras arenosas plásticas (material 5) en el muro subyacente; como situación más óptima al muro de la capa Cervantes y la que ofrecía las condiciones más favorables para la apertura de la galería con unas fuertes ventajas en comparación con las otras alternativas, en especial con la posición primitiva, sobre la cual presenta deformaciones laterales del orden de 600% menor y de hinchamiento del suelo 70% menor, con lo que las ventajas son totalmente evidentes y decisorias.

El análisis aquí desarrollado se llevó a cabo utilizando el programa PLANET para elementos elastoplásticos del paquete SWANPACK desarrollados por D.R.J. Owen y E. Hinton en 1980 en la Universidad de Swansea, cuna y centro universal del desarrollo de la metodología de Elementos Finitos en la ingeniería, bajo la dirección del Prof. O.C. Zienkiewicz. Este programa codificado en una formulación isoparamétrica, se utilizó con elementos Lagrangianos de 9 nodos, dos puntos de Gauss en la integra



Posición 2
t = infinito
c al 20%

Figura 17



(5)

(4)

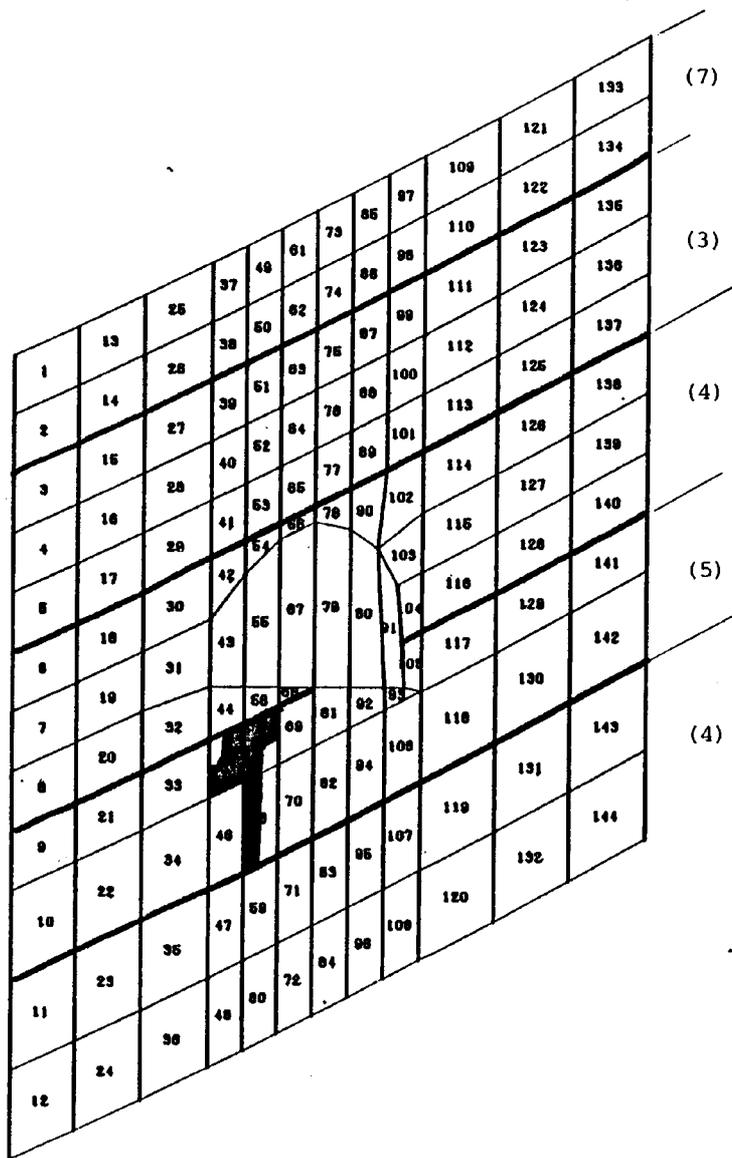
(5)

(4)

(6)

Posición 3
 $t = \text{infinito}$
 $c \text{ al } 20\%$

Figura 18



Posición 4
t = infinito
c al 20%

Figura 19

ción numérica, un algoritmo combinado, en el que las rigideces elementales se recalculan para la segunda iteración de cada incremento de carga, y una función de fluencia de Mohr-Coulomb. Las necesidades de memoria fueron de 2.000 K con 1.5 minutos de CPU. Se utilizaron incrementos de carga del 50%, 80%, 90%, 95% y 100% en un proceso iterativo, realizado en una máquina IBM - 4341, de 8.192 K de capacidad de almacenamiento.

El siguiente paso era el de la definición de la entibación a utilizar para minimizar las deformaciones experimentadas en la posición 4; tema que desarrollamos a continuación.

4.9.3. Diseño de la entibación

4.9.3.1.- Definición del problema

En la entibación de la galería de arrastre en su posición óptima, se trataba de analizar el comportamiento de tres tipos de cuadros metálicos indicados por ENCASUR. Estos cuadros eran el 2UA (TH-21) y 2UB (TH-21) y (TH-29). (Fig. 21).

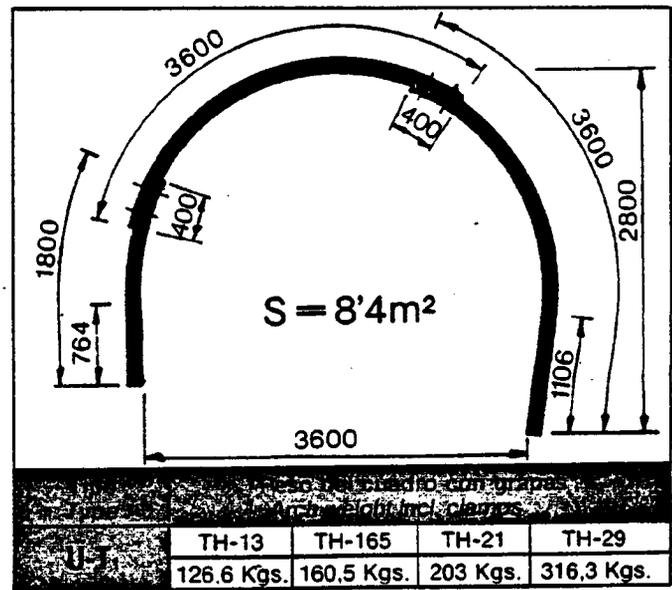
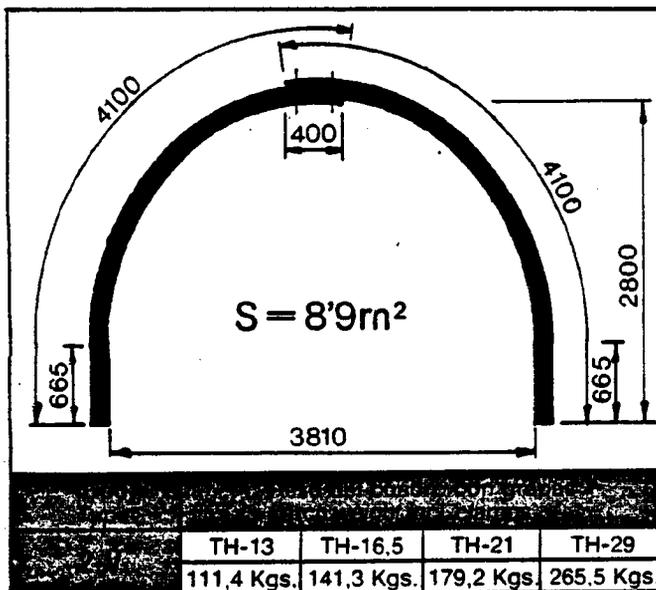
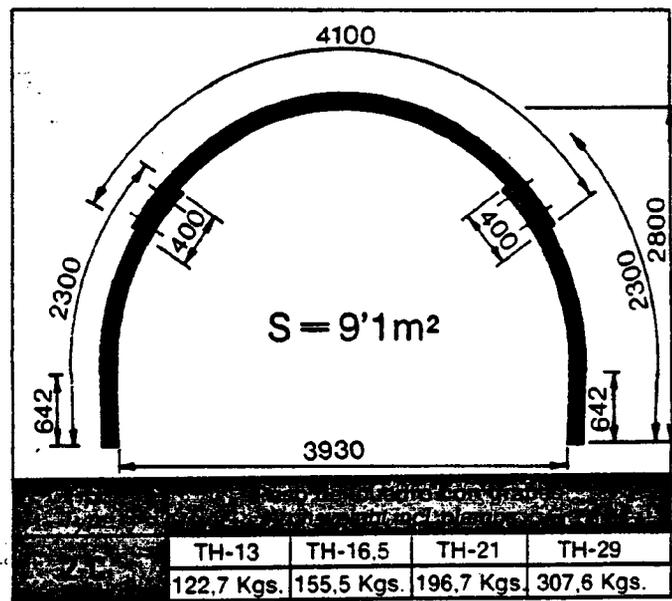
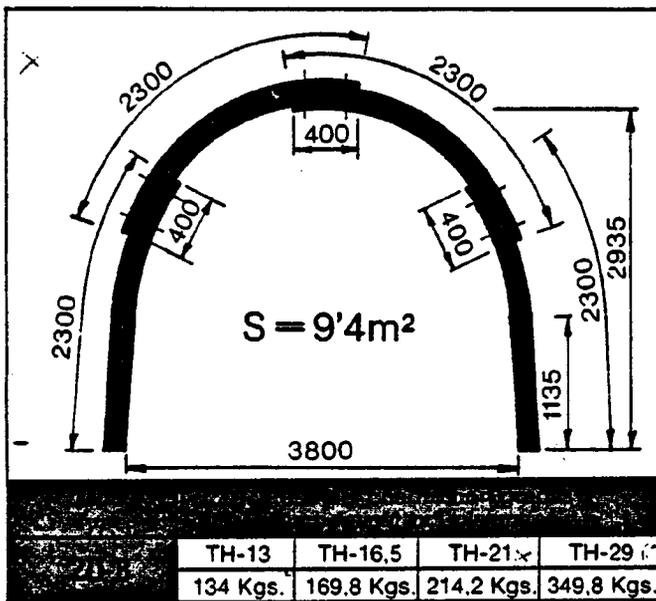
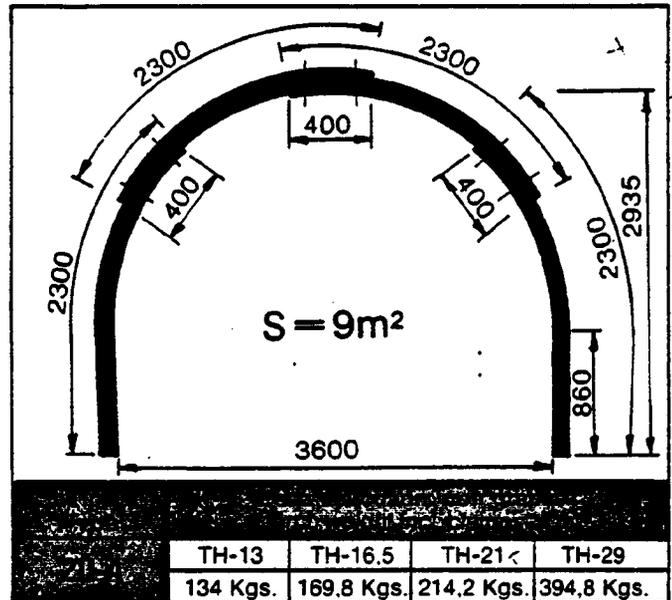
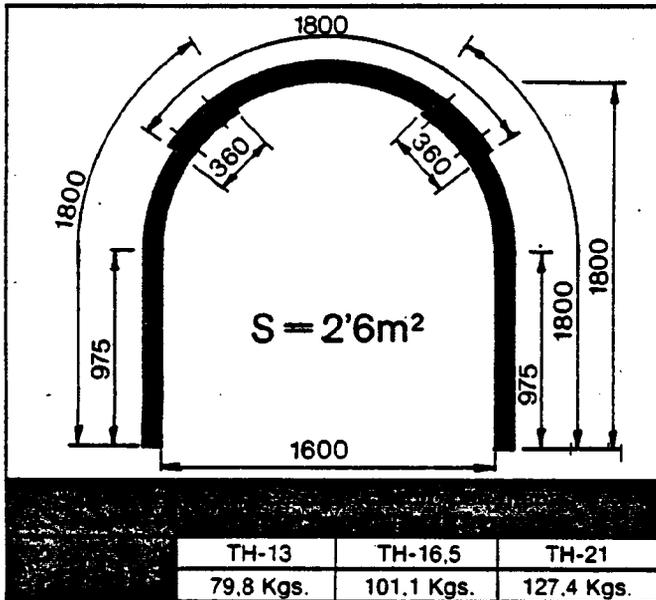
A su vez se trataba de estudiar la influencia del espaciamiento de los cuadros en las cargas a que se sometían los cuadros. Este espaciamiento se consideró en un rango entre 0.8 y 1.2 metros.

4.9.3.2.- Modelo Estructural. Criterios

El modelo estructural utilizado es la malla de Elementos Finitos de las figuras 22 y 23 de 15 x 12 metros, y con los materiales señalados.

Los cuadros metálicos se modelizaron con 14 elementos vi

Fig. 21



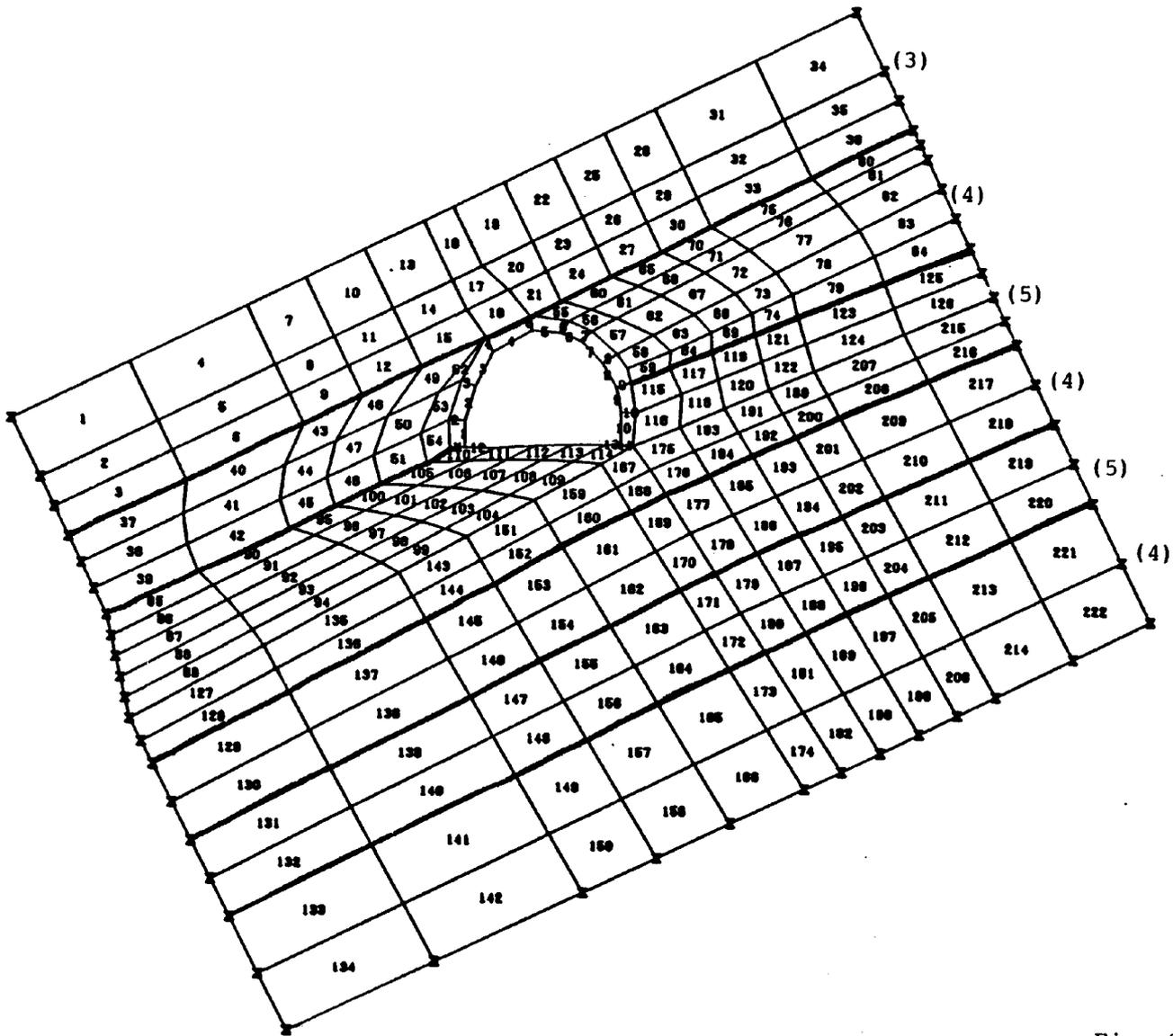
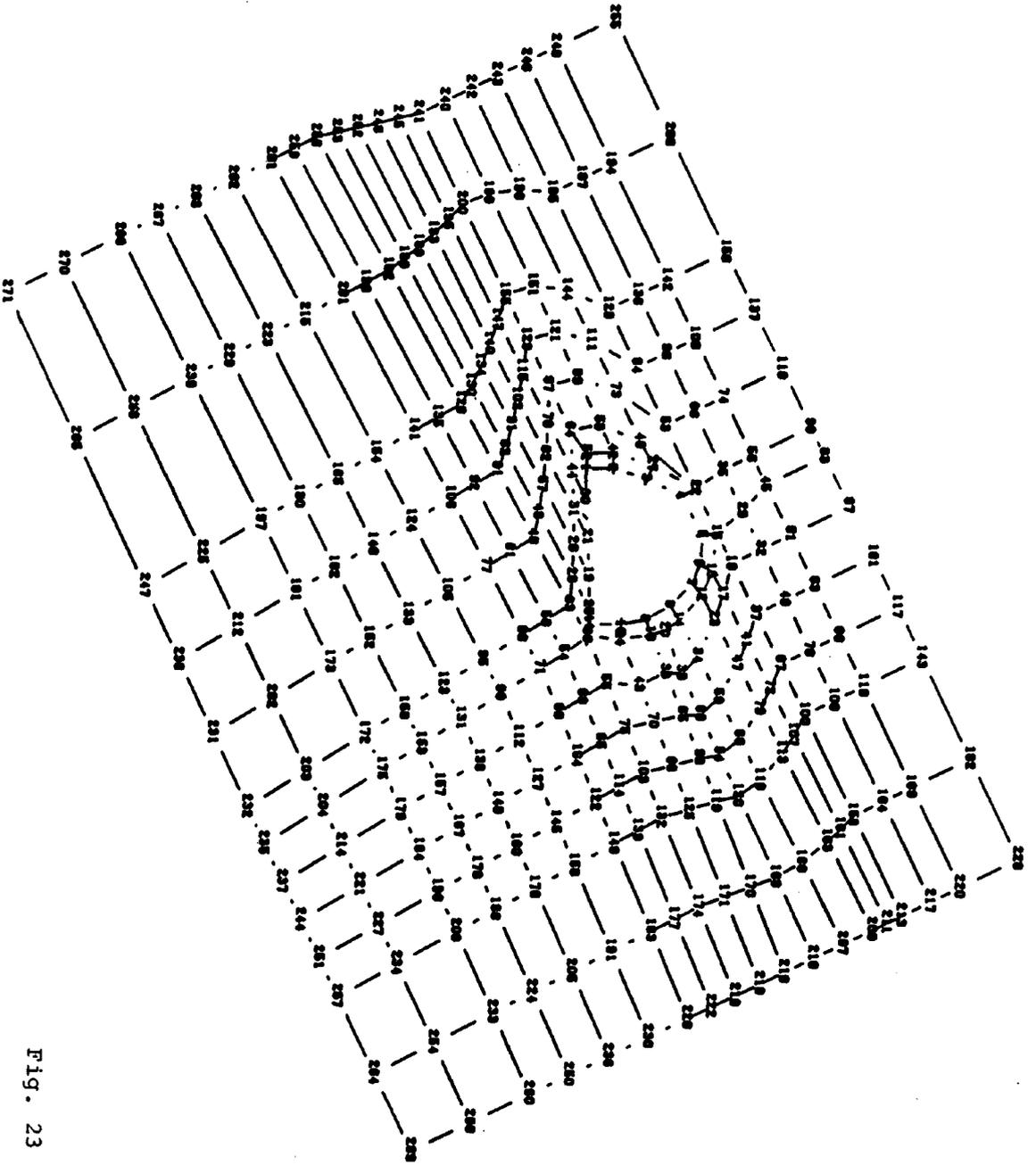


Fig. 22

GALERIA DE PENARROYA. CALCULO DE LA ENTIBACION.





GALERIA DE PENARROYA. CALCULO DE LA ENTIBACION.

Fig. 23

ga (beam) (1 al 14), y en su modelación se utilizaron las siguientes características de los cuadros utilizados de Duro-Felguera:

<u>Perfiles</u>	<u>TH - 21</u>	<u>TH - 29</u>
Altura	10 cm	12,5 cm
Ancho	12 cm	15 cm
Sección	27 cm ²	37 cm ²
Momento de Inercia ..	341 cm ⁴	616 cm ⁴
Módulo de Elasticidad	21.000 kg/mm ²	21.000 kg/mm ²
Ratio Poisson	0.3	0.3

Igualmente se modelizó la madera que constituye el revestimiento entre el cuadro y la pared de la roca, mediante 11 elementos "Truss" que transmiten solo cargas axiales. Los pies de los cuadros se calzaron con planchas metálicas fijas a los cuadros con características mecánicas semejantes a los mismos, con el fin de evitar que los cuadros se hundiesen en la solera de la galería. Esto está modelizado en los elementos 11, 12, 13 y 14.

El modelo estructural utilizado se le condicionó en su contorno, al igual que en el análisis elasto-plástico de búsqueda de situación óptima, con desplazamientos definidos en el análisis de la estructura anterior.

En el análisis de sensibilidad del espaciamiento, el utilizar espaciamientos diferentes a 1 metro, y al estar trabajando con un modelo plano, se hicieron las correcciones oportunas en la sección del perfil de los cuadros y en sus correspondientes Momentos de Inercia.

El programa utilizado en este análisis fue el SAP-IV, de

la Universidad de Berkeley, comentado anteriormente. Se resolvieron en cada pasada 813 ecuaciones con un ancho de banda de 224, con 277 nodos y 222 elementos. Para su realización se utilizó igualmente que en los casos anteriores una máquina IBM 4341.

4.9.3.3.- Análisis de Sensibilidad del Espaciamiento

En el Anexo 11, aparecen los estados tensionales y deformados de cada uno de los casos estudiados, al variar espaciamientos y tipos de cuadros.

De los resultados obtenidos, se observa que los cuadros se comportan todos ellos perfectamente para la situación 4 de la galería. Es interesante observar que el paso de una entibación de 0.8 metros de espaciamento a 1.2 metros, repercute en un incremento de carga sobre los cuadros (empuje axial) del 50%. Es evidente pues que el espaciamento juega un papel importante y que es un factor de fuerte incidencia en el caso que aquí estamos estudiando con todas sus particularidades que ya conocemos. En cualquier caso y en este problema particular de las galerías de arrastre, las cargas axiales a que están sometidos los cuadros están muy lejos de su límite de carga, y una reducción del espaciamento a pesar de la disminución en un 50% de la carga al pasar de 1.2 a 0.8 metros de espaciamento no va a suponer ningún desequilibrio en el comportamiento de los mismos, siempre y cuando, por supuesto, ubiquemos la galería en la posición 4.

4.9.3.4.- Análisis de Tipos de Cuadro

La utilización de cuadros tipo 2UA ó 2UB, no reporta ninguna variación substancial a las cargas (axiales, corte y momentos flectores), a que están sometidos los cuadros (Anexo 11).

Las variaciones que se aprecian son del orden del 8%, por lo que el tipo de cuadro no tiene ninguna relevancia.

4.9.3.5.- Análisis del tipo de perfil

El tipo de perfil TH-21 ó TH-29, y la utilización de uno y otro de ellos, conlleva una disminución de la carga en los cuadros al pasar del TH-21 al TH-29 del orden del 25% (Anexo 11) , aunque siempre dando valores muy alejados del límite de resistencia a la carga de los cuadros.

5.- CONCLUSIONES

El estudio aquí desarrollado nos ha dejado ver como el análisis de la estabilidad en galerías mineras, su ubicación - más óptima y el dimensionamiento y definición de su entibación, dentro de una configuración extremadamente compleja como la aquí presentada sólo es posible mediante el seguimiento y ejecución de una planificación y programa de trabajos y ensayos específicos que nos conduzcan a la posibilidad de utilización de ordenadores y programas de análisis numérico del tipo de Elementos Finitos.

En el caso de la galería de arrastre del muro de la capa Cervantes del Pozo San José de Peñarroya, nos encontramos con unos fenómenos observados que nos condujeron a definir un programa de ensayos y pruebas in situ que nos llevaron a establecer la existencia de unos materiales no homogéneos, anisótropos, con comportamientos elasto-plásticos y visco-elásticos, junto con un estado tensional atípico y con la influencia de la proximidad de las zonas de explotación, en las que era totalmente imposible una solución válida y aceptable que no pasase por un tratamiento numérico computarizado del mismo, en búsqueda de la ubicación óptima de la galería y de su entibación.

Creemos que ésta ha sido la gran aportación de este trabajo, esto es, la aportación de unas técnicas de diagnóstico y de una metodología adecuada y apropiada con rigor a unos condicionamientos específicos y que en sus líneas maestras es perfectamente aplicable a cualquier problema estructural de cualquier

tipo de excavación y labor minera en rocas de tipo sedimentario como es el carbón, en el que los sistemas de discontinuidades - no representan un factor decisivo en el comportamiento de dichos materiales.

Ha sido la primera vez que se ha empleado esta metodología en la minería española, y en este sentido creemos que la aquí realizada y los resultados obtenidos constituyen la aportación y conclusión mas importante a que se ha llegado.

6.- RECOMENDACIONES

Las recomendaciones a que llegamos con la ejecución de este proyecto y que interesan en forma específica no solo al Instituto Geológico y Minero, sino a la misma ENCASUR, se han venido desglosando a lo largo de los últimos capítulos de este trabajo y que son en resumen:

- 1) Situación óptima de la galería de arrastre que minimice las deformaciones y la estabilidad estructural de la misma es la de ubicarla a unos 6 metros de la capa de carbón explotada. En ella se consiguen unas reducciones de las deformaciones del 70% en el levantamiento de la solera y del 500% en la convergencia lateral.
- 2) La entibación más apropiada nos orienta hacia la 2UA con perfil TH-21 con espaciamiento de 1 metro.

El cambio al cuadro 2UB implica muy pocas mejoras en cuanto a las cargas que se generan en la entibación.

La utilización de perfiles TH-29, mejora estas cargas en un 25%, que aunque relativamente considerable no va a suponer, dadas las condiciones de carga en la entibación que se genera en la posición de la galería elegida, una mejora sensible en cuanto al comportamiento de la entibación.

En cuanto al espaciamiento, entre 0,8 a 1,2 metros, con una incidencia del 50% de incremento de carga en el cuadro al pa

sar de una a otra, no nos va a influir por las mismas razones que en el cambio de perfil, de una forma sensible en el comportamiento del cuadro, una vez que tenemos ubicada la galería en su nueva posición.

Se ha hecho asimismo evidente, el calzar los cuadros en su base, con el fin de evitar la penetración en el suelo.

- 3) Los resultados y directrices recomendadas, son totalmente aplicables, con la consideración de que la zonificación del muro aquí estudiada se mantiene razonablemente a lo largo del recorrido que vaya a tener la galería.

A su vez el criterio personal y juicio del ingeniero encargado de la explotación pueden aconsejar consideraciones adicionales y complementarias a lo aquí expresado.

En cualquier caso la rigurosidad utilizada así como la tecnología más avanzada existente para el estudio de estos problemas, nos permite hacer las recomendaciones operacionales comentadas, con los condicionamientos explicados.

Las recomendaciones, son pues breves pero queremos que sean concisas y claras, ya que tienen una orientación enteramente operacional y decisoria. Ello no quita para que el poder llegar a este tipo de recomendaciones se halla tenido que desarrollar un complejo programa de toma de datos y análisis, en el cual el problema y la dificultad no está en dicho programa o análisis, sino en establecer los medios, la planificación y la programación que nos conduzca a los objetivos reales y al problema que se quiera resolver.

7.- BIBLIOGRAFIA

- "Symposium on Exploration For Rock Engineering", Johannesburg, South Africa. 1977.
- "Sixth International Strata Control Conference", Banff, Alberta, Canada. 1977.
- "Fifth International Strata Control Conference", London, U.K. 1972.
- "Seventh International Strata Control Conference", Liege, Belgium. 1982.
- "Symposium on Strata Mechanics". University of New Castle-Upon-Tyne, U.K. 1982.
- "Coal Ground Control", S.S. Peng. 1978.
- "Symposium on Strata Control in Roadways", University of Nottingham. 1970.
- "SAP-IV. A Structural Analysis Program For Static and Dynamic Response of Linear System". K.J. Bathe, E.L. Wilson, F.E. Peterson, University of California, Report EERC. 73-11, April. 1974.
- "Finite Elements in Plasticity". Owen, D.R.J., Hinton, E., Pitman Press, Swansea, U.K., 1980.