



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

## PROYECTO DE INVESTIGACION DE DERRABES DE CARBON

### ANEJO IV

#### **Análisis tensodeformacional de un taller de testeros en una capa inclinada de carbón**

*Geocontrol, S.A - Proyecto de derrabes de carbón*



MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA

01115

**ANALISIS  
TENSO-DEFORMACIONAL DE  
UN TALLER EN UNA CAPA  
INCLINADA DE CARBON**

# **ANALISIS TENSO-DEFORMACIONAL DE UN TALLER EN UNA CAPA INCLINADA DE CARBON**

## **1.- INTRODUCCION.**

## **2.- ANTECEDENTES.**

## **3.- METODOLOGIA.**

**3.1. Definición geométrica del problema.**

**3.2. Condiciones de contorno.**

**3.3. Propiedades de los materiales.**

**3.4. Programa de cálculo.**

**3.5. Requerimientos informáticos.**

**3.6. Tiempo de cálculo.**

**3.7. Salidas de ordenador.**

## **4.- RESULTADOS OBTENIDOS.**

**4.1. Modelos analizados.**

**4.2. Análisis de los resultados obtenidos.**

**4.2.1. Desarrollo de la rotura.**

**4.2.1.1. Índice de plastificación.**

**4.2.1.2. Distribución de tensiones normales a la capa.**

**4.2.2. Desplazamientos del terreno.**

**4.2.2.1. Movimientos del carbón.**

**4.2.2.2. Movimientos del muro.**

**4.2.3. Volumen de influencia del testero.**

**4.2.3.1. Distribución de tensiones.**

**4.2.3.2. Distribución de desplazamientos horizontales.**

**5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

# **ANALISIS TENSO-DEFORMACIONAL DE UN TALLER EN UNA CAPA INCLINADA DE CARBON**

## **1.- INTRODUCCION.**

La DIRECCION GENERAL DE MINAS E INDUSTRIAS DE LA CONSTRUCCION, LA CONSEJERIA DE ECONOMIA Y HACIENDA DE LA JUNTA DE CASTILLA Y LEON, LA CONSEJERIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO DEL PRINCIPADO DE ASTURIAS Y OCICARBON están promocionando la realización del proyecto de INVESTIGACION DE DERRABES DE CARBON EN YACIMIENTOS DE FUERTE PENDIENTE, para lo cual han nombrado titular administrativo del proyecto al INSTITUTO TECNOLOGICO GEOMINERO DE ESPAÑA (ITGE).

Dentro de las funciones que está desarrollando al amparo de este proyecto el ITGE ha contratado con GEOCONTROL, S.A. la realización de diversos trabajos de asistencia técnica, entre los cuales está el análisis tenso-deformacional de un taller en una capa inclinada de carbón para evaluar las posibilidades que ofrece, frente a la prevención de los derrabes, el conocimiento preciso de la distribución de tensiones que se genera en las inmediaciones de los testeros típicos en las explotaciones sobre capas inclinadas.

Mediante este documento GEOCONTROL, S.A. presenta los resultados de los trabajos realizados que han contribuido a clarificar la metodología a seguir, establecer las herramientas de cálculo que se pueden utilizar y a mostrar las grandes posibilidades que ofrece este método para obtener una información precisa que ayude a prevenir la formación de los derrabes.

## **2.- ANTECEDENTES.**

La explotación de una capa inclinada de carbón, mediante el método que sea, modifica sustancialmente la distribución de tensiones en su entorno de forma similar a lo que ocurre con la creación de un hueco subterráneo.

Como idea general hay que señalar que, al avanzar un tajo de explotación, las tensiones radiales en el terreno próximo a la excavación disminuirán respecto a los valores existentes en el estado inicial y, contrariamente, las tensiones tangenciales aumentarán notablemente.

Este aumento de la tensión tangencial, unido a la baja resistencia que normalmente tiene el carbón y algunas lutitas carboníferas, supone que se genere un proceso de plastificación que implica la creación de zonas localmente débiles.

Este mecanismo exige que los métodos de cálculo utilizados tengan la capacidad de considerar un comportamiento elasto-plástico de los materiales ya que, por contra, la utilización de un modelo exclusivamente elástico proporcionaría unos resultados que muy poco tendrían que ver con la realidad.

De acuerdo con este mecanismo la distribución tensional en el entorno del taller se verá profundamente alterada respecto a la situación natural y esto tiene consecuencias importantes tanto en la interrelación entre capas próximas como en la estabilidad de la propia explotación.

En primer lugar el volumen de los terrenos plastificados, a techo y muro de la capa, unido al posterior proceso de subsidencia generado en el postaller definirá el volumen de terrenos influenciados por la explotación. Esta situación puede tener un efecto positivo sobre explotaciones próximas cuando se busca un efecto de distensión; pero también puede tener una incidencia negativa sobre galerías y talleres próximos en razón del aflojamiento que se produce en los terrenos.

En segundo lugar la plastificación tiene una incidencia directa sobre la estabilidad local de las explotaciones, es decir los testeros, así como puede jugar un papel primordial en la generación de los derrabes.

Hay que tener presente que el carbón plastificado de los testeros es esencialmente un terreno debilitado y, en los casos como en las capas inclinadas donde la componente de la gravedad es importante, origen de zonas susceptibles de dislocarse produciendo caídas del carbón.

Además hay que tener en cuenta que en la frontera elasto-plástica, que separa el material debilitado por la plastificación del que todavía es elástico, se producen los mayores valores de la tensión tangencial. Esta situación, en un material como el carbón que normalmente contiene cantidades importantes de grisú adsorbido, es potencialmente peligrosa ya que el carbón plastificado aumentará la permeabilidad al paso del grisú; pero, en la frontera elasto-plástica, esta permeabilidad disminuirá notablemente, impidiendo la normal desorción del grisú que podrá ser liberado bruscamente con consecuencias negativas.

A partir de todo lo anterior queda claro la importancia de tener un conocimiento preciso sobre la distribución de tensiones alrededor de una explotación; que para ser realista debe basarse en un comportamiento elasto-plástico de los materiales.

Los fundamentos de la Mecánica que posibilitan la resolución de este tipo de problemas, que además son evidentemente tridimensionales, están disponibles desde el siglo XIX; pero la resolución de las ecuaciones correspondientes es prácticamente imposible con los métodos tradicionales; salvo en situaciones simplificadas que, desgraciadamente, no son las de los talleres sobre capas inclinadas.

Los métodos de cálculo numérico, basados en la utilización de ordenadores, han hecho posible en los años 70 abordar estos problemas; pero con un coste tan alto que el progreso ha sido muy lento. Sin embargo, a mediados de los 80, el tremendo progreso de la microelectrónica ha abaratado drásticamente la utilización de los medios informáticos y ha hecho posible la utilización eficaz de los métodos numéricos de cálculo.

De acuerdo con este planteamiento en este trabajo se ha realizado un análisis tenso-deformacional de un taller típico en una capa inclinada de carbón utilizando un modelo tridimensional de elementos finitos, con un comportamiento elastoplástico de los materiales y simulando la respuesta del terreno en algunas situaciones características de estos talleres.

### **3.- METODOLOGIA.**

La metodología que se ha seguido en este trabajo es la habitualmente empleada en los análisis tenso-deformacionales, mediante métodos numéricos, que consta de las siguientes etapas:

- \* Definición geométrica del problema**
- \* Condiciones de contorno**
- \* Propiedades de los materiales**
- \* Programa de cálculo**
- \* Análisis de los resultados**

En los apartados siguientes se comentan detalladamente las particularidades más relevantes de las distintas etapas del análisis numérico realizado.

#### **3.1. Definición geométrica del problema.**

Para analizar la distribución de tensiones y desplazamientos en un taller tipo de testers se ha definido un paralelepípedo de  $109.725 \text{ m}^3$  de volumen que tiene 66 m de ancho, 47,5 m de profundidad y 35 m de altura.

En este modelo se ha simulado la presencia de una capa inclinada de carbón de 70° de inclinación en dos modalidades; la primera considerando que la capa es absolutamente regular, con una potencia de 2 m, y la segunda suponiendo que la capa tiene anchurones, con potencia hasta de 3,5 m y estrechones en los que la capa llega a tener 0,5 m de potencia.

En el modelo se ha considerado que el techo tiene una potencia media de 32 m y que la potencia media del muro es de 32 m. Se han modelizado 4 testeros, con niveladuras y alturas de 5 m, y se han incluido la guía de cabeza que se ha supuesto se lleva de rasgado.

El frente de relleno se ha modelizado con un plano de 45° de inclinación que está a 3 m de la línea de picos de los testeros.

En la zona deshullada se han modelizado las mampostas de sostenimiento con una densidad de 1 mamposta cada 1,56 m<sup>2</sup>; que equivale a separaciones longitudinales y transversales de 1,25 m x 1,25 m que se han modelizado con elementos tipo viga.

Hay que tener presente la gran dificultad que supone utilizar elementos tan pequeños para conseguir modelizar las mampostas y combinar un mallado fino en las proximidades del frente del carbón sin que el número de elementos del modelo exceda las posibilidades de cálculo.

En condiciones normales este problema se resuelve con las subrutinas propias de los programas de cálculo que consiguen un mallado optimizado una gradación adecuada del tamaño de los elementos.

Sin embargo en este caso la subrutina de mallado no era capaz de pasar de los elementos pequeños en el borde de carbón y las mampostas hasta los bordes del modelo sin sobrepasar la anchura de banda de la matriz de rigidez, que limita las posibilidades de cálculo.

Para superar este problema ha sido necesario crear un programa de mallado, basado en un modelo fractal, de tal forma que la dimensión de un elemento está dada por

$$D = \frac{1}{2^n}$$

siendo  $n$  el número de elementos.

Se demuestra que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{2^n} = 2$$

De esta forma, resulta que a una distancia doble de una de las dimensiones del elemento más grande se puede dibujar infinitos elementos que cumplen las tres condiciones de MANDELBROT para ser considerados fractales:

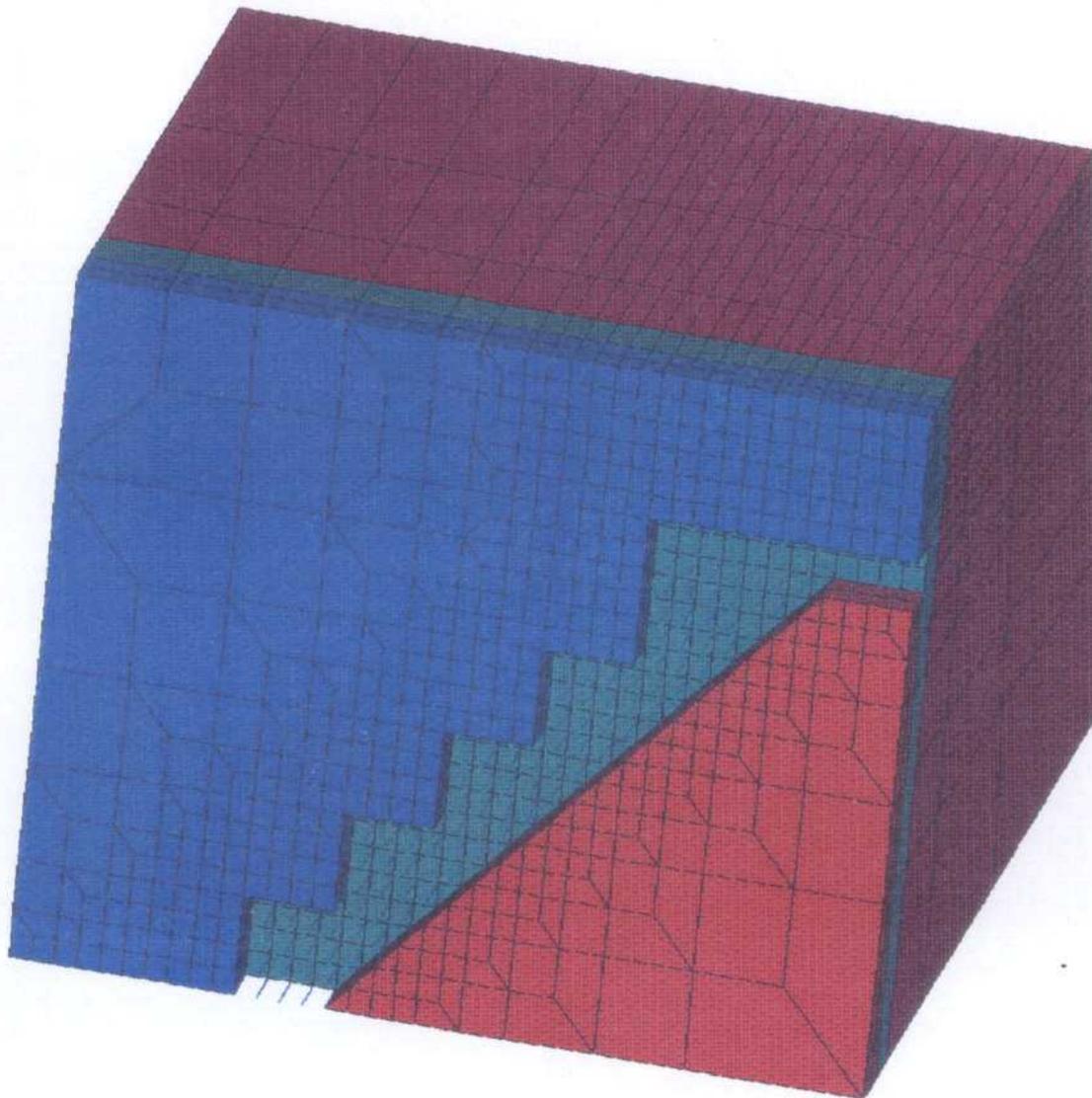
- Autosimilitud
- Forma independiente del factor de escala
- Dimensiones no enteras

La forma de operar con este programa para crear el mallado consiste en crear, manualmente, el mallado fino en las proximidades del frente de carbón y considerar estos elementos como la última serie que debe ser generada por el método fractal.

De esta forma se han generado los dos modelos utilizados en este trabajo, que se presentan en las Figuras N° 1 y 2, con 6.468 elementos y 6.919 nodos cada uno. En estas figuras puede apreciarse claramente la alta definición que se logra en las proximidades del espacio deshullado y la rápida gradación hacia los bordes del modelo.

En las Figura N° 3 y 4 se presentan dos secciones, en capa y transversal a ella, del mallado utilizado en el caso de capa regular.

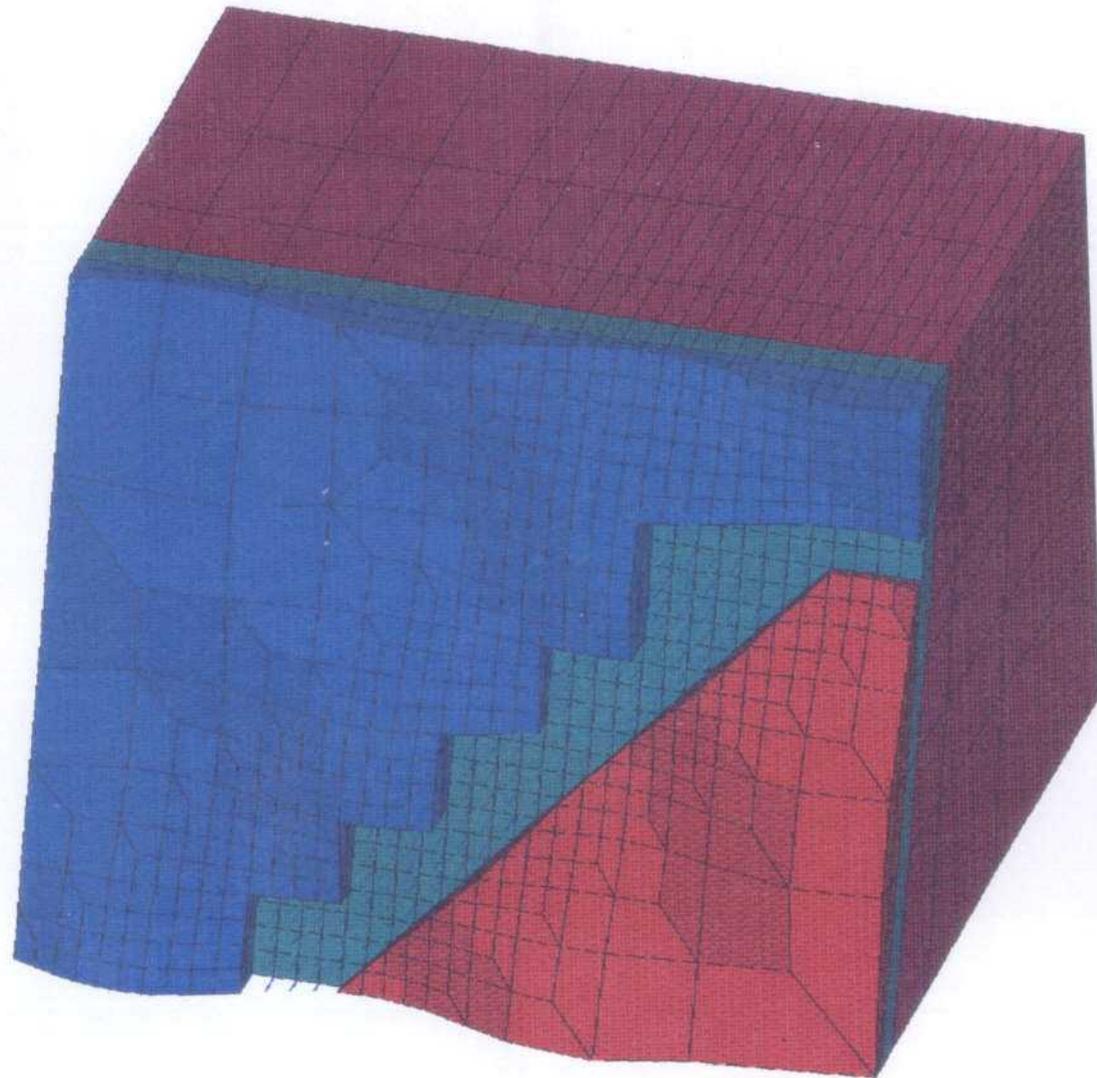
1



```
ANSYS 4.4a  
JUN 15 1991  
21:26:00  
PLOT NO. 1  
POST1 ELEMENTS  
MAT NUM  
  
XU = 1  
YU = 2  
ZU = 3  
DIST=31.944  
XF = 23.75  
YF = 17.5  
ZF = 20.105  
PRECISE HIDDEN
```

FIGURA N° 1. PERSPECTIVA DEL  
MODELO DE UN TALLER DE TESTEROS  
EN UNA CAPA INCLINADA REGULAR

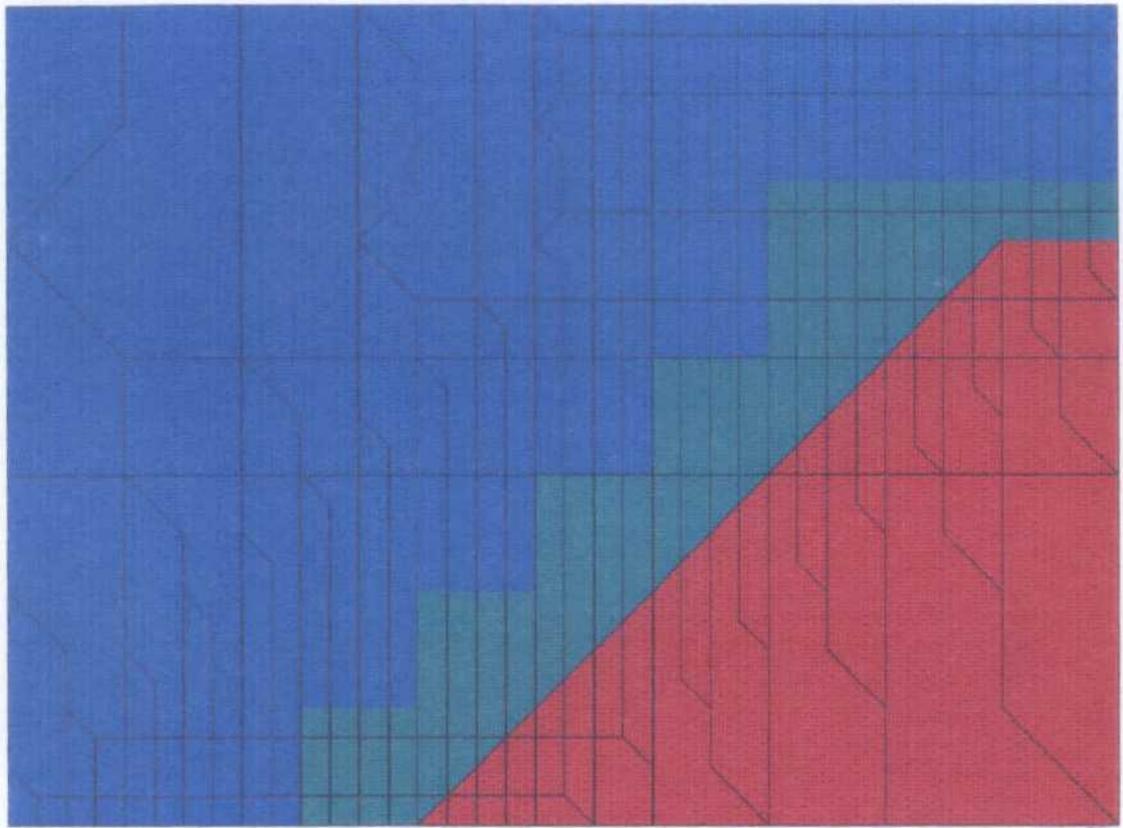
1



```
ANSYS 4.4a  
JUN 12 1991  
8:16:02  
PLOT NO. 1  
POST1 ELEMENTS  
MAT NUM  
XU = 1  
YU = 1  
ZU = 1  
DIST = 2.363  
XF = 13.75  
YF = 17.5  
ZF = 20.935  
PRECISE HIDDEN
```

FIGURA Nº 2. PERSPECTIVA DEL MO  
DELO DE UN TALLER DE TESTEROS EN  
UNA CAPA INCLINADA IRREGULAR

1



ANSYS 4.4A  
JUN 12 1991  
6:58:01  
PLOT NO. 2  
POST1 ELEMENTS  
MAT NUM  
ZU =1  
DIST=26.125  
XZ =23.75  
YZ =17.5  
ZF =20.185  
PRECISE HIDDEN

FIGURA N° 3. SECCION DEL MODELO TRIDIMENSIONAL DE TESTEROS EN EL PLANO DE LA CAPA

1

```
ANSYS 4.4a  
JUN 12 1991  
2:13:58  
PLOI NO. 3  
POST1 ELEMENTS  
MAT NUM  
  
XU =1  
DIST=96.3  
XP =23.75  
YP =17.3  
ZP =33  
PRECISE HIDDEN
```

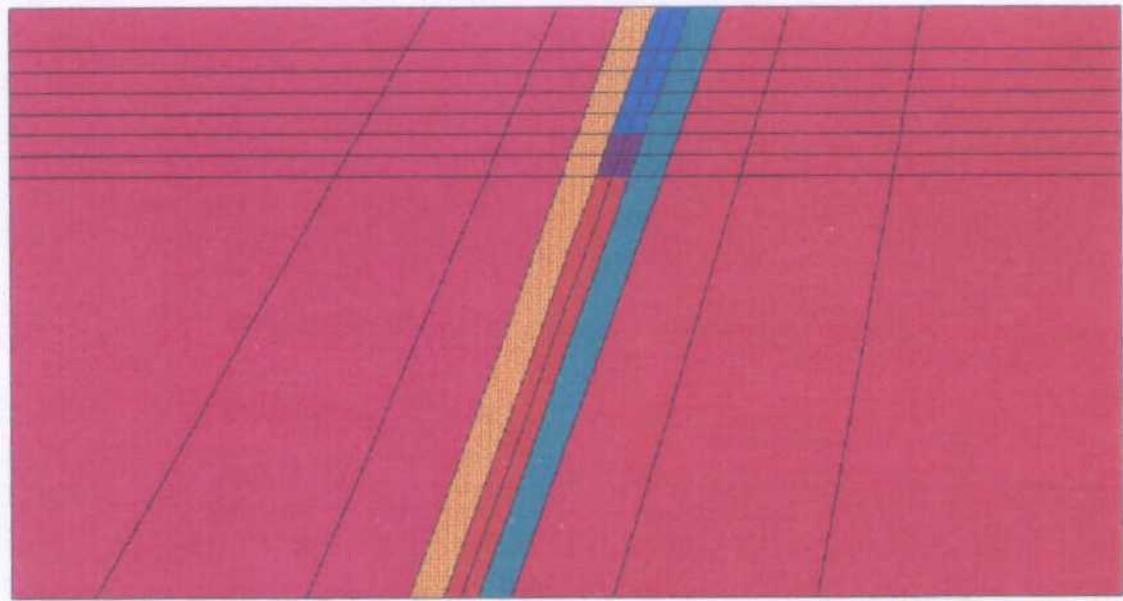


FIGURA N° 4. SECCION TRANSVERSAL  
EN UN PLANO VERTICAL DEL MODELO -  
TRIDIMENSIONAL DE UN TALLER DE -  
TESTEROS EN UNA CAPA REGULAR

En la Figura N° 5 se presenta el corte vertical transversal a la capa en el caso de que ésta sea irregular.

### **3.2. Condiciones de contorno.**

En cada cara del modelo, excepto en la horizontal superior, se ha supuesto que el desplazamiento normal es nulo.

En la cara horizontal superior se ha aplicado una presión normal de 7,5 MPa que, para un peso específico de  $0,025 \text{ MN/m}^3$ , equivale a que el modelo se encuentre a una profundidad de 300 m respecto a la superficie.

En el interior del modelo solo actúa la gravedad y los movimientos son libres de tal forma que las reacciones sobre las mampostas y las sobrepresiones en el carbón y relleno deben ser soportados por éstos materiales.

### **3.3. Propiedades de los materiales.**

Los programas de cálculo tenso-deformacional, ya sean de elementos o diferencias finitas, permiten considerar que el modelo está constituido por diversos materiales y, para poder realizar los cálculos, es necesario alimentar al ordenador con las propiedades que representan el comportamiento de estos materiales.

Estas propiedades pueden clasificarse en dos grandes grupos: DEFORMACIONALES y RESISTENTES. Las propiedades deformacionales permiten calcular los desplazamientos de los elementos del modelo, para cada terreno, en función del estado tensional a que está sometido cada elemento. Normalmente los parámetros típicos que se emplean para definir el comportamiento deformacional son el MODULO DE YOUNG y el COEFICIENTE DE POISSON.

Las propiedades resistentes permiten conocer si el material se comporta elásticamente, cuando se produce el tránsito de elasticidad a plasticidad y establecer el comportamiento en post-rotura.

```
ANSYS 4.4a  
JUN 12 1991  
8:17:53  
PLOT NO. 3  
POST1 ELEMENTS  
MAT NUM  
  
XU = 1  
DIST = 36.3  
XF = 23.75  
VF = 17.3  
ZF = 33  
PRECISE HIDDEN
```

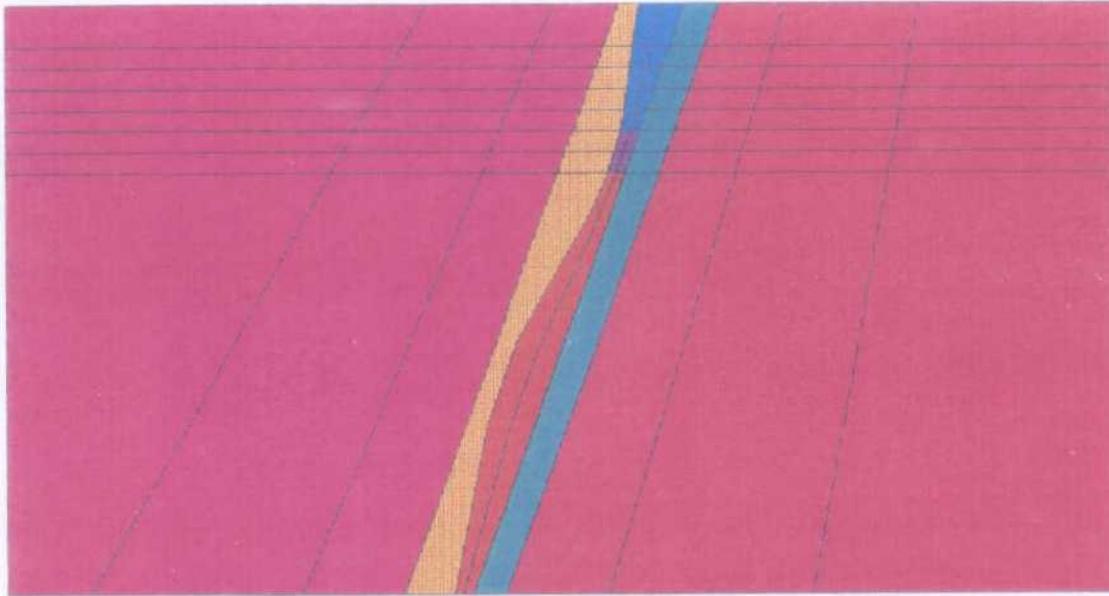


FIGURA Nº 5. SECCION TRANSVERSAL EN UN PLANO VERTICAL DEL MODELO TRIDIMENSIONAL DE UN TALLER DE TESTEROS EN UNA CAPA IRREGULAR

Habitualmente el criterio de plastificación más utilizado es el de Mohr-Coulomb y por ello los parámetros resistentes más significativos son la cohesión y el ángulo de rozamiento interno.

En la mayor parte de los casos cada elemento del modelo puede asociarse a un material diferente por lo que el número de ellos que se puede emplear puede considerarse, a efectos prácticos, como cuasi-infinito.

Además como los materiales están sometidos al efecto de la gravedad, es necesario aportar para cada uno de ellos el valor de la densidad.

En este trabajo se han utilizado los ocho materiales que se indican a continuación:

- 1.- Carbón**
- 2.- Aire, que representa el espacio deshullado y no relleno**
- 3.- Relleno**
- 4.- Madera, necesario para poder modelizar las mampostas**
- 5.- Muro lejano**
- 6.- Muro próximo**
- 7.- Techo próximo**
- 8.- Techo lejano**

En el Cuadro I se presentan las propiedades asignadas a cada uno de los materiales utilizados en este trabajo.

El aire, que debe representar el volumen deshullado y no relleno, se ha modelizado como cuasi-infinitamente deformable y con una densidad muy pequeña como corresponde a este material. Sin embargo se ha considerado con una cohesión muy alta para evitar que su plastificación introduzca distorsiones en los elementos próximos del modelo.

MATERIAL	PROPIEDADES				
	DEFORMACIONALES		RESISTENTES		Densidad $\left(\frac{M \cdot Kg}{m^3}\right)$
	Modulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson	Cohesión (MPa)	Angulo de rozamiento interno (°)	
CARBON	500	0,4	0,4 - 1,0	28	0,0025
AIRE	0,1	0,35	100,0	28	0,00001
RELLENO	200	0,25	ELASTICO		0,0020
MADERA	50	0,3	ELASTICO		0,0015
MURO LEJANO	2.000	0,25	ELASTICO		0,0025
MURO PROXIMO	1.000	0,3	2,0	30	0,0025
TECHO PROXIMO	1.500	0,25	2,0	40 - 30	0,0025
TECHO LEJANO	4.000	0,25	ELASTICO		0,0025

**CUADRO I. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES**

El relleno, la madera y el techo lejano se han modelizado como puramente elásticos de tal forma que admiten el nivel de carga que resulte del equilibrio de los elementos del modelo.

El carbón ha sido modelizado, en el primer caso analizado, como elemento elástico para comprobar la eficiencia de los cálculos; pero, en los casos siguientes, se ha modelizado con comportamiento elasto-plástico con cohesión de 0,4 y 1,0 MPa.

Hay que tener presente que las propiedades utilizadas en este trabajo han sido escogidas por los Técnicos de GEOCONTROL, S.A. en base a su experiencia en este campo; aunque deberían haberse obtenido a partir de ensayos de laboratorio y campo. Probablemente, no habrá ningún taller de testers que tenga exactamente las propiedades seleccionadas; aunque, en conjunto, representen una situación que pueda considerarse como normal.

Dado que el objetivo de este trabajo se concreta en mostrar las posibilidades del análisis tenso-deformacional para estudiar el mecanismo de producción de los derrabes, se considera razonable esta asignación de propiedades; pero **cuando se quiera estudiar un caso real se deberán realizar los correspondientes ensayos para obtener las propiedades específicas de los terrenos que se consideren.**

### **3.4. Programa de cálculo.**

El programa de cálculo que se ha utilizado es el denominado ANSYS que ha sido desarrollado por SWANSON ANALYSIS SYSTEMS INC, HOUSTON P.A. USA, GEOCONTROL, S.A. tiene alquilada la versión 4.4A que puede ser utilizada en un ordenador tipo PC Compatible.

El programa ANSYS está orientado hacia el análisis estructural en tres dimensiones con carácter absolutamente general y, dentro de su amplio espectro de utilización, incluye aplicaciones geotécnicas.

Básicamente el programa consta de tres subprogramas totalmente diferenciados; el primero se encarga de confeccionar el modelo, el segundo realiza los cálculos y el tercero proporciona las salidas gráficas para el análisis de los resultados.

Hay que tener presente que, en un análisis tensodeformacional en tres dimensiones, la confección del modelo presenta tal grado de complejidad que sin la ayuda de un programa de preproceso, como tiene el programa ANSYS, resulta prácticamente imposible llegar a disponer de un modelo adecuado.

Por otro lado, la información suministrada por los resultados de los cálculos realizados es del tal volumen que prácticamente no se puede analizar sin la ayuda de un programa de post-proceso que convierta esta información en salidas gráficas.

### **3.5. Requerimientos informáticos.**

Aunque la versión del programa ANSYS que está alquilada por GEOCONTROL, S.A. es una versión que puede ser utilizada en un ordenador tipo PC Compatible, para poder resolver problemas de la envergadura de los que integran este trabajo es preciso disponer de un PC altamente potenciado.

Para trabajar con el programa ANSYS GEOCONTROL, S.A. ha utilizado un ordenador ALR provisto de un microprocesador 80846, trabajando a 25 MHz, que está auxiliado por otro microprocesador Abacus 4167 de WEITEK para realizar los cálculos matemáticos.

La estructura y modo de trabajo del programa ANSYS exige disponer de una amplia memoria RAM, que en este caso es de 13 Mb, y está auxiliada por un disco duro de 620 Mb.

Con objeto de poder almacenar la copiosa información generada al resolver los modelos tenso-deformacionales, el ordenador empleado para correr el programa ANSYS dispone de una cinta, con capacidad de almacenamiento por cartucho de 150 Mb.

### **3.6. Tiempo de cálculo.**

En esta aplicación del programa ANSYS se ha llegado al límite de las posibilidades del ordenador utilizado y, en consecuencia, los tiempos de cálculo son verdaderamente importantes.

El primer análisis realizado en elasticidad ha supuesto un tiempo de cálculo de unas 9 horas; que se ha incrementado notablemente cuando se ha pasado al análisis elasto-plástico.

Como idea básica hay que señalar que el tiempo de cálculo en un análisis elasto-plástico es tanto mayor cuanto mayor es la plastificación y, por término medio, puede afirmarse que los cálculos necesarios para resolver un problema elasto-plástico exigen unas 74 horas de cálculo.

### **3.7. Salidas de ordenador.**

Habitualmente, además de las salidas gráficas que facilitan notablemente la interpretación de los cálculos realizados, es normal acompañar en anejos los listados de ordenador que corresponden a los cálculos realizados.

**En este caso la impresión de los resultados de cálculo, para cada caso analizado, ocupa aproximadamente unas 4460 hojas de tamaño DIN A4.**

Por ello las salidas correspondientes a los cálculos efectuados se han almacenado en cintas magnéticas a partir de las cuales, disponiendo del correspondiente programa ANSYS, puede realizarse la interpretación de los cálculos realizados.

Para tener una idea de la magnitud del trabajo realizado, basta indicar que una vez que se tienen las ideas claras sobre las salidas gráficas que se quiere obtener, se necesitan unas tres horas de trabajo en cada problema analizado, para disponer de las distribuciones de tensiones y desplazamientos que, para cada caso, se han empleado en la redacción de esta memoria.

#### **4.- RESULTADOS OBTENIDOS.**

En los apartados siguientes se comentan los resultados obtenidos con el programa ANSYS en los diversos análisis realizados.

##### **4.1. Modelos analizados.**

En total se han analizado cinco casos de un taller de testers correspondientes a las siguientes características de la capa de carbón y de los hastiales:

- 1.- Comportamiento elástico del carbón
- 2.- Comportamiento elasto-plástico del carbón, con una cohesión de 1 MPa
- 3.- Comportamiento elasto-plástico del carbón, con una cohesión de 0,4 MPa
- 4.- Comportamiento elasto-plástico del carbón con una cohesión de 1,0 MPa y techo próximo con ángulo de rozamiento interno disminuido en 10°.
- 5.- Comportamiento elasto-plástico del carbón con una cohesión de 0,4 MPa y capa de potencia irregular.

##### **4.2. Análisis de los resultados obtenidos.**

Al analizar los resultados obtenidos se comprobó que el estado tenso-deformacional correspondiente a la situación de equilibrio en los casos 2 y 4 eran prácticamente idénticos; por lo que el análisis de los resultados del caso 4 no aporta la información diferencial relevante.

Por otro lado hay que señalar que los tiempos de cálculo necesarios para la resolución del caso 5 aumentaron extraordinariamente, superando las 112 horas de cálculo ininterrumpido. Esto es debido a que la plastificación inducida

en el carbón debido a su relativamente baja cohesión, 0,4 MPa, y a la notable potencia local de la capa, 3,5 m, es muy intensa y empieza a ser difícil de alcanzar la situación de equilibrio con un algoritmo de cálculo de elementos finitos.

En los apartados siguientes se comentan los resultados más relevantes que se han obtenido en relación con los siguientes aspectos:

- \* Desarrollo de la rotura
- \* Desplazamiento del terreno
- \* Volumen de influencia del terreno

#### **4.2.1. Desarrollo de la rotura.**

Para el análisis de la evolución de la zona de carbón que puede considerarse rota, plastificada en términos técnicos, se han tenido en cuenta los resultados obtenidos en los casos 2, 3 y 5. No se han considerado los resultados obtenidos en el caso 1 ya que, por definición, en este caso no se pueden generar zonas plastificadas.

##### **4.2.1.1. Índice de plastificación.**

Una forma de evaluar la evolución de la plastificación inducida en el modelo consiste en representar el índice de plastificación de cada elemento que está definido por la expresión:

$$\text{I.P.} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{F(\sigma_3) - \sigma_3}$$

En la expresión anterior  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  son las tensiones principales extremas y  $F(\sigma_3)$  es la expresión del criterio de rotura. En el criterio de Mohr-Coulomb se cumple que

$$F(\sigma_3) = N_\varphi \cdot \sigma_3 + \sigma_c = N_\varphi \cdot \sigma_3 + 2c \sqrt{N_\varphi}$$

siendo

$$N_\varphi = \frac{1 + \operatorname{sen}\varphi}{1 - \operatorname{sen}\varphi}$$

En la Figura N° 6 se ilustra este concepto y en ella puede apreciarse que  $r_1$  es el radio del círculo del Mohr correspondiente al estado de equilibrio de un elemento determinado; mientras que  $r_2$  es el radio del círculo de Mohr correspondiente al estado límite para una  $\sigma_3$  dada.

En las Figuras N° 7, 8 y 9 se presenta la distribución de los valores del índice de plastificación correspondiente a los casos 2, 3 y 5.

Como es lógico los mayores valores de los índices de plastificación se encuentran en picos de los testers que es el lugar donde la plastificación es más intensa.

En el Cuadro II se presentan resumidos los valores del índice de plastificación máximo obtenido en cada caso, que se han representado en la Figura N° 10 para mayor claridad.

CASO	1	2	5
COHESION DEL CARBON (MPa)	1,0	0,4	0,4
IRREGULARIDAD DE LA CAPA	NO	NO	SI
INDICE DE PLASTIFICACION MAXIMO	0,492	0,935	0,940

**CUADRO II. INDICES DE PLASTIFICACION**

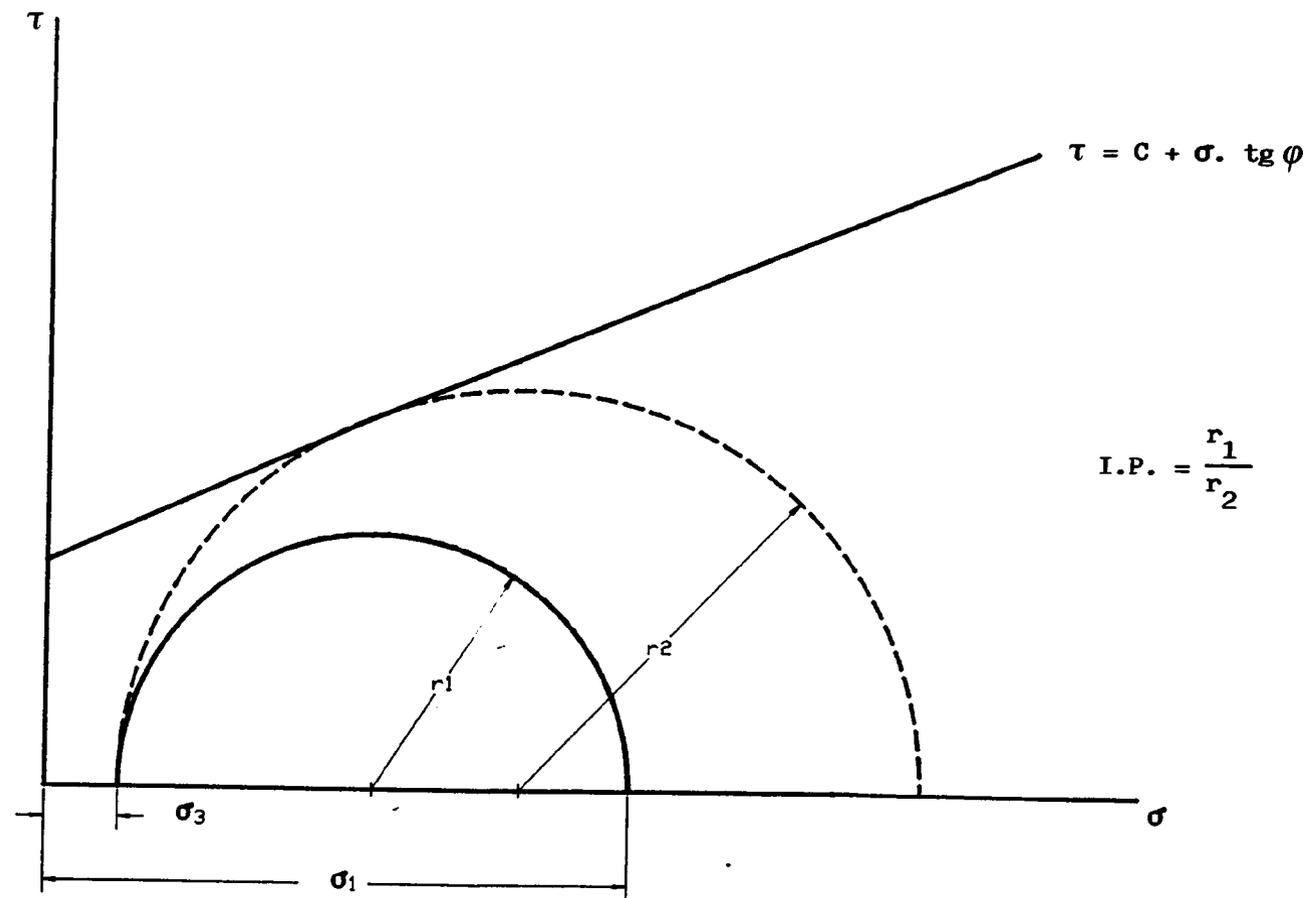
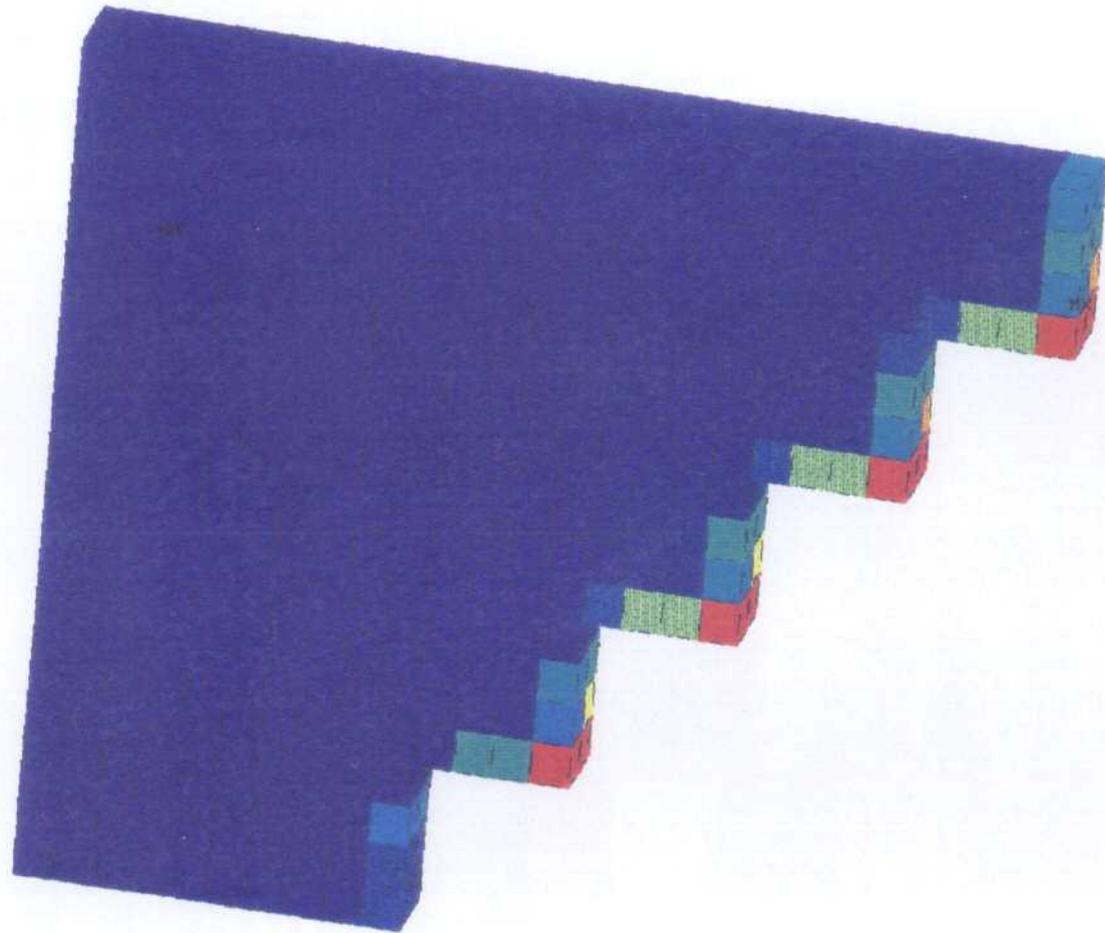


FIGURA N° 6. DEFINICION DEL INDICE DE PLASTIFICACION

1

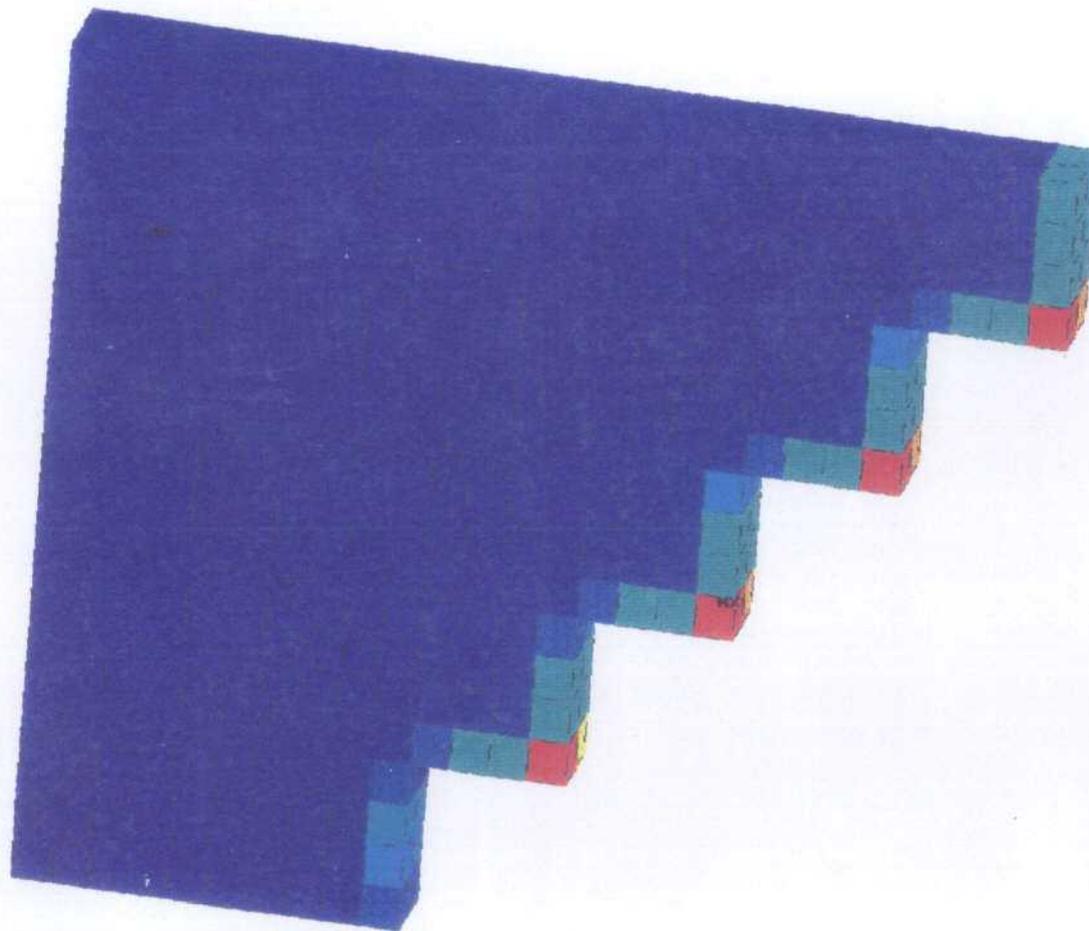


```
ANSYS 4.4a
JUN 12 1991
2:43:54
PLOT NO. 4
POST1 STRESS
STEP=2
ITER=10
PLAS (NOAUC)
DMX =0.081336
SMX =0.491918

XU =1
VU =2
ZU =3
DIST=10.000
XF =16.25
VF =12.5
ZF =34.02
CENTROID HIDDEN
0
0.054650
0.109315
0.163979
0.218643
0.273288
0.327945
0.382600
0.437261
0.491918
```

FIGURA Nº 7. DISTRIBUCION DEL INDICE DE PLASTIFICACION EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA REGULAR CON COHESION DE 1 MPa

1

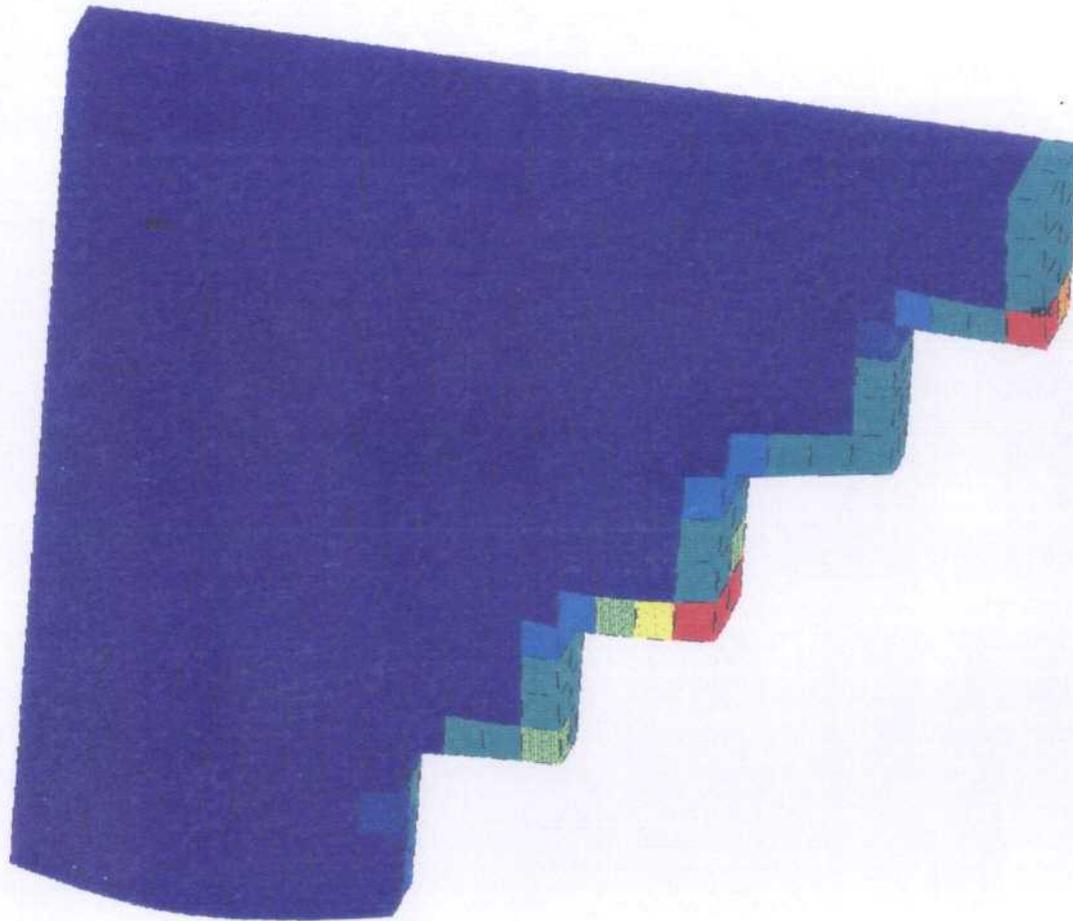


```
ANSYS 4.4a
JUN 12 1991
6:59:30
PLOT NO. 4
POST1 STRESS
STEP=2
ITER=10
PLAS (NOAUC)
DMX =0.124325
SMX =0.934779

XU =1
YU =2
ZU =3
DIST=10.000
XF =15.25
YF =12.5
ZF =34.02
CENTROID HIDDEN
0 0.103064
1 0.207729
2 0.311593
3 0.415457
4 0.519322
5 0.623186
6 0.727051
7 0.830915
8 0.934779
```

FIGURA Nº 8. DISTRIBUCION DEL INDICE DE PLASTIFICACION EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA REGULAR CON COHESION DE 0,4 MPa

1

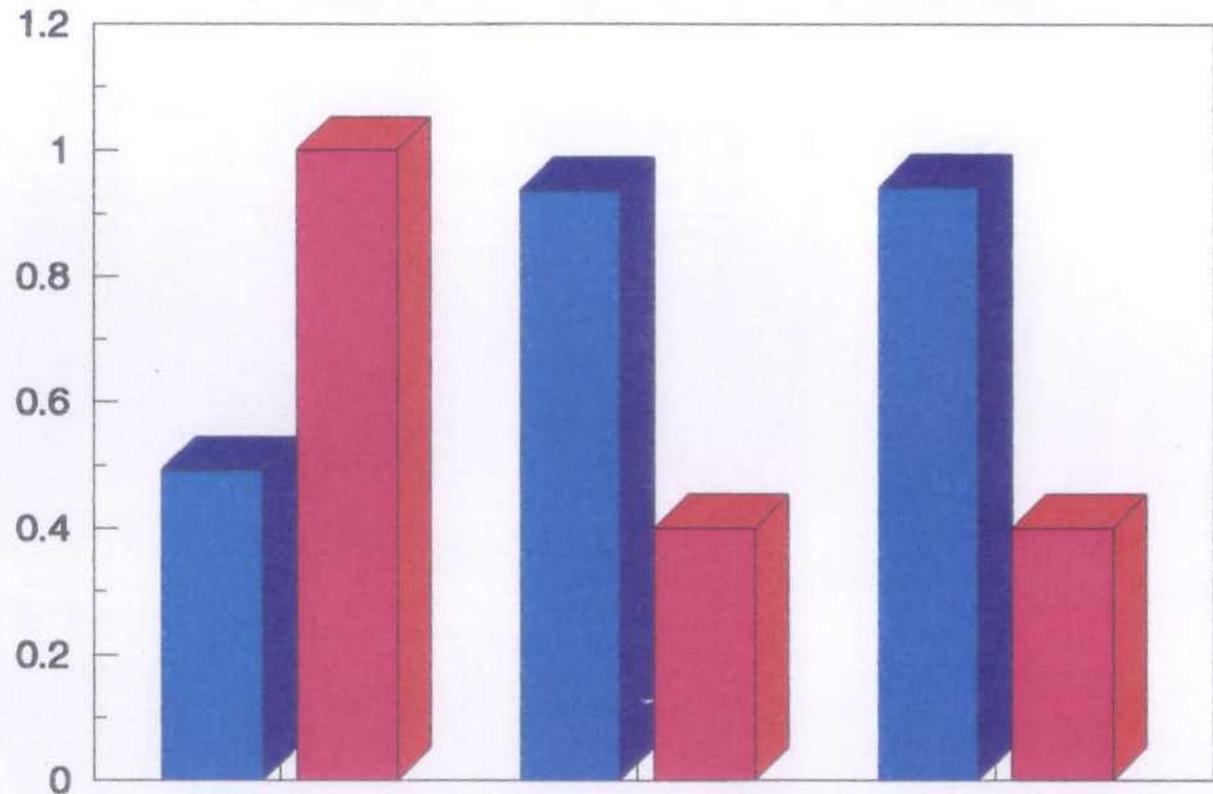


ANSYS 4.40  
JUN 12 1991  
0:10:59  
PLOT NO. 4  
POST1 STRESS  
STEP=2  
ITER=10  
PLAC (NOAUC)  
SMX = 0.940369

XU = 1  
YU = 2  
ZU = 3  
DIST = 19.149  
XF = 16.453  
YF = 12.453  
ZF = 35.457  
CENTROID HIDDEN  
0  
0.104485  
0.208971  
0.313456  
0.417942  
0.522427  
0.626912  
0.731398  
0.835883  
0.940369

FIGURA Nº 9. DISTRIBUCION DEL INDICE DE PLASTIFICACION EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA IRREGULAR CON COHESION DE 0,4 MPa

## INDICES DE PLASTICIDAD



CASO		2	3	5
I.P.	<span style="color: blue;">■</span>	0.492	0.935	0.940
COHESION	<span style="color: red;">■</span>	1.0	0.4	0.4

FIGURA Nº 10. COMPARACION DE LOS INDICES DE PLASTIFICACION MAXIMOS OBTENIDOS EN LOS CASOS 2, 3 y 5

De estos datos se deduce la gran influencia que tiene la cohesión sobre la plastificación del carbón que está fuertemente modulada por las variaciones de potencia. El efecto puede verse, comparando las figuras N° 8 y 9, que en el caso N° 2 todos los picos de los testers están altamente plastificados mientras que en el caso N° 5, los testers en los que la capa tiene menor potencia, el índice de plastificación baja fuertemente a pesar de conservar la cohesión de 0,4 MPa.

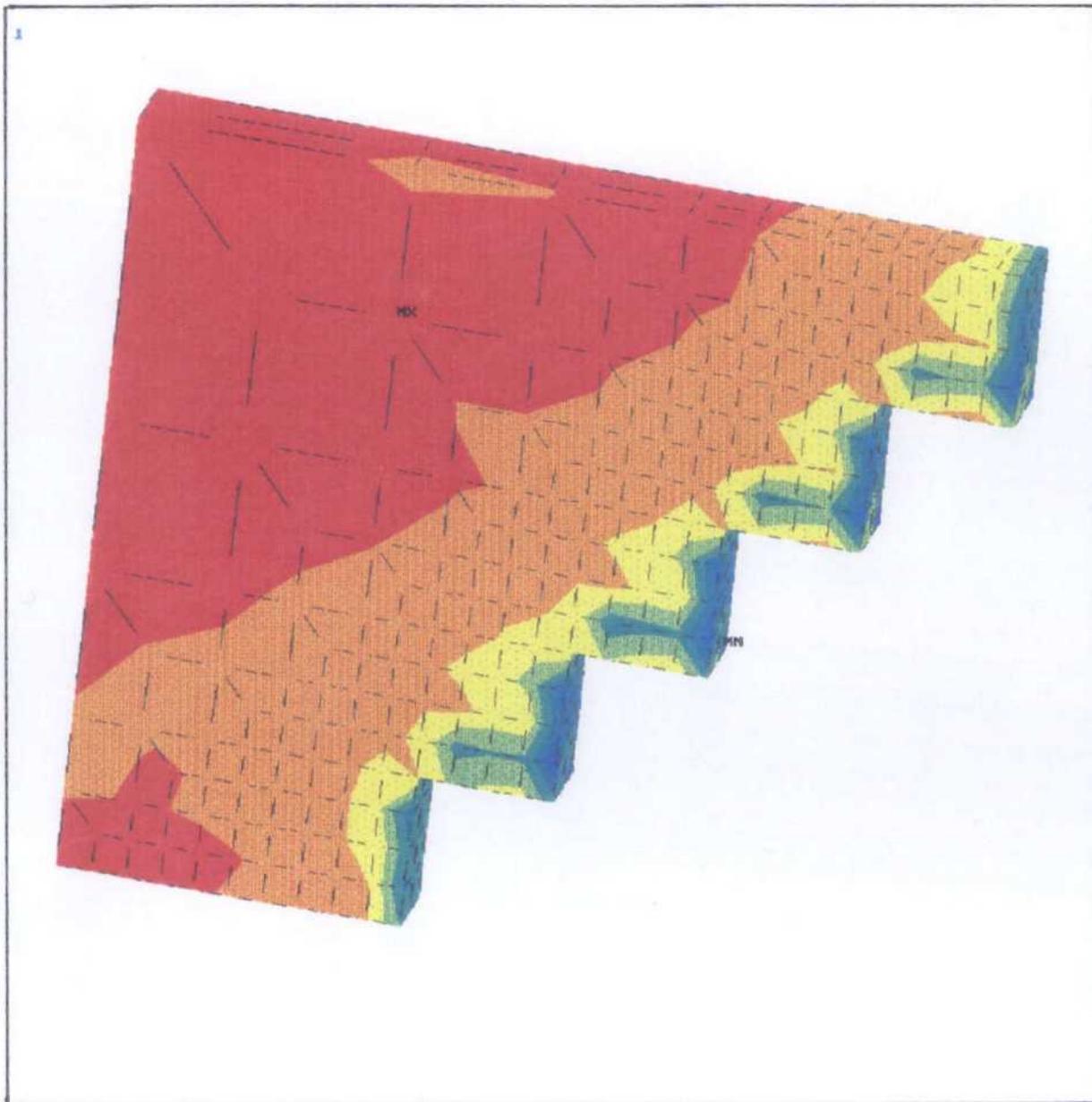
#### **4.2.1.2. Distribución de tensiones normales a la capa.**

Una vez que un material supera su resistencia máxima, definida por el criterio de rotura, éste se rompe y su capacidad de resistir una cierta tensión, que será la tensión principal mayor, está condicionada por el valor de la tensión principal de confinamiento.

En este caso, dado que el material estará plastificado, el mayor valor de la tensión estará alejado del borde del carbón; dando lugar a una zona descomprimida situada entre el borde del carbón y la posición del máximo valor de la presión principal mayor.

Para esclarecer la influencia de los parámetros analizados sobre el fenómeno de distensión de la capa de carbón producido por la plastificación, en las Figuras N° 11, 12 y 13 se ha representado la distribución de la tensión normal a la capa de carbón, que es la tensión principal mayor  $\sigma_1$ , para cada uno de los tres casos estudiados en este apartado.

En análisis de la información presentada en la Figura N° 11 es altamente revelador ya que en ella puede observarse que en las niveladuras de los testers existe una zona descomprimida, pues el mayor valor de la tensión se encuentra aproximadamente a 1,5 m en el interior del macizo de carbón. En esa misma figura se aprecia que en la cara vertical del testero se encuentra el máximo valor de la tensión horizontal lo cual indica que en esa zona no se ha producido distensión alguna.



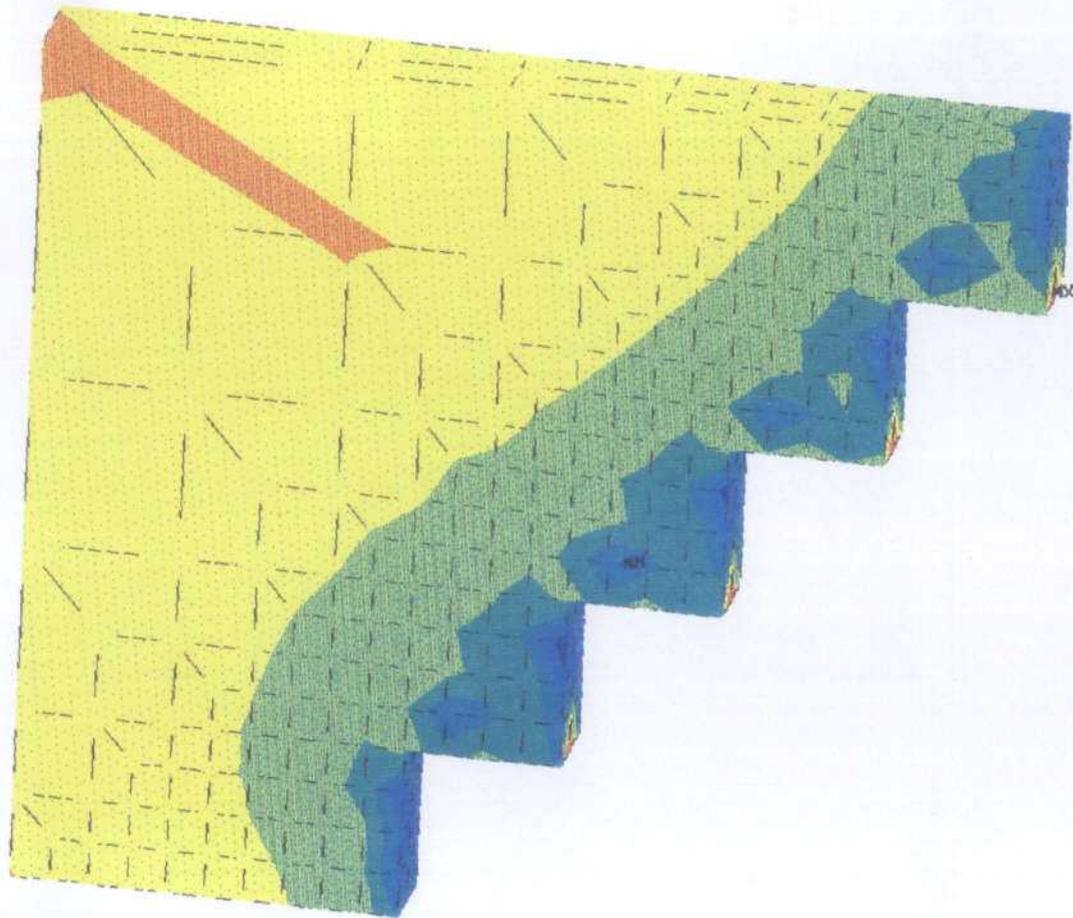
```

ANSYS 4.4a
JUN 12 1991
2:58:33
PLOT NO. 5
POST1 STRESS
STEP=2
ITER=10
SZ (AUC)
$ GLOBAL
DMX = 0.881336
SMN = -5.628
SMX = -2.847

XU = 1
VU = 0
ZU = 0
DIST=10.888
XF = 16.25
YF = 12.5
ZF = 34.82
CENTROID HIDDEN
-5.628
-5.628
-4.832
-4.434
-4.036
-3.638
-3.24
-2.842
-2.444
-2.047

```

FIGURA N° 11. DISTRIBUCION DE LA TENSION PRINCIPAL MAYOR EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA REGULAR DE CARBON CON COHESION DE 1 MPa

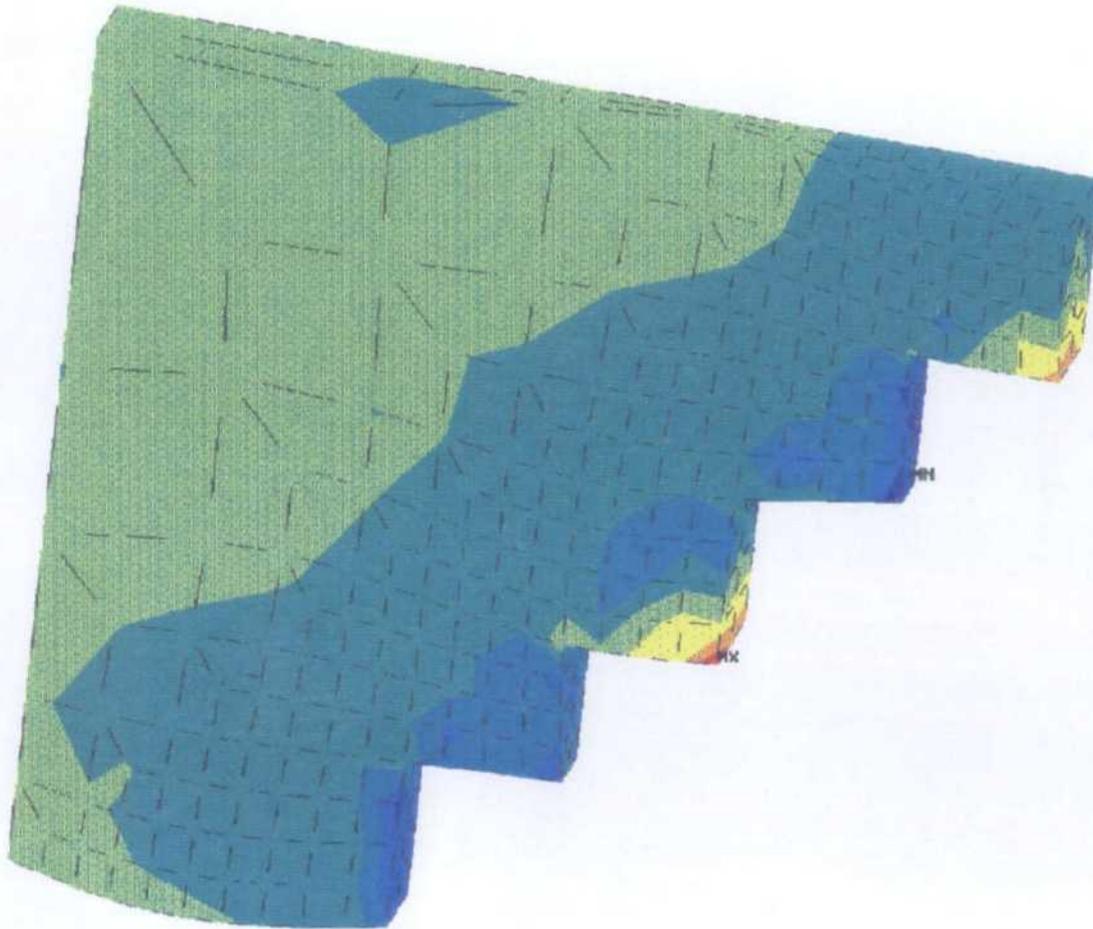


ANSYS 4.4a  
JUN 12 1991  
6:55:46  
PLOT NO.  
POST1 STRESS  
STEP=2  
ITER=10  
S2 (AUC)  
\$ GLOBAL  
SMX = 8.124325  
SMN = -5.264  
SMX = -1.295

XU = 1  
YU = 2  
ZU = 3  
DIST = 10  
XF = 10.0000  
YF = 10.0000  
ZF = 34.82  
CENTROID HIDDEN  
-5.264  
-4.823  
-4.382  
-3.941  
-3.500  
-3.059  
-2.618  
-2.177  
-1.736  
-1.295

FIGURA Nº 12. DISTRIBUCION DE LA TENSION PRINCIPAL MAYOR EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA REGULAR DE CARBON CON COHESION DE 0,4 MPa

1



```
ANSYS 4.4a  
JUN 12 1991  
8:19:16  
PLOT NO. 5  
POST1 STRESS  
STEP=2  
ITER=10  
SZ (AUG)  
S GLOBAL  
SMN =-5.533  
SMX =0.836351
```

```
XU =1  
VU =0  
ZU =0  
DIST=19.149  
XF =16.25  
VF =12.5  
ZF =35.57  
CENTROID HIDDEN  
-5.533  
-4.922  
-4.312  
-3.701  
-3.09  
-2.479  
-1.869  
-1.258  
-0.6471  
0.836351
```

FIGURA N° 13. DISTRIBUCION DE LA TENSION PRINCIPAL MAYOR EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA IRREGULAR DE CARBON CON COHESION DE 0,4 MPa

Esta situación explica la mayor peligrosidad de las niveladuras ante un derrabe que el frente de testero y es totalmente coherente con la buena práctica minera de "frenar la niveladura" para prevenir los derrabes.

Al bajar la cohesión a 0,4 MPa, en el Caso N° 2, puede apreciarse en la Figura N° 12, que en la cara frontal de todos los testeros aparece una cuña de carbón descomprimido, como corresponde a la generalización del fenómeno de plastificación.

En estas mismas condiciones de cohesión, 0,4 MPa; pero con una capa de potencia irregular se produce una distorsión importante del fenómeno. En efecto, en la Figura N° 13, puede apreciarse que en los testeros correspondientes a la zona de menor potencia de la capa no hay descompresión alguna. Por el contrario en los testeros en los que la potencia de la capa es máxima se produce una descompresión generalizada del carbón lo cual supone un riesgo eminente de derrabe.

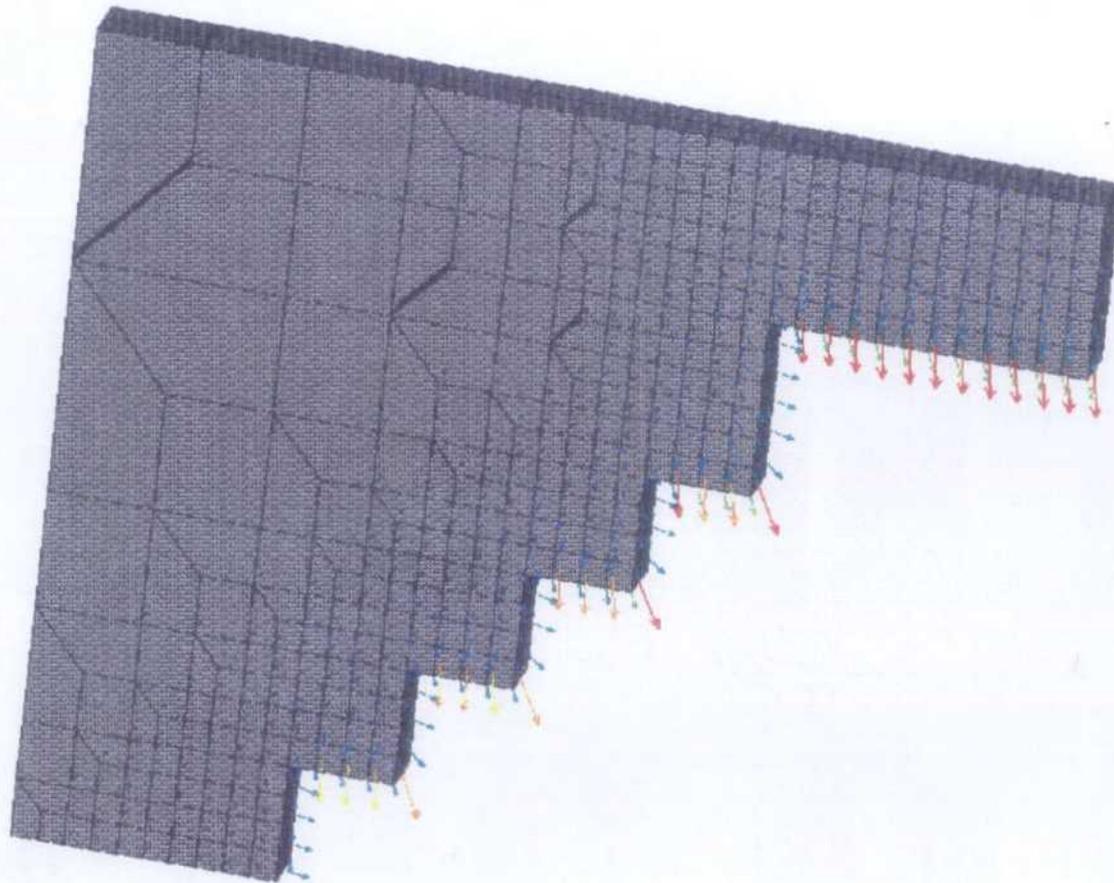
#### **4.2.2. Desplazamientos del terreno.**

En los apartados siguientes se presentan los resultados obtenidos, en los casos 1, 2, 3 y 5 estudiados, en lo que se refiere al movimiento del terreno en el entorno de la explotación modelizada.

##### **4.2.2.1. Movimientos del carbón.**

En las Figuras N° 14, 15, 16 y 17 se presentan las distribuciones de los vectores desplazamiento en la masa de carbón modelizada en los cuatro casos analizados.

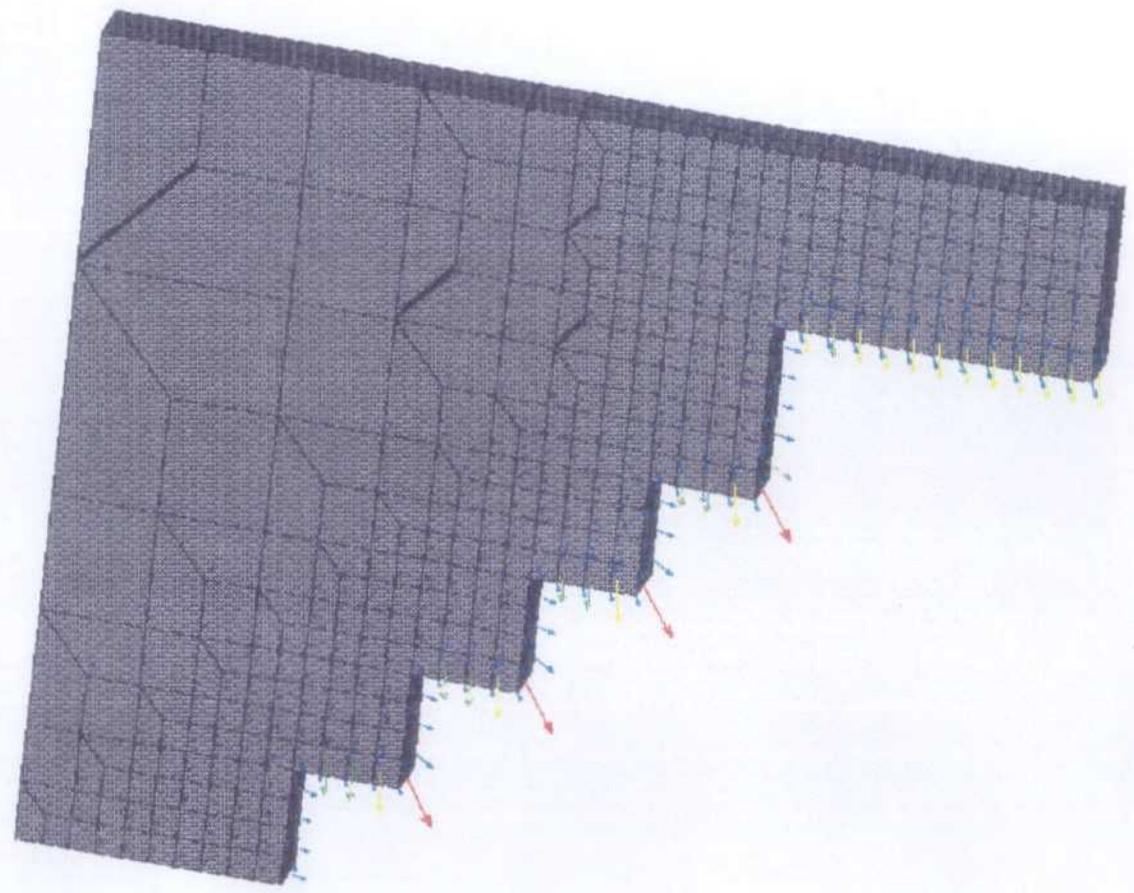
Puede apreciarse que en el caso elástico, Figura N° 14, los mayores desplazamientos se producen en los picos de los dos testeros superiores y en el cielo de la galería de cabeza.



```
ANSYS 4.4a
JUN 12 1991
6:25:36
PLOT NO. 8
POST1 VECTOR
STEP=9999
ITER=1
DISP
MODE=5609
0.001992
0.003725
0.005456
0.007191
0.008924
0.010656
0.012388
0.014120
0.015855
---
V0 = 1
V9 = 17
Z0 = 107
DIST=27.348
XP = 23.73
VF = 17.5
ZF = 33
CENTROID HIDDEN
```

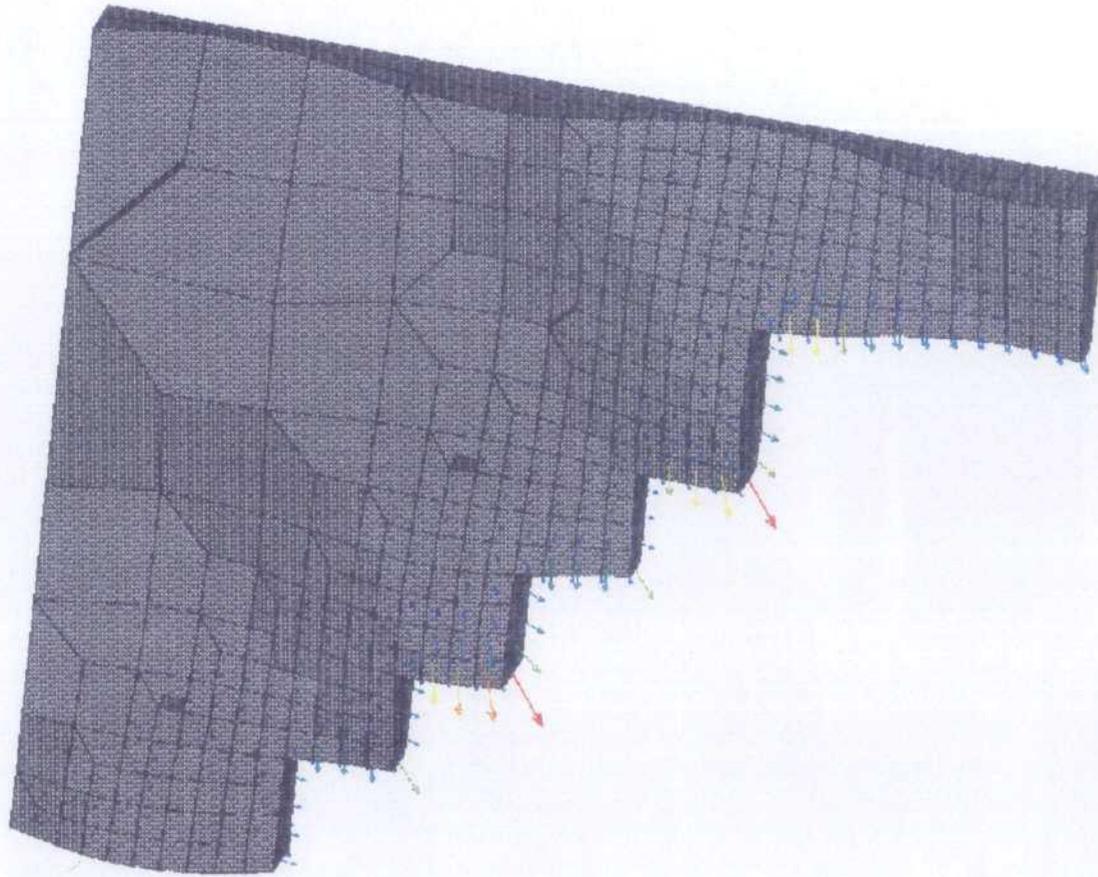
FIGURA Nº 14. DISTRIBUCION DE DESPLAZAMIENTOS EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA REGULAR DE CARBON CON COMPORTAMIENTO ELASTICO





```
ANSYS 4.4a  
JUN 12 1991  
7:01:56  
PLOT NO. 9  
POST1 VECTOR  
STEP=9999  
ITER=1  
DISP  
MODE=5221  
0.002153  
0.003129  
0.007361  
0.009993  
0.012423  
0.014057  
0.019721  
0.022153  
  
XW = 1  
YU = 2  
ZU = 3  
DIST=27.340  
XF = 23.75  
YF = 17.5  
ZF = 23  
CENTROID HIDDEN
```

FIGURA N° 16. DISTRIBUCION DE DESPLAZAMIENTOS EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA REGULAR DE CARBON CON COHESION DE 0,4 MPa



```
ANSYS 4.4a
JUN 12 1991
8:21:26
PLOT NO. 9
POST1 VECTOR
STEP=9999
ITER=1
DISP
MODE=5186
0.003408
0.006537
0.00967
0.012804
0.015937
0.019071
0.022205
0.025338
0.028472
XU =1
YU =2
ZU =3
DIST=27.609
XF =23.75
YF =17.5
ZF =33.75
CENTROID HIDDEN
```

FIGURA N° 17. DISTRIBUCION DE DESPLAZAMIENTOS EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA IRREGULAR CON COHESION DE 0,4 MPa

Sin embargo, al realizar un análisis elasto-plástico los desplazamientos se hacen mucho mayores en los dos testeros superiores y pierden importancia los del cielo de la guía. Este efecto se acusa mucho más al disminuir la cohesión del carbón a 0,4 MPa, Figura N° 16, ya que en este caso los movimientos más importantes se concentran en todos los picos de los testeros.

De nuevo el efecto de la irregularidad de la potencia modula fuertemente este fenómeno ya que, conforme se ilustra en la Figura N° 17, los desplazamientos se concentran en los picos de los testeros de mayor potencia.

Para presentar con mayor claridad estos resultados en la Figura N° 18 se han representado los mayores desplazamientos obtenidos en cada caso.

En esta figura, puede apreciarse claramente la gran influencia de la disminución de cohesión y el efecto preponderante de los anchurones de la capa que hace que los desplazamientos del carbón puedan ser del orden de 2,85 cm.

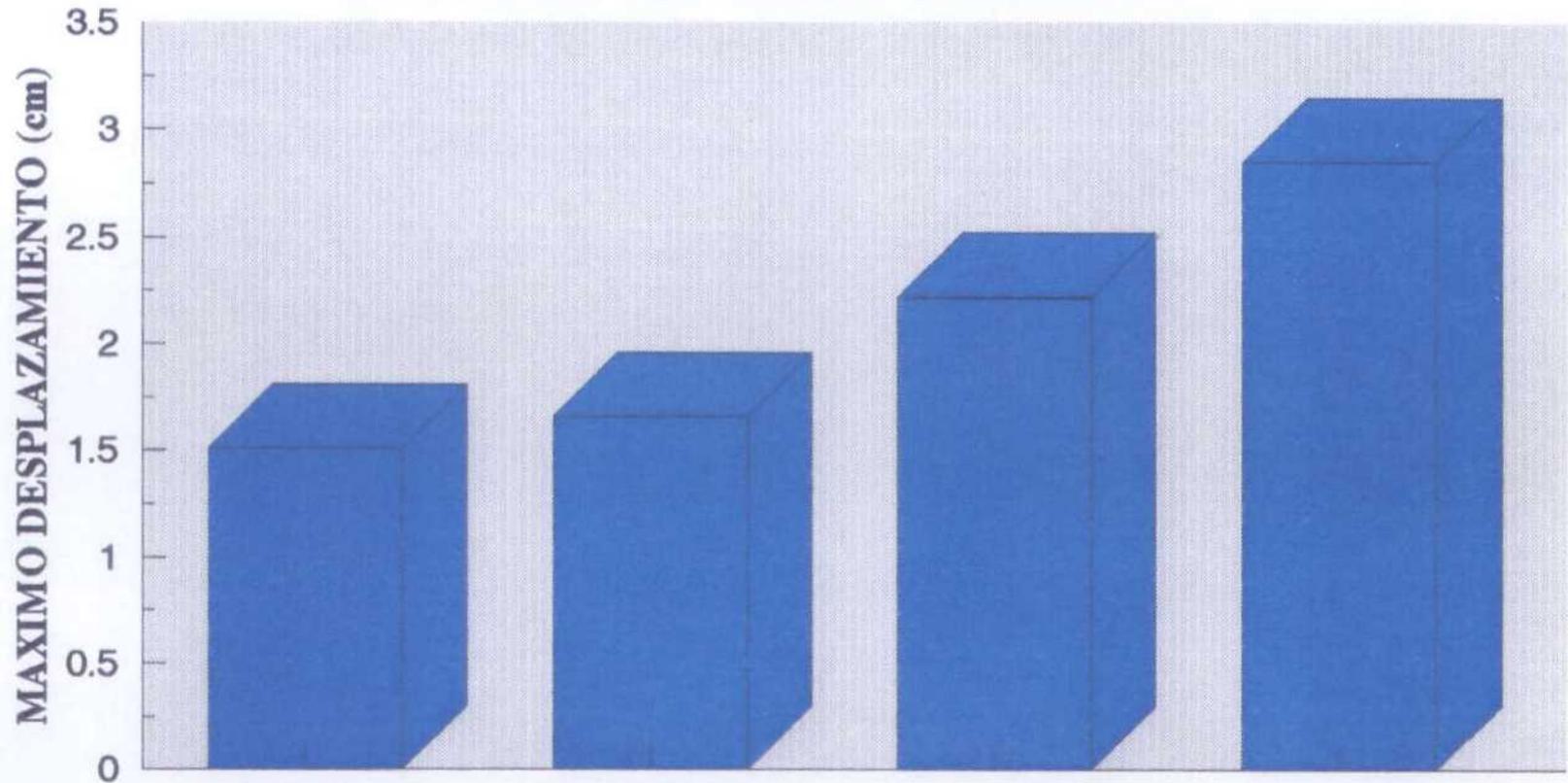
En la realidad estos desplazamientos probablemente serán mayores ya que el modelo constitutivo del carbón, sobre todo en post-rotura, no debe ser el de Mohr-Coulomb sino que más bien habría que introducir un modelo degenerativo con reblandecimiento plástico. De esta forma podría simularse el hecho real de que, al alcanzar la rotura, el carbón perdiera una buena parte de su capacidad resistente y aceptara unos desplazamientos mucho mayores que, en el límite, darían lugar al derrabe.

En cualquier caso hay que tener presente que, aunque las herramientas de cálculo admiten con cierta facilidad modelizar estos comportamientos, es necesario disponer de datos reales sobre el comportamiento del carbón en la post-rotura para que el análisis sea fiable.

#### **4.2.2.2. Movimientos del muro.**

En las explotaciones sobre capas inclinadas de carbón una parte importante de los accidentes graves, que pueden asociarse a derrabes posteriores, se deben a deslizamientos del muro de la capa.

## VECTORES DE DESPLAZAMIENTO



CASO	ELASTICO	C=1 MPa	C=0.4 MPa	IRREGULAR
	1.51	1.66	2.22	2.85

FIGURA N° 18. COMPARACION DE LOS MAXIMOS DESPLAZAMIENTOS DEL CARBON EN LOS CASOS ESTUDIADOS

Por ello en las Figuras N° 19, 20, 21 y 22 se presenta la distribución de los desplazamientos horizontales del muro y de la capa de carbón en los cuatro casos considerados.

Como es lógico, puede apreciarse que, en estos casos, el carbón está comprimido y el muro distendido; ya que puede invadir el volumen deshullado.

A medida que se inicia la plastificación y baja la cohesión del carbón se generaliza el hinchamiento del muro que, siempre, está limitado al espacio existente entre el carbón y el relleno.

De estos resultados se desprende la importancia primordial que juega el relleno para controlar los movimientos del muro y, probablemente, también los del carbón. Esto haría necesario conocer mejor las propiedades resistentes y deformacionales del relleno para poder realizar un análisis más afinado.

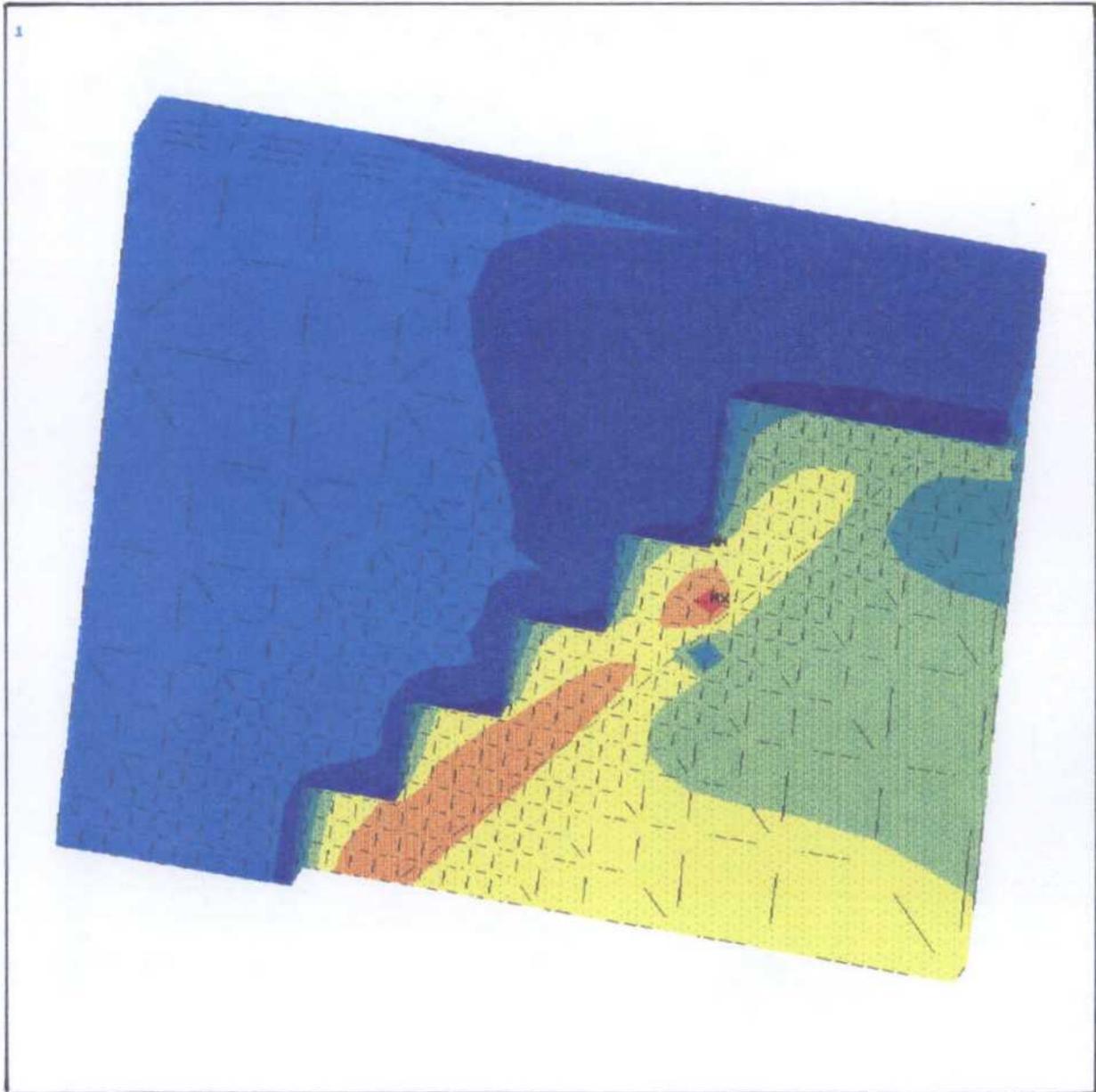
#### **4.2.3. Volumen de influencia del testero.**

En los yacimientos españoles de capas inclinadas de carbón, aunque no son en general muy densos, es frecuente la explotación de capas próximas y, en este caso, el volumen de terrenos influenciados por una explotación tiene una importancia primordial para establecer la interrelación entre explotaciones próximas y escoger la estrategia adecuada de explotación.

Por ello, en los apartados siguientes, se presentan los resultados obtenidos en lo que se refiere a las presiones y desplazamientos de los terrenos influenciados en los cuatro casos estudiados.

##### **4.2.3.1. Distribución de tensiones.**

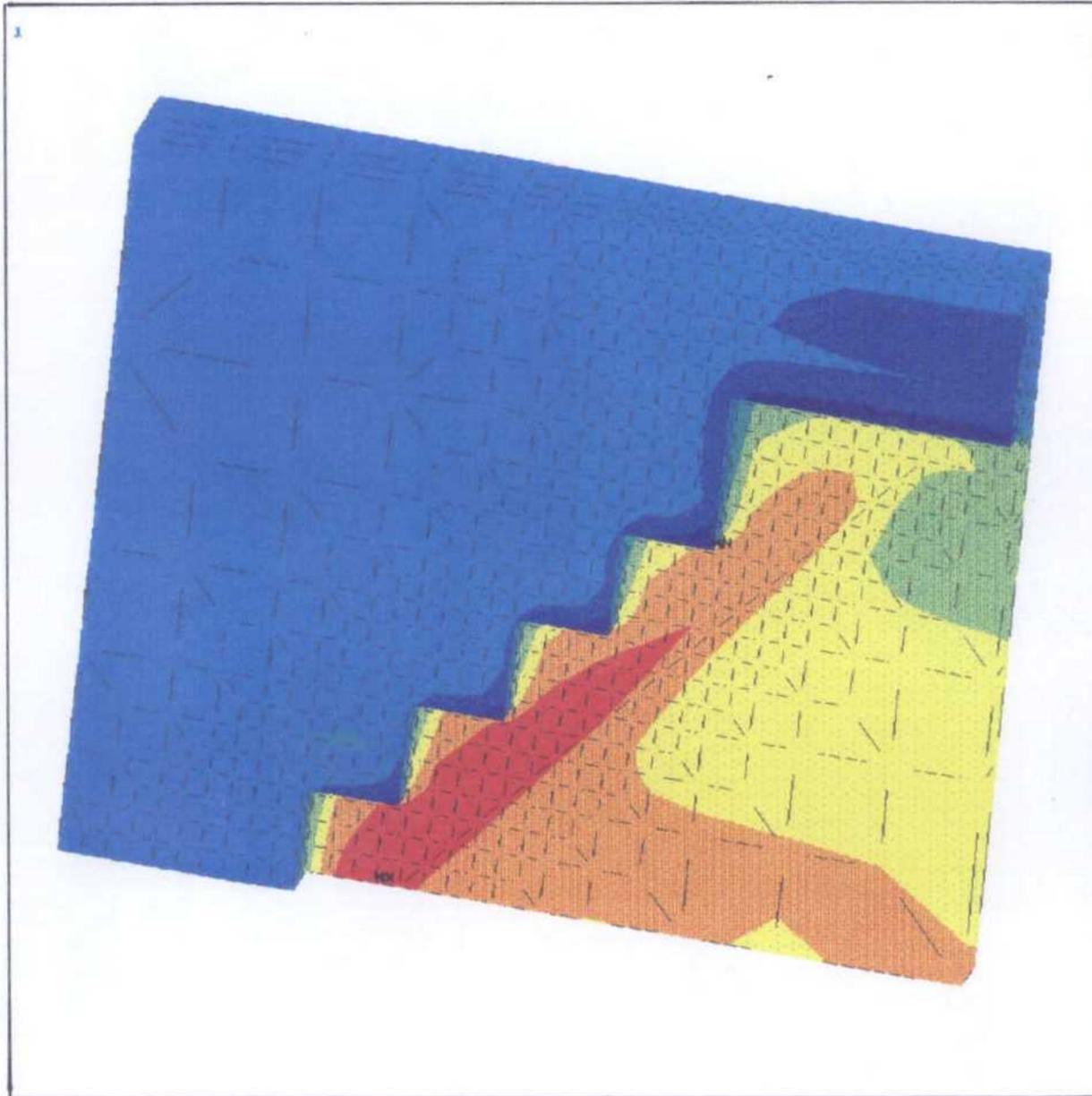
En las Figuras N° 23, 24, 25 y 26 se presenta la distribución de la tensión horizontal normal a la capa cuando se alcanza el equilibrio en cada uno de los cuatro casos estudiados.



```
ANSYS 4.4a
JUN 12 1991
6:25:12
PLOT NO. 7
POST1 STRESS
STEP=9999
ITER=1
U2
D GLOBAL
SMN =-0.005375
SMX =0.016766

YU =1
VU =2
ZU =3
DIST=27.696
XF =23.75
YF =17.5
ZF =32
PRECISE HIDDEN
-0.005375
-0.002915
-0.455E-03
0.002005
0.004465
0.006926
0.009386
0.011846
0.014306
0.016766
```

FIGURA N° 19. DISTRIBUCION DE DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA DE CARBON REGULAR CON COMPORTAMIENTO ELASTICO



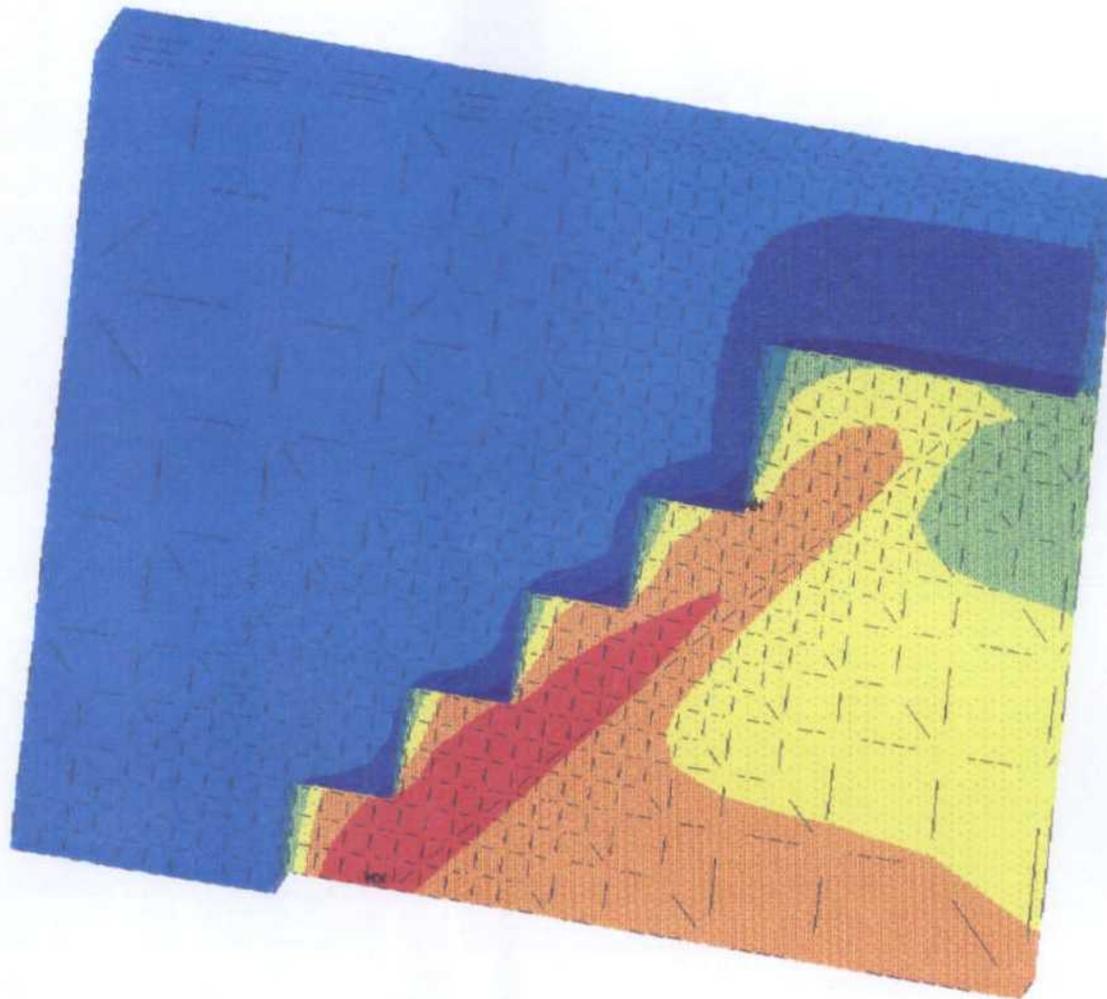
```

ANSYS 4.4a
JUN 12 1991
3:09:02
PLOT NO. 8
POST1 STRESS
STEP=9999
ITER=1
U2
D GLOBAL
SMN =-0.006020
SMX =0.013602

XU =1
YU =2
ZU =3
DIST=27.696
XF =23.75
YF =17.5
ZF =32
PRECISE HIDDEN
-0.006020
-0.003838
-0.001648
0.542E-03
0.002732
0.004722
0.007112
0.009382
0.011492
0.013602

```

FIGURA N° 20. DISTRIBUCION DE DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA DE CARBON REGULAR CON COHESION DE 1 MPa



```

ANSYS 4.4a
JUN 18 1991
7:01:33
PLOT NO. 8
POST1 STRESS
STEP=9999
ITER=1
U2
D GLOBAL
SMX =0.124325
SMN =-0.006023
SMX =0.013959

XU =1
VU =2
ZU =3
DIST=27.696
XF =23.75
YF =17.5
ZF =32
PRECISE HIDDEN
-0.006023
-0.003003
-0.001502
0.638E-03
0.002050
0.005070
0.007299
0.009515
0.011739
0.013959

```

FIGURA Nº 21. DISTRIBUCION DE DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA DE CARBON REGULAR CON COHESION DE 0,4 MPa

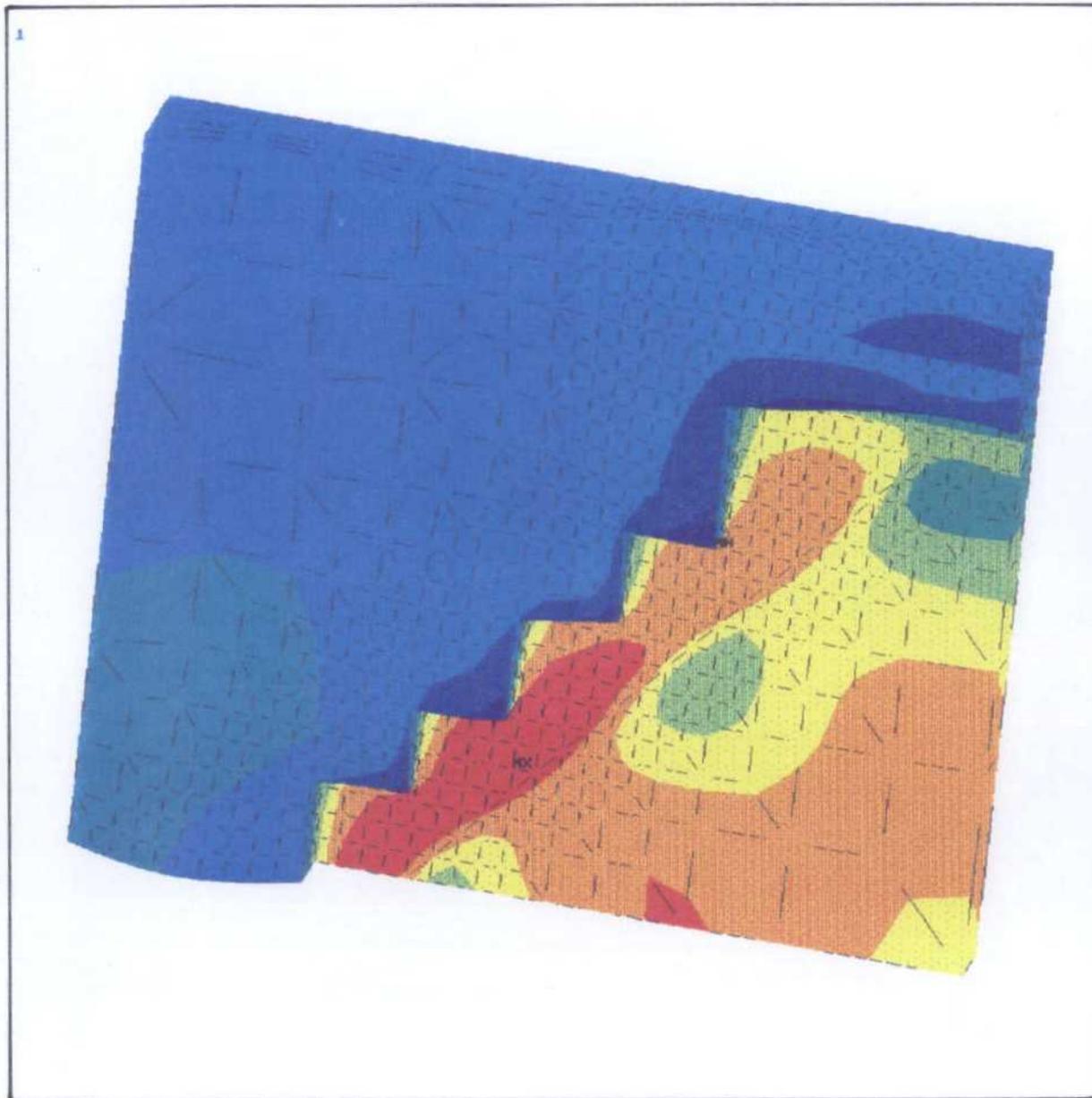
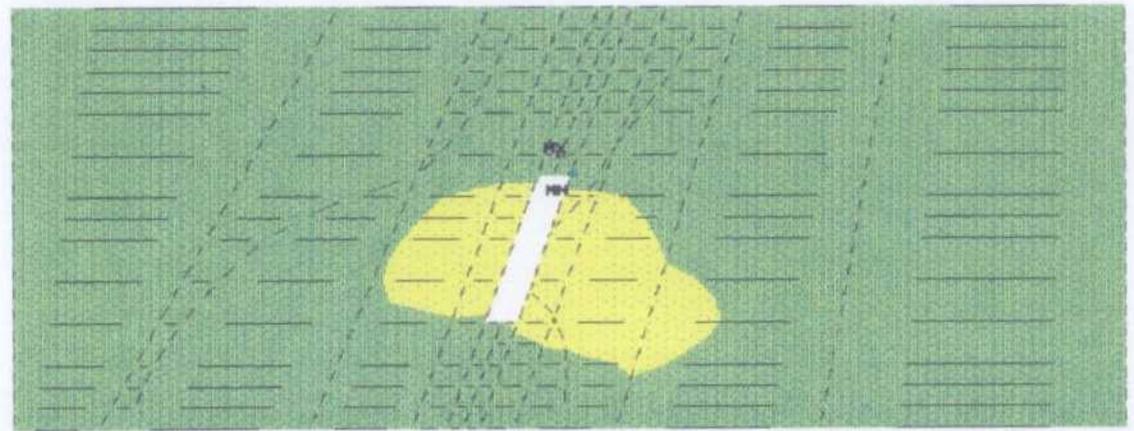
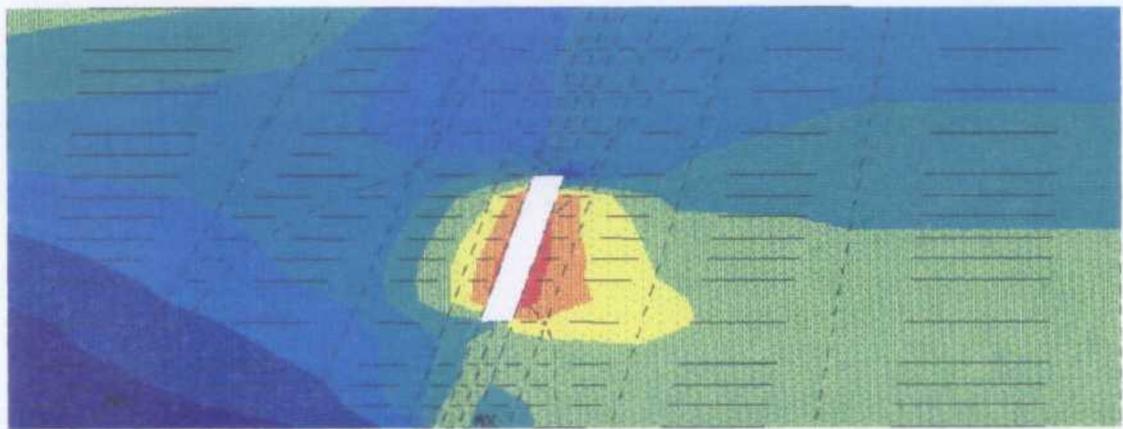


FIGURA N° 22. DISTRIBUCION DE DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA DE CARBON IRREGULAR CON COHESION DE 0,4 MPa



ANSYS 4.4a  
JUN 18 1991  
6:24:09  
PLOT NO. 3  
POST1 STRESS  
STEP=9999  
ITER=1  
S2 (AUG)  
S GLOBAL  
SMN =-11.505  
SMX =7.065  
  
XU =1  
DIST=36.3  
XF =23.75  
VF =12.5  
ZF =33  
SECTION  
-11.505  
-9.443  
-7.382  
-5.322  
-3.258  
-1.197  
0.865151  
2.927  
4.989  
7.065

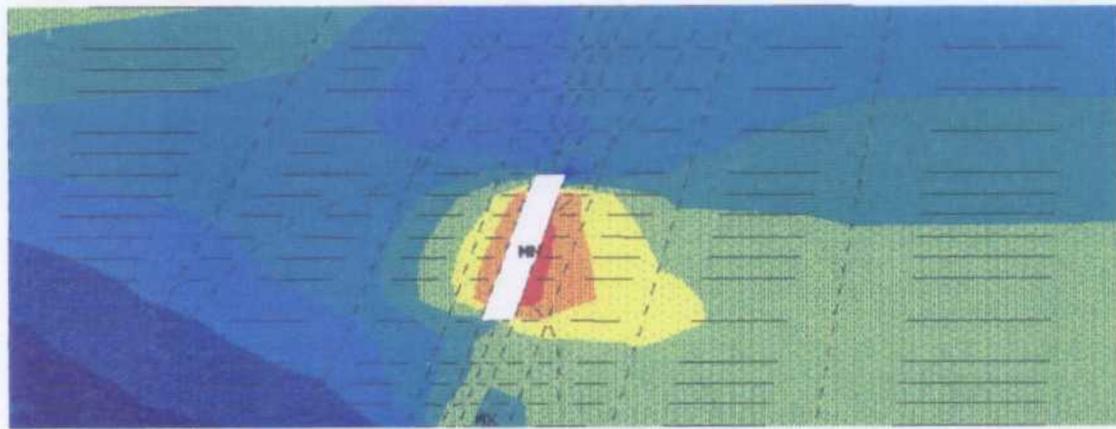
FIGURA N° 23. DISTRIBUCION DE LAS TENSIONES HORIZONTALES EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA REGULAR DE CARBON CON COMPOR-TAMIENTO ELASTICO



ANSYS 4.4a  
JUN 12 1991  
2:56:28  
PLOT NO. 6  
POST1 STRESS  
STEP=2  
ITER=10  
S2 (AUG)  
S GLOBAL  
DMX = 9.881336  
SMN = -4.247  
SMX = -9.831129

XU = 1  
DIST = 36.3  
XF = 23.75  
YF = 12.3  
ZF = 33  
SECTION  
-4.247  
-3.779  
-3.31  
-2.842  
-2.373  
-1.905  
-1.436  
-0.967975  
-0.499532  
-0.831129

FIGURA Nº 24. DISTRIBUCION DE LAS TENSIONES HORIZONTALES EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA REGULAR DE CARBON CON COHESION DE 1 MPa

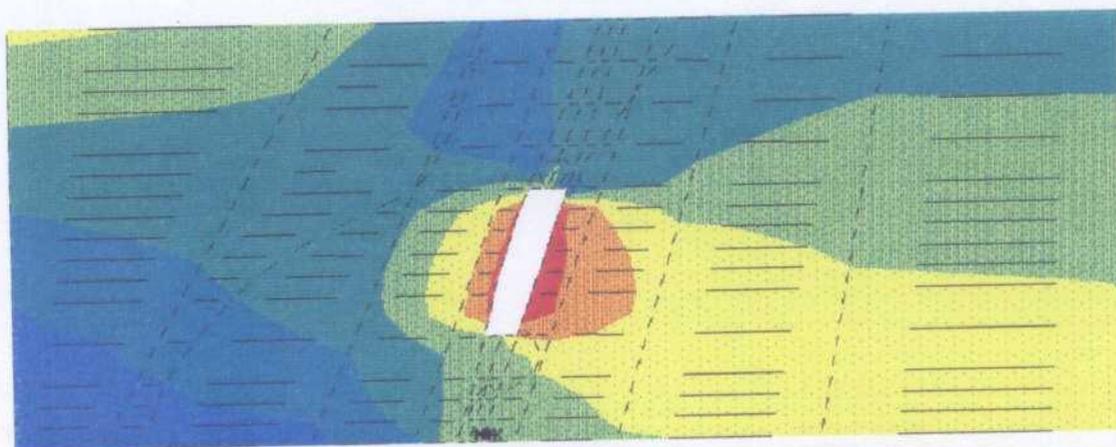


ANSYS 4.4a  
JUN 12 1991  
7:00:30  
PLOT NO. 6  
POST1 STRESS  
STEP=2  
ITER=10  
S2 (AUC)  
S GLOBAL  
DMX = 0.124325  
SMN = -4.321  
SMX = -0.029620

XU = 1  
DIST=36.3  
XF = 23.75  
YF = 12.5  
ZF = 33  
SECTION  
-4.321  
-3.045  
-3.368  
-2.091  
-2.414  
-1.937  
-1.46  
-0.503372  
-0.5065  
-0.029620

FIGURA N° 25. DISTRIBUCION DE LAS TENSIONES HORIZONTALES EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA REGULAR DE CARBON CON COHESION DE 0,4 MPa

1



ANSYS 4.4a  
JUN 12 1991  
9:28:00  
PLOT NO. 6  
POST1 STRESS  
STEP=2  
ITER=10  
\$Z (AVG)  
\$ GLOBAL  
SMN = -5.421  
SMX = -0.049188

XU = 1  
DIST=36.3  
XF = 29.75  
VF = 18.5  
ZF = 33  
SECTION  
-5.421  
-4.8224  
-4.2227  
-3.623  
-3.0233  
-2.4237  
-1.824  
-1.2243  
-0.624629  
-0.049188

FIGURA N° 26. DISTRIBUCION DE LAS TENSIONES HORIZONTALES EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA IRREGULAR DE CARBON CON COHESION DE 0,4 MPa

El plano en el que están representadas las figuras anteriores es el (OY., OZ) que corresponde a un plano vertical. Por ello en estas figuras, además de aparecer el techo y el muro de la capa que se ha modelizado, se incluye una parte del carbón, parte del hueco deshullado y el relleno que se coloca posteriormente.

En la Figura N° 23, que corresponde al caso elástico, se aprecia claramente la existencia de una zona importante de terreno sometida a tracción tanto en el techo como en el muro de la capa. De acuerdo con la escala gráfica de la Figura N° 23 los valores de estas tracciones están comprendidos entre 0,86 y 2,9 MPa. Estos valores, probablemente, serán excesivos para la calidad de los materiales modelizados y, en la realidad, esto significa que se desarrollarán zonas con una plastificación importante.

Este hecho tiene una gran relevancia ya que muestra claramente que un análisis puramente elástico, en las condiciones del modelo, tiene escasa representatividad y no es apropiado de ninguna manera.

Analizando las Figuras N° 24 y 25 se aprecian dos circunstancias importantes: la primera es la existencia de una zona de plastificación, tanto a techo como a muro, ya que el máximo valor de la presión no se encuentra en las uniones entre hastiales y la capa; sino en el interior del terreno y del muro.

La segunda circunstancia relevante es la gran similitud entre las Figuras N° 24 y 25 ya que la extensión de la zona plastificada en ambas zonas es similar. Esto indica que el hecho de que el carbón pase a tener una cohesión de 1 MPa a 0,4 MPa no tiene apenas influencia sobre el volumen de terrenos influenciados.

Por último de la Figura N° 26 se deduce claramente que la presencia de un anchurón de la capa tiene como consecuencia un notable incremento del terreno distendido sobre todo a muro de la capa.

Estas conclusiones son totalmente coherentes con las de la buena práctica minera; pero están totalmente cuantificadas, con lo cual se muestra la posibilidad de aplicarlas con la necesaria precisión a casos particulares y de realizar estudios de sensibilidad que permitan fundar una correcta estrategia de explotación.

#### **4.2.3.2. Distribución de desplazamientos horizontales.**

En las Figuras N° 27, 28, 29 y 30 se presenta la distribución de desplazamientos horizontales, en el plano vertical (OY., OZ), cuando se ha alcanzado el equilibrio en los cuatro casos considerados.

Los signos negativos de las escalas gráficas indican desplazamientos hacia la derecha de la figura mientras que los positivos suponen que el elemento se mueve hacia la izquierda.

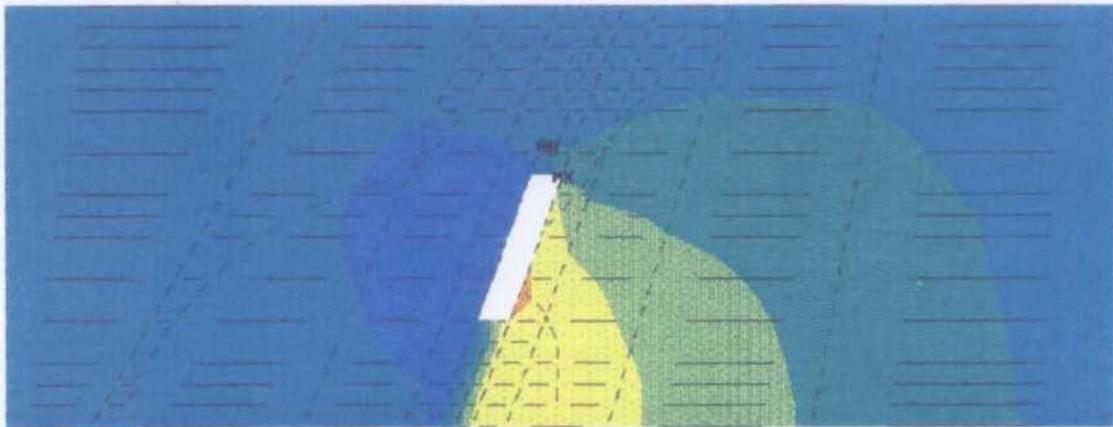
En este caso las conclusiones obtenidas son similares a las expuestas en el apartado anterior respecto a la distribución de tensiones.

Cabe añadir que, en la realidad, podría existir una mayor diferencia en los desplazamientos obtenidos al disminuir la cohesión y aumentar la potencia de la capa, es decir al generalizarse la plastificación, si los materiales que integran el muro y techo próximo no tienen un comportamiento tipo Mohr-Coulomb.

En cualquier caso la utilización de otros modelos constitutivos no está justificada si no se tienen ensayos fiables sobre el comportamiento en post-rotura de estos materiales.

## **5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

Se ha realizado un análisis tenso-deformacional de un taller de testeros con la ayuda del programa ANSYS que permite considerar un comportamiento elasto-plástico de los materiales en tres dimensiones.

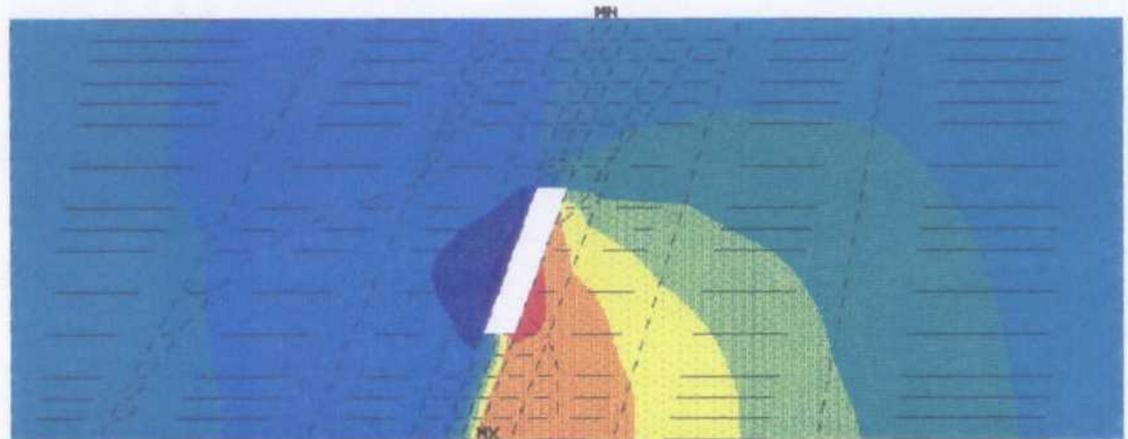


```
ANSYS 4.4a
JUN 12 1991
6:24:39
PLOT NO. 6
POST1 STRESS
STEP=9999
ITER=1
U2
D GLOBAL
SMN =-0.012723
SMX =0.019329

KV =1
DIST=36.3
XP =23.75
YP =12.5
ZF =33
SECTION
-0.012723
-0.009162
-0.005601
-0.002039
0.001522
0.005983
0.008643
0.012206
0.015767
0.019329
```

FIGURA N° 27. DISTRIBUCION DE  
LOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES  
EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE  
UNA CAPA REGULAR CON COMPORTAMIENT  
TO ELASTICO

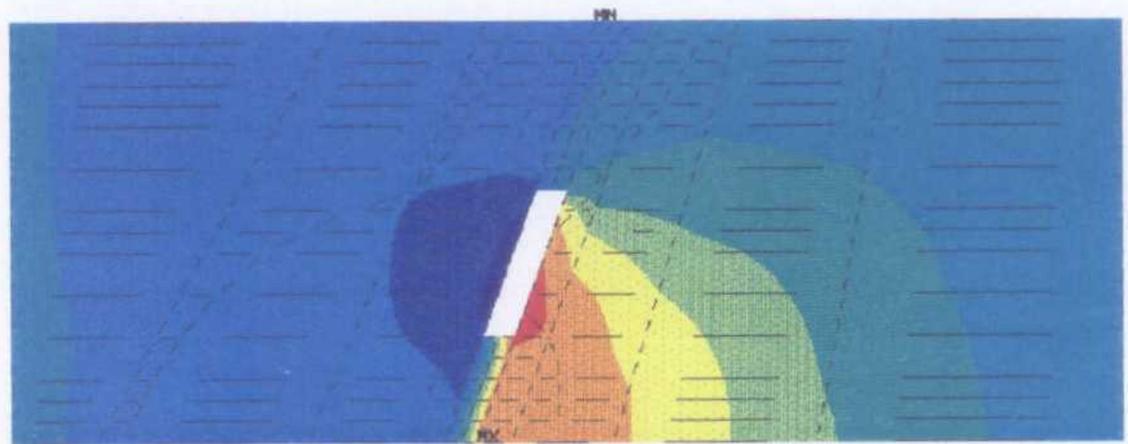
1



```
ANSYS 4.4a
JUN 12 1991
2:59:26
PLOI NO. 7
POST1 STRESS
STEP=9999
ITER=1
U2
D GLOBAL
DMX =0.001336
SMN =-0.000054
SMX =0.013602
NU =1
DIST=36.3
XF =23.75
YF =12.3
ZF =33
SECTION
-0.000054
-0.005639
-0.003224
-0.009263
0.001586
0.004821
0.006437
0.000052
0.011267
0.013602
```

FIGURA N° 28. DISTRIBUCION DE  
LOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES  
EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE  
UNA CAPA REGULAR CON COHESION DE  
1 MPa

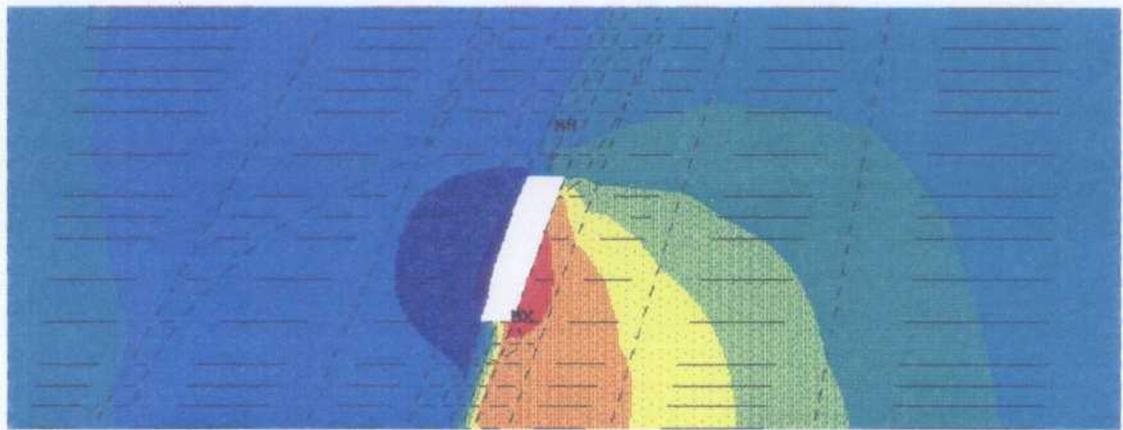
1



```
ANSYS 4.4a
JUN 12 1991
7:01:01
PLOT NO. 7
POST1 STRESS
STEP=9999
ITER=1
U2
D GLOBAL
DMX =0.124325
SMN =-0.007274
SMX =0.013959

XU =1
DIST=36.3
XF =23.75
YF =12.5
ZF =-33
SECTION
-0.007274
-0.004914
-0.002555
-0.196E-03
0.002163
0.004523
0.006002
0.009241
0.0116
0.013959
```

FIGURA N° 29. DISTRIBUCION DE  
LOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES  
EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE  
UNA CAPA REGULAR CON COHESION DE  
0,4 MPa



```
ANSYS 4.4a
JUN 12 1991
9:28:30
PLOT NO. 7
POST1 STRESS
STEP=9999
ITER=1
H2
D GLOBAL
SMN =-0.00784
SMX =0.012886

XU =1
DIST=36.3
XF =23.75
YF =12.5
ZF =33
SECTION
-0.00784
-0.004026
-0.002612
-0.338E-03
0.001816
0.004036
0.006344
0.008458
0.010672
0.012886
```

FIGURA N° 30. DISTRIBUCION DE LOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES EN UN TALLER DE TESTEROS SOBRE UNA CAPA IRREGULAR CON COHESION DE 0,4 MPa

Para ello se ha confeccionado un modelo que tiene un volumen de  $109.725 \text{ m}^3$ , está constituido por 6.468 elementos y 6.919 nodos. En este modelo se han considerado ocho materiales diferentes entre los que está una capa de carbón de 2 m de potencia, en dos hipótesis: una con potencia uniforme y otra con variaciones de potencia entre 3,5 y 0,5 m.

En el interior de este modelo se ha considerado la geometría de un taller típico de testers, en una capa de  $70^\circ$  de inclinación. Se han incluido cuatro testers y la guía de cabeza, que se lleva de rasgado. También se han modelizado las mamostas y el relleno de la explotación.

Se han resuelto cinco casos distintos, cuatro con capa de potencia regular y uno con potencia variable. De los cuatro casos con potencia regular el primera se ha resuelto con comportamiento elástico de los materiales, para comprobar la validez de los cálculos y los otros tres con comportamiento elasto-plástico rígido por el modelo de Mohr-Coulomb.

Las propiedades de los materiales se han estimado en base a la experiencia de los Técnicos de GEOCONTROL, S.A. sobre el comportamiento de los terrenos carboníferos ya que no se dispone de ensayos contrastados sobre estos materiales particularmente sobre el del carbón.

Los cálculos se han realizado con un ordenador ALR equipado con un microprocesador 80486 a 25 MHz y un coprocesador ABACUS 4167 de WEITEK. El ordenador dispone de una memoria RAM de 13 Mb y un disco duro de 620 Mb.

La resolución de un caso elasto-plástico supone un tiempo de cálculo medio de unas 74 horas y la impresión de los resultados obtenidos exigirá unas 4.460 hojas del tamaño DIN A4. Por ello los resultados de los cálculos se han almacenado en cinta magnéticas y se han presentado las distribuciones de tensiones y desplazamientos más características en forma de gráficos escalados.

Se han analizado los resultados obtenidos para investigar tres aspectos concretos de la explotación de un taller de testers:

- \* Desarrollo de la rotura del carbón del testero
- \* Movimientos del carbón y del muro
- \* Volumen de influencia del testero

En todos los casos estudiados los resultados obtenidos con el programa ANSYS son coherentes con las reglas de buena práctica minera; pero presentan la enorme ventaja de que permiten realizar una cuantificación muy afinada del problema analizado. Con ello es posible adoptar estrategias concretas de explotación en cada caso particular superando los criterios puramente cualitativos empleados hasta ahora que, en muchos casos, son ineficaces.

Los resultados obtenidos muestran claramente la potencia de la metodología utilizada, para cuantificar aspectos concretos de la prevención de derrabes; pero para ello sería necesario progresar en los siguientes aspectos:

- \* Propiedades de los materiales; con objeto de utilizar en los cálculos parámetros que representen el comportamiento real de los materiales existentes en una explotación determinada. En este sentido sería conveniente concentrar los esfuerzos en la realización de ensayos "in situ" para determinar las propiedades del carbón y del relleno; que son los materiales peor conocidos en la actualidad.
- \* Modelos constitutivos; con objeto de aproximar más los cálculos al comportamiento de los terrenos, en particular en la fase de post-rotura. En esta investigación se debería introducir la puesta a punto de elementos de junta capaces de modelizar la interfaz hastial-carbón.

- \* Modelización de aspectos concretos de explotación; como posición del relleno, geometría de los testers y tipo de sostenimiento empleados, a fin de establecer las condiciones de explotación más adecuadas en cada caso concreto.

Una vez obtenida esta información suplementaria podrá materializarse el enorme potencial de la herramienta de cálculo que se ha puesto a punto en este trabajo y será posible contribuir, de una forma precisa y eficaz, a elaborar unos criterios para la prevención de los derrabes en la minería española del carbón.