

TUNEL: Sistema Computarizado Aplicado al Diseño Geomecánico de Excavaciones Subterráneas

V. R. MONTESINOS

M. CASTILLEJO

G. PERRI

1. INTRODUCCION:

El propósito de este artículo es presentar las características del sistema computarizado "TUNEL". TUNEL fue desarrollado con el fin de obtener soluciones iniciales y rápidas de problemas atinentes al campo del diseño genérico de Obras Subterráneas.

La experiencia en la aplicación de computadoras a problemas diarios de ingeniería ha aumentado mucho en nuestros días. En la actualidad existen sistemas computarizados que ofrecen la posibilidad de obtener soluciones a ciertos problemas de Ingeniería Estructural o de Ingeniería de Túneles mediante programas refinados de métodos de cálculo que implican el uso de un computador con una excelente capacidad de almacenamiento y de memoria directa, como el método de los Elementos Finitos o el método de los Elementos Límites (FEM, BEM) (1). Generalmente esos programas han sido diseñados de la forma mas general posible, y su utilidad puede ser puesta a prueba en cualquier campo donde los mencionados métodos de cálculo pueden ser aplicados: resistencia de materiales, mecánica de fluidos, transferencia de energía, etc., etc. Esta generalidad los hace costosos, por su valor comercial, y por su sistema de implementación en computadoras bastante grandes que puedan permitir su ejecución.

Por otra parte también existen sistemas computarizados que ofrecen soluciones variadas de un mismo problema. Estos sistemas son de mayor interés para aquellas personas cuya relación de trabajo fundamental es la de consultoría técnica. A un costo menor que los primeros, permiten obtener soluciones rápidas y bien presentadas, aunque aun cuentan con la desventaja de que deben ser instalados en computadores de capacidad promedio (2,3). Adicionalmente los mismos son restringidos a un campo muy particular de la generalidad del área de trabajo.

El objetivo central de este artículo es mostrar que es posible diseñar, -lo que se hizo-, un sistema computarizado que abarque la generalidad del área de trabajo, -diseño

de obras subterráneas-, de forma de utilizar las ventajas de los dos sistemas antes mencionados: métodos de cálculo utilizados hoy en día, y capacidad de solucionar los problemas mas comunes del área de trabajo.

El proyecto TUNEL fue realizado por Virgilio Montesinos como Tesis de Grado para optar al Título de Ingeniero de Minas, bajo la tutoría académica de Miguel Castillejo y Gianfranco Perri, ambos docentes del Departamento de Ingeniería de Minas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela en Caracas, Venezuela.

2. METODOS DE CALCULO DE "TUNEL"

2.1. Curva Característica de un Túnel (Convergence-Confinement Method):

Se ha seguido la teoría expuesta por Ladanyi (4), que se basa fundamentalmente en la determinación del Factor de Expansión Volumétrica (eav), y en la condición de que los parámetros de rotura del material son distintos en la fase elástica y en la plástica. Se ha obviado el factor tiempo en este análisis, y se han implementado varios criterios de rotura dependiendo de las condiciones del material que se esté sometiendo a estudio. Se está estudiando la implementación del método de cálculo expuesto por Panet (5), el cual calcula directamente la pérdida de resistencia del material en la fase plástica. De esta forma se podrán tener en un futuro dos soluciones distintas de un mismo tipo. Las condiciones para utilizar la opción implementada son las siguientes:

- 2.1.1. Túnel Circular.
- 2.1.2. Condición Hidrostática de Esfuerzos.
- 2.1.3. Un Macizo Rocoso Homogéneo e Isotrópico.

Independientemente del cálculo de la Curva Característica del Túnel, TUNEL permite obtener soluciones de sostenimientos circulares a base de concreto, pernos de

anclaje, costillas metálicas, o una combinación de los anteriores.

2.2. Rigidez Relativa (Relative Stiffness)

Este método fue desarrollado por Einstein y Schwarzt (6) como una forma de determinación instantánea del método de la Curva Característica. Dos soluciones extremas se calculan dependiendo de la relación de rigidez terreno-sostenimiento: una adherencia completa de los mismos, y una ausencia de adherencia entre terreno y sostenimiento, asumiendo que no hay esfuerzos de corte en el contacto.

Las condiciones para utilizar esta opción son muy parecidas a las de Curva Característica, con la flexibilidad de poder usar una condición de esfuerzos iniciales distinta a la hidrostática (cualquier K mayor de cero).

2.3. Análisis de Bloques Inestables:

Son diversos los autores que han propuesto métodos para determinar posibles bloques inestables creados por variados patrones de discontinuidades (diaclasas, fallas, estratificaciones, foliaciones) en una cavidad subterránea. Los más conocidos son realizados mediante proyección estereográfica de los planos de discontinuidad que actúan sobre una cara libre. Hook y Brown (7) y Manera (8) presentan soluciones de este tipo. El primero analizando bloques formados por tres planos diferentes (tetraedros), y el segundo por dos o más planos diferentes o iguales que puedan formar un volumen que pueda caer o deslizar. Hook y Brown (7) adicionalmente presentan una solución analítica semejante a la gráfica, que es la que interesa para los fines de TUNEL.

Este método calcula el Factor de Seguridad de un bloque en forma de tetraedro que puede deslizar o caer de una cara libre de una excavación subterránea, que esté siendo excavada en roca con al menos tres sistemas de discontinuidades.

La limitación fundamental de este método rápido y sencillo, reside, además de la ya mencionada de los bloques tetraédricos, en la forma geométrica de las caras libres. En caras libres curvas, tales como las que existen en túneles circulares por ejemplo, es necesario repetir el procedimiento asemejando la superficie cilíndrica original a una prismática.

2.4. Método de Elementos Finitos (FEM):

Hablar sobre Elementos Finitos es hablar de más, por lo que se hace la sugerencia de consultar para mayor información a los siguientes autores: Huebner (9), Desai y Nael (10), Gallagher (11), y Zienkiewicz (12).

Para este método no se ha desarrollado ningún programa, sino que se ha implementado con ciertas modificaciones de optimización

el que aparece publicado en la referencia (10), para elementos triangulares y cuadrangulares. Las limitaciones fundamentales de este método, residen en el número de nodos que integran la malla, y en el ancho de banda de la matriz de rigidez de la misma.

Teniendo en cuenta lo tedioso que significa numerar nodos y elementos de una malla, determinar las coordenadas de cada nodo, y separar los nodos que integran un elemento, se han diseñado varios programas que permiten la autogeneración de la malla en secciones de túneles más o menos comunes: circular, cuadrado o rectangular, elíptico y "U" invertida. Los tres primeros aprovechando la simetría en ambos ejes para un cuarto de túnel, y el último según la simetría en el eje de las ordenadas, para medio túnel. Se están diseñando programas que autogeneren la malla para secciones de túneles más especiales como: "U" invertida con piso curvo, herradura, y "U" invertida con techo elíptico, aprovechando la simetría en el eje de las ordenadas. Cuando se utilicen secciones distintas a las implementadas, no quedará más remedio que generar manualmente la malla, aunque se facilita un poco el trabajo con un programa que permite ingresar los datos.

2.5. Método de los Elementos Límites (BEM)

Este método de más reciente aplicación permite obtener resultados muy similares, y algunas veces más precisos, a los obtenidos por medio de Elementos Finitos, con la ventaja de una menor cantidad de datos, y una disminución sensible del espacio de almacenamiento de memoria. Como lo dice su nombre, la idea es obtener la solución en un límite previamente definido. En nuestro caso, el límite es el perímetro de la excavación. Pero adicionalmente, se pueden obtener soluciones en cualquier punto distintos al límite, mejor conocidos como puntos internos.

Como no es intención de este artículo hacer una descripción del método de cálculo, información que pueden conseguir en la Tesis de Grado del autor (13) de este artículo para este y los otros métodos descritos, en forma sencilla y comprensible, dejamos a los lectores el interés de consultar a Brebbia (14,15), donde podrán encontrar una información detallada de este método de cálculo. Con respecto al programa se ha escogido para su implementación en TUNEL, el publicado por Hook y Brown (7), optimizado para aumentar su capacidad de memoria. La desventaja fundamental de este programa es que fue diseñado para materiales homogéneos, y no permite mezclar diferentes tipos como es el caso de Elementos Finitos. Buscando obviar este inconveniente se estudia la implementación de una versión mejorada publicada por Brebbia (14) para obtener las mismas soluciones del ya implementado.

3. CARACTERISTICAS DE "TUNEL"

Para la realización de este proyecto se contó con un computador Digital PDP 11/34A propiedad de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela. El PDP 11/34A funciona bajo el sistema operativo RSX-11M. Este sistema operativo tiene un procesador de archivos indirectos que permite enlazar los programas básicos antes mencionados con los comandos propios de manejo de archivos, de forma de crear un menú de aplicaciones.

La ventaja de este procesador es su similitud con otros sistemas operativos (CP/M), especialmente aquellos que están implementados en computadoras personales de alta demanda comercial, de forma que el menú de aplicaciones de TUNEL puede ser fácilmente traducido para éstas. Esta es otra actividad que se está sometiendo a estudio, aprovechando esta ventaja.

Antes de entrar en las características de TUNEL, es conveniente entender como funciona el procesador de archivos indirectos del sistema operativo RSX-11M. El procesador permite enlazar diferentes actividades propias del sistema operativo mediante una secuencia lógica de comandos que este procesador pueda entender. En esta forma puede inquirir por una respuesta del usuario, y dependiendo de la misma, ejecutar una u otra actividad. En TUNEL la secuencia de comandos se ha restringido a las siguientes:

- 3.1. Preguntar por una respuesta.
- 3.2. Determinar el nivel de prioridad de la respuesta.
- 3.3. Ejecutar la corrida de un programa básico (algunos de los mencionados antes u otros que se explicarán posteriormente), dependiendo del nivel de la respuesta.
- 3.4. Visualizar por algún terminal la solución producida en el paso anterior, dependiendo del nivel de prioridad.
- 3.5. Eliminar información almacenada, creada por el paso 3, que el usuario ya no desee.

Los dos primeros pasos son propios de la estructura del procesador de archivos indirectos. El tercero es la ejecución de un archivo que contiene el programa objeto mediante la instrucción RUN del RSX-11M. Y las dos últimas es la ejecución de un "software" que permite el manejo de archivos, el PIP (Peripheral Interchange Program), conocido en los sistemas operativos de las computadoras personales mas usadas (CP/M).

La ejecución de un PIP en el paso 4 permite ver el contenido de un archivo, usualmente la salida con los resultados de un

programa, por algún terminal escogido por el usuario: una pantalla, una impresora, o un "plotter". Por otro lado, la ejecución de un PIP en el paso 5 significa la eliminación de un archivo cuando deja de prestar utilidad. En TUNEL este paso es ejecutado cuando el usuario lo abandona. De esta forma se evita la profusión de archivos que ocupan un determinado espacio en los mecanismos de memoria masiva del computador.

Todos los programas básicos de TUNEL fueron escritos en FORTRAN IV, aunque no necesitan del compilador para su ejecución. El ingreso de los datos en los programas se ha diseñado pensando en que el usuario, mas que un esclavo del computador, sea el que lo esclavice para sus objetivos. De esta forma cada programa pregunta por los datos que él necesita, sin perder tiempo creando archivos por parte del usuario, que necesite la comprensión de algún sistema de edición de archivos. Este sistema no se cumple cuando se necesita generar manualmente una malla de Elementos Finitos, y en todo caso para verificar que los datos están en correcto orden, cuestión que está de mas, si el usuario no comete errores cuando se ejecuta el programa que le pide los datos de este caso.

Cuando algún programa es ejecutado, lleva en sus instrucciones la orden de abrir uno o varios archivos que contendrán los resultados o los datos para otros programas. Para facilitar la tarea al usuario, TUNEL ya conoce sus nombres y sus tipos, y preguntará al usuario si desea mostrarlos y por donde, dependiendo del tipo del archivo, a lo que deberá responder.

TUNEL fue diseñado para utilizar los siguientes equipos periféricos instalados al PDP 11/34A: terminales DEC VT-100, impresoras DEC LA-120, pantallas gráficas TEKTRONICS 4006-1, delineador ("plotter") TEKTRONICS 4662. Estos periféricos permiten la obtención de resultados de distinta presentación en forma de gráficas o de tablas, para lo cual fue necesario diseñar programas adicionales para cumplir con otro de los objetivos de TUNEL: buena presentación de resultados. La descripción de estos programas se explicará en el siguiente capítulo.

4. DESCRIPCION DE SALIDAS DE RESULTADOS

TUNEL presenta variadas salidas de resultados, pero fundamentalmente se agrupan en dos tipos: salidas gráficas y salidas impresas. El tipo de salidas será descrita en cada uno de los programas básicos.

4.1.1. Curva Característica de un Túnel:

La salida impresa muestra los resultados de Presión Radial en el techo, pared y piso versus Deformación Radial en la zona plástica. Previamente muestra el valor de la presión inicial P_0 , y el valor de la Presión Crítica y la Deformación Crítica en la in-

terfase elástica-plástica de la curva. Acompañando los resultados se indica el sistema de unidades escogidas para el cálculo.

La salida gráfica es la curva obtenida en un sistema cartesiano "P" versus "u", para cada punto de cálculo. Esta salida es elaborada mediante un programa accesorio, lo que permite adicionalmente mostrar las curvas características de los sostenimientos escogidos superpuestos a las del túnel. Adicionalmente cuenta con una opción de sectorizar una parte del gráfico para detallarlo mas. Ver Figs. 1 y 2.

4.1.2. Curva Característica del Sostenimiento:

La salida impresa muestra un encabezado con el tipo de sostenimiento usado, y los datos de entrada con el sistema de unidades escogido. Asimismo, muestra los valores de rigidez, presión admisible, y deformación máxima, para cada variación de las características geométricas del sostenimiento.

La salida gráfica, realizada con el programa accesorio mencionado antes, muestra las curvas de sostenimientos en un gráfico cartesiano "P" versus "u". Ver Fig. 3.

4.2. Rigidez Relativa:

La salida impresa muestra un encabezado con los datos de entrada y el sistema de unidades escogido para el cálculo. Los resultados mostrados, para los dos casos extremos, sin adherencia y con adherencia terreno-sostenimiento, son los siguientes: esfuerzo radial, esfuerzo de corte, carga sobre el sostenimiento, momento, deformación radial y deformación tangencial, para cada cinco grados de un cuarto de túnel.

La salida gráfica muestra la variación en un cuarto de túnel de cada uno de los coeficientes calculados con los datos utilizados. Esta salida es realizada por otro programa accesorio, que permite graficar la función deseada o todas ellas. Ver Figs. 4 y 5.

4.3. Bloques Inestables:

Para este programa solo existe la salida impresa, la cual muestra un encabezamiento con los datos de las discontinuidades y el sistema de unidades empleado. El resultado, el Factor de Seguridad, es mostrado para los dos casos extremos dependiendo de donde se ubique el bloque frente a la cara libre. Ver Fig. 6.

4.4. Elementos Finitos:

Como se mencionó antes, TUNEL está diseñado para pedir los datos necesarios para sus programas básicos. Con este método de cálculo los datos son abundantes cuando se necesita generar tradicionalmente la malla de elementos finitos, por lo que se cuenta con un programa accesorio para pedir

los datos. Este es el único programa para ser utilizado en la entrada.

La salida impresa es de dos tipos, resultados tabulados con los siguientes parámetros: esfuerzo en X, esfuerzo en Y, esfuerzo de corte, esfuerzo principal menor, esfuerzo principal mayor, esfuerzo de corte máximo, y ángulo que forma el esfuerzo principal mayor con el eje X, en los centroides de los elementos, después de imprimir los datos de las coordenadas de los puntos nodales, y de la lista de nodos por elemento. Asimismo, imprime los desplazamientos en los nodos, y la deformación de los elementos. La otra salida impresa es la de la malla inicial o la malla deformada. Esto es ejecutado por un nuevo programa accesorio. Ver Fig. 7.

La salida gráfica es muy variada. Se puede obtener el dibujo de la malla inicial o deformada con un programa accesorio. Ver Fig. 8. El dibujo de la magnitud de los esfuerzos cartesianos, o el dibujo de la magnitud y dirección de los esfuerzos principales con otro programa accesorio. Ver Fig. 9. Y por último dibujos de contornos de cualquiera de los resultados. Ver Fig. 10 y 11.

4.5. Elementos Límites:

La salida impresa consiste de los resultados de: esfuerzos cartesianos, esfuerzo de corte, esfuerzos principales, ángulo que forma el esfuerzo principal mayor con el eje X, y dependiendo de si se escoge la opción, el tipo de rotura y un factor de seguridad, en cada centroide de los elementos.

La salida gráfica es semejante a la opción de elementos finitos. Magnitud de los esfuerzos cartesianos, o magnitud y dirección de los esfuerzos principales. Y dibujos de contornos de cualquiera de los resultados.

5. CONCLUSION.

Se han discutido las posibilidades y limitaciones del Sistema Computarizado TUNEL, así como su capacidad de presentación de resultados. En la convicción de que mucho camino queda por hacer, se aceptan cualquier tipo de críticas o sugerencias para la optimización de este sistema, para lo cual se ruega dirigir correspondencia a:

Ing. Virgilio R. Montesinos Y.
Universidad Central de Venezuela
Dpto. de Ingeniería de Minas.
Apdo. 47351, Caracas 1041-A.
Venezuela.

EJEMPLO DE CURVA CARACTERÍSTICA EN EL SISTEMA TUNEL

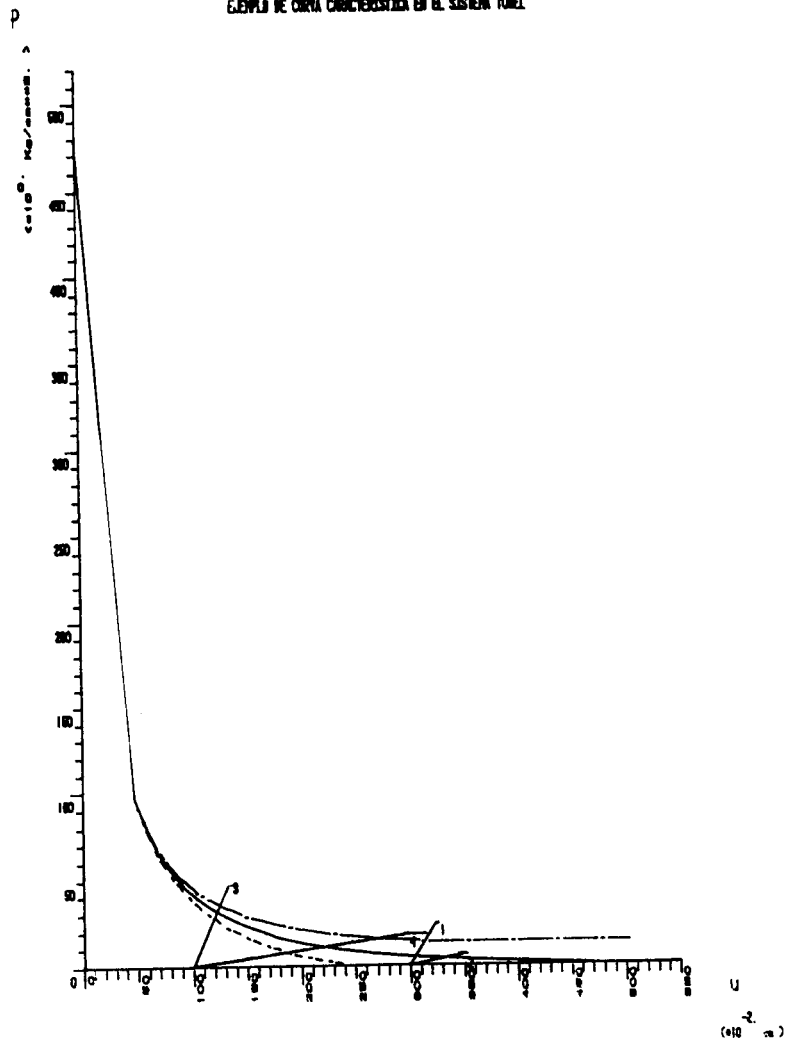


Fig. 1: Curva Característica de un Túnel de 17.5 pies de radio; excavado en gneiss de calidad promedio a una profundidad de 400 pies. Superpuestas a éste, se observan curvas características de sostenimientos: 1. costillas metálicas 8I23 espaciadas cada 5 pies y puntos de bloqueo cada 11.25 grados. 2. costillas metálicas 8I23 espaciadas cada 5 pies y puntos de bloqueo cada 20.grados. 3. concreto proyectado de 2. pulg. de espesor. 4. pernos de anclaje de concha de expansión de 1. pulg. de diámetro espaciados cada 5 pies.

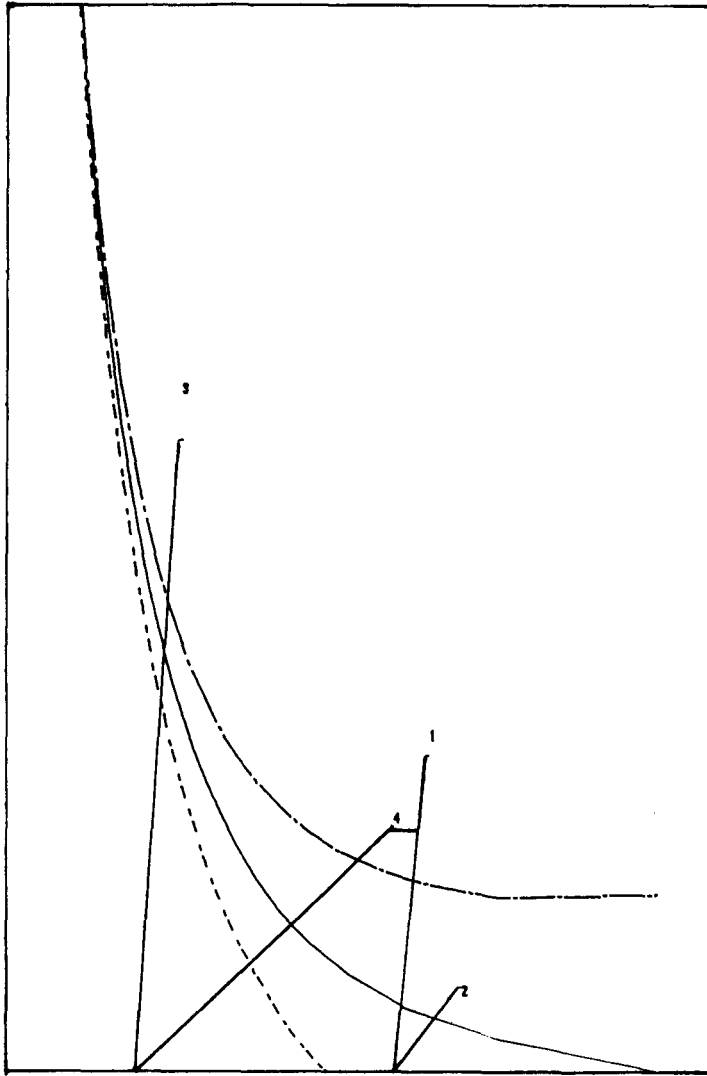


Fig. 2: Sector de la Fig. 1, detallando la formación de la zona plástica, y los puntos de intersección de los sostenimientos.

p EJEMPLO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE CONCRETO COMO SOSTENIMIENTO EN "TUNEL"

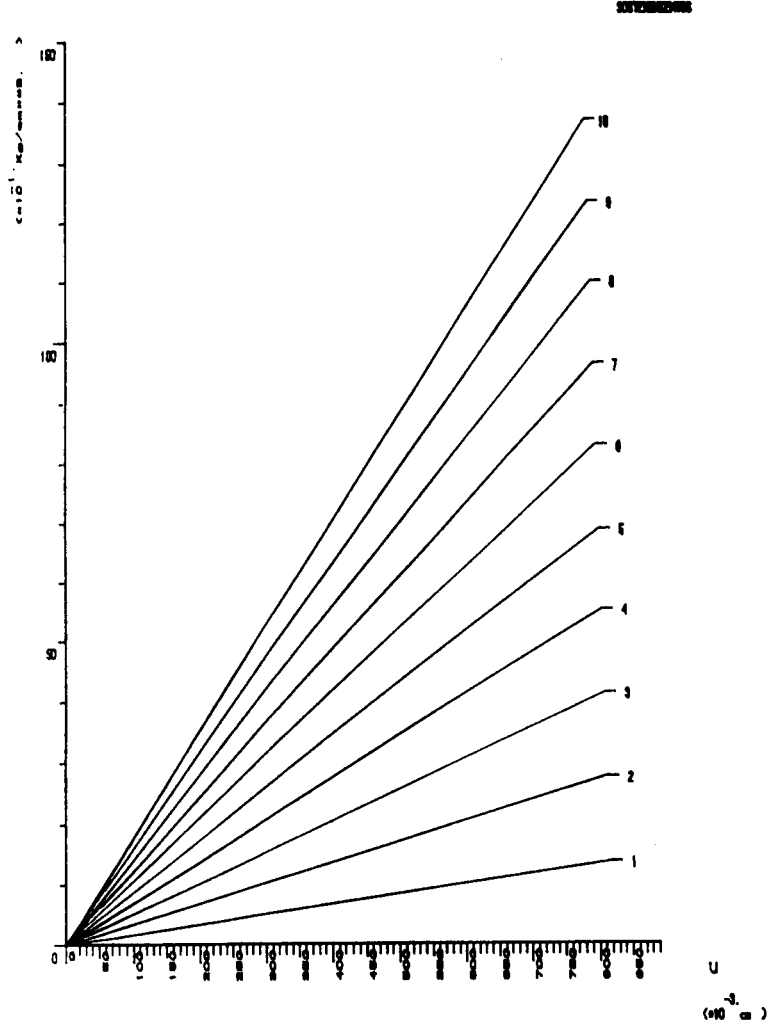


Fig. 3: Curvas Características de Sostenimientos a base de concreto proyectado, variando el espesor de 2. cm a 20. cm, cada 2. cm, en un túnel de 5. m de radio.

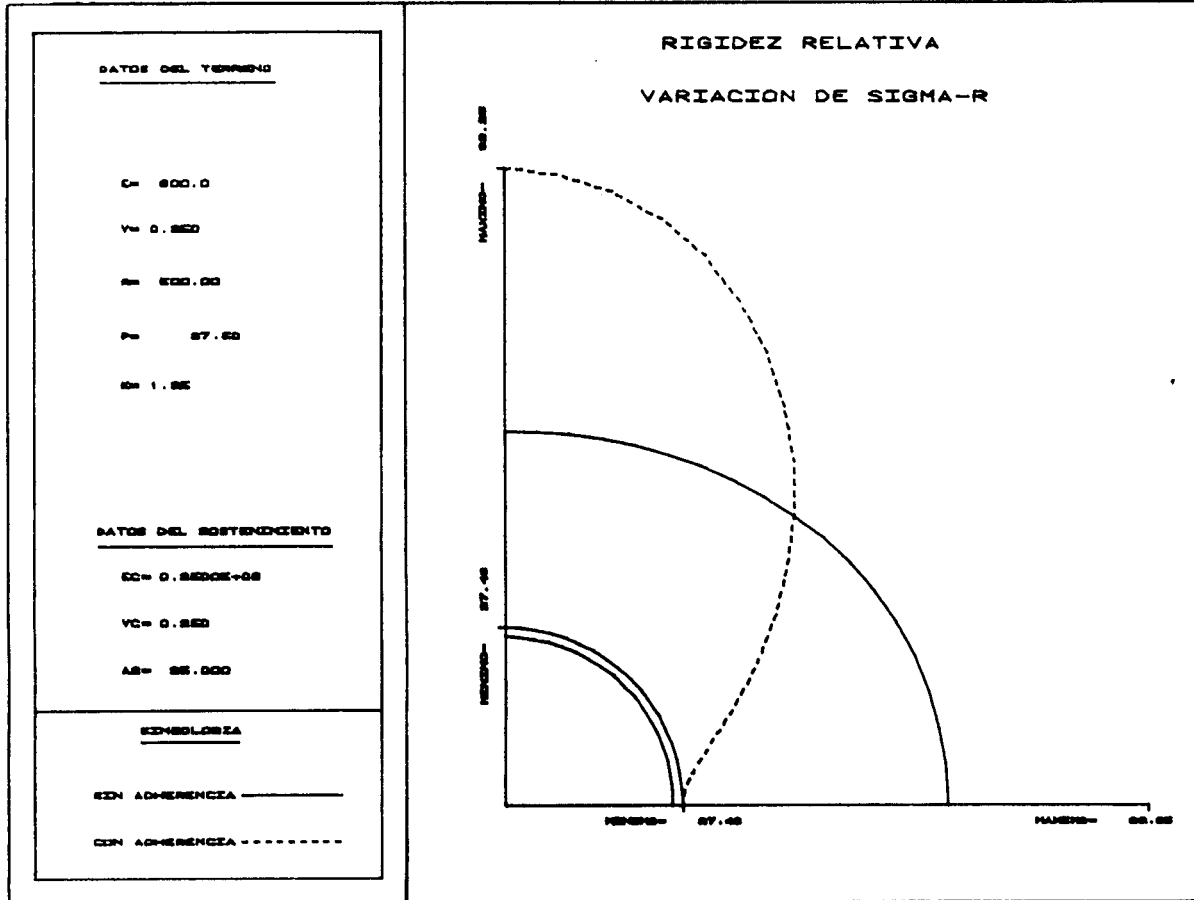


Fig. 4: Variación del esfuerzo radial (SIGMA-R) en un túnel de 5. m de radio, excavado en un esquisto de baja calidad, a 100. m de profundidad con un valor de $K= 1.25$, y un sostenimiento a base de concreto de 25. cm de espesor.

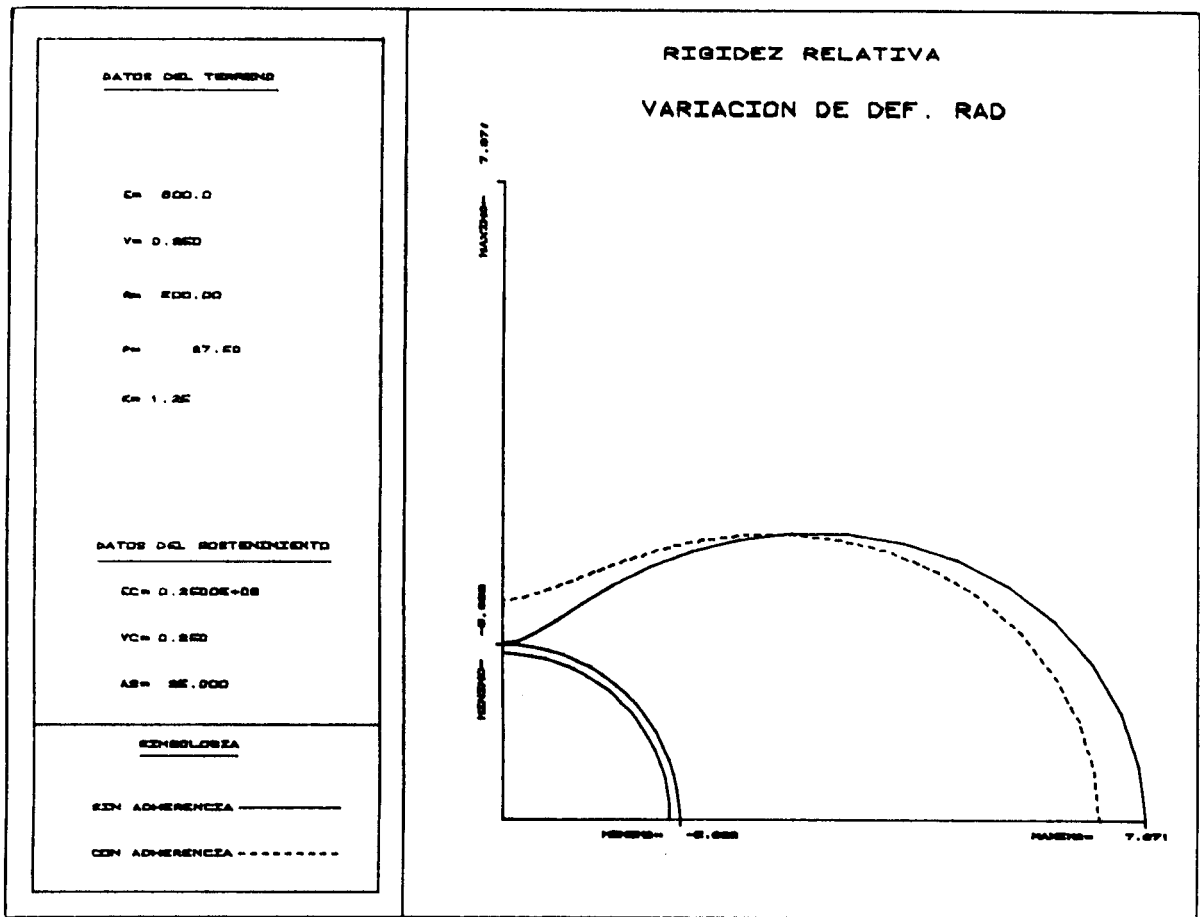


Fig. 5: Variación de la deformación radial (DEF.RAD.) en un túnel con las mismas características de la Fig. 4.

 ANALISIS DE CUGNAS INESTABLES
 EN UNA EXCAVACION SUBTERRANEA

DATOS SUMINISTRADOS

DISCONTINUIDAD 1	DISCONTINUIDAD 2
RUMBO Y BUZAMIENTO: 60.00 W 80.00 S	RUMBO Y BUZAMIENTO: 20.00 E 30.00 N
COHESION 0.00 Ks/cm**2.	COHESION 0.00 Ks/cm**2.
ANGULO DE FRICCION 30.0 Grados	ANGULO DE FRICCION 30.0 Grados
PRESION DE AGUA 0.00 Ks/cm**2.	PRESION DE AGUA 0.00 Ks/cm**2.

DISCONTINUIDAD 3

RUMBO Y BUZAMIENTO: 0.50 W 30.00 W
 COHESION 0.00 Ks/cm**2.
 ANGULO DE FRICCION 30.0 Grados
 PRESION DE AGUA 0.00 Ks/cm**2.

RUMBO Y BUZAMIENTO DE LA CARA LIBRE: 45.00 E 89.50 S

DIMENSION MAXIMA: 430.00 cm

RUMBO Y DECLIVE DE LA RECTA SOBRE LA QUE SE MIDE
 LA DIMENSION MAXIMA DE LA CARA LIBRE: 45.00 E 89.50 S

RUMBO Y DECLIVE DE LA FUERZA APLICADA AL ANCLAJE: 0.50 E 0.50 N

FUERZA APLICADA AL ANCLAJE: 0.00 Ks

PESO UNITARIO DE LA ROCA: 0.270000E-02 Ks/cm**3.

PRIMER CASO:

LA CARA LIBRE NO SOBRESALE CON RESPECTO A LA POSIBLE CUGNA.

EXISTE CONTACTO EN LOS PLANOS 1 Y 3, Y SEPARACION EN EL PLANO 2
 FACTOR DE SEGURIDAD = 1.43973

SEGUNDO CASO:

LA CARA LIBRE SI SOBRESALE CON RESPECTO A LA POSIBLE CUGNA.

EXISTE CONTACTO EN EL PLANO 1, Y SEPARACION EN LOS PLANOS 2 Y 3
 FACTOR DE SEGURIDAD = 0.101802

Fig. 6: Salida tabulada de un análisis de bloques inestables (cugnas) en un túnel cuadrado de 4.30 m de semi-lado excavado en una cuarcita con diaclasas sin cohesión ni agua.

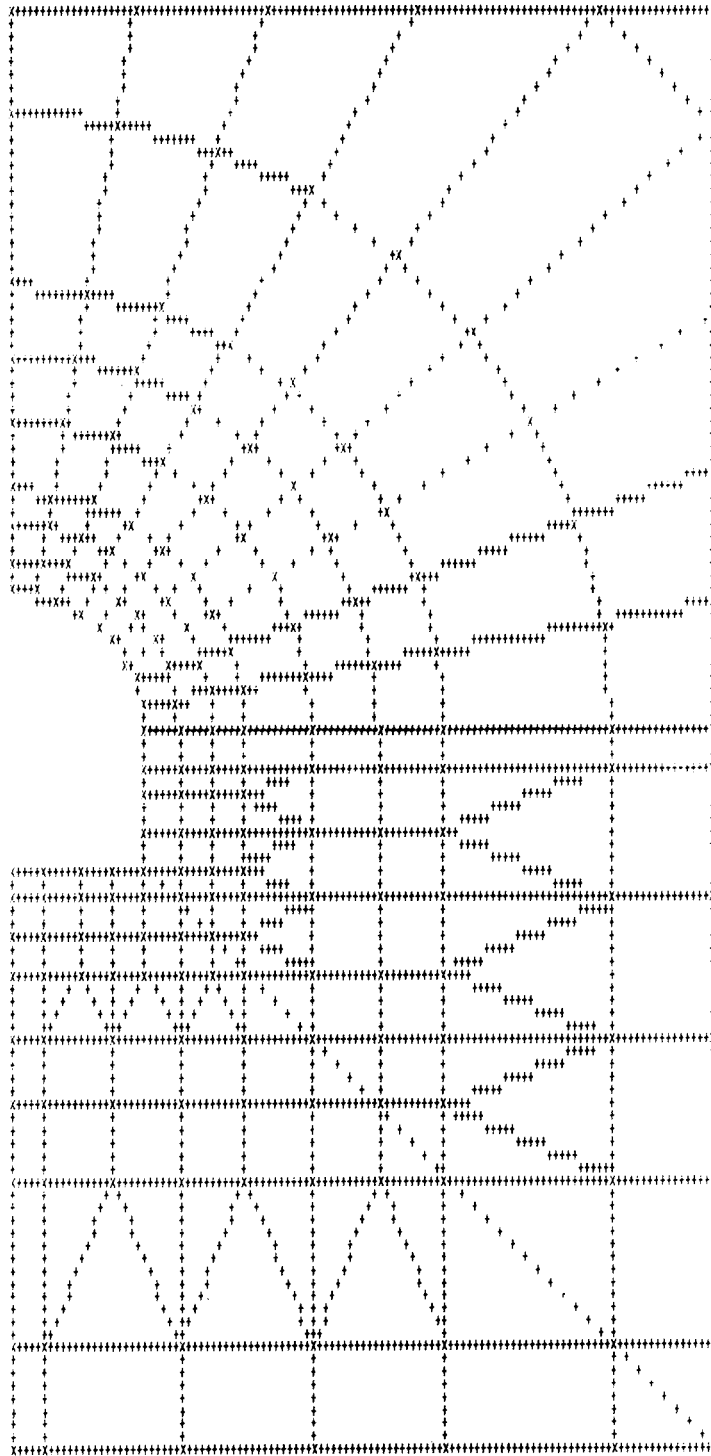


Fig. 7: Malla de elementos finitos inicial en un túnel en forma de "U" invertida, como es mostrada por la impresora.

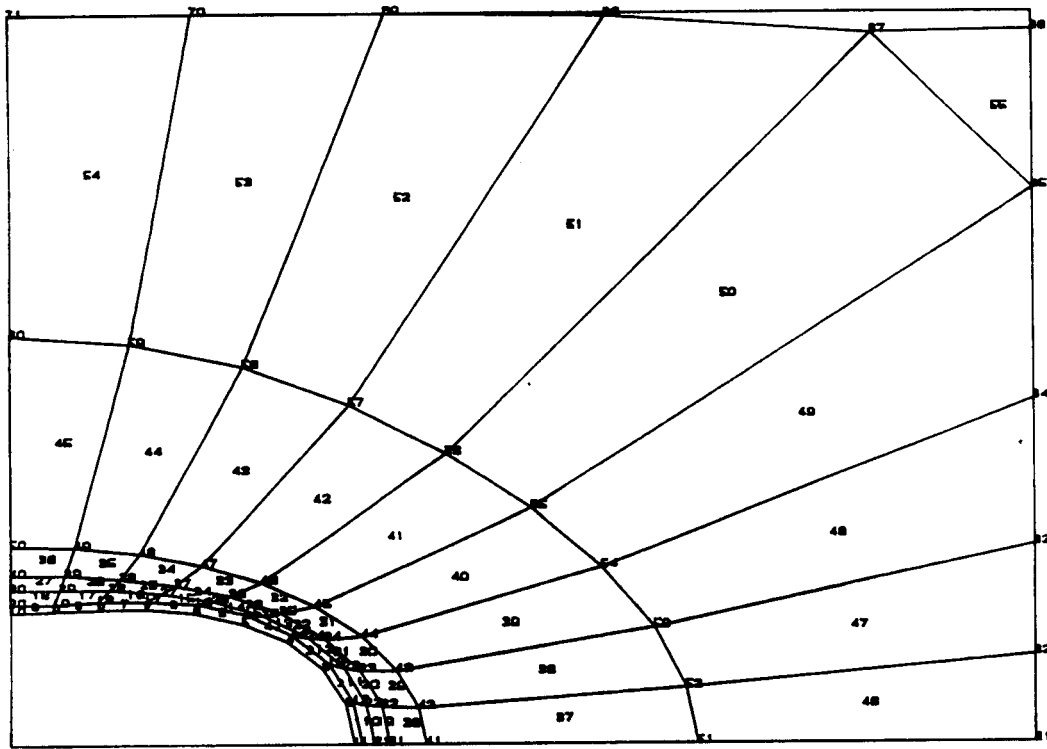


Fig. 8: Malla de elementos finitos deformada de 20. m por 20. m en un túnel circular de 5. m de radio, excavado en un gneiss de calidad promedio a 100. m de profundidad con un sostenimiento de concreto de 25 cm de espesor obtenida por un "plotter".

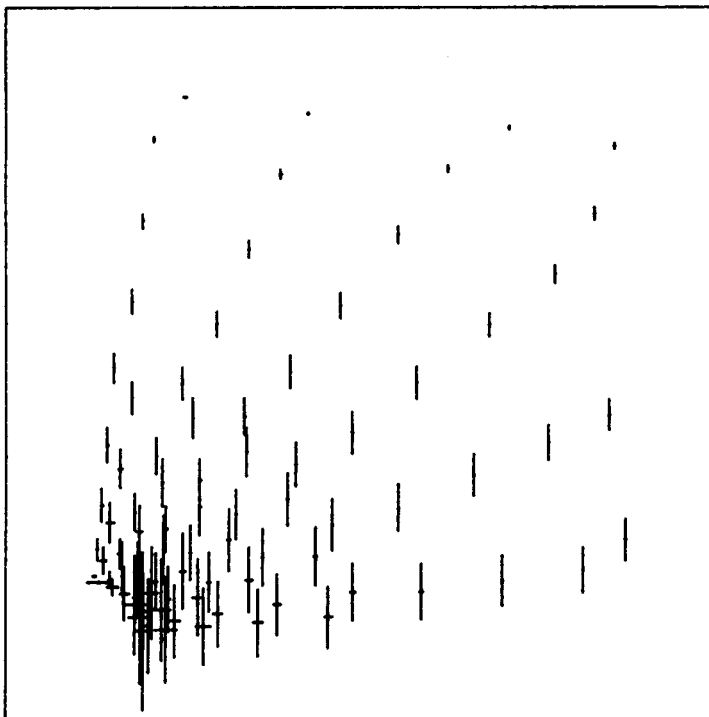


Fig. 9: Dibujo de la magnitud de los esfuerzos cartesianos en un túnel de 4. m de radio excavado en un esquisto de alta calidad, sin sostenimiento alguno.

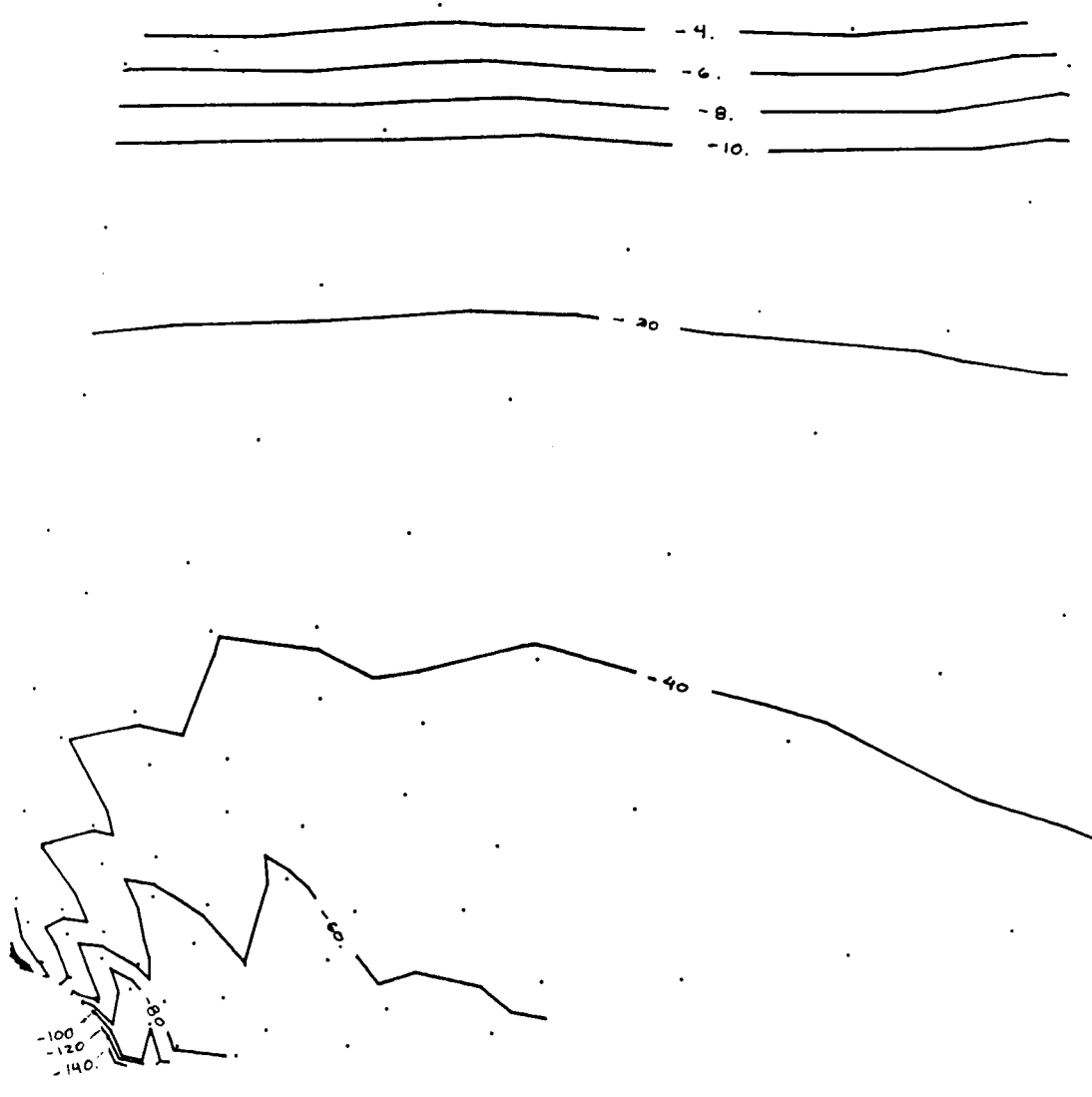


Fig. 10: Dibujo de contornos de esfuerzo principal mayor (SIG-MA-1), en un túnel con las mismas características de la Fig. 9 (el valor del contorno es graficado por el programa).

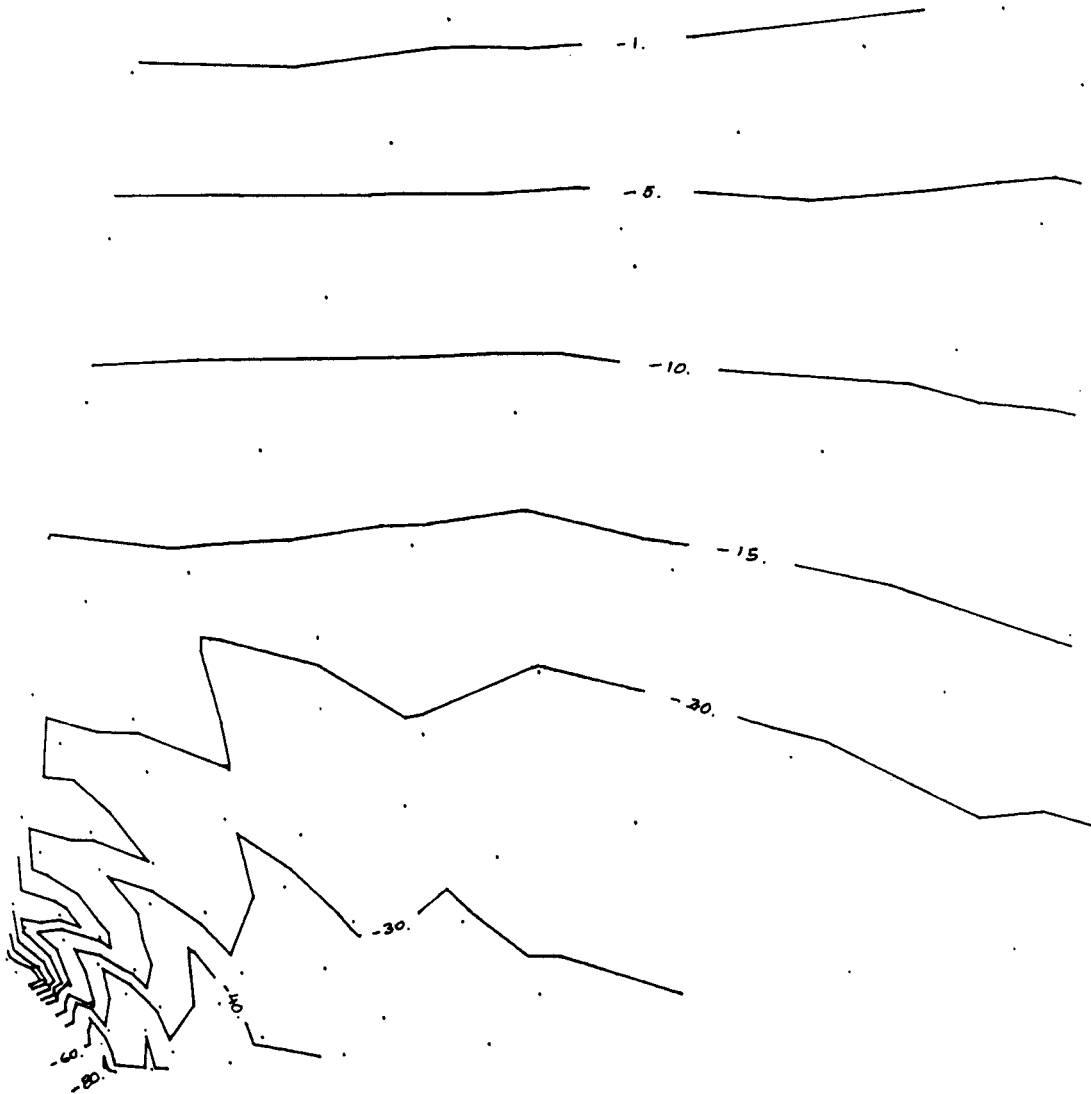


Fig. 11: Dibujo de contornos de esfuerzo de corte máximo, en un túnel con las mismas características de la Fig. 9 (el valor del contorno no es graficado por el programa).

6. REFERENCIAS

1. Mackerle, J. Review of pre- and postprocessor programs included in the major commercial general purpose finite element packages. *Advances in Engineering Software*, 1983, Vol. 5, No. 1.
2. Wood, L. A. RAFTS: a program for the analysis of soil-structure interaction. *Advances in Engineering Software*, 1978, Vol. 1, No. 1.
3. Katona, M. CANDE: a versatile soil-structure design and analysis computer program. *Advances in Engineering Software*, 1978. Vol. 1, No. 1.
4. Ladanyi, B. Use of the long-term strength concept in the determination of ground pressure on tunnel linings. *Proc. 3rd. Congress of International Society of Rock Mechanics*, Denver, 1974, Vol. 2B.
5. Panet, M. Analyse de la stabilite d'un tunnel creuse dans un massif rocheux en tenant compte du comportement apres la rupture. *Rock Mechanics*, 1976, Vol. 8, No. 4.
6. Einstein, H. and Schwartz, C. Simplified Analysis for Tunnel Supports, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. April 1979, Vol. 105, No. GT4.
7. Hoek, E. and Brown E. *Underground Excavations in Rock*. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980.
8. Manera B., C. Método para el estudio de inestabilidades creadas por bloques rígidos en excavaciones subterráneas. *Boletín Geológico y Minero*, 1983, Tomo XCIV, No. 1.
9. Huebner, K. *The Finite Element Method for Engineers*. John Wiley & Sons. New York, 1975.
10. Desai, C. and Nael, J. *Introduction to the Finite Element Method*. Van Nostrand Reinhold. New York, 1972.
11. Gallagher, R. *Finite Element Analysis Fundamentals*, Prentice - Hall Inc.. 1975.
12. Zienkiewicz, O. *El Método de los Elementos Finitos*. Editorial Reverté, S.A.. Barcelona, 1980.
13. Montesinos Y., V. R. TUNEL: sistema computarizado aplicado al diseño de excavaciones subterráneas. Tesis de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
14. Brebbia, C. *The Boundary Element Method for Engineers*. John Wiley & Sons. New York, 1978.
15. Brebbia, C. *Progress in Boundary Element Methods*. Vol. 1. John Wiley & Sons, New York, 1981.
16. Perri, G., Castillejo, M., y Torrealba, G. *El Método de los Elementos Finitos en las Aplicaciones Geotécnicas*. Geomec, 1981, Vol. 1., No. 1.