

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

**DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS  
RESISTENTES DE UN RELLENO  
CONSOLIDABLE PARA SU EMPLEO  
EN CAPAS INCLINADAS DE CARBON**

MEMORIA



9 INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

00679

El presente estudio ha sido realizado por la división de Geología aplicada a la Ingeniería del INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA en régimen de contratación con ESBOGA GEOTECNICA, S.A.

1 9 8 1

DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS RESISTENTES DE  
UN RELLENO CONSOLIDABLE PARA SU EMPLEO EN CAPAS  
INCLINADAS DE CARBON

1.- INTRODUCCION

1.1 La mecánica de las capas inclinadas

1.1.1 Avance del frente perpendicularmente a la línea de máxima pendiente

1.1.2 Avance del frente paralelo a la línea de máxima pendiente

1.1.3 Soutirage y arranque hidromecánico

1.2 Rellenos consolidables

1.2.1 Estado actual de la utilización de rellenos consolidables

1.2.1.1 Rellenos consolidables con baja proporción de cemento

1.2.1.2 Rellenos consolidables con alta proporción de cemento

1.2.2 Distribución de la presión en los talleres con relleno -  
colgado.

## 2.- METODOLOGIA EMPLEADA

2.1 Selección de materias primas

2.2 Preparación de las formulaciones

2.3 Ensayos de resistencia

2.4 Modelización geomecánica

2.4.1 Comportamiento de los medios granulares

2.4.2 Leyes del comportamiento elástico

2.4.3 Criterios de plastificación

2.4.4 Leyes del comportamiento plástico

2.4.5 El método de los elementos finitos

2.4.6 Programa de cálculo

## 3.- TRABAJOS REALIZADOS

3.1 Recopilación bibliográfica

3.2 Características de las materias primas

3.2.1 Estériles

3.2.2 Conglomerantes

3.2.3 Cenizas volantes

3.2.3.1 Propiedades hidráulicas de las cenizas volantes

3.2.3.2 Efecto puzolánico de las cenizas volantes

3.2.4 Acelerantes de fraguado

3.3 Definición de la formulación tipo

### 3.4 Optimización de la formulación tipo

#### 3.4.1 Conclusiones particulares

3.4.1.1 Estériles de escombrera de tipo A

3.4.1.2 Estériles de escombrera de tipo B

3.4.1.3 Estériles de menudos de lavadero

#### 3.4.2 Conclusiones generales

3.4.2.1 Influencia del tipo de estéril

3.4.2.2 Influencia de las cenizas volantes

3.4.2.3 Influencia de los acelerantes

### 3.5 Resultados de la modelización geomecánica

3.5.1 Características del modelo

3.5.2 Características de los materiales

3.5.3 Análisis de los resultados

## 4.- CONCLUSIONES

## 5.- BIBLIOGRAFIA

ANEJO I Fotos, Resultados ensayos de corte, Resultados del modelo geomecánico

ANEJO II Resultados de los ensayos de compresión simple

## DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS RESISTENTES DE

### UN RELLENO CONSOLIDABLE PARA SU EMPLEO EN CAPAS

#### INCLINADAS DE CARBON

#### **1.- INTRODUCCION:**

La producción de carbón en España prácticamente se ha duplicado entre 1976 y 1980 lo cual constituye un éxito notable que, en algunos aspectos, mejora incluso las previsiones contenidas en el Plan Energético Nacional que otorga al carbón la gran responsabilidad de ser una de las principales fuentes de energía de nuestro país en la carrera para sustituir a los combustibles líquidos.

Este incremento se ve notablemente disminuido si analizamos la producción subterránea de carbón que en ese mismo periodo sólo ha crecido un 27%.

Las razones de este diferente crecimiento hay que buscarlas en la baja producción de lignitos a cielo abierto con anterioridad a 1976, a la gran inercia de la minería subterránea y,

CUADRO 1.- RECURSOS ESPAÑOLES DE CARBON EN FUNCION DE LA PENDIENTE

TIPO DE CARBON	CUENCA	PENDIENTE DE LAS CAPAS			TOTAL
		0-35°	35-60°	> 60°	
HULLA Y ANTRACITA	ASTURIAS NORTE	-	106,6	282,2	388,8
	ASTURIAS SUR	124,8	62,6	190,4	377,8
	ASTURIAS OCC.	78,6	-	-	78,6
	EL BIERZO-VILLABLINO	563,5	377,6	8,9	950
	NORTE DE LEON	5,5	223,8	12,0	241,3
	GUARDO-BARRUELO	120,4	19,2	79,4	219
	SUR DE ESPAÑA	54,3	14,1	3,0	71,4
S U B - T O T A L		947,1 (41%)	803,9 (35%)	575,9 (24%)	2.326,9 (100%)
LIGNITO NEGRO	TERUEL SUR	289,9	10,4	-	300,3
	TERUEL NORTE-ME-QUINENZA	511,2	56,4	-	567,6
	PIRENAICA	118,6	10,4	-	129
	BALEARES	29,0	-	-	29,0
S U B - T O T A L		948,7 (92%)	77,2 (8%)	-	1.025,9 (100%)
LIGNITO PARDO	GALICIA	405,3	-	-	405,3
T O T A L		2.301,1 (61%)	881,1 (23%)	575,9 (16%)	3.758,1 (100%)

sobre todo, a la gran dificultad que presenta la explotación subterránea de los yacimientos de carbón españoles. Esta dificultad proviene de los trastornos geológicos que presentan nuestros yacimientos y en particular de la gran pendiente con que aparecen la mayoría de las capas de carbón.

En el cuadro nº 1 se aclara convenientemente esta situación; pues en el caso de la hulla y la antracita de las 2.326,9Mt que corresponden a las reservas totales 1.379,8 Mt que representan el 59%, están encerradas con capas con pendiente superior a 35°.

La explotación de estas capas con pendiente superior a 35° debe hacerse, en general, controlando el hueco creado detrás del taller mediante la introducción de un material de relleno en el hueco creado. Los materiales que actualmente se emplean como relleno son rocas y estériles de lavadero que no tienen más capacidad resistente que la que proporciona el rozamiento mutuo de los distintos fragmentos de roca que integran estos materiales. En los talleres mecanizados es preciso emplear la técnica del "relleno colgado" que exige unos trabajos de sostenimiento muy importantes y, en cualquier caso, presentan un riesgo potencial apreciable respecto a las explotaciones clásicas.

En este contexto este proyecto de investigación pretende sentar las bases científicas para poder fabricar, a partir



de estériles de la minería del carbón, un relleno consolidable que tenga las características resistentes necesarias para disminuir los trabajos suplementarios de sostenimiento y aumentar la seguridad del método de "relleno colgado". En los talleres convencionales la utilización de un relleno consolidable reducirá los movimientos que se generan al explotar los tajos disminuyéndose los trabajos de conservación tanto en el interior como en el exterior. Por otra parte la utilización de rellenos consolidables podría permitir la adopción en nuestro país de métodos de explotación que están dando excelentes resultados en las capas inclinadas y que se basan, precisamente, en el empleo de materiales de relleno de alta calidad .

No debe extrañar el hecho de que la mecanización de las capas inclinadas de carbón esté tan atrasada, en el momento actual, respecto a la explotación de las capas subhorizontales ya que esto es debido a que a nivel mundial lo normal es que las capas de carbón se presenten con poca inclinación y por lo tanto las reducidas reservas que encierran las capas inclinadas no han compensado, hasta ahora, los grandes esfuerzos que hay que hacer para desarrollar una tecnología adecuada.

Para ilustrar esta afirmación en el cuadro nº 2 se indica la distribución de la producción de carbón en la C.E.E. que puede resumirse, de acuerdo con

PENDIENTE DE LAS CAPAS	PRODUCCION DE CARBON EN LA C.E.E. (% del total)			
	INGLATERRA	ALEMANIA	FRANCIA	BELGICA
0 - 18°	85%	83%	53%	100%
18 - 35°	15%	12%	20%	---
35°	---	5%	27%	---

Cuadro N° 2 DISTRIBUCION DE LA PRODUCCION DE CARBON EN LA C.E.E.

NEHRDICH (1976), afirmando que el 90% del carbón subterráneo extraído en la C.E.E. proviene de capas con pendiente inferior a 35°. Fuera del área de la C.E.E. se explotan capas inclinadas de carbón en OSTRAVA-KARVINA (Checoslovaquia), WATBRZYCH (Polonia), DONBASS y KUTZBASS (U.R.S.S.), China, Turkía, Canadá, Colombia y España.

No obstante lo anterior se espera que en los próximos años aumente la producción de carbón que proviene de capas inclinadas ya que la crisis energética ha reforzado el papel del carbón como fuente de energía y esto ha hecho que se revalorizaran

las reservas, como las encerradas en capas inclinadas, que hasta hace poco eran reservas marginales sin interés inmediato.

### 1.1. LA MECANIZACION DE LAS CAPAS INCLINADAS

Actualmente en Europa el método de explotación que más se emplea en la minería subterránea del carbón es el del tajo largo con hundimiento integral de tal forma que el hueco creado por la extracción del carbón se rellena naturalmente por los fragmentos de las rocas que componen el techo. Este método es con mucho el sistema más seguro y económico pues permite obtener elevadas producciones por taller.

Sin embargo cuando las capas de carbón están inclinadas se presentan problemas derivados por un lado de la falta de estabilidad de la maquinaria del tajo frente a la pendiente y de otro de la inestabilidad de los bloques de roca que crean el relleno del hueco creado. Estos problemas empiezan a manifestarse a partir de unos 20° pero, en el momento actual, están resueltos hasta pendientes de unos 45° por lo que se refiere a la estabilidad de los bloques de roca que se crean en la zona deshullada y hasta unos 70° por lo que se refiere a la estabilidad de los equipos mecánicos del tajo, fundamentalmente máquinas de arranque y elementos de sostenimiento.

Por estas razones, en el momento actual, el método de tajo largo con hundimiento integral solo puede ser empleado con éxito total en capas cuya inclinación respecto a la horizontal no sea superior a  $45^\circ$ . En circunstancias muy favorables este método puede extenderse hasta aproximarse a los  $70^\circ$  pero, en cualquier caso, estas experiencias no pueden extrapolarse a todas las capas con esta inclinación.

Debido a los problemas que supone el control de los bloques de roca que se crean en la zona deshullada, en el caso de las capas con inclinación superior a unos  $45^\circ$  se recurre a rellenar artificialmente el hueco creado empleándose para ello los estériles que provienen de los frentes de avance de las galerías o de las plantas de lavado de los carbones. El ángulo de reposo de estos materiales es, en general, de unos  $45^\circ$  de tal forma que a partir de esa inclinación de la capa se garantiza el relleno total del hueco deshullado.

En la figura nº 1 se muestra el esquema típico de un taller de testers que es el método convencional que se emplea en la explotación de capas de carbón cuya inclinación es superior a  $45^\circ$ . Estos talleres se caracterizan porque el talud de la zona rellenada forma un ángulo próximo a  $45^\circ$  y el frente de avance del taller, constituido por "series" en las que se sitúan los picadores, debe permanecer sensi

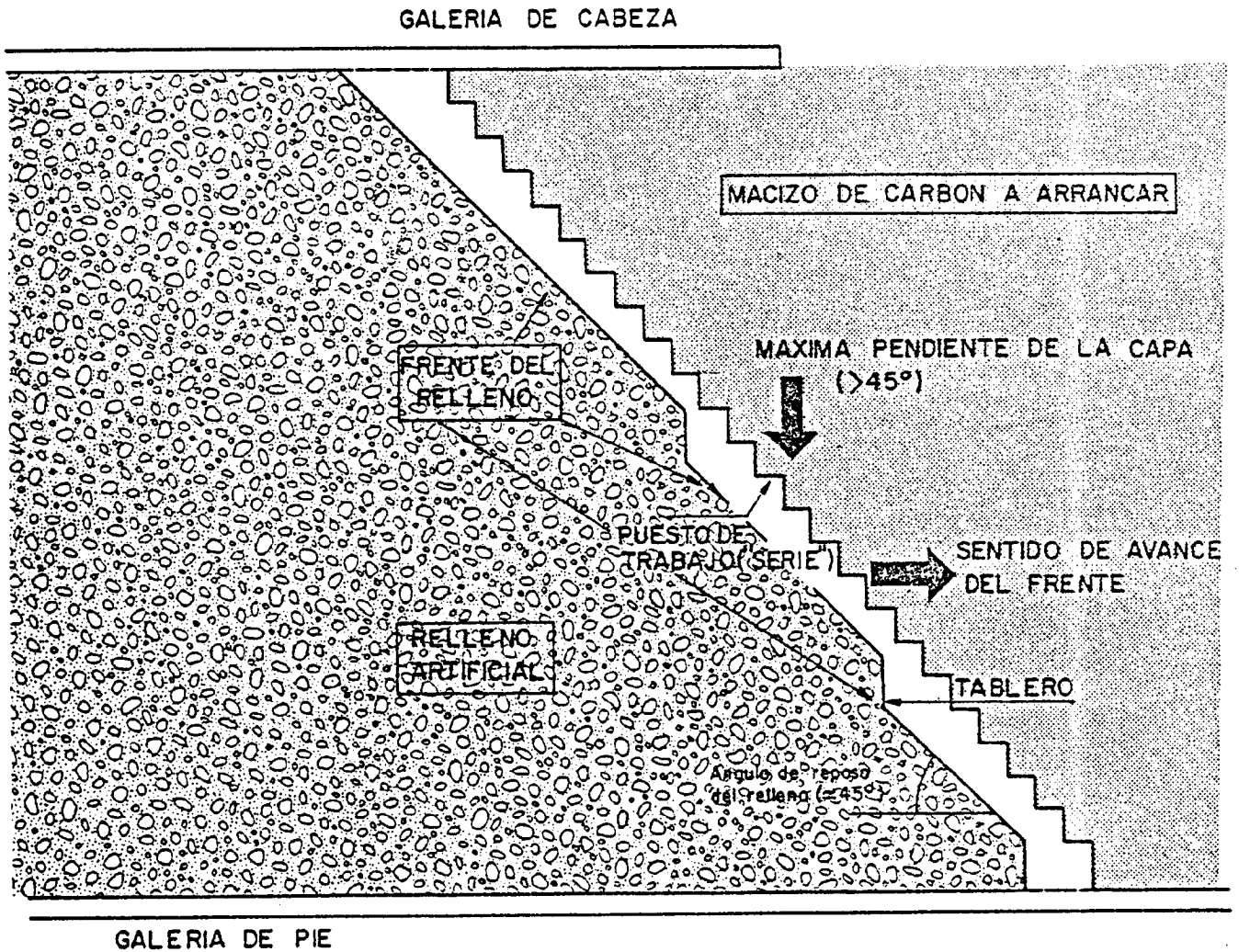


Fig. Nº 1.- ESQUEMA TIPICO DE UN TALLER POR TESTEROS.

blemente paralelo al frente de relleno. Esto se consigue, para cada pendiente de la capa, con una selección adecuada de las dimensiones de cada serie y con el empleo de tableros de contención del relleno colocados puntualmente, a fin de aumentar de forma artificial el ángulo del talud de relleno. El avance del frente de arranque se realiza perpendicularmente a la línea de máxima pendiente de la capa.

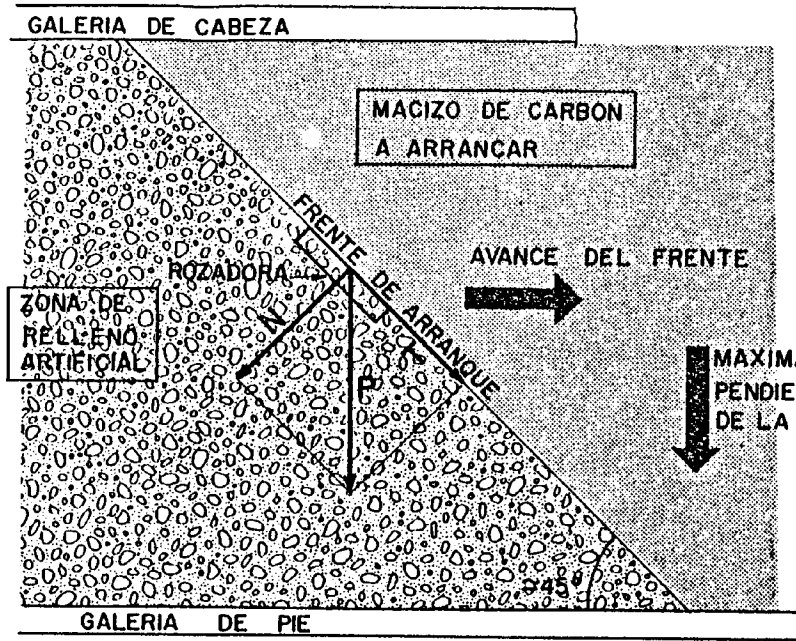
Este método de explotación se caracteriza por exigir una gran mano de obra, que además debe ser muy especializada, y no permite obtener elevadas producciones unitarias por taller con lo cual los resultados económicos nunca pueden ser brillantes. A favor del método hay que señalar su gran flexibilidad que le permite adaptarse bastante bien a cualquier irregularidad que presente la capa a explotar.

Desde hace más de veinte años se ha intentado seguir, en la explotación de las capas inclinadas, la vía de la mecanización que tan buenos resultados técnico-económicos ha proporcionado con el método del tajo largo; pero, hasta el momento actual, el problema no ha encontrado una solución definitiva. A continuación exponemos los métodos de explotación que parecen más prometedores.

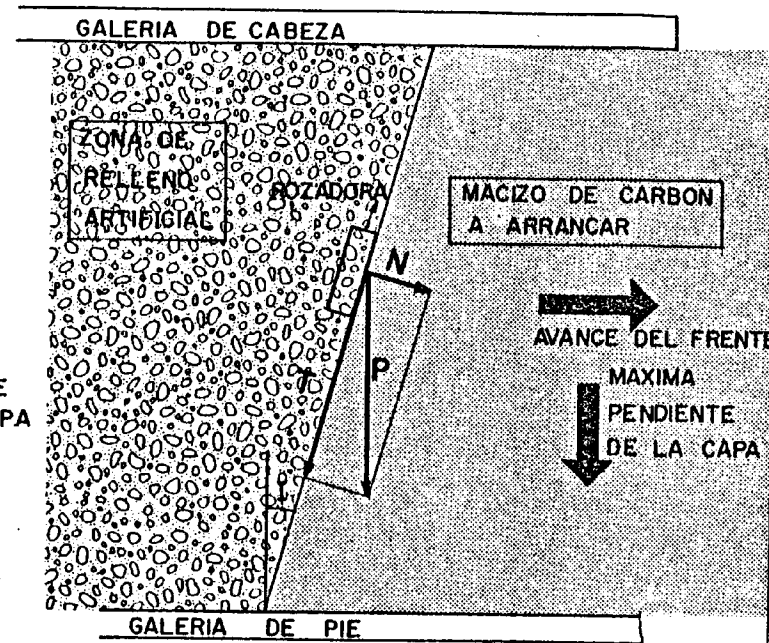
### 1.1.1 Avance del frente perpendicularmente a la línea de máxima pendiente

Este método deriva directamente del de testeros aunque se han adoptado las variaciones necesarias, que se ilustran en la fig. N<sup>o</sup> 2, para hacer posible el empleo de máquinas que mecanicen el arranque.

Por el hecho de efectuar el arranque mediante una rozadora desaparecen inmediatamente los testeros o "series" y el frente puede estar perfectamente alineado. Si en esta hipótesis conservamos la disposición normal de un taller con testeros, en el que el frente de avance forma un ángulo de unos 45° respecto a la horizontal, el peso P de la máquina de arranque puede descomponerse en dos fuerzas N y T normales y tangenciales al frente de arranque respectivamente conforme se ilustra en la fig. 2A. La componente tangencial, T, puede ser fácilmente compensada mediante el efecto de un cabrestante situado en la galería de cabeza, por delante del frente del tajo. La componente normal, N, debe ser contrarrestada por el sostenimiento que además debe proporcionar el empuje necesario para que la rozadora ataque al frente del carbón. Estos esfuerzos no pueden ser soportados por los sostenimiento



A.- FRENTE EN DISPOSICION NORMAL



B.- FRENTE INVERTIDO CON "RELLENO COLGADO"

Fig. Nº 2.- SOLUCIONES PARA LA MECANIZACION DEL ARRANQUE EN UNA CAPA INCLINADA EN LA QUE EL FRENTE AVANZA PERPENDICULAR A LA LINEA DE MAXIMA PENDIENTE.



tos de madera convencionales y solo con el empleo de sostenimientos autodesplazables puede pensarse en man tener esta disposición del taller que, no obstante, debe modificarse acercando el frente a la dirección de la línea de máxima pendiente para minimizar el valor de N.

En el momento actual la tecnología ofrece sosteni mientos autodesplazables para capas inclinadas pero su utilización práctica tropieza con el problema de su adaptabilidad a las irregularidades de la capa que, en el caso de la mayoría de los yacimientos españoles, se convierte actualmente en un problema insalvable si se quieren lograr unos resultados económicos nor males.

Para evitar este problema puede recurrirse a modificar la posición del frente, invirtiéndolo respecto a la posición tradicional conforme ilustra la figura N° 2B. En este caso el mismo peso de la máquina de arranque, P, genera una componente tangencial, T, que al igual que antes puede ser contrarrestada por un cabrestante y una componente normal, N, que de forma natural hace que la máquina de arranque tienda a atacar al macizo de carbón. Esta disposición es com

patible con los sostenimientos convencionales a base de mampostas de madera, ya que no genera esfuerzo alguno sobre ellas; pero, en contrapartida exige que el material de relleno gravite sobre el área de trabajo lo cual exige realizar unos trabajo de refuerzo del sostenimiento muy importantes para "colgar el relleno" que gravan notablemente los resultados económicos de estos talleres. Por otro lado dado que el "relleno colgado" es potencialmente inestable, a pesar de los trabajos de refuerzo que se realizan, el método está limitado en función de la potencia de la capa. Este método se utiliza con profusión en nuestro país y, gracias a él, se ha logrado mecanizar aproximadamente el 30% de la hulla extraída en capas con inclinación superior a 45°.

#### 1.1.2 Avance del frente paralelo a la línea de máxima pendiente

Otras soluciones que se han presentado para acometer la mecanización de capas inclinadas consiste en cambiar la geometría del taller de tal forma que la dirección de avance del frente sea paralela a la máxima pendiente de la capa; en este caso existen dos variantes, una se aplica en Francia y otra en la U.R.S.S.

En Lorena el sentido de avance del frente es ascendente y el hueco creado por la explotación se rellena empleándose para ello arenas obtenidas en canteras. En este caso, figura N° 3, las galerías de cabeza y pie son substituidas por pocillos en capa, manteniéndose la infraestructura general de la explotación igual que en los métodos antes expuestos. Sobre el material de relleno que se coloca se apoyan las máquinas de arranque y colocación del sostenimiento, figura N° 4 con lo que el grado de mecanización que se logra es importante.

Este método de explotación exige carbones que no tengan tendencia al "derrabe" y, por otro lado, es muy poco flexible ante los estrechones de las capas ya que las máquinas empleadas exigen unas anchuras mínimas importantes.

En Lorena este método es operativo en capas con inclinación superior a 60° y potencias comprendidas entre 1,75 y 6 m. En este método de explotación la calidad del relleno juega un papel muy importante para facilitar el trabajo de las máquinas del tajo y para lograr una distribución de presiones favorables, DEJEAN (1979).

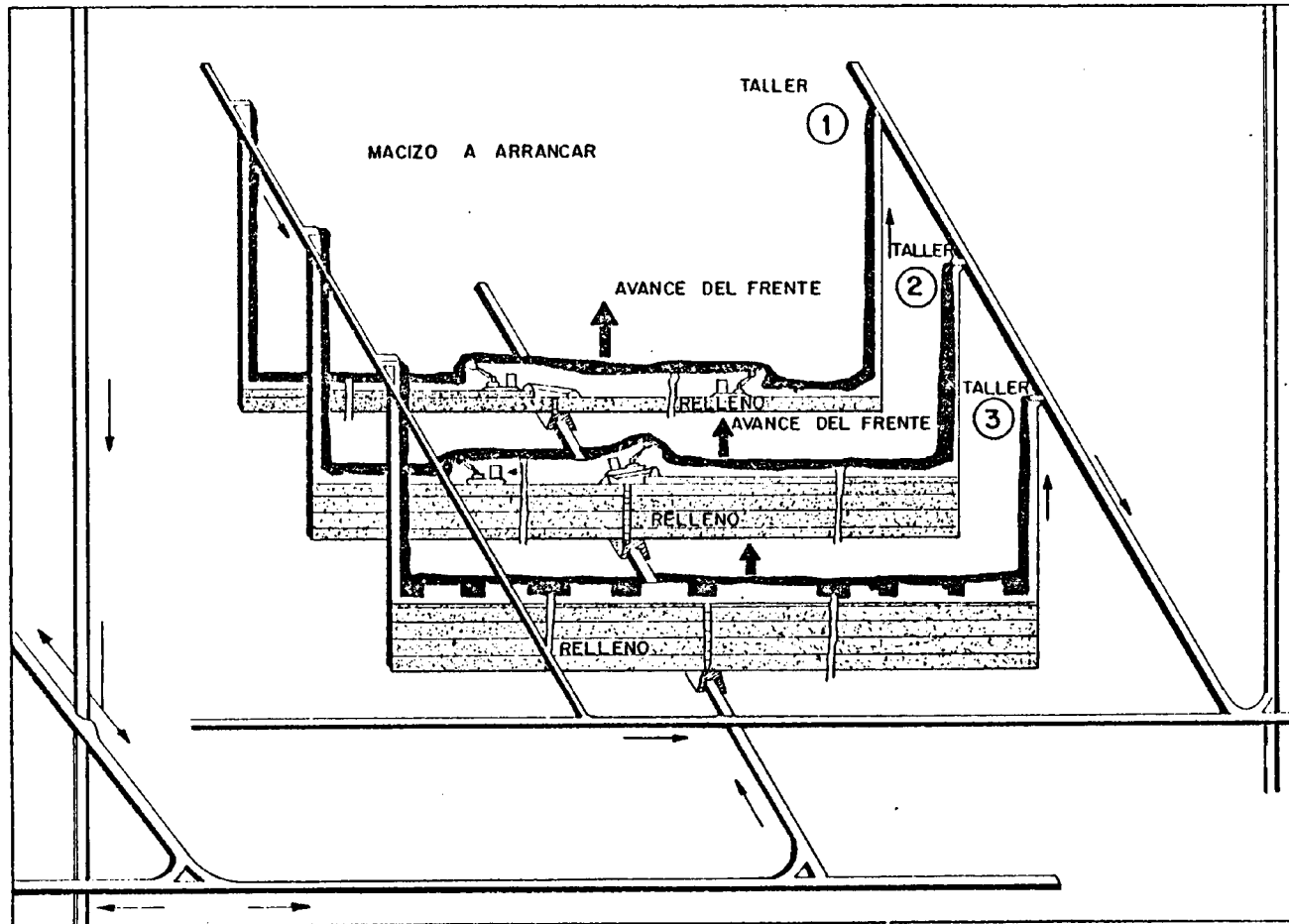
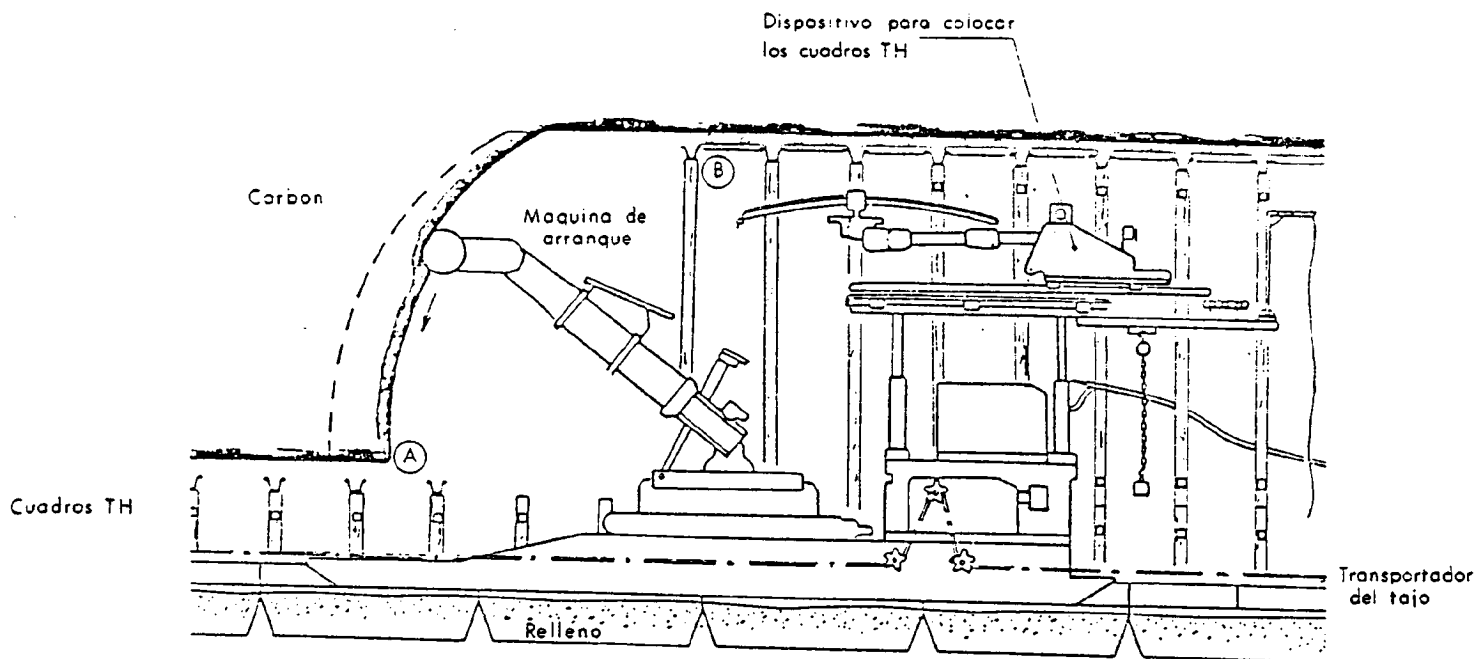
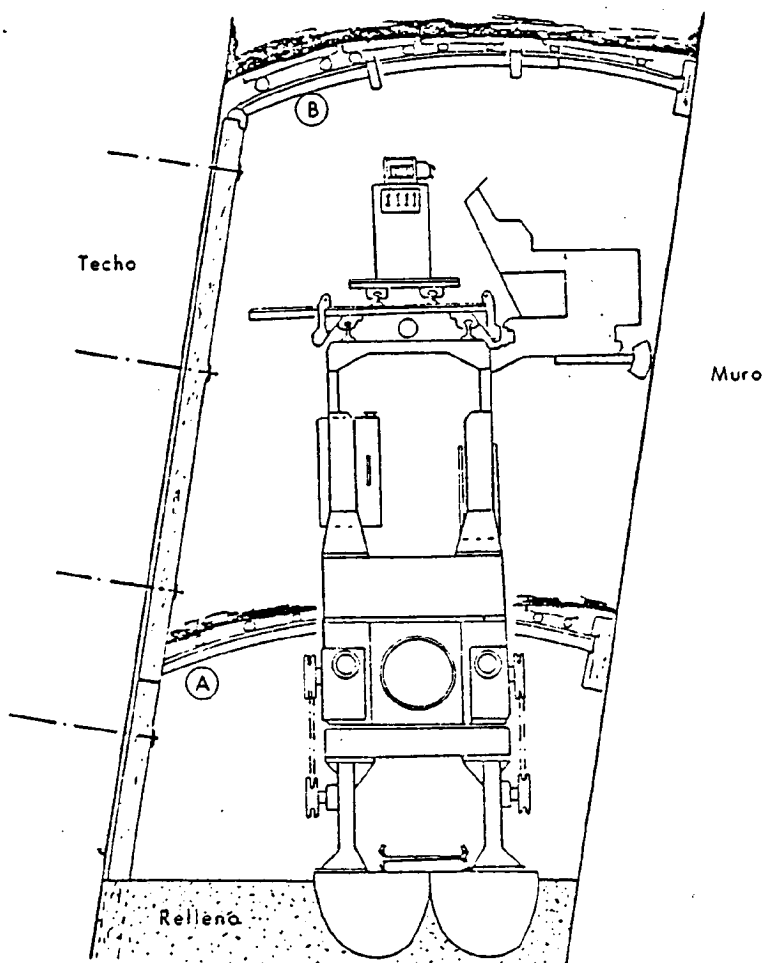


Fig. N° 3.- DISPOSICION DE LOS TALLERES SOBRE CAPAS INCLINADAS CON SENTIDO DE AVANCE DEL FRENTE ASCENDENTE.



SECCION LONGITUDINAL DEL TALLER



SECCION TRANSVERSAL DEL TALLER

Fig. Nº 4 .- DISPOSICION DE UN TALLER SOBRE CAPAS INCLINADAS EN LORENA

En la cuenca del DON, en la U.R.S.S. se producen actualmente unos 10-12 Mt. de carbón al año que provienen de capas inclinadas y se ha logrado un grado de mecanización total, arranque y sostenimiento, próximo al 30%, CELADA et al. (1981).

Entre los métodos empleados destaca uno que es prácticamente idéntico en su geometría al método de Lorena que hemos descrito antes, con la salvedad de que el sentido de progresión del frente es descendente y no se emplea relleno sino que se deja que el techo hunda de forma espontánea.

Puede parecer chocante el hecho de que sobre la entibación del tajo graviten las rocas hundidas del techo y muro de la capa que rellenan el hueco creado; pero, como veremos más adelante al tratar sobre el "relleno colgado" con más detalle, se produce por encima del taller un efecto de silo que hace que las presiones de las rocas hundidas sean realmente moderadas.

En los talleres de la cuenca del DON en los que es operativo este sistema se emplea el sostenimiento autodesplazable AW, que puede trabajar en capas con potencias comprendidas entre 0,7 y 2,2 m. y pendientes

superiores a 50° CARRASCO y CELADA (1981). Este método, que es el más prometedor porque es el único que no exige relleno, solo puede ser empleado en capas muy regulares, con buenos hastiales y con unas limitaciones muy grandes en cuanto a la potencia de la capa a explotar. Por todo ello parece que la aplicación de este método a los yacimientos españoles resulta bastante problemática.

### 1.1.3 Soutirage y arranque hidromecánico

Tanto el soutirage como el arranque hidromecánico tienen la particularidad de que no exigen rellenar la zona deshullada razón por la cual son métodos que resultan muy atractivos cuando se pueden aplicar.

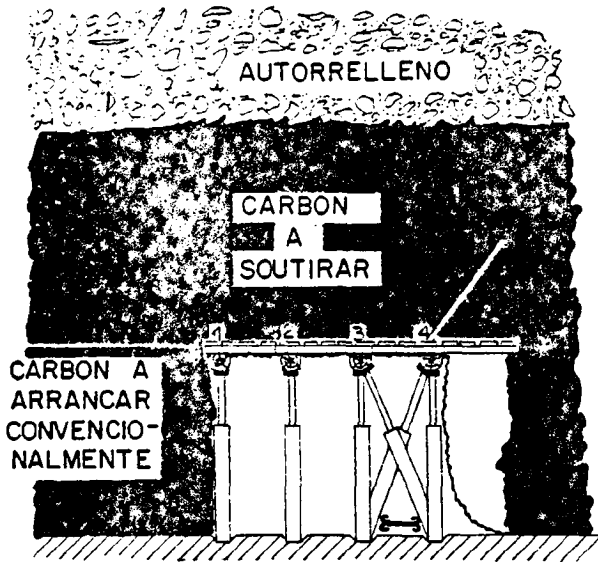
El soutirage es un método que resulta particularmente interesante para ser aplicado en capas potentes que pueden ser explotadas en franjas que, en este caso, avanzan en sentido descendente. En este caso la capa se divide en subniveles de una altura comprendida entre 7 y 15 m.. En cada nivel se monta un taller convencional que arranca una potencia de unos 2m.

disparandose al carbón del techo para proceder a su fragmentación y posterior hundimiento. En la figura N° 5 se muestra esquemáticamente el desarrollo de las distintas fases del soutirage. Este método ha sido empleado con gran éxito en las explotaciones de la S.A. Hullera Vasco-Leonesa, WAGNER y ARTIEDA (1970).

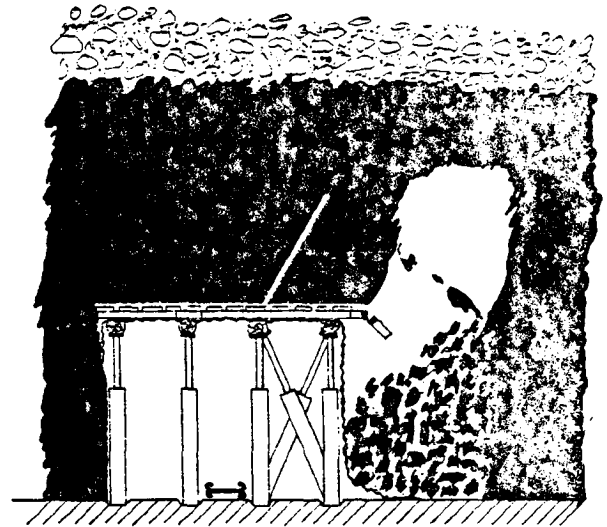
Este método puede ser aplicado también a capas de potencia media, entre 2,5 y 4 m. pero en este caso es preciso realizar unas labores de preparación en capa que encarecen notablemente el sistema haciendo que su interés económico sea problemático.

El arranque hidráulico se basa en emplear la energía que posee un dardo de agua a presión que al incidir sobre el carbón penetra por las fisuras existentes provocando su fracturación. La presión de agua que se utiliza puede variar entre 30 y 100 Kg/cm<sup>2</sup> pero hay casos extremos en los que se llega a presiones muy altas con caudales elevados, YI-LIN y PANG (1977) indican que en YANG CHUANG (China) se han llegado a emplear presiones de 200 Kg/cm<sup>2</sup> con un caudal de 260 m<sup>3</sup>/h. Naturalmente en estos casos extremos se trata de arrancar carbones extraordinariamente duros.

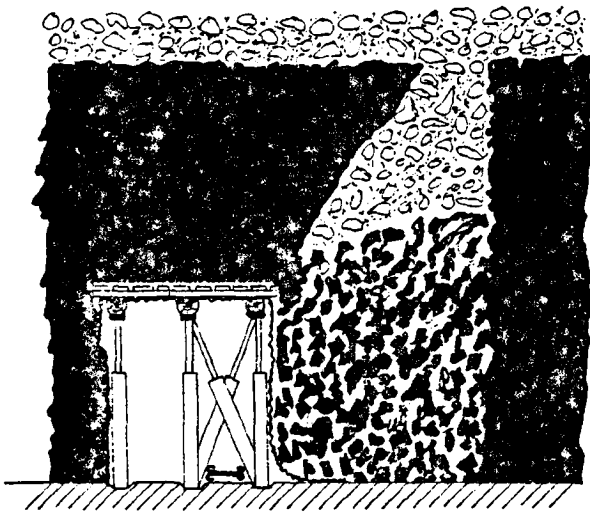




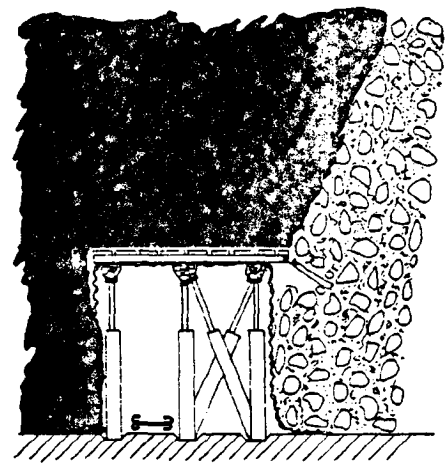
A.- DISPOSICION INICIAL



B.- DISPARO AL CARBON DEL  
TECHO



C.- SOUTIRAGE DEL CARBON



D.- FIN DEL SOUTIRAGE

Fig. Nº 5.- FASES DE DESARROLLO DEL SOUTIRAGE

Los métodos que emplean la energía hidráulica no solo se limitan a mecanizar el arranque sino que con una adecuada pendiente de las galerías puede también realizarse el transporte del carbón arrancado. FISEKCI y GRIMLEY (1977) indican que en el caso de que se empleen canales de acero para transportar el agua y el carbón arrancado las galerías deben tener una pendiente de 7°. En el caso de que se empleen materiales como: acero revestido de caucho, fibra de vidrio o plásticos de alto peso molecular la pendiente de las galerías puede reducirse hasta 4°.

En la figura N° 6 se muestra una disposición típica de un taller con arranque hidráulico en capas muy inclinadas. El método exige realizar gran número de metros de galerías en carbón pero pueden ser realizadas, si la capa es potente, con minadores continuos y si esto no es posible el avance puede efectuarse con los propios lanzadores de agua de arranque. En marcha normal se debe procurar que los puntos de arranque estén alineados conforme indica la figura N° 6. Con este método de explotación tampoco es necesario rellenar la zona deshullada ya que el vacío creado por la explotación se rellena de forma espontánea por el hundimiento de los hastiales de la capa.

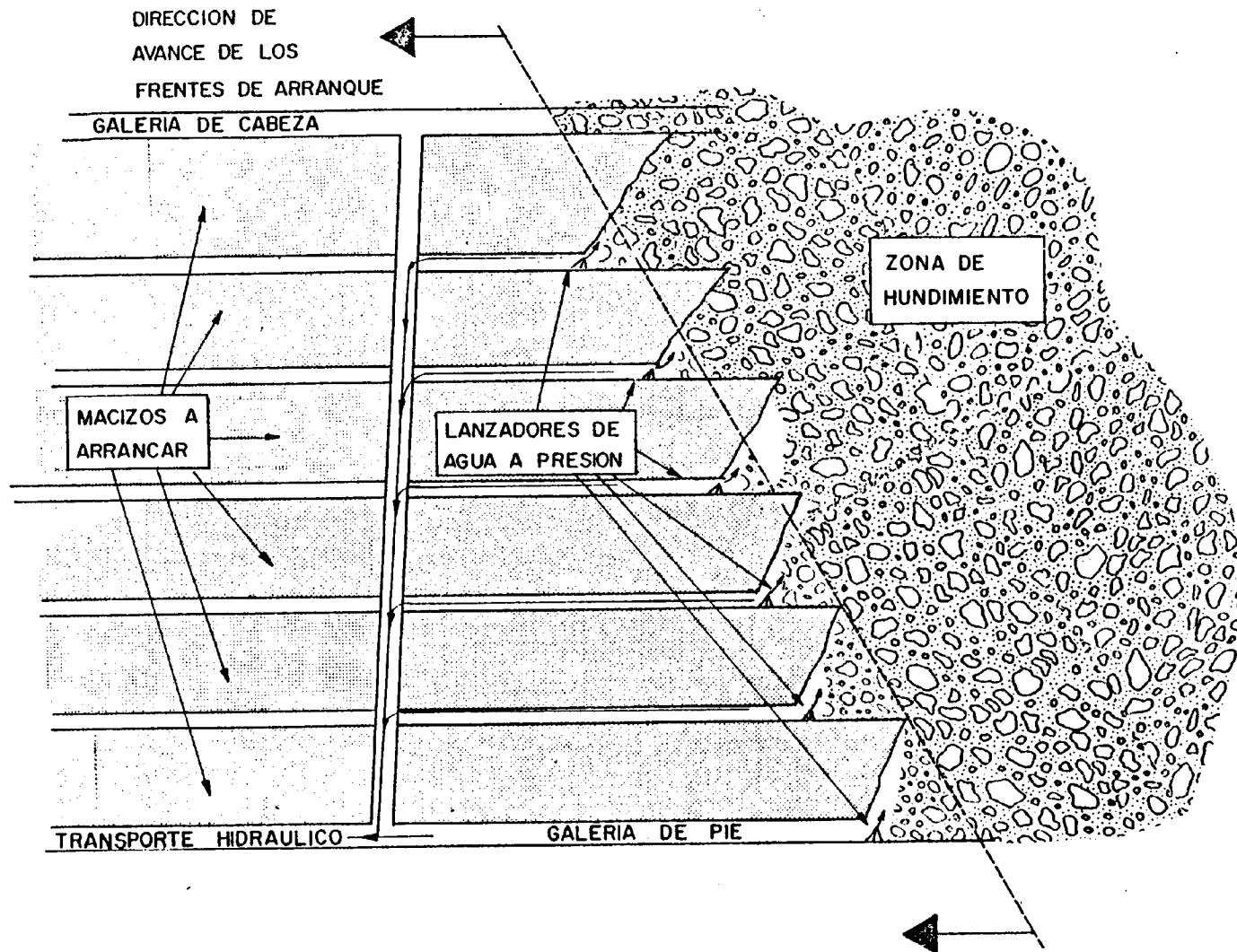


Fig. Nº 6.- DISPOSICION DE UN TALLER CON ARRANQUE Y TRANSPORTE HIDRAULICO.

El arranque hidráulico parece que está impuesto en China, Japón y Canadá, en este último caso se explotan capas anchas con pendientes hasta 55°. En Alemania Federal se habían puesto muchas esperanzas en este método para la mecanización de las capas inclinadas pero un desgraciado accidente, con varias víctimas mortales, ha frenado bruscamente las investigaciones. En nuestro país se han empezado a hacer ensayos en Hulleras de Sabero y Anexas S.A. donde, debido a la irregularidad de las capas y a su fuerte inclinación, este método parece una solución válida.

## 1.2. RELLENOS CONSOLIDABLES

Según hemos visto en los apartados anteriores los únicos métodos para la explotación de capas inclinadas que no necesitan relleno son: el frente descendente avanzando paralelo a la línea de máxima pendiente, el soutirage y el arranque hidráulico. Desgraciadamente estos métodos tienen un campo de aplicación muy restringido y en nuestro país no parece que puedan constituir una solución general para la mecanización de las capas inclinadas de carbón. Los métodos que parecen más idóneos para resolver este problema están basados en el empleo de relleno como son el frente invertido con

relleno colgado, que es el método más empleado en España, y el frente ascendente con sentido de progresión paralelo a la línea de máxima pendiente que es el método empleado en Francia.

En cualquier caso el éxito de ambos métodos radica en disponer de un relleno de buena calidad. Si se consiguiera que este relleno tuviera una cierta resistencia a compresión simple al poco tiempo de su colocación, en este caso lo denominaremos relleno consolidable, ambos métodos de explotación mejorarían notablemente. En el caso del relleno colgado se disminuirían los trabajos suplementarios de sostenimiento que son muy costosos y en el caso del método empleado en LORENA mejoraría sensiblemente la estabilidad de las máquinas de arranque, sostenimiento y transporte que ahora están situadas sobre un relleno de arena.

Para que el relleno consolidable sea operativo es preciso que cumpla dos condiciones: que su resistencia sea apropiada y que su coste sea compatible con las exigencias económicas de la explotación.

Para que el coste sea lo más bajo posible podemos utilizar los estériles de la minería del carbón que deben ser almacenados con un coste próximo a 300 Pts/t. De esta

forma utilizamos un material con coste negativo. Pero como ha sido puesto de manifiesto en numerosas investigaciones, en particular en nuestro país IGME (1980) (1981), estos materiales no presentan en estado natural ninguna resistencia a compresión simple. Por ello será preciso recurrir a mezclar los estériles de mina con los materiales aglomerantes hasta lograr la resistencia adecuada.

Para acotar el problema vamos a resumir el estado actual de conocimientos referente a la utilización de rellenos consolidables y a las presiones que se generan en las masas de relleno colocadas en los huecos creados por las explotaciones.

#### 1.2.1 Estado actual de la utilización de rellenos consolidables

Los rellenos consolidables han constituido una evolución de los rellenos colocados por vía húmeda en el hueco creado por las explotaciones con objeto de obtener un máximo de aprovechamiento del mineral o reducir la subsidencia en superficie.

Parece que los rellenos hidráulicos fueron empleados por primera vez en 1864 en las minas de carbón

de Pennsylvania, CORSON (1980); pero el empleo de los rellenos hidráulicos obtenidos mediante hidrociclonado de los estériles de las plantas de tratamiento no se extendió hasta la década de los años 40 tanto en USA como en CANADA, SINGH (1980). El método no se modificó hasta el final de los años 60 en los cuales, al aparecer los sistemas LHD, fue preciso mejorar las propiedades portantes de los rellenos para permitir el paso de vehículos cada vez más pesados. Para resolver este problema tanto el BUREAU OF MINES, en su centro de SPOKANE, como las compañías canadienses más importantes: NORANDA, INCO y FALCONBRIDGE realizaron importantes investigaciones que han permitido poner a punto una mecanización total del método de corte y relleno. La figura N° 7 muestra gráficamente la evolución de estos métodos.

En el momento actual los rellenos consolidables se consiguen, casi exclusivamente, mediante la adición de cementos del tipo Portland a los estériles de mina.

CORSON (1974) ha investigado la influencia de la adición de diversos materiales con el fin de mejorar la resistencia de los rellenos. Por lo que se refiere a las cenizas volantes finas, con tamaños inferiores a 30 micras, CORSON ha obtenido buenos resultados

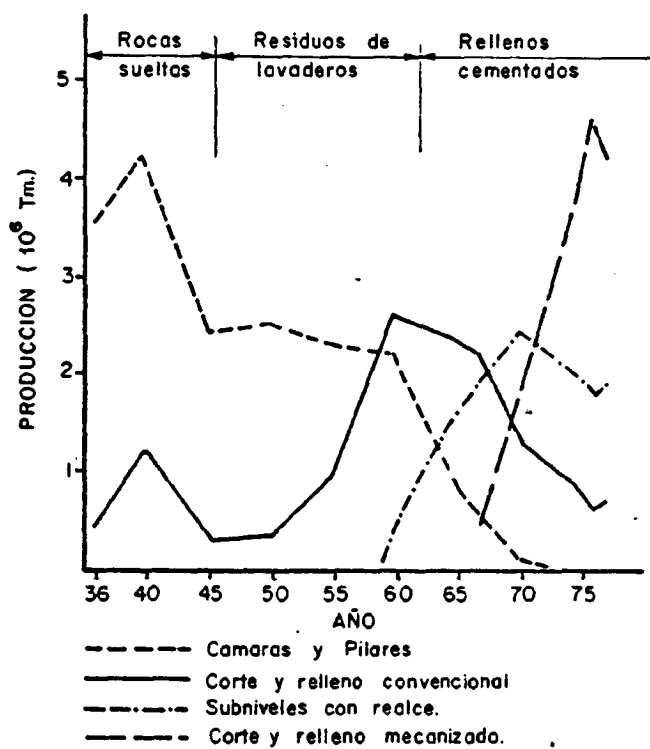


Fig. N<sup>o</sup> 7.- EVOLUCION DEL TIPO DE RELLENO EMPLEADO EN LA MINERIA METALICA CANADIENSE..



sustituyendo con este material la tercera parte del cemento que se necesitaba añadir. Los resultados obtenidos con los acelerantes típicos de fraguado, como el Silicato Sódico o Cloruro Cálcico, han dado resultados irregulares pues muchas veces las probetas confeccionadas con mezclas que incluían estos componentes no se podían desmoldear al cabo de siete días. El empleo de yeso finamente molido ha dado resultados buenos pero hay que tener en cuenta la elevada retracción que se produce.

WYSZOMIRSKI et al, (1966) indica que en Polonia se han obtenido buenos resultados mediante el empleo de asfaltos a los que se añade un activador catiónico, del tipo alkyl-pyridina; CORSON (1974) estima que esta vía es prometedora pero debe ser objeto de posteriores ensayos.

En todos los casos el vibrado de los rellenos, utilizando los métodos tradicionales que se emplean en la puesta en obra del hormigón, da muy buenos resultados; pues consigue eliminar el exceso de agua, disminuir el índice de huecos y aumentar la resistencia a corto plazo. CORSON (1972).

Aunque todavía no se han extendido a escala industrial merece la pena hacer mención de los trabajos del BUREAU OF MINES llevados a cabo por SPRUTE (1980) en la HENDERSON MINE, Empire Colorado, propiedad de la CLIMAX MOLIBDENUM Co., donde las explotaciones alcanzan los 2500 m. de profundidad. En este caso la consolidación se basaba en los fenómenos de electroforesis y electro-osmosis pues se trataba de aprovechar como relleno slurrys con un contenido en sólidos del 25,3%, en peso, y una finura importante pues el 75% de la materia sólida era inferior a 20 micras.

Los ensayos realizados en el interior pusieron de manifiesto que al cabo de 44 horas de pasar por el relleno una corriente continua de 400 amperios, con una tensión entre 65-70 voltios, el contenido en sólidos aumentó sensiblemente pues estaba comprendido entre el 44 y 65%. Aunque estos resultados son excelentes, el método presenta problemas importantes que todavía no han sido resueltos:

- \* Peligro potencial de acumulación de gases explosivos debido al proceso electroquímico.
- \* Riesgo de electrocución por el paso de la corriente en un medio húmedo.

- \* Problemas de corrosión.
- \* Peligro potencial de licuefacción de los rellenos consolidados si estos son sometidos a vibraciones.

De todo lo anteriormente expuesto resulta que, en el momento actual, el método más comunmente usado para obtener un relleno consolidable es emplear una mezcla de estériles, cemento y agua a los que puede añadirse algún aditivo para mejorar sus propiedades. SINGH (1980) diferencia tres tipos de mezclas según su contenido en cemento conforme se indica en el cuadro N° 3.

PROPORCION DE CEMENTO (% solidos)	TIPO DE RELLENO CONSOLIDABLE
3 - 4	Utilización normal
8 - 12	Capa de rodadura de vehículos
> 16	Aplicaciones especiales

Cuadro N° 3 TIPOS DE RELLENO CONSOLIDABLE

En la figura N° 8 se muestra un resumen de las propiedades mecánicas que pueden obtenerse con los rellenos consolidables en función de la cantidad de cemento que contengan.

A continuación vamos a exponer con más detalle las características de los rellenos consolidables con baja y alta proporción de cemento ya que las formulaciones que se emplean como capa de rodadura no tienen interés para los objetivos de este proyecto.

#### 1.2.1.1 Rellenos consolidables con baja proporción de cemento

Como se ha indicado este tipo de relleno tiene un contenido en cemento inferior al 4% del peso de materiales sólidos. El estéril suele jugar el papel de arena lo cual no siempre es exacto teniendo en cuenta las definiciones habituales, ya que los estériles disponibles en la minería metálica son, en general, del tamaño de los limos y, debido a las modernas técnicas de flotación para aprovechar menas cada vez más

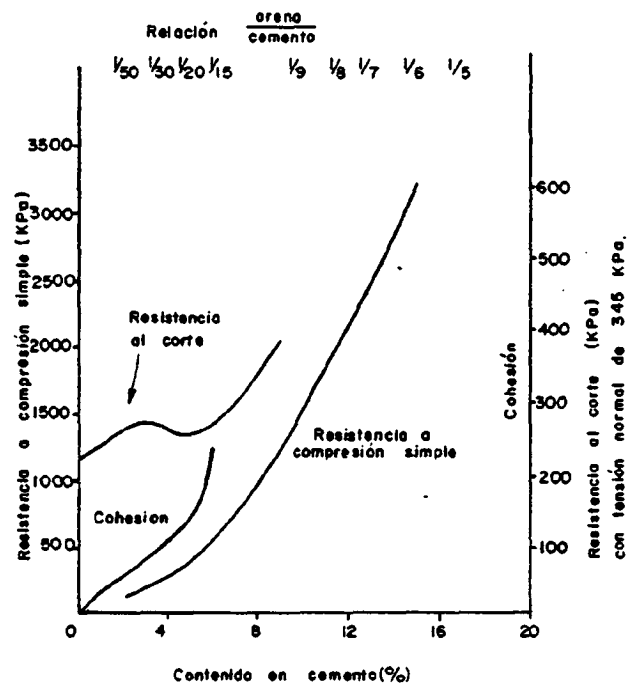


Fig. N° 8.- CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS RELLENOS CONSOLIDABLES EMPLEADOS EN CANADA.

pobres, tienen una fracción importante de materiales del tamaño de arcillas.

En general las mezclas se identifican por la proporción entre arenas y cemento que suele ser de 50/1, 40/1 y 30/1.

Estos materiales se caracterizan por su resistencia a compresión simple que, en la mayoría de los casos, suele medirse a los siete días de hecha la mezcla pues debido a la dinámica de las explotaciones importa muy poco la evolución de su resistencia a partir de ese periodo de tiempo. CORSON (1967).

El factor que más influye en la resistencia de los rellenos consolidables es el contenido en cemento y así CORSON (1967), después de ensayar diversas formulaciones con estériles que contenían el 32% inferior a 200 mallas ASTM (74 micras) y el 5% inferior a 20 micras, propone la relación gráfica que se muestra en la figura N° 9.

El segundo factor en importancia para definir la resistencia de los rellenos consolidables

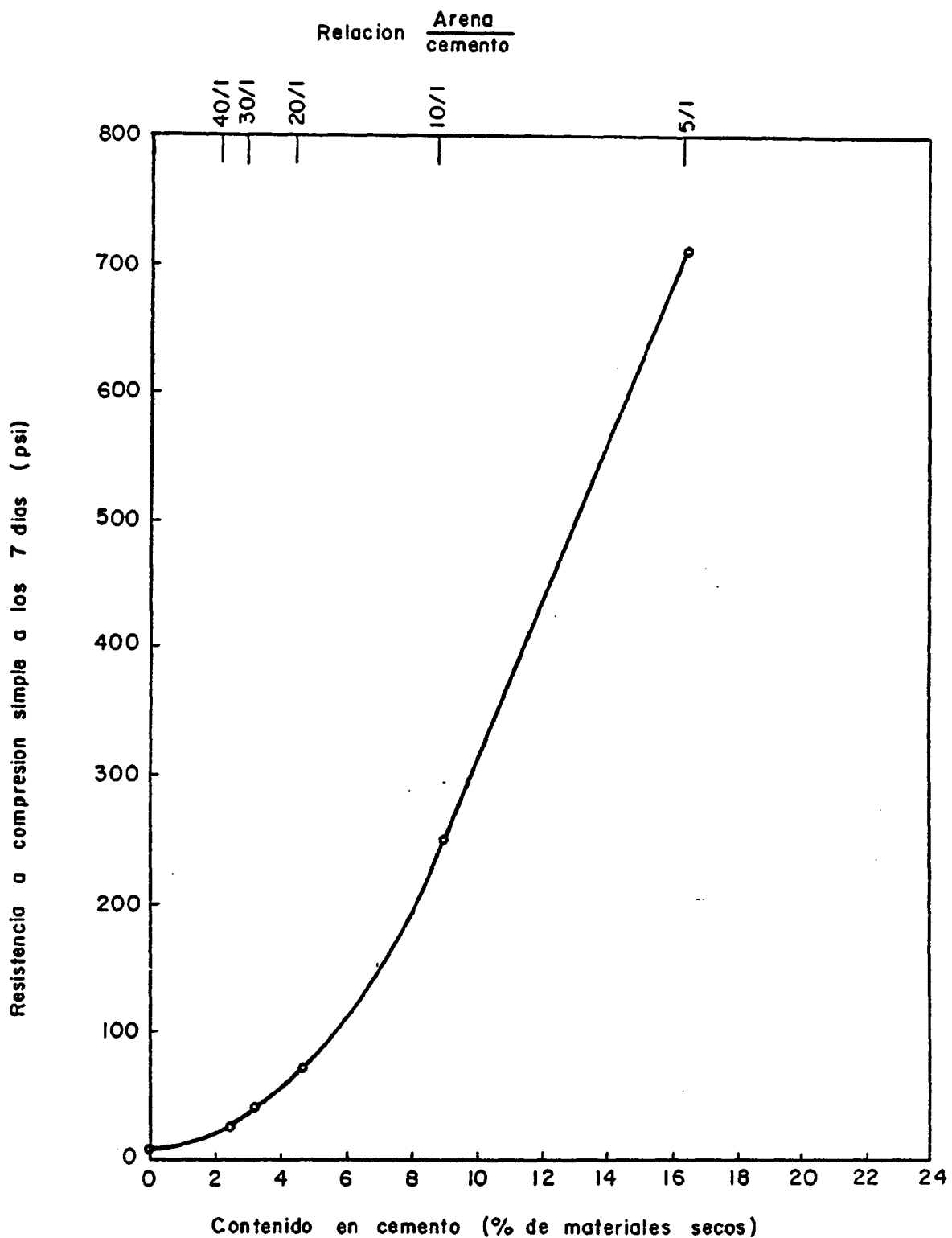


Fig. N° 9.- RELACION ENTRE LA RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE A LOS SIETE DIAS Y EL CONTENIDO EN CEMENTO DE LOS RELLENOS CONSOLIDABLES EMPLEADOS EN U.S.A.

dables es el coeficiente de uniformidad y para tenerlo en cuenta CORSON (1974) propone la siguiente relación:

$$L_n \sigma_c = 8,27 + 1,48 L_n C + 0,113 Cu \quad (1)$$

Donde

$\sigma_c$  = resistencia a compresión a siete días, en psi

$C$  = contenido de cemento, en % del peso de sólidos

$Cu$  = coeficiente de uniformidad ( $D_{60}/D_{10}$ )

En general puede afirmarse que el comportamiento mecánico de estos materiales está regido por su cohesión para valores pequeños de las tensiones que actúan y por su ángulo de rozamiento interno para valores elevados de la tensión.

Para rellenos con relación arena/cemento.= 40/1 CORSON (1974) indica que la mejor cohesión la dan los estériles de granulometría más fina pero el mayor ángulo de rozamiento interno corresponde a mezclas elaboradas con estériles de granulometría bien graduada. Como caso



singular merece citarse el hecho, SINGH (1980), de que los investigadores de la INCO consiguieron un relleno capaz de autosoportar una altura de 60 m. mediante una mezcla de 4% de cemento, 8% escorias de mineral de níquel finamente molida y 88% de estériles de planta de concentración

Según HILL (1975) un relleno consolidable de calidad debiera tener las siguientes características:

$$E = 60.000 \text{ p.s.i.}$$

$$\nu = 0,25$$

$$\gamma = 125 \text{ p.c.f.}$$

$$\sigma_c = 30 \text{ p.s.i.}$$

$$\sigma_t = 5 \text{ p.s.i.}$$

Los aditivos juegan un importante papel ya que al ser muy pequeña la cantidad de cemento que se emplea es necesario conseguir una buena homogeneización de la masa. CORSON (1967) ha puesto de manifiesto, figura N° 10, que el empleo de dispersantes es muy beneficioso en el caso de relaciones arena/cemento = 40/1.

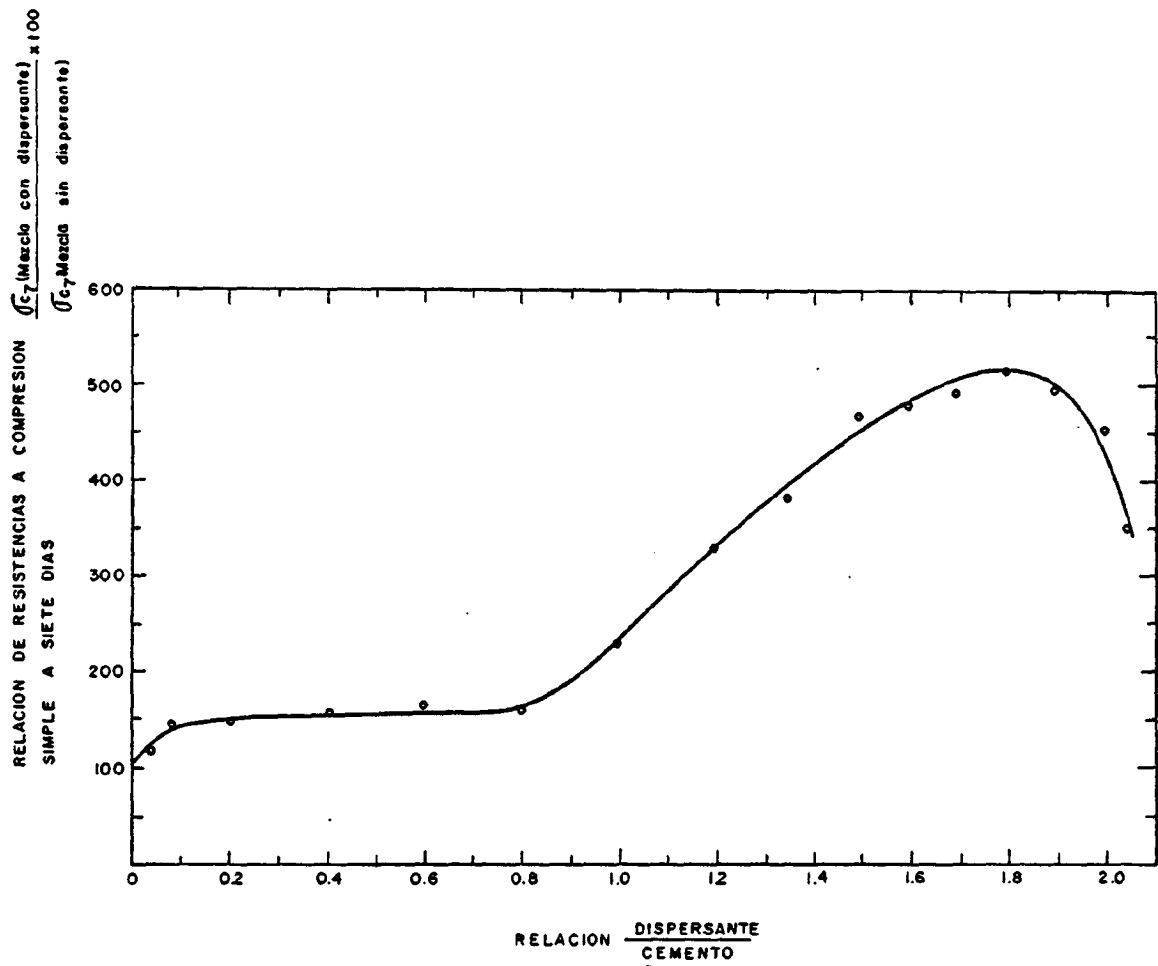


Fig. N° 10.- EFECTO DEL DISPERSANTE EN FORMULACIONES  
 CON  $\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{40}{1}$  SOBRE LA RESISTENCIA A  
 COMPRESION SIMPLE A SIETE DIAS

pues se puede llegar a quintuplicar la resistencia del relleno; pero, en estos casos, la proporción de dispersante debe ser 1,8 veces la del cemento. Como agente dispersante se empleaba hexametafosfato sódico.

#### 1.2.1.2 Rellenos consolidables con alta proporción de cemento.

Muchas minas metálicas se desarrollan a profundidades superiores a los 1500 m. y en estos casos las concentraciones de tensiones que se producen en torno a los pilares residuales son tan importantes que se producen violentos golpes de carga que llegan a poner en peligro la viabilidad de las explotaciones. En estos casos la mejor solución estriba en eliminar los pilares residuales sustituyéndolos por otros realizados con materiales resistentes pero deformables de tal forma que la acumulación de tensiones que se produzca no cree problemas a la estabilidad de la mina. En general este tipo de explotaciones se realizan por el método

de corte y relleno en sentido descendente, produciéndose un relleno parcial mediante losas que independizan los sucesivos niveles de explotación.

Con este método de explotación se pretende conseguir los siguientes objetivos:

- \* Mayor seguridad en las explotaciones
- \* Mejorar la selectividad del sistema y no contaminar el mineral arrancado con el relleno.
- \* Conseguir una recuperación total del yacimiento.

En estos casos el relleno empleado es más bien un auténtico hormigón pues en experiencias citadas por DUROCHER (1980) en Francia y por MUSSO et al. (1972) en ITALIA se pretendía llegar a resistencias a compresión a 28 días del orden de  $100 \text{ Kg/cm}^2$  en el primer caso y de  $150 \text{ Kg/cm}^2$  en el segundo.

Consecuentemente los áridos empleados no son simples estériles de mina sino que res

ponden a especificaciones muy concretas.

En el caso de la explotación de Noailhac-Saint-Salvy, DUROCHER (1980) indica la composición por metro cúbico que se indica en el cuadro N° 4.

MATERIAL	ESPECIFICACION	PROPORCION	
		PESO (Kg)	%
Arena	0 - 6 mm	1160	44,5
Grava	6 - 20 mm	1160	44,5
Cemento	CPA - 325	140	5,5
Agua	---	140	5,5

Cuadro N° 4 COMPOSICION DEL RELLENO EMPLEADO EN NOAILHAC-SAINT-SALVY

En el cuadro n° 5 se indican las características del relleno empleado en las explotacion

	MINAS				
	GAVORRANO	RAIBL	FONTANE		
COMPOSICION	Tamaño máximo del árido	60 mm.	30 mm.	30 mm.	
	Proporción de cemento	138 Kg/ m <sup>3</sup>	194 Kg/ m <sup>3</sup>	200 Kg/ m <sup>3</sup>	
	Relación $\frac{\text{agua}}{\text{cemento}}$	1,0	0,6	0,6	
CARACTERISTICAS MECANICAS A 28 DIAS	Densidad	2,08 t/m <sup>3</sup>	2,33 t/m <sup>3</sup>	2,26 t/m <sup>3</sup>	
	Resistencia a compresión simple	102 kg/cm <sup>2</sup>	225 Kg/cm <sup>2</sup>	205 Kg/cm <sup>2</sup>	
	Resistencia a traccion (ENSAYO BRASILEÑO)	13 Kg/cm <sup>2</sup>	27 Kg/cm <sup>2</sup>	?	
	COHESION	$\sigma_3 < 50 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$	$C=25 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$	60-80 Kg/cm <sup>2</sup>	?
		$\sigma_3 > 50 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$	$C=65 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$		
	ANGULO DE ROZAMIENTO INTERNO	$\sigma_3 < 50 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$	$\phi = 47^\circ$	50-35°	?
		$\sigma_3 > 50 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$	$\phi = 37^\circ$		
MODULO DE POISSON	0,37	0,10	-----		

Cuadro N° 5 CARACTERISTICAS DE LOS RELLENOS DE ALTO CONTENIDO EN CEMENTO EMPLEADOS EN ITALIA

nes italianas según MUSSO et alt. (1972).

En ambos casos la puesta en obra está muy cuidada, empleandose armaduras de acero para evitar las tensiones de tracción y se utiliza la técnica del vibrado pues se exige una compactación que dé una densidad próxima al 95% del óptimo según el ensayo PROCTOR.

Conviene destacar que en la explotación de Noailhac-Saint-Salvy se está pensando pasar a una mezcla que proporcione una resistencia a compresión del orden de  $50 \text{ Kg/cm}^2$  pues la resistencia actual, que es del orden de  $100 \text{ Kg/cm}^2$ , provoca reacciones indeseables en los hastiales en la unión con las losas de hormigón.

### 1.2.2 Distribución de la presión en los talleres de relleno colgado

En los talleres sobre capas horizontales se sabe que por delante del frente de la explotación se crea una onda de sobrepresión que se ve compensada por la zona

donde está ubicado el propio frente de arranque que está libre de presiones. Detrás del tajo, ya sea con hundimiento o relleno, se produce un incremento progresivo de las presiones de tal forma que a una cierta distancia el estado tensional es el mismo que existe en el terreno virgen. En los talleres sobre capas inclinadas el fenómeno es, conceptualmente, el mismo; aunque la magnitud de las presiones y movimientos generados son sensiblemente inferiores a las que se producen en el caso de capas horizontales. DEJEAN (1979).

Desde un punto de vista general el relleno, después de ser colocado en la zona deshullada, debe de sufrir un proceso de compactación de tal forma que, transcurrido el tiempo necesario para que el frente de arranque se haya alejado una distancia adecuada, las presiones en el relleno sean similares a las que existen en el terreno virgen.

En este proceso de compactación pueden diferenciarse dos etapas: COLOCACION y CONSOLIDACION. Los rellenos habitualmente utilizados en la minería del carbón no tienen cohesión ninguna y son de naturaleza granular de tal forma que su resistencia está basada exclusivamente en el rozamiento de las distintas par



tículas entre si. Por esto en la fase de colocación la distribución de presiones en el relleno sigue un modelo similar al que se produce en un silo cuando se almacena un material granular.

En la fase de consolidación la convergencia de los hastiales produce una disminución del índice de huecos del relleno lo cual trae consigo que su módulo de elasticidad sea progresivamente más alto produciéndose un endurecimiento que le faculta para aceptar tensiones cada vez mayores hasta que cesa la convergencia.

BORGESSON (1980) estima que el coeficiente de Poisson del relleno empleado en la mina de Näsliden vale 0,32 mientras que el módulo de elasticidad puede estimarse por la expresión:

$$E = 490 \cdot \sigma_m^{0,7} \quad (\text{KPa}) \quad (2)$$

Donde 
$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (3)$$

Según BRAUNER (1967) la transición entre la fase de colocación y consolidación puede situarse a una distancia del frente del orden de 10 veces la potencia de la capa y, en cualquier caso, inferior a los 20 m. Los fenómenos de consolidación que tienen lugar no tienen interés desde el punto de vista de las labores de refuerzo que es preciso realizar pues en esa zona se considera que el relleno ya es estable.

El problema se plantea en la zona de colocación en la que debido a la falta de cohesión del relleno es preciso colocar una tela metálica y mampostas de refuerzo para garantizar la estabilidad del "relleno colgado". Para poder dimensionar las telas metálicas de retención y las mampostas de refuerzo es necesario conocer la presión que puede ejercer el relleno sobre ellas.

Estos fenómenos han sido intensamente investigados por BRAUNER (1966) (1967) y (1968), en quince talleres de la cuenca del Ruhr llegando a las siguientes conclusiones:

- En todos los casos las presiones están limitadas ya que se produce un efecto de silo de tal forma

que la presión normal sobre las telas se hace constante a partir de una altura de taller próxima a los 15 m. Las máximas presiones que se han medido no llegan a  $2 \text{ Kg/cm}^2$ .

- La convergencia en esa zona no tiene ninguna influencia apreciable en la presión del relleno sobre la tela metálica. Se han medido convergencias absolutas entre 2 y 111 mm. correspondientes al avance de diversos talleres. Esto concuerda con la experiencia que se tiene en el relleno hidráulico de capas horizontales.
- El ángulo de rozamiento entre el relleno y los hastiales oscila entre  $42$  y  $45^\circ$  y el relleno inicialmente no tiene cohesión.
- La presión del relleno sobre las telas de retención puede calcularse con una aproximación suficiente mediante la expresión:

$$P_n = \frac{a \cdot b \cdot \gamma \cdot \text{sen}^2 \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \text{sen}^2 (\beta + \delta)}{\text{sen} \beta \cdot \text{sen} \delta \cdot \{ a \cdot \text{sen} \beta \cdot \text{sen} (\alpha + \delta) + b \cdot \text{sen} \alpha \cdot \text{sen} (\beta + \delta) \}} \quad (4)$$

Donde:

$\alpha$  = inclinación de la capa (grados)

$2a$  = anchura de las franjas de relleno (m)

$2b$  = potencia de la capa (m)

$\varepsilon$  = grado de inversión del frente (grados)

$\gamma$  = densidad aparente del relleno ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$\delta$  = ángulo de rozamiento del relleno con los has  
tiales (grados)

$$\beta = \arccos (\sin \alpha \cdot \sin \varepsilon) \quad (5)$$

En un taller típico con frente invertido y relleno colgado tendremos

$$\alpha = 74^\circ \quad \text{,,} \quad 2a = 3\text{m} \quad \text{,,} \quad 2b = 2\text{m} \quad \text{,,} \quad \varepsilon = 8^\circ \quad \text{,,}$$

$$\gamma = 1500 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad \delta = 42^\circ$$

De aquí según (5) tendremos  $\beta = 82,3^\circ$  y según (4)

$$P_n = 994,7 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} = 0,9947 \frac{\text{t}}{\text{m}^2}$$

que es un valor moderado

Estas conclusiones se obtienen de un análisis estático del problema pero hay fenómenos dinámicos que pueden tener cierta influencia. BRAUNER (1966) señala que en el caso hipotético de que se rompiera una tela y se produjera el vaciado del relleno las presiones sobre la tela subirán a valores próximos al doble de los calculados. Aunque en estas conclusiones se admite que las presiones son independientes de la longitud del tajo es obvio que en caso de rotura de una tela un tajo de gran longitud representa un peligro potencial mayor. Por otra parte el modelo actual no tiene respuesta ante un fenómeno dinámico como un golpe de techo o las vibraciones producidas por una voladura que desencadenarían una fluidificación del relleno.

Por otro lado la influencia del rozamiento entre el relleno y los hastiales desempeña un papel fundamental, pues si imaginamos que este rozamiento disminuye, por ejemplo por una aportación de agua, los valores de la presión aumentan notablemente. Así si en el ejemplo anterior consideramos  $\delta = 5^\circ$  y  $\bar{\rho} = 2000 \text{ Kg/m}^3$  resulta

$$P_n = 12.895 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} = 12,89 \frac{\text{t}}{\text{m}^2}$$

que es trece veces superior al valor calculado anteriormente.

A la vista de lo anterior hay que concluir que el método de relleno colgado en condiciones normales no presenta más inconvenientes que las labores de refuerzo que es necesario realizar para conseguir mantener el relleno colgado a pesar de que no tenga cohesión. Sin embargo en el caso de que el rozamiento del relleno con los hastiales disminuyera drásticamente las presiones sobre las talas aumentan considerablemente. Por otro lado, hasta ahora, no se ha estudiado la influencia de una posible licuefacción del relleno que podría producirse por aporte de agua, un golpe de techo o las vibraciones generadas por una voladura que, en cualquier caso, crearían problemas importantes.

Por último es preciso resaltar que si el relleno tuviera una mínima cohesión inicial estos problemas desaparecerían drásticamente pues, como se sabe, los medios cohesivos no pueden fluidificarse. Por otra parte, estos medios presentan una resistencia al corte que para tensiones normales bajas, que es el caso que nos ocupa, está regida precisamente por la cohesión. Si el relleno tuviera una cierta cohesión, es decir fuera

consolidable, las presiones que existirían sobre las telas de retención serían mucho menores y, consecuentemente, los trabajos de refuerzo tendrían menor importancia. Con el modelo de cálculo de BRAUNER no se puede determinar la influencia de la cohesión porque, por hipótesis, el relleno no es cohesivo; pero BRAUNER (1967) indica que en el caso de las galerías de pie de los talleres con relleno colgado inicialmente las presiones sobre los cuadros de sostenimiento son del orden de  $15 \text{ t/m}^2$  pero, en cuanto el relleno adquiere una cierta cohesión, al cabo de un mes estas presiones están comprendidas entre  $0,6$  y  $1,5 \text{ t/m}^2$ . Si admitimos que en los talleres la influencia de la cohesión es similar; en el caso de emplear un relleno consolidable las presiones sobre las telas de retención serían del orden de 25 a 10 veces menores que en el caso actual.

## **2.- METODOLOGIA EMPLEADA**

A la vista de lo expuesto anteriormente resulta que la explotación de las capas inclinadas de carbón se vería facilitada notablemente si se dispusiera de un relleno consolidable que, a la vista de las presiones medidas en este tipo de talleres, debería tener una resistencia a compresión simple a los siete días del orden de  $2 \text{ Kg/cm}^2$ . Por otro lado el coste de este relleno deberá ser los más reducido posible, y para ello, hay que procurar utilizar

los estériles que produce la minería del carbón ya que con ello se emplearía un material de coste negativo. Por último el relleno consolidable debe disponer de una cierta cohesión lo antes posible razón por la que se han de incluir en su formulación acelerantes de fraguado.

En los apartados siguientes expondremos la metodología seguida en cuanto a la selección de materias primas, preparación de formulaciones, ensayos realizados y modelización teórica del problema.

## 2.1. SELECCION DE MATERIAS PRIMAS

Dado que la materia prima para la fabricación de los rellenos consolidables deben ser los estériles de la minería del carbón se ha utilizado para su selección la abundante documentación de que dispone el IGME (1981) sobre las escombreras de la minería del carbón.

Se han elegido las escombreras de Minas de Figaredo y Reicastro y el Lavadero de Mieres como proveedores de material estéril. Las dos escombreras se han escogido teniendo en cuenta el gran volumen de escombros que tienen almacena



dos y las características ambientales y de estabilidad de estos depósitos. En cuanto al lavadero de Mieres se ha escogido por ser el de más entidad en la Cuenca del Caudal y por ser los lavaderos los principales productores de estériles y, si se aprovechan sin tener que ser depositados en la escombrera, se producirá una economía considerable.

Se han recogido doce toneladas de estériles, cuatro de cada uno de los puntos seleccionados, que se han empleado para fabricar las distintas formulaciones. El proceso de muestras se ha efectuado de tal forma que se garantice una buena representatividad. Así en el caso del Lavadero de Mieres los estériles, que corresponden a la fracción de menudos, se han recogido en sacos de 50 Kg. espaciando el llenado a lo largo de tres días. En el caso de las escombreras se ha empleado una pala hidráulica que ha permitido efectuar una carga aleatoria de estériles en distintos niveles de las escombreras.

Como material aglomerante se ha empleado, en general, cemento tipo Portland P-450 ARI, de Valderribas que se encuentra fácilmente en el mercado, y está recomendado para obtener una alta resistencia inicial. En una formulación se ha complementado el efecto del P-450 ARI con sulfato cálcico, que se emplea en algunas aplicaciones mineras para construir muros de alta resistencia.

Algunas formulaciones han exigido una corrección de la granulometría de los estériles que estaban escasos de materiales finos; para ello se han empleado cenizas volantes de la central térmica de LADA de tal forma que, si se llevan a efecto ensayos a escala industrial, estos productos puedan encontrarse sin dificultad.

Las restantes materias primas han sido adquiridas en el comercio porque su proporción en las formulaciones empleadas es muy pequeña.

## 2.2. PREPARACION DE LAS FORMULACIONES

Dado que en esencia se trata de preparar un hormigón pobre se han seguido las normas de buena práctica que rigen la preparación de los hormigones industriales.

Como primer paso se han efectuado ensayos previos para definir el mortero más adecuado, atendiendo fundamentalmente a las proporciones de cemento necesarias para conseguir la resistencia deseada con el mínimo coste.

Una vez definido el mortero idóneo se han clasificado los áridos disponibles en tres grupos atendiendo a sus características granulométricas y para cada grupo se han elaborado diversas formulaciones para estudiar la incidencia de los parámetros que intervienen. En cada formulación se ha variado la composición de un solo parámetro a fin de que los resultados no estén enmascarados y resulten plenamente comparativos.

Para la preparación de cada formulación se ha empleado una hormigonera de eje vertical de 200 litros de capacidad de tal forma que de cada formulación solo se ha tenido que realizar una masada con lo cual la homogeneidad del producto obtenido estaba garantizada.

Habitualmente en el caso de los hormigones se suele medir la consistencia de la mezcla terminada mediante el ensayo del cono de Abrams que está regulado en la norma UNE 7103. Según los asentos que se producen en el cono realizado con la masa a ensayar se clasifica su consistencia en cinco categorías de acuerdo al cuadro N<sup>o</sup> 6.

CONSISTENCIA	ASIENTO EN EL CONO DE ABRAMS EN cm
SECA (S)	0 - 2
PLASTICA (P)	3 - 5
BLANDA (B)	6 - 9
FLUIDA (F)	10 - 15
LIQUIDA (L)	$\geq$ 16

Cuadro N° 6 CLASIFICACION DE LA CONSISTENCIA DE UN HORMIGON

Todas las formulaciones que se han realizado han dado consistencias comprendidas entre seca y blanda lo cual es lógico pues al trabajar con contenidos de cemento tan bajos es preciso emplear la menor cantidad posible de agua para mantener una relación agua/cemento lo más baja posible y, consecuentemente, los asientos del cono de Abrams son muy bajos. En cualquier caso este ensayo se ha empleado como medio de control de la bondad del amasado y no tiene mayor interés práctico pues la consistencia que deban tener los rellenos consolidables para su utilización en la mina dependerá sobre todo de los medios de puesta en obra y estos no son objeto de esta investigación

No obstante lo anterior se ha procurado que en la preparación de las formulaciones se respeten algunos principios que es preciso mantener cuando se llegue a una aplicación industrial para que el relleno consolidable resulte lo más económico posible.

Por ello la preparación de las formulaciones se ha simplificado al máximo recurriendo a una clasificación por volumen (sacos, paladas y litros), aunque en este caso se ha procedido a un pesado de cada componente para obtener el adecuado rigor y representatividad de los resultados. Los estériles disponibles se han empleado tal cual salen del lavadero o se encuentran en la escombrera, sin recurrir a un cribado que, si bien podría mejorar sus características, en carecería notablemente el producto final.

En general los rellenos consolidables deben presentar buenas propiedades reológicas con gran docilidad, buena trabajabilidad, para permitir una fácil puesta en obra por vertido directo mediante canaleta o trompa de elefante, y una aceptable compactación sin necesidad de recurrir a un vibrado. El ángulo de rozamiento interno del relleno habrá de ser lo más elevado posible para facilitar su colocación en los talleres sobre capas muy inclinadas. En cuanto al curado del hormigón hay que indicar que no presentará difi

cultades especiales pues las condiciones de interior son prácticamente las ideales con una temperatura constante, próxima a 20°C, y un grado de saturación elevado. Por otro lado la desecación del relleno durante el fraguado no será significativa al no existir la acción radiante del sol ni otra fuente de calor.

### 2.3. ENSAYOS DE RESISTENCIA

De todas las formulaciones realizadas se han efectuado los ensayos de resistencia que permitan caracterizar las propiedades mecánicas de los rellenos consolidables. Se han realizado ensayos de compresión simple y de corte para lo cual ha habido que fabricar las probetas adecuadas. Los ensayos de compresión simple se han realizado a la edad de 1 día, 7 días y 28 días. La gran mayoría de ellos se han realizado empleando los moldes habituales para la fabricación de probetas de hormigón que tienen 30 cm de alto y 15 cm de diámetro. En la confección de las probetas se han seguido las normas UNE 7240 y UNE 7242. Estos ensayos se han realizado en una prensa mecánica con registro de la carga y deformación axial con lo cual puede calcularse el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión simple.

También se han realizado ensayos a gran escala empleando moldes cúbicos de 40 cm de arista sobre los que se han colocado bandas extensométricas de 12 cm de longitud, para poder determinar tanto las deformaciones axiales como las transversales. De esta forma además de determinar la resistencia a compresión simple el módulo de elasticidad puede determinarse también el coeficiente de Poisson.

Para dimensionar el número de ensayos necesarios se ha seguido el criterio recomendado por VENUAT y PAPADAKIS (1966) que, en función del coeficiente de variación definen la calidad de los ensayos efectuados de acuerdo con el contenido del cuadro nº 7.

COEFICIENTE DE VARIACION (%)	CALIDAD DE LOS ENSAYOS
< 10	Excelente
10 - 12	Muy bueno
12 - 15	Bueno
15 - 18.	Mediano
18 - 20	Muy mediano
20 - 25	Malo
> 25	No fiable

Cuadro Nº 7 ESTIMACION DE LA BONDAD DE LOS ENSAYOS A COMPRESION SIMPLE CON HORMIGONES

Los ensayos de corte se han realizado en la prensa portátil de HOEK para lo cual se han construido moldes especiales que han permitido fabricar probetas de sección de 11 x 17 cm con lo cual se aprovechan al máximo las características de la prensa. A fin de controlar adecuadamente los niveles de aplicación de la tensión normal se ha substituido uno de los manómetros de origen por otro con menor fondo de escala para tener la precisión requerida.

Tanto en los ensayos de corte como en los de compresión simple se han seguido las instrucciones que al respecto ha dictado la sociedad Internacional de Mecánica de rocas.

Desde el momento de su confección las probetas han sido almacenadas en una cámara húmeda con control del grado de saturación del ambiente y de la temperatura existente.

#### 2.4. MODELACION GEOMECANICA

Para poder comparar el trabajo del relleno consolidable con el de un relleno normal se ha puesto a punto un modelo geomecánico basado en el método de los elementos finitos que presenta la novedad de admitir tanto un comportamiento elás



tico de los elementos como su progresiva plastificación. Este modelo está basado en el que ha sido empleado por DAHL (1969) y PARISEAU (1976) en el análisis del comportamiento de los rellenos consolidables que se emplean en la minería metálica de los Estados Unidos de América.

#### 2.4.1 Comportamiento de los medios granulares

Este tipo de materiales casi nunca poseen un comportamiento elástico debido a que la interacción de los distintos fragmentos de rocas presentes provoca una notable disminución en el índice de huecos y, consecuentemente, se produce una histéresis pronunciada.

Los materiales granulares tienen un comportamiento resistente que está regido por la ley de Mohr.

$$\tau = z(\sigma) \quad (6)$$

donde  $\tau$  es la resistencia al corte y  $\sigma$  la tensión normal que actúa en el medio. Esta expresión, cuya representación gráfica se conoce habitualmente como "curva intrínseca", presenta el inconveniente de que no es

lineal y por ello habitualmente se aproxima por la expresión de Mohr-Coulomb

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (7)$$

donde  $C$  es la cohesión del material y  $\phi$  el ángulo de rozamiento interno. En términos de tensiones normales el límite de rotura puede expresarse por la relación

$$\sigma_1 = K \cdot \sigma_3 + \sigma_c \quad (8)$$

Donde  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  son las tensiones normales principales;  $\sigma_c$  es la resistencia a compresión simple y  $K$  el factor de triaxialidad que puede definirse, en un medio puramente friccional sin cohesión, por la relación

$$K = \frac{1 + \operatorname{sen} \phi}{1 - \operatorname{sen} \phi} \quad (9)$$

#### 2.4.2 Leyes de comportamiento elástico

Aunque en rigor estos materiales no suelen presentar un comportamiento puramente elástico se admite que, en la primera etapa de las deformaciones, existe una

cierta proporcionalidad entre las tensiones y deformaciones. Siguiendo la notación de LEKHNITSKII (1963) podemos escribir para el caso de un medio ortótropo en el caso de deformaciones planas que:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x^e &= \frac{1-\nu_1^2}{E_1} \cdot \sigma_x - \frac{\nu_2}{E_2} (1+\nu_1) \cdot \sigma_y \\ \varepsilon_y^e &= -\frac{\nu_2^2}{E_2} (1+\nu_1) \cdot \sigma_x + \frac{1}{E_2} \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \cdot \nu_2^2\right) \cdot \sigma_y \\ \gamma_{xy}^e &= \frac{\tau_{xy}}{G_2} \end{aligned} \right\} (10)$$

El subíndice 1 corresponde a las propiedades en el plano de la estratificación mientras que el subíndice 2 se reserva para el plano perpendicular. Existen cinco constantes elásticas independientes:  $E_1$ ;  $E_2$ ;  $\nu_1$ ;  $\nu_2$  y  $G_2$  que definen el estado tensional. En forma matricial las ecuaciones (10) pueden escribirse como sigue:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^e \\ \varepsilon_y^e \\ \gamma_{xy}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_1^2}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} (1+\nu_1) & 0 \\ -\frac{\nu_2^2}{E_2} (1+\nu_1) & \frac{1}{E_2} \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \cdot \nu_2^2\right) & 0 \\ 0 & 0 & G_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (11)$$

El medio tiene un comportamiento isotrópico si

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 \quad ; \quad \nu_1 = \nu_2 \quad \gamma \quad G_2 = \frac{E_1}{2(1+\nu_1)}$$

### 2.4.3 Criterios de plastificación

El límite del comportamiento elástico para los estados de tracción pura o compresión simple está definido normalmente por la resistencia a tracción y compresión uniaxial respectivamente. En el caso de estados de tensión multiaxial no pueden emplearse como criterio de plastificación valores simples de resistencia y hay que recurrir a emplear una combinación más compleja de las tensiones que intervienen en el proceso. Esta relación es una generalización del punto de fluencia en el caso de compresión uniaxial y se conoce con el nombre de criterio de plastificación y se admite que cuando esta relación se cumple en un punto de un cuerpo en ese punto las deformaciones son irreversibles.

Los criterios de plastificación para los materiales isotrópicos pueden clasificarse en dos grupos: los que incluyen el efecto de la tensión principal intermedia

y los que no la consideran. Estos últimos pueden representarse mediante una expresión del tipo:

$$|\tau_m|^n = A_0 \cdot \sigma_m + B_0 \quad (12)$$

donde

$$\tau_m = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (13)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) \quad (14)$$

$A_0$ ,  $B_0$  y  $n$ , siendo siempre  $n \geq 1$ , son constantes para cada material y  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  las tensiones principales mayor y menor respectivamente.

Mediante la expresión (12) se engloban algunos de los criterios de plastificación más importantes como el de PARISEAU (1968) y el de MOHR-COULOMB que hemos mencionado antes.

Si se quiere emplear un criterio que contenga la tensión principal intermedia es necesario utilizar una formulación que incluya los invariantes de tensión.

En el caso de un material isotrópico se tiene

$$|J_2|^{\frac{n}{2}} = A_1 \cdot I_1 + B_1 \quad (15)$$

Donde  $A_1$  ;  $B_1$  y  $n$ , siendo  $n \geq 1$ , son constantes del material;  $I_1$  es el primer invariante de tensiones y  $J_2$  es el segundo invariante de desviación de tensiones que están definidos por

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (16)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[ (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 \right] + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2 \quad (17)$$

En el caso de deformación plana las expresiones (12) y (15) son similares con la salvedad de que la expresión (12) no incluye la tensión principal intermedia.

La expresión (15) engloba tanto el criterio de Von Mises como el de Von Mises generalizado.

Los criterios anteriormente expuestos son apropiados para materiales isótropos; pero, en el caso de materiales anisótropos es necesario emplear otros criterios.

HILL (1950) propuso un criterio de plasticidad para los metales que PARISEAU (1968) extendió al caso de tensión hidroestática. Tanto el criterio de HILL como el de PARISEAU pueden expresarse mediante la ecuación (15). En particular el criterio de PARISEAU puede expresarse así:

$$\left| F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + L\tau_{yz}^2 + M\tau_{zx}^2 + N\tau_{xy}^2 \right|^{\frac{n}{2}} - (U\sigma_x + V\sigma_y + W\sigma_z) = 1 \quad (18)$$

los nueve coeficientes F,G,H,L,M,N,U,V y W son constantes para cada material y deben determinarse mediante ensayos; por otro lado  $n \geq 1$ . En el caso de que  $U=V=W=0$  el criterio de PARISEAU se convierte en el de Hill.

Para modelizar el comportamiento plástico de los materiales granulares, emplearemos la expresión siguiente debida a DAHL (1969)

$$\left| \left( \frac{A \cdot \sigma_x - B \cdot \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right|^{\frac{n}{2}} = C \cdot \frac{\sigma_x}{2} + D \cdot \frac{\sigma_y}{2} + K \quad (19)$$

donde los coeficientes A,B,C,D y K deben determinarse mediante ensayos y siempre  $n \geq 1$ .

Una vez que se ha escogido un criterio de plastificación, que abreviadamente escribiremos como  $Y(\sigma_{ij})=0$   
(20) Si

$$Y(\sigma_{ij}) < 0 \quad (21)$$

estamos ante un comportamiento elástico y

$$Y(\sigma_{ij}) > 0 \quad (22)$$

no representa un estado perfectamente definido. La descarga a partir del estado de plastificación exige  $dY < 0$  o lo que es igual

$$\frac{\partial Y(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \cdot d\sigma_{ij} < 0 \quad (23)$$

Un proceso de carga en régimen plástico exige que se cumpla

$$dY = 0 \quad (24)$$

ya que  $dY > 0$  no corresponde a un estado definido.



Es decir el proceso de carga en estado plástico supone que

$$\frac{\partial Y(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \cdot d\sigma_{ij} = 0 \quad (25)$$

Geométricamente la ecuación (25) indica que el tensor de incrementos de tensión asociado con incrementos de carga en el estado plástico es tangente a la superficie de plastificación.

Algunos materiales, que no son perfectamente plásticos, muestran tanto incrementos o decrecimientos de resistencia cuando se cargan por encima del límite elástico. En estos casos los materiales puede decirse que se "endurecen" o "ablandan".

Para establecer el comportamiento de un material en el dominio de la plastificación es necesario adoptar unas relaciones tensionales como las que indicamos a continuación.

#### 2.4.4 Leyes del comportamiento plástico

Para desarrollar las ecuaciones constitutivas de los materiales en estado plástico que nos relacionen tensiones con deformaciones hay que establecer el concepto de "potencial plástico" que según HILL (1950) puede expresarse por

$$d\varepsilon_{ij}^P = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (26)$$

Donde  $f$  es la función de carga y  $\lambda$  es un factor no negativo. Geométricamente el vector incremento de deformación se supone que es normal a la superficie de plastificación en el espacio de tensiones.

Si admitimos que la función de carga coincide con el criterio de plasticidad ( $Y$ ) la expresión (26) puede escribirse

$$d\varepsilon_{ij}^P = \lambda \frac{\partial Y}{\partial \sigma_{ij}} \quad (27)$$

Las expresiones (26) y (27) no son realmente relaciones entre las tensiones y deformaciones en el estado

plástico ya que los incrementos de tensiones no están ligados con incrementos de deformaciones; pues las ecuaciones (26 y (27) relacionan los incrementos de deformación con la derivada de la función de carga o del criterio de plastificación.

Para obtener las relaciones entre los incrementos de deformación y los de tensión es útil el concepto de deformación total.

El incremento total de deformación que se produce durante un incremento de tensión  $\{\Delta\sigma\}$  puede expresarse como la suma de los desplazamientos elásticos y plásticos:

$$\{\Delta\varepsilon\} = \{\Delta\varepsilon\}^e + \{\Delta\varepsilon\}^p \quad (28)$$

Las deformaciones en régimen elástico pueden calcularse mediante las expresiones (10) escritas en forma incremental. Las deformaciones en régimen plástico pueden calcularse mediante la expresión (26) si se consigue que en ella exista un único incremento de deformación plástica independiente.

La ecuación (27) puede emplearse para calcular el factor de proporcionalidad  $\lambda$  pues:

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{d\varepsilon_x^p}{\frac{\partial Y}{\partial \sigma_x}} \\ d\varepsilon_y^p &= \frac{d\varepsilon_x^p}{\frac{\partial Y}{\partial \sigma_x}} \left( \frac{\partial Y}{\partial \sigma_y} \right) \\ d\gamma_{xy}^p &= \frac{d\varepsilon_x^p}{\frac{\partial Y}{\partial \sigma_x}} \left( \frac{\partial Y}{\partial \tau_{xy}} \right) \end{aligned} \right\} (29)$$

Las expresiones (29) pueden escribirse en forma matricial

$$\left\{ d\varepsilon \right\}^p = \left[ \tilde{E} \right] \cdot \left\{ d\varepsilon \right\}^p \quad (30)$$

donde

$$\left[ \tilde{E} \right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{\partial Y}{\partial \sigma_y} / \frac{\partial Y}{\partial \sigma_x} & 0 & 0 \\ \frac{\partial Y}{\partial \tau_{xy}} / \frac{\partial Y}{\partial \sigma_x} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\left\{ d\varepsilon \right\}^p = \begin{bmatrix} d\varepsilon_x^p \\ d\varepsilon_y^p \\ d\gamma_{xy}^p \end{bmatrix}$$

La condición de tangencia a la superficie de plasticidad, que está asociada a la plasticidad perfecta, está dada por la ecuación (25) que en el caso de deformación plana puede escribirse:

$$dY = \frac{\partial Y}{\partial \sigma_x} d\sigma_x + \frac{\partial Y}{\partial \sigma_y} d\sigma_y + \frac{\partial Y}{\partial z_{xy}} dz_{xy} = 0 \quad (31)$$

Pueden escogerse dos incrementos independientes de tensión, por ejemplo  $d\sigma_y$  y  $dz_{xy}$ , y el otro es dependiente de los dos anteriores. La expresión (31) escrita en forma matricial puede escribirse como

$$\{d\sigma\} = [\bar{E}] \cdot \{d\sigma\} \quad (32)$$

donde

$$[\bar{E}] = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\partial Y}{\partial \sigma_y} & -\frac{\partial Y}{\partial z_{xy}} \\ \frac{\partial Y}{\partial \sigma_x} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\{d\sigma\} = \begin{bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ dz_{xy} \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones (30) y (32) muestran que hay dos incrementos de tensiones independientes y un incremento de deformación independiente, por ejemplo

ISAKSON et al. (1967) define un "vector solución"  $\{d\omega\}$  definido por

$$\{d\omega\} = \begin{bmatrix} d\varepsilon_x^p \\ d\sigma_y \\ d\tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Dada la forma especial de (30), (32) y de la definición de  $\{d\omega\}$ , (30) y (32) pueden escribirse como

$$\{d\varepsilon\}^p = [\tilde{E}] \cdot \{d\omega\} \quad (34)$$

$$\{d\sigma\} = [\tilde{E}] \cdot \{d\omega\} \quad (35)$$

La deformación total, ecuación (28) puede escribirse, empleando (10) y (34) como sigue

$$\{d\varepsilon\} = [E_2] \cdot \{d\sigma\} + [\tilde{E}] \cdot \{d\omega\} \quad (36)$$

Sustituyendo  $\{d\sigma\}$  definida por (35) resulta

$$\{d\varepsilon\} = \left[ [E_e][\bar{E}] + [\tilde{E}] \right] \cdot \{dW\} \quad (37)$$

o

$$\{d\varepsilon\} = [R] \cdot \{dW\} \quad (38)$$

donde

$$[R] = [E_e] \cdot [\bar{E}] + [\tilde{E}] \quad (39)$$

Por otro lado (38) puede ser empleada para calcular  $\{dW\}$  pues

$$\{dW\} = [R]^{-1} \cdot \{d\varepsilon\} \quad (40)$$

ISAKSON et al. (1967) emplean (38) en su análisis pero DALH (1969) emplea una expresión derivada de (40) que resulta de multiplicar ambos términos por  $[\bar{E}]$

$$[\bar{E}] \cdot \{dW\} = \{\bar{E}\} [R]^{-1} \cdot \{d\varepsilon\} \quad (41)$$

El primer término de (41) es igual a  $\{d\sigma\}$  según (35), así pues

$$\{d\sigma\} = [E_p] \cdot \{d\varepsilon\} \quad (42)$$

donde

$$[E_p] = [\bar{E}] \cdot \left[ [E_e] \cdot [\bar{E}] + [\tilde{E}] \right]^{-1} \quad (43)$$

En el análisis elasto-plástico de los rellenos con solidables se empleará la ecuación (42) como ley de tensiones en estado plástico. Es posible modelizar varias combinaciones diferentes de comportamiento mecánico tanto isótropo como anisótropo. Las combinaciones disponibles son: isótropo-elástico e isótropo-plástico; isótropo-elástico y anisótropo-plástico; anisótropo-elástico e isótropo-plástico y, por último, anisótropo-elástico y anisótropo-plástico. Los cuatro casos pueden representarse con valores adecuados de (43).

#### 2.4.5 El método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF) permite aplicar los métodos numéricos de resolución de ecuaciones diferenciales a modelos en los que se han discretizado diversos materiales con lo cual se consigue un notable grado de aproximación a la realidad si se conocen



adecuadamente las características mecánicas de los distintos materiales que integran el modelo.

El modelo debe ajustarse lo mejor posible a la realidad del problema que se pretende modelizar y la discretización suele hacerse mediante elementos, triangulares o rectangulares, que se numeran correlativamente y se identifican por los vértices que los integran. Cada elemento no puede estar constituido más que por un solo material.

La aplicación del MEF permite conocer el desplazamiento de los vértices que integran el modelo en función de las cargas aplicadas a cada uno de ellos. Para ello se calculan las deformaciones de cada elemento mediante la ecuación fundamental

$$\{ F \} = \{ K \} \cdot \{ u \} \quad (44)$$

donde

$\{ F \}$  es la matriz de las fuerzas aplicadas en cada nudo

$\{ u \}$  es la matriz de desplazamiento de cada nudo

$\{ K \}$  es la matriz de rigidez

los elementos de la periferia del modelo están sometidos a las condiciones de contorno que deben ser previamente establecidas. Todas las fuerzas que actúan se suponen aplicadas en el centro de gravedad de cada elemento.

Una vez definida la geometría del modelo, asignadas las características de los diferentes materiales y establecidas las condiciones de contorno se calcula la matriz de rigidez elemental, las ensambla para formar la matriz de rigidez  $K$  del modelo y se resuelve el conjunto de las ecuaciones de los desplazamientos nodales.

Para resolver las ecuaciones de los desplazamientos nodales se hace la hipótesis de que las funciones de los desplazamientos nodales son lineales en  $x$  e  $y$ .

Las variaciones espaciales de los desplazamientos nodales las podemos definir como:

$$\left. \begin{aligned} u(x,y) &= a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot y \\ v(x,y) &= a_4 + a_5 \cdot x + a_6 \cdot y \end{aligned} \right\} (45)$$

Para un triángulo dado podemos definir un vector de desplazamiento

$$\{u\} = \{u_1, u_2, u_3, v_1, v_2, v_3\} \quad (46)$$

con lo cual tendremos

$$\{u\} = [C] \{a\} \quad (47)$$

$$\{a\} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\} \quad (48) \quad y$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_2 & y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_3 & y_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_2 & y_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \quad (49)$$

Si el triángulo tiene volúmen

$$\{a\} = [C]^{-1} \cdot \{u\} \quad (50)$$

ya que  $C$  tendrá inversa.

La deformación estará dada por

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{ij} + u_{ji}) \quad i, j = 1, 2 \quad (51) \quad \text{que con (45) da}$$

$$\{\varepsilon\} = [B] \cdot \{a\} \quad (52) \quad \text{donde}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (53)$$

y  $\{\varepsilon\}$  está definida por (11).

A partir de (50) y (52) tenemos

$$\{\varepsilon\} = [T] \cdot \{u\} \quad (54) \quad \text{siendo}$$

$$[T] = [B] \cdot [C]^T \quad (55)$$

Una vez determinadas las deformaciones las tensiones se calculan mediante las expresiones (11).

Con estos cálculos se puede definir el comportamiento elástico del material; pero, para poder calcular las tensiones y deformaciones en régimen plástico, es preciso pasar estas ecuaciones a la forma diferencial conforme se ha indicado en el apartado 2.4.3.

La matriz de rigidez de un elemento elástico puede obtenerse mediante el teorema de los trabajos virtuales, pero en el caso plástico como el sistema no es conservativo, el trabajo depende del camino seguido y se hace necesaria la formulación diferencial.

Para que se alcance una posición de equilibrio es necesario que la variación total de la energía potencial de un elemento, en un incremento de carga, sea nula.

Consideremos un incremento de carga  $\{df\}$  aplicado a los nudos de un triángulo. Si los desplazamientos nodales son  $\{du\}$ , el trabajo diferencial externo realizado en el elemento valdrá

$$\Delta W_E = \{u + du\}^T \cdot \{df\} \quad (56)$$

La energía de deformación interna valdrá

$$\Delta W_I = \int_V \{\epsilon + d\epsilon\}^T \cdot \{d\sigma\} dv \quad (57)$$

Como la energía potencial debe ser nula

$$\Delta W_T = \Delta W_E - \Delta W_I = 0 \quad (58) \quad \text{por lo tanto}$$

$$\{u + du\}^T \cdot \{df\} = \int_V \{\epsilon + d\epsilon\} \cdot \{d\sigma\} dv \quad (59)$$

de acuerdo con (11) y (55)

$$\{u + du\}^T \cdot \{df\} = \int_V \{u + du\}^T [T]^T [E] [T] \{du\} dv \quad (60)$$

Si los desplazamientos de los nudos son lineales la ecuación (60) puede resolverse independiente de x e y; en caso contrario es preciso realizar una integración numérica. Como en el programa de DALH (1969), que es el que se ha empleado, se admite que los desplazamientos son lineales tenemos

$$\{df\} = [K] \cdot \{u\} \quad (61)$$

siendo

$$[K] = V \cdot [T]^T \cdot [E] \cdot [T] \quad (62)$$

Estos son los cálculos que deben hacerse para cada elemento; el ordenador se ocupa de que se correspondan todos los elementos nodales al ensamblar la matriz de rigidez.

Para ello, la matriz de rigidez (62) se expresa por medio de una matriz arbitraria  $[E]$  que en cálculo elástico será  $[E_e]$  y en plástico  $[E_p]$ . Al ensamblar la matriz de rigidez el ordenador relaciona los desplazamientos de los nudos de cada elemento con los del modelo mediante la expresión:

$$\{\delta\} = [H] \cdot \{u\} \quad (63) \quad \text{siendo}$$

$$\{\delta\} = \left\{ \{u_1\} \{u_2\} \dots \{u_n\} \right\} \quad (64)$$

$$\{u\} = \left\{ u_{x_1}, u_{y_1}, u_{x_2}, u_{y_2} \dots u_{x_n}, u_{y_n} \right\} \quad (65)$$

m es el número de triángulos y n el de nudos.

$\{u_i\}$  es el vector i de desplazamiento elemental

$\{\delta\}$  es el vector columna de dimensión 6m

$U_{xi}$  ,  $U_{yi}$  son los componentes i del desplazamiento no dal de  $\{U\}$  en la dirección x e y.

$[H]$  es una matriz Booleana de dimensión 6m x 2n pues solo contiene ceros y unos.

Hace falta otra relación entre las matrices elemen tales de rigidez y la matriz de rigidez del modelo.

Para ello admitimos que la energía de deformación del modelo debe ser igual a la suma de las energías de deformación de los elementos.

En el caso del modelo tenemos:

$$W_m = \{U\}^T \cdot \{F\} \quad (66)$$

Aquí  $\{F\}$  son los vectores de fuerza en los nudos del modelo. Hay que tener presente que, desde el punto de vista del análisis efectuado, un nudo elemental perte

nece a un solo elemento, mientras que el nudo del modo lo está compartido por los diversos elementos a que pertenece. Entre ambas situaciones existe una operación de ensamblaje que realiza el ordenador.

Para el elemento  $i$  tenemos

$$W_i = \{u_i\}^T \cdot \{f_i\} \quad (67)$$

Si sumamos para todos los elementos y tenemos en cuenta (62) queda

$$W_E = \sum_i \{u_i\}^T [K] \cdot \{u_i\}$$

que puede escribirse

$$W_E = \{\delta\}^T \cdot [K'] \cdot \{\delta\} \quad (68)$$

Siendo  $[K']$  una matriz de  $6m \times 6m$  elementos cuyas submatrices diagonales son  $[K_1]$ ,  $[K_2]$ , .....  $[K_m]$  y las restantes son cero. A partir de (62) (63 y (68) tenemos

$$\{F\} = [K] \cdot \{U\} \quad \text{que es similar a (11) con}$$

$$[K] = [H]^T \cdot [K'] \cdot [H] \quad (69)$$



La expresión (69) debe ser acondicionada para el cálculo electrónico para lo cual se emplean (11) y (66) que dan

$$W_m = \{u\}^T \cdot [K] \cdot \{u\} \quad (70)$$

El programa de ordenador que se utiliza en este caso se encarga, a través de la subrutina ASSEM, de igualar la energía de deformación de todos los elementos (68) con la energía de deformación del modelo (70) mediante la superposición de todos los componentes de desplazamiento elemental a las posiciones que deben ocupar los nodos en el modelo.

#### 2.4.6 Programa de cálculo

El programa de cálculo que se ha empleado, DALH (1969) permite realizar el análisis elástico y plástico de una estructura bidimensional empleando como criterio de plasticidad tanto el criterio generalizado de Mohr-Coulomb (12) y el de VON MISES generalizado (15).

El modelo debe realizarse mediante triángulos, cuidando de que cada vértice esté compartido como máximo por ocho triángulos. El máximo número de triángulos que admite el programa es 900 y el de nudos 450. Pueden emplearse 20 materiales distintos que deben caracterizarse por sus propiedades elásticas:  $E$ ,  $\nu$ ,  $G$ , y resistentes  $\sigma_c$ ,  $\sigma_t$  y  $\tau$ . El programa admite una anisotropía según los ejes  $x$  e  $y$  de modo que cada material puede ser identificado por 12 parámetros. El programa calcula el criterio de plasticidad a partir de los parámetros resistentes. El número máximo de nudos que están en el contorno del modelo es 100. También es 100 el máximo número de nudos en los que se puede imponer que no existan tracciones. En cualquier elemento puede fijarse el desplazamiento máximo, según  $x$  y según  $y$ , lo cual es una gran ventaja para acercar el modelo a la realidad. Por último deben establecerse las condiciones de contorno del modelo de acuerdo con la experiencia práctica para que sean reales.

El modelo debe realizarse de tal forma que se procure mantener constante el gradiente de deformación a través de los distintos elementos. Así allí donde se esperen mayores deformaciones la malla de triángulos debe ser más cerrada y, por el contrario, cuando la deformación sea menor se debe emplear una malla más abierta.

Hay que tener un especial cuidado en la numeración de los nudos para conseguir que los números que correspondan a vértices de un mismo triángulo estén lo más próximos posibles entre si. Por otro lado los elementos de un mismo material deben tener una numeración correlativa. En caso de no respetar estas condiciones el cálculo del programa se alarga extraordinariamente.

El programa de cálculo se divide en dos partes, en la primera se aborda el cálculo elástico y en la segunda el plástico.

El operador puede decidir la eliminación de una de las partes del cálculo dando las instrucciones adecuadas.

El diagrama de flujo del programa que se denomina FINITO 1 se muestra en la figura N° 11.

Para el cálculo de la matriz de rigidez el programa emplea el método iterativo de sobre-relajación de Gauss-Seidel mediante la subrutina SOLVE con lo cual se consiguen dos mejoras importantes respecto al método directo:

- Se reduce notablemente el tiempo de utilización del ordenador si actúan más de 10 fuerzas.
- Se necesita menos espacio de almacenamiento y por lo tanto mejora la velocidad de acceso.

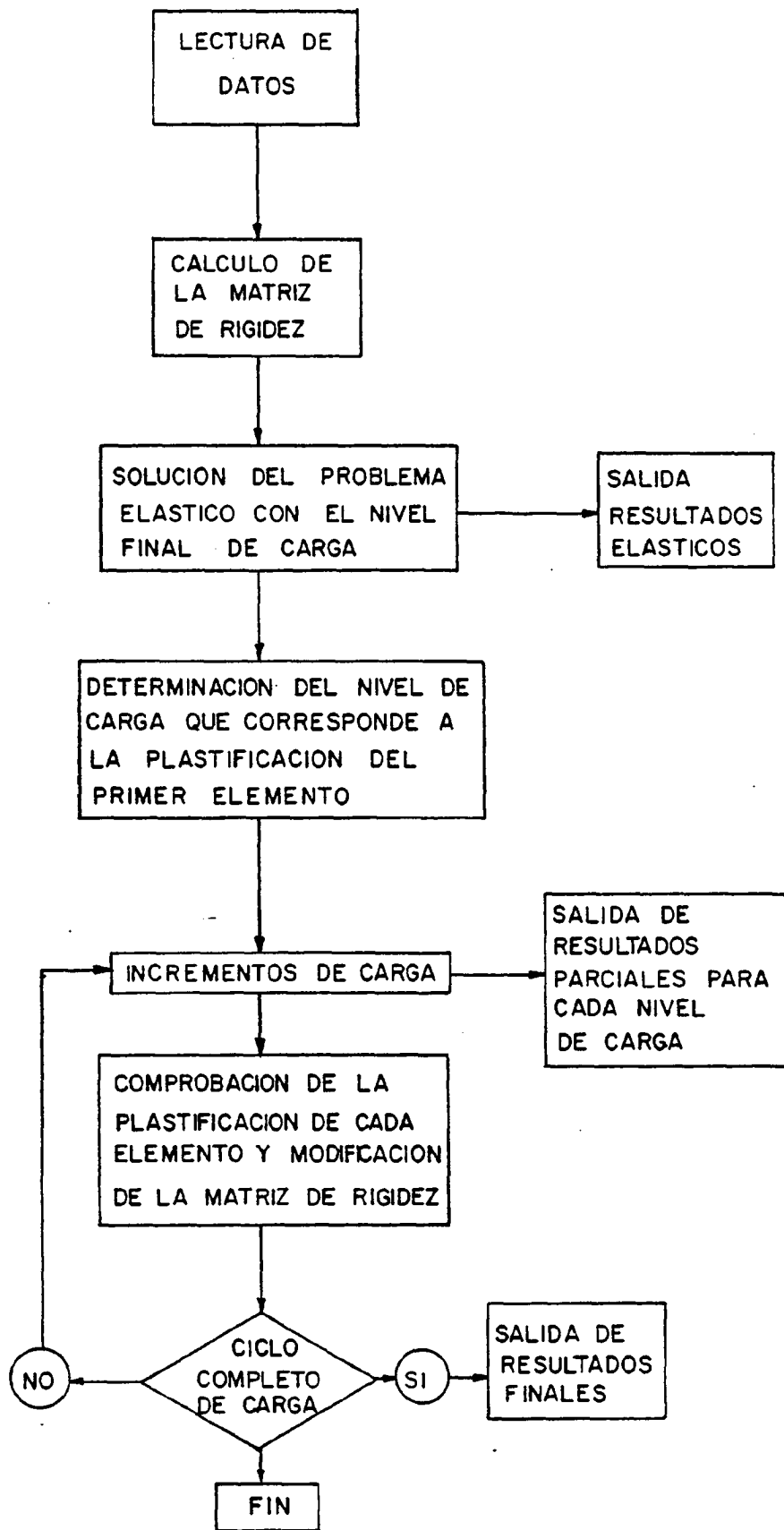


Fig. N° 11.- DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA. FINITO 1

El programa está escrito en FORTRAN IV y consta de cinco partes; un programa y cuatro subrutinas de cálculo y escritura. A continuación se incluye el listado del programa que contiene numerosos comentarios con lo cual es sumamente fácil su seguimiento.

La subrutina ELSTIF genera la matriz de rigidez, que es ensamblada por la subrutina ASSEM, la resolución del modelo lo efectúa la subrutina SOLVE y la impresión la ordena la subrutina WRITE.

Se ha efectuado una modificación importante al programa original de DALH (1969) que consiste en la introducción de un contador entre las dos primeras llamadas de las subrutinas ELSTIF y ASSEM en la solución del problema elástico para detectar los fallos de escritura en las coordenadas de los nudos y en la composición de los triángulos. Con estos contadores se detectan enseguida fallos simples cuya localización resulta muy engorrosa en el programa original.

La salida del programa proporciona las tensiones principales, direcciones de tensión principal, deformaciones, desplazamientos y reacciones en los nudos.

```

0001 C *****
0002 C PROGRAMA PARA LA SOLUCION DE PROBLEMAS ELASTO -
0003 C PLASTICOS POR ELEMENTOS FINITOS.
0004 C VERSION EN DOBLE PRECISION.PROGRAMA PRINCIPAL.
0005 C *****
0006 C NELEM=NUMERO DE ELEMENTOS
0007 C NNODE=NUMERO DE NUDOS
0008 C NBOUN=NUMERO DE NUDOS CON DESPLAZAMIENTO ESTABLECIDO
0009 C NSPEC=NUMERO DE NUDOS CON FUERZAS DISTINTAS DE CERO
0010 C O SIN DESPLAZAMIENTO ESTABLECIDO
0011 C NFREE ES EL NUMERO DE NUDOS SIN TRACCION. ESTOS NUDOS
0012 C DELIMITAN LA SUPERFICIE DE LA EXCAVACION MINERA.
0013 C LAS CONDICIONES DE CONTOURNO ADICIONALES SE INCLUYEN
0014 C EN LA VARIABLE "NSPEC"
0015 C EL MAXIMO NUMERO DE ELEMENTOS ES 900
0016 C EL MAXIMO NUMERO DE NUDOS ES 450
0017 C EL MAXIMO NUMERO DE NUDOS ADYACENTES A UN NUDO DADO ES 8
0018 C EL MAXIMO NUMERO DE MATERIALES ES 20
0019 C EL MAXIMO NUMERO DE NUDOS DE CONTOURNO ES 100
0020 C EL MAXIMO NUMERO DE NUDOS LIBRES DE TRACCION ES 100
0021 C NLAY ES EL NUMERO DE MATERIALES DEL MODELO
0022 C LAS PROPIEDADES E1,E2, ECT. SE COLOCARAN DE ACUERDO
0023 C CON EL MEDIO AL QUE PERTENEZCAN
0024 C MAXIT,ORF, E INTER SON EL MAXIMO NUMERO DE
0025 C ITERACIONES, FACTOR DE RELAJACION, Y EL INTERVALO
0026 C EN EL QUE SE DESEA LA INFORMACION SOBRE LA CONVERGENCIA.
0027 C ERROR ES LA SUMA MAXIMA DE RESIDUOS DESEADOA PARA CONVERGENCIA
0028 C SI NOPLAS =0, SOLO SE CALCULARA LA SOLUCION ELASTICA
0029 C EN OTRO CASO SE DARA LA SOLUCION TOTAL
0030 C SI INDSTR=0, EL MEDIO ES INDEPENDIENTE DE SIGMA 2
0031 C SI INITAL=0 NO SE ICLUYEN FUERZAS INICIALES
0032 C INC ES EL NUMERO DE INCREMENTOS DE CARGA APLICADOS TRAS
0033 C EL PRIMER CALCULO. SE SUGIEREN ENTRE 10 Y 20.
0034 C MAXBAL SPECIFICA EL NUMERO DE CICLOS DE EQUILIBRIO ADICIONALES
0035 C QUE SE ICLUYEN EN CADA INCREMENTO DE CARGA
0036 C UNO O DOS SON RECOMENDABLES ( CERO ES SATISFACTORIO PARA
0037 C MUCHOS PROBLEMAS )
0038 C NLAST ES EL ULTIMO ELEMENTO EN CADA MATERIAL
0039 C EN UN SISTEMA DE COORDENADAS DERECHO, LOS PUNTOS NODALES
0040 C SE DEBEN IDENTIFICAR EN EL SENTIDO CONTRARIO A LAS AGUJAS
0041 C DEL RELOJ. PUEDE NO OBSTANTE HACERSE AL CONTRARIO.
0042 C NOD(I,J) IDENTIFICA LOS PUNTOS NODALES DE UN ELEMENTO
0043 C SEGUN LA CONVENCION ANTES MENCIONADA.
0044 C NBF(I) ES UN NUDO CON MOVIMIENTO ESPECIFICADO
0045 C NB(I)=0 SI AMBOS DESPLAZAMIENTOS SE ESPECIFICAN
0046 C NB(I)=1 SI SE ESPECIFICA DESPLAZAMIENTO EN EL EJE X
0047 C NB(I)=2 SI SE ESPECIFICA DESPLAZAMIENTO EN EL EJE Y
0048 C SI SE UTILIZAN COORDENADAS DIFERENTES A PULGADAS, XFAC E
0049 C YFAC SON LOS FACTORES DE CONVERSION NECESARIOS PARA PASAR
0050 C A PULGADAS..... ESTOS FACTORES PUEDEN USARSE PARA

```

```

0052 C CAMBIAR LAS DIMENSIONES DEL MODELO SIN CAMBIAR LOS
0053 C DATOS. EN CASO CONTRARIO COLOCAR XFAC,YFAC=0
0054 C SI SE DESEA PARAR LA EJECUCION CUANDO UN ELEMENTO SE HACE
0055 C PLASTICO, COLOCAR NSTOP IGUAL A ESE ELEMENTO.
0056 C EN CASO CONTRARIO HACER NSTOP=0
0057 C *****
0057 IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
0058 LOGICAL*4 BFX, BPY, PLAST
0059 INTEGER*2 NOD, NBP, NB, NP, NAP, NLAST
0060 REAL*4 FX, PY, DX, DY, UTX, UTY
0061 DIMENSION TITLE(10), GAMX(20), GAMY(20), PX(450), PY(450)
0062 1, DX(450), DY(450)
0063 COMMON SXX(450,9), SXY(450,9), SYX(450,9), SYY(450,9),
0064 1S(6,6), P(6), T(3,6), E(3,3), ERT(3,3), TP(3,6), XORD(450),
0065 2YORD(450), E1(20), E2(20), TXY(20), ANIE(20), R(3,3), STD(3)
0066 3, FR1(20), FR2(20), GE(20), CX(20), CY(20), TX(20), TY(20),
0067 4STX(900,6), X(3), Y(3), UX(450), UY(450), FX(450), FY(450),
0068 5DXMAX(100), DYMAX(100), GRSIG(2), DELSIG(3), DELEPS(3), V2
0069 6, UTX(450), UTY(450), LL(3), INDSTR, NBP(100), NB(100),
0070 7NLAST(20), NAP(450), NP(450,9), NOD(900,3), BFX(450),
0071 8BPY(450), PLAST(900)
0072 C *****
0073 C LECTURA Y ESCRITURA DE DATOS.
0074 C SE REQUIEREN DOS TARJETAS EN BLANCO AL FINAL DE LOS DATOS.
0075 C *****
0076 320 READ(1,118)(TITLE(I), I=1,10)
0077 READ(1,102)NELEM, NNODE, NBOUN, NSPEC, NLAY, INTER, MAXIT,
0078 1INDSTR, NOPLAS, INC, NFREE, INITAL, MAXBAL, NSTOP
0079 IF(NELEM.EQ.0) STOP
0080 READ(1,104) ERROR, ORF, XFAC, YFAC
0081 READ(1,102) (NLA(I), I=1, NLAY)
0082 READ(1,900)((NOD(I,J), J=1,3), I=1, NELEM)
0083 READ(1,900)(NBP(I), NB(I), I=1, NBOUN)
0084 DO 29 I=1, NNODE
0085 FX(I)=0.0
0086 FY(I)=0.0
0087 UTX(I)=0.0
0088 UTY(I)=0.0
0089 UX(I)=0.0
0090 29 UY(I)=0.0
0091 STD(1)=0.0
0092 STD(2)=0.0
0093 STD(3)=0.0
0094 C *****
0095 C LECTURA DE LOS ESFUERZOS INICIALES SI LOS HAY
0096 C *****
0097 IF(INITAL.EQ.0) GO TO 32
0098 READ(1,104)(STD(I), I=1,3)
0099 C *****
0100 C LECTURA DE LAS PROPIEDADES ELASTICAS
0101 C SE SUPONE ELASTICIDAD ANISOTROPICA

```

```

0102 C      SI SE DESEA ISOTROPIA, E1=E2, PR1=PR2, Y G=E/2(1+NU)
0103 C      LA DENSIDAD ESTA EN LIBRAS POR PIE CUBICO
0104 C      PARA ANALIZAR SISTEMAS PLASTICOS CARGADOS CON LA GRAVEDAD
0105 C      LA DIRECCION DE LA GRAVEDAD SERA LA DEL EJE X
0106 C      *****
0107 32 READ(1,135) (E1(I),E2(I),PR1(I),PR2(I),GE(I),GAMX(I),
0108 1GAMY(I),ANIE(I),I=1,NLAY)
0109 IF(NOPLAS.EQ.0) GO TO 26
0110 C      *****
0111 C      LECTURA DE LAS PROPIEDADES PLASTICAS
0112 C      SE SUPONEN ANISOTROPICAS.SI EL COMPORTAMIENTO SE ESTIMA
0113 C      INDEPENDIENTE DE LA TENSION INTERMEDIA PRINCIPAL
0114 C      COLOCAR INDSTR=0.SI INDSTR NO ES CERO, EL PROGRAMA USA EL
0115 C      CRITERIO PARA MEDIOS ANISOTROPOS DE VON MISES(PARISEAU,1967)
0116 C      LA ENTRADA DE LAS TENSIONES UNIAXIALES CX,CY, TX, TY, Y TXY SON
0117 C      LAS MISMAS PARA AMBOS. PARA EL PRIMERO LA ISOTROPIA SE
0118 C      RECUPERA CON CX=CY=C, TX=TY=T, Y TXY=C*T/(C+T)
0119 C      PARA EL EXTENDIDO DE VON MISES, LA ISOTROPIA SE RECUPERA CUANDO
0120 C      CX=CY=C, TX=TY=T, Y TXY=1.1547*C*T/(C+T)
0121 C      PARA LOS CASOS DE COMPORTAMIENTO ATENSIONAL, ASIGNAR VALORES
0122 C      PEQUENOS A LAS SIGMAS DE TRACCION Y COMPRESION PARA LOGRAR
0123 C      LA SIMULACION DEL EFECTO DESEADA
0124 C      *****
0125 READ(1,122)(CX(I),CY(I),TX(I),TY(I),TXY(I),I=1,NLAY)
0126 C      *****
0127 C      LECTURA DE LAS COORDENADAS DE LOS NUDDOS
0128 C      *****
0129 28 READ(1,104)(XORD(I),YORD(I),I=1,NNODE)
0130 WRITE(3,120)(TITLE(I),I=1,10)
0131 WRITE(3,105) NELEM
0132 WRITE(3,106) NNODE
0133 WRITE(3,107) NBOUN
0134 WRITE(3,108)
0135 WRITE(3,109)(I,E1(I),E2(I),PR1(I),PR2(I),GE(I),GAMX(I),
0136 1GAMY(I),ANIE(I),I=1,NLAY)
0137 WRITE(3,119)
0138 WRITE(3,124)(I,CX(I),CY(I),TX(I),TY(I),TXY(I),I=1,NLAY)
0139 WRITE(3,110) MAXIT
0140 WRITE(3,111) ORF,ERROR
0141 WRITE(3,126)(NBP(I),NB(I),I=1,NBOUN)
0142 IF(INITAL.EQ.0) WRITE(3,129)
0143 IF(INITAL.NE.0) WRITE(3,130) (STD(I),I=1,3)
0144 IF(NOPLAS.EQ.0) GO TO 33
0145 IF(INDSTR.EQ.0) WRITE(3,131)
0146 IF(INDSTR.NE.0) WRITE(3,132)
0147 GO TO 34
0148 33 WRITE(3,133)
0149 C      *****
0150 C      INICIALIZACION
0151 C      *****

```



```

0152      34 DO 61 I=1,NNODE
0153          BPX(I)=.FALSE.
0154          BPY(I)=.FALSE.
0155          PLAST(I)=.FALSE.
0156          DO 60 J=1,9
0157              SXX(I,J)=0.0D0
0158              SXY(I,J)=0.0D0
0159              SYX(I,J)=0.0D0
0160              SYX(I,J)=0.0D0
0161          60 NP(I,J)=0
0162          61 NP(I,1)=I
0163          DO 62 I=NNODE,NELEM
0164          62 PLAST(I)=.FALSE.
0165              IF(XFAC.EQ.0.0) XFAC=1.0
0166              IF(YFAC.EQ.0.0) YFAC=1.0
0167              DO 15 I=1,NNODE
0168                  UX(I)=UX(I)*XFAC
0169                  UY(I)=UY(I)*YFAC
0170                  XORD(I)=XORD(I)*XFAC
0171          15 YORD(I)=YORD(I)*YFAC
0172              DO 16 I=1,NLAY
0173                  GAMX(I)=GAMX(I)/1728.0
0174          16 GAMY(I)=GAMY(I)/1728.0
0175 C          *****
0176 C          INTRODUCCION DE LAS CONDICIONES DE DESPLAZAMIENTO DEL CONTORNO
0177 C          *****
0178          DO 20 I=1,NBOUN
0179              JJ=NB(I)+1
0180              JJ=NB(I)
0181              NBP(I)=0
0182              GO TO (30,40,50),J
0183          30 BPX(JJ)=.TRUE.
0184              FX(JJ)=0.0
0185          50 BPY(JJ)=.TRUE.
0186              FY(JJ)=0.0
0187              GO TO 20
0188          40 BPX(JJ)=.TRUE.
0189              FX(JJ)=0.0
0190          20 CONTINUE
0191 C          *****
0192 C          LECTURA DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO DIFERENTES DE CERO
0193 C          *****
0194          IF(NSPEC.EQ.0) GO TO 87
0195          DO 27 N=1,NSPEC
0196              READ(1,103)I,FX(I),FY(I),UX(I),UY(I)
0197              UX(I)=UX(I)*XFAC
0198              UY(I)=UY(I)*YFAC
0199          27 NB(N)=I
0200 C          *****
0201 C          CALCULO DE LAS FUERZAS SOBRE EL CUERPO EN LOS NUDOS
0202 C          SE SUPONE ESPESOR UNIDAD
0203 C          *****

```

```

0204 67 IF(GAMX(1).EQ.0.0.AND.INITAL.EQ.0) GO TO 17
0205 I=1
0206 DO 10 J=1,NELEM
0207 XCENT=0.0
0208 IF(J-NLAST(I).LE.0) GO TO 13
0209 I=I+1
0210 13 DO 11 K=1,3
0211 LX=NOD(J,K)
0212 XCENT=XCENT+XORD(LX)/3.0
0213 X(K)=XORD(LX)
0214 11 Y(K)=YORD(LX)
0215 V2=X(1)*(Y(2)-Y(3))+X(2)*(Y(3)-Y(1))+X(3)*(Y(1)-Y(2))
0216 IF(V2.GT.0.0) GO TO 31
0217 WRITE(3,100)J
0218 PLAST(1)=.TRUE.
0219 31 GRSIG(1)=-GAMX(I)*XCENT
0220 YNUM=PR2(I)*(1.0+PR1(I))
0221 YDEN=1.0-E1(I)*PR2(I)*PR2(I)/E2(I)
0222 HOR=YNUM/YDEN
0223 GRSIG(2)=GRSIG(1)*HOR
0224 P(1)=(Y(2)-Y(3))/V2
0225 P(2)=(Y(3)-Y(1))/V2
0226 P(3)=(Y(1)-Y(2))/V2
0227 P(4)=(X(3)-X(2))/V2
0228 P(5)=(X(1)-X(3))/V2
0229 P(6)=(X(2)-X(1))/V2
0230 X(1)=STD(1)+GRSIG(1)
0231 X(2)=STD(2)+GRSIG(2)
0232 X(3)=STD(3)
0233 DO 2 L=1,3
0234 K=L+3
0235 T(1,L)=P(L)
0236 T(1,K)=0.0
0237 T(2,L)=0.0
0238 T(2,K)=P(K)
0239 T(3,L)=P(K)
0240 2 T(3,K)=P(L)
0241 DO 12 K=1,3
0242 LX=NOD(J,K)
0243 DO 12 L=1,3
0244 FX(LX)=FX(LX)+0.5*V2*T(L,K)*X(L)
0245 12 FY(LX)=FY(LX)+0.5*V2*T(L,K+3)*X(L)
0246 10 CONTINUE
0247 C *****
0248 C INTRODUCCION DE LA SUPERFICIE LIBRE DE TRACCION 0
0249 C ESPECIFICACION DE LOS DESPLAZAMIENTOS MAXIMOS
0250 C *****
0251 17 IF(NFREE.EQ.0) GO TO 69

```

```

0252 READ(1,128)(NBP(I),DXMAX(I),DYMAX(I),I=1,NFREE)
0253 DO 65 I=1,NFREE
0254 DXMAX(I)=DXMAX(I)*XFAC
0255 65 DYMAX(I)=DYMAX(I)*YFAC
0256 J=1
0257 DO 66 I=1,NNODE
0258 IF(I.EQ.NBP(J)) GO TO 4
0259 FX(I)=0.0
0260 FY(I)=0.0
0261 GO TO 66
0262 4 FX(I)=-FX(I)
0263 FY(I)=-FY(I)
0264 J=J+1
0265 66 CONTINUE
0266 C *****
0267 C GENERACION Y CONSTRUCCION DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ
0268 C *****
0269 69 DO 70 I=1,NELEM
0270 CALL ELSTIF(I,0)
0271 C *** COLOCAR CONTADOR EXTERIOR DE ELEMENTOS PARA DETECTAR ERRORES
0272 CALL ASSEM(I,0)
0273 70 CONTINUE
0274 IF(PLAST(I)) GO TO 320
0275 C *****
0276 C CONTAJE DE LOS NUDOS ADYACENTES
0277 C *****
0278 DO 200 I=1,NNODE
0279 MX=1
0280 210 MX=MX+1
0281 IF(MX.GT.9) GO TO 220
0282 IF(NP(I,MX).NE.0) GO TO 210
0283 NAP(I)=MX-1
0284 GO TO 200
0285 220 NAP(I)=9
0286 200 CONTINUE
0287 CALL SOLVE(NNODE,NELEM,NFREE,INTER,MAXIT,ERROR,ORF)
0288 C *****
0289 C CALCULO DE LAS TENSIONES
0290 C *****
0291 DO 300 I=1,NELEM
0292 J=NOD(I,1)
0293 K=NOD(I,2)
0294 L=NOD(I,3)
0295 CALL ELSTIF(I,1)
0296 P(1)=UX(J)
0297 P(2)=UX(K)
0298 P(3)=UX(L)
0299 P(4)=UY(J)
0300 P(5)=UY(K)
0301 P(6)=UY(L)
0302 DO 280 J=1,3

```

```

0303     STX(I, J+3)=0.0
0304     DO 280 K=1, 6
0305 280   STX(I, J+3)=STX(I, J+3)+T(J, K)*P(K)
0306     DO 300 J=1, 3
0307     STX(I, J)=0.0
0308     DO 300 K=1, 3
0309 300   STX(I, J)=STX(I, J)+E(J, K)*STX(I, K+3)
0310     WRITE(3, 116)
0311     IF(INITAL.EQ.0.AND.GAMX(1).EQ.0.0) GO TO 304
0312     J=1
0313     DO 301 I=1, NELEM
0314     XCENT=0.0
0315     IF(I-NLAST(J).LE.0) GO TO 302
0316     J=J+1
0317 302   DO 303 K=1, 3
0318     LX=NOD(I, K)
0319 303   XCENT=XCENT+XORD(LX)/3.0
0320     GRSIG(1)=-GAMX(J)*XCENT
0321     YNUM=PR2(J)*(1.0+PR1(J))
0322     YDEN=1.0-E1(J)*PR2(J)*PR2(J)/E2(J)
0323     HOR=YNUM/YDEN
0324     GRSIG(2)=GRSIG(1)*HOR
0325     X(1)=STD(1)+GRSIG(1)
0326     X(2)=STD(2)+GRSIG(2)
0327     X(3)=STD(3)
0328     DO 301 K=1, 3
0329 301   STX(I, K)=STX(I, K)+X(K)
0330 304   CALL WRITER(NNODE, NELEM, 0, IPUNCH)
0331     JJ=0
0332     IF(NOPLAS.EQ.0) GO TO 320
0333     IF(GAMX(1).NE.0.0.OR.INITAL.NE.0) GO TO 426
0334 C     *****
0335 C     CALCULO DE LA PLASTIFICACION INCIPIENTE
0336 C     *****
0337     J=1
0338     BIGEL=0.0
0339     IF(INDSTR.EQ.0) GO TO 401
0340     DO 330 I=1, NELEM
0341 305   IF(I-NLAST(J).LE.0) GO TO 310
0342     J=J+1
0343     GO TO 305
0344 310   BX=STX(I, 1)
0345     BY=STX(I, 2)
0346     BXY=STX(I, 3)
0347     O=(CX(J)+TX(J))/(2.0*CX(J)*TX(J))
0348     Z=(CY(J)+TY(J))/(2.0*CY(J)*TY(J))
0349     Q=1.0/(TXY(J)*TXY(J))
0350     CO=(TX(J)-CX(J))/(2.0*CX(J)*TX(J))
0351     FP=(TY(J)-CY(J))/(2.0*CY(J)*TY(J))
0352     DEN=1.0/DSQRT(2.0*Q*O*O*(O*O-CO*CO))

```

```

0350 A=2.0*Z*Z*(2.0*Z*Z-0.5*(Z+Z))*(Z-0.5*Z)
0351 B=2*Z*(2.0*Z*Z*Z-0.5*Z*Z)
0352 C=2.0*Z*Z*(2.0*Z*Z-0.5*(Z+Z))
0353 D=Z*Z*Z
0354 E=Z*Z
0355 Z=DSQRT(DABS(0.25*Z*Z+Z*Z))
0356 Z=Z-0.5*(Z*Z+Z)
0357 FACT=Z/D
0358 IF(FACT.LT.BIGEL) GO TO 330
0359 BIGEL=FACT
0360 CONTINUE
0361 GO TO 430
0362 DO 420 I=1,NELEM
0363 IF(I-NLAST(J).LE.0) GO TO 410
0364 J=J+1
0365 GO TO 405
0366 410 BX=STX(I,1)
0367 BY=STX(I,2)
0368 BXY=STX(I,3)
0369 A=TX(J)*(CX(J)+TX(J))/(CX(J)*TX(J))
0370 B=TY(J)*(CY(J)+TY(J))/(CY(J)*TY(J))
0371 DE=0.5*TX(J)*(TX(J)-CX(J))/(CX(J)*TX(J))
0372 EE=0.5*TY(J)*(TY(J)-CY(J))/(CY(J)*TY(J))
0373 X(1)=A*BX-B*BY
0374 Z=0.25*X(1)*X(1)+BXY*BXY
0375 BXY=DSQRT(Z)
0376 Z=BXY-DE*BX-EE*BY
0377 FACT=Z/TX(J)
0378 IF(FACT.LT.BIGEL) GO TO 420
0379 BIGEL=FACT
0380 420 CONTINUE
0381 430 IF(BIGEL.LT.1.0) WRITE(3,127)
0382 IF(BIGEL.LT.1.0) GO TO 320
0383 ALPHA=1.0/BIGEL
0384 BETA=(1.0-ALPHA)/INC
0385 WRITE(3,117)
0386 WRITE(3,115)ALPHA
0387 GO TO 427
0388 426 ALPHA=0.0
0389 BETA=1.0/INC
0390 DO 427 I=1,NNODE
0391 UTX(I)=UX(I)*ALPHA
0392 UTY(I)=UY(I)*ALPHA
0393 FX(I)=FX(I)*BETA
0394 FY(I)=FY(I)*BETA
0395 PX(I)=FX(I)
0396 PY(I)=FY(I)
0397 UX(I)=UX(I)*BETA
0398 UY(I)=UY(I)*BETA
0399 ERROR=ERROR*BETA
0400 J=1
0401 DO 445 I=1,NELEM
0402 XCENT=0.0
0403 IF(I-NLAST(J).LE.0) GO TO 442
0404 J=J+1
0405 442 DO 443 K=1,3

```

```

0409      LX=NOD(I,K)
0410      445 XCENT=XCENT+XORD(LX)/3.0
0411      GRSIG(1)=-GAMX(J)*XCENT
0412      YNUM=PR2(J)*(1.0+PR1(J))
0413      YDEN=1.0-E1(J)*PR2(J)*PR2(J)/E2(J)
0414      HOR=YNUM/YDEN
0415      GRSIG(2)=GRSIG(1)*HOR
0416      X(1)=STD(1)+GRSIG(1)
0417      X(2)=STD(2)+GRSIG(2)
0418      X(3)=STD(3)
0419      DO 445 K=1,3
0420      STX(I,K+3)=STX(I,K+3)*ALPHA
0421      445 STX(I,K)=STX(I,K)*ALPHA+X(K)
0422      IF(NFREE.EQ.0) GO TO 450
0423      DO 446 I=1,NFREE
0424      K=NBP(I)
0425      IF(DXMAX(I).EQ.0.0) GO TO 447
0426      BFX(K)=.FALSE.
0427      447 IF(DYMAX(I).EQ.0.0) GO TO 446
0428      BFY(K)=.FALSE.
0429      446 CONTINUE
0430      450 DO 600 JJ=1,INC
0431      ALPHA=ALPHA+BETA
0432 C      CALL TIMREM(JK)
0433      JK=0
0434      WRITE(3,113)JJ,ALPHA,JK
0435      DO 455 I=1,NNODE
0436      DX(I)=0.0
0437      455 DY(I)=0.0
0438      IF(NFREE.EQ.0) GO TO 469
0439      DO 468 I=1,NFREE
0440      K=NBP(I)
0441      IF(BFX(K)) UX(K)=0.0
0442      468 CONTINUE
0443      469 NBAL=0
0444      470 CALL SOLVE(NNODE,NELEM,NFREE,INTER,MAXIT,ERROR,ORF)--
0445      IF(INITAL.NE.0.OR.GAMX(1).NE.0.0) GO TO 530
0446      SUMR=0.0
0447      NBAL=NBAL+1
0448      DO 472 I=1,NNODE
0449      UX(I)=UX(I)+DX(I)
0450      UY(I)=UY(I)+DY(I)
0451      FX(I)=0.0
0452      472 FY(I)=0.0
0453 C      *****
0454 C      CALCULO DE LOS INCREMENTOS DE TENSIONES Y ESFUERZOS
0455 C      *****
0456      DO 580 I=1,NELEM
0457      J=NOD(I,1)
0458      K=NOD(I,2)
0459      L=NOD(I,3)
0460      CALL ELSTIF(I,1)
0461      P(1)=UX(J)
0462      P(2)=UX(K)
0463      P(3)=UX(L)
0464      P(4)=UY(J)
0465      P(5)=UY(K)

```

```

0466      F(6)=UY(L)
0467      DO 480 J=1,3
0468      DELEPS(J)=0.0
0469      DO 480 K=1,6.
0470 480 DELEPS(J)=DELEPS(J)+T(J,K)*F(K)
0471      DO 495 J=1,3
0472      DELSIG(J)=0.0
0473      DO 495 K=1,3
0474 495 DELSIG(J)=DELSIG(J)+E(J,K)*DELEPS(K)
0475      DO 580 K=1,3
0476      LX=NOD(I,K)
0477      DO 580 L=1,3
0478      FX(LX)=FX(LX)+0.5*V2*T(L,K)*(DELSIG(L)+STX(I,L))
0479 580 FY(LX)=FY(LX)+0.5*V2*T(L,K+3)*(DELSIG(L)+STX(I,L))
0480      DO 525 I=1,NNODE
0481      IF(BPX(I)) FX(I)=0.0
0482      IF(BPY(I)) FY(I)=0.0
0483      DX(I)=UX(I)
0484      DY(I)=UY(I)
0485      SUMR=SUMR+DABS(PX(I)*ALPHA/BETA-FX(I))
0486      SUMR=SUMR+DABS(PY(I)*ALPHA/BETA-FY(I))
0487      FX(I)=PX(I)*ALPHA/BETA-FX(I)
0488 525 FY(I)=PY(I)*ALPHA/BETA-FY(I)
0489      LX=NBAL-1
0490      WRITE(3,101)LX,SUMR
0491      IF(SUMR.LT.ERROR.OR.NBAL.GT.MAXBAL) GO TO 530
0492      GO TO 470
0493 530 DO 475 I=1,NNODE
0494      FX(I)=PX(I)
0495      FY(I)=PY(I)
0496      UTX(I)=UTX(I)+UX(I)
0497 475 UTY(I)=UTY(I)+UY(I)
0498      WRITE(3,112)
0499      WRITE(3,125)
0500 C *****
0501 C TEST DE LOS ELEMENTOS DEFORMADOS
0502 C *****
0503      DO 520 I=1,NELEM
0504      J=NOD(I,1)
0505      K=NOD(I,2)
0506      L=NOD(I,3)
0507      CALL ELSTIF(I,0)
0508      P(1)=UX(J)
0509      P(2)=UX(K)
0510      P(3)=UX(L)
0511      P(4)=UY(J)
0512      P(5)=UY(K)
0513      P(6)=UY(L)
0514      DO 680 J=1,3
0515      DELEPS(J)=0.0
0516      DO 680 K=1,6

```

```

0517 680 DELEPS(J)=DELEPS(J)+T(J,K)*F(K)
0518 DO 490 J=1,3
0519 490 STX(I,J+3)=STX(I,J+3)+DELEPS(J)
0520 DO 695 J=1,3
0521 DELSIG(J)=0.0
0522 DO 695 K=1,3
0523 695 DELSIG(J)=DELSIG(J)+E(J,K)*DELEPS(K)
0524 J=1
0525 496 IF(I-NLAST(J).LE.0) GO TO 497
0526 J=J+1
0527 GO TO 496
0528 497 BX=STX(I,1)+DELSIG(1)
0529 BY=STX(I,2)+DELSIG(2)
0530 BXY=STX(I,3)+DELSIG(3)
0531 IF(INDSTR.EQ.0) GO TO 498
0532 O=(CX(J)+TX(J))/(2.0*CX(J)*TX(J))
0533 Z=(CY(J)+TY(J))/(2.0*CY(J)*TY(J))
0534 Q=1.0/(TXY(J)*TXY(J))
0535 OO=(TX(J)-CX(J))/(2.0*CX(J)*TX(J))
0536 PP=(TY(J)-CY(J))/(2.0*CY(J)*TY(J))
0537 DEN=1.0/DSQRT(2.0*Q*O*O*(O*O-OO*OO))
0538 A=2.0*Z*Z*(2.0*O*O-0.5*Z*Z)/(Q*O*O)
0539 B=DEN*(2.0*PP*O*O+OO*Z*Z)
0540 C=2.0*DEN*OO*(2.0*O*O-0.5*Z*Z)
0541 D=DEN*O*O
0542 O=BX-BY
0543 Z=DSQRT(DABS(0.25*A*O*O+BXY*BXY))
0544 Z=Z-0.5*(B*BX+C*BY)
0545 BIGEL=Z/D
0546 GO TO 501
0547 498 A=TXY(J)*(CX(J)+TX(J))/(CX(J)*TX(J))
0548 B=TXY(J)*(CY(J)+TY(J))/(CY(J)*TY(J))
0549 DE=0.5*TXY(J)*(TX(J)-CX(J))/(CX(J)*TX(J))
0550 EE=0.5*TXY(J)*(TY(J)-CY(J))/(CY(J)*TY(J))
0551 C=TXY(J)
0552 X(1)=A*BX-B*BY
0553 Z=0.25*X(1)*X(1)+BXY*BXY
0554 BXY=DSQRT(Z)
0555 Z=BXY-DE*BX-EE*BY
0556 BIGEL=Z/TXY(J)
0557 501 IF(BIGEL.LT.1.0) GO TO 515
0558 CALL ASSEM(I,1)
0559 IF(PLAST(I)) GO TO 499
0560 PLAST(I)=.TRUE.
0561 DO 505 J=1,3
0562 STX(I,J)=(STX(I,J)+DELSIG(J))/BIGEL
0563 505 DELEPS(J)=STX(I,J+3)*(1.0-1.0/BIGEL)
0564 CALL ELSTIF(I,1)
0565 DO 506 J=1,3
0566 DELSIG(J)=0.0
0567 DO 506 K=1,3
0568 506 DELSIG(J)=DELSIG(J)+E(J,K)*DELEPS(K)

```



```

0567      BX=STX(I,1)+DELSIG(1)
0570      BY=STX(I,2)+DELSIG(2)
0571      BXY=STX(I,3)+DELSIG(3)
0572      IF(INDSTR.EQ.0) GO TO 507
0573      D=BX-BY
0574      Z=DSQRT(DABS(0.25*A*D*D+BXY*BXY))
0575      Z=Z-0.5*(B*BX+C*BY)
0576      BIGEL=Z/D
0577      GO TO 499
0578 507 X(1)=A*BX-B*BY
0579      Z=0.25*X(1)*X(1)+BXY*BXY
0580      BXY=DSQRT(Z)
0581      Z=BXY-DE*BX-EE*BY
0582      BIGEL=Z/C
0583 499 DO 500 J=1,3
0584 500 STX(I,J)=STX(I,J)+DELSIG(J)
0585      CALL ELSTIF(I,0)
0586      CALL ASSEM(I,0)
0587      WRITE(3,114)I,(STX(I,K),K=1,6),(Y(K),K=1,3),(E(K,K),K=1,
0588 23),BIGEL
0589      GO TO 520
0590 515 IF(.NOT.PLAST(I)) GO TO 517
0591      CALL ASSEM(I,1)
0592      PLAST(I)=.FALSE.
0593      CALL ELSTIF(I,0)
0594      CALL ASSEM(I,0)
0595 517 DO 518 J=1,3
0596 518 STX(I,J)=STX(I,J)+DELSIG(J)
0597 520 CONTINUE
0598      IF(NSTOP.EQ.0) GO TO 600
0599      IF(.NOT.PLAST(NSTOP))GO TO 600
0600      WRITE(3,134)NSTOP
0601      CALL WRITER(NNODE,NELEM,1,IFUNCH)
0602      GO TO 320
0603 600 CONTINUE
0604      WRITE(3,123) JJ
0605      CALL WRITER(NNODE,NELEM,1,IFUNCH)
0606      GO TO 320
0607 100 FORMAT(1H ,8HELEMENTO,2X,I5,2X,'TIENE VOLUMEN CERO O NEGATIVO')
0608 101 FORMAT('0','INCREMENTO EQUILIBRIO ',I4,5X,'FUERZA DESBALANCEADA =
0609 1,F15.5)
0610 102 FORMAT(14I5)
0611 103 FORMAT(I10,4F10.0)
0612 104 FORMAT(14F5.0)
0613 900 FORMAT(12I5)
0614 105 FORMAT(1H0,22HNUMERO DE ELEMENTOS = , I4)
0615 106 FORMAT(1H0,18HNUMERO DE NUDOS = ,I4)
0616 107 FORMAT(1H0,45HNUMERO DE NUDOS CON MOVIMIENTO ESTABLECIDO =
0617 1,I4)
0618 108 FORMAT(1H0,4HNLAY,14X,2HE1,13X,2HE2,12X,3HPR1,12X
0619 13HPR2,13X,2HGE,11X,4HGAMX,11X,4HGAMY,11X,4HANIE)
0620 109 FORMAT(1H0,I4,1X,8E15.4)

```

```

0621 110 FORMAT(1H0,24HITERACIONES MAXIM. = ,I4)
0622 111 FORMAT(1H0,25HFACTOR DE RELAJACION = ,F5.3,6X,3HERE,
0623 119HOR MAXIMO TOTAL = ,E10.4)
0624 112 FORMAT(1H0,'ELEMENTOS PLASTICOS EN EL NIVEL ACTUAL DE CARGA')
0625 113 FORMAT('1', 'NUMERO DE INCREMENTOS',I3,6X,'NIVEL DE CARGA = ',
0626 1F7.4,4X,'TIEMPO= ',I4)
0627 114 FORMAT(' ',I4,3F10.1,9E10.2,F5.2)
0628 115 FORMAT('0', 'PRIMERA DEFORMACION CON FACTOR DE CARGA ',F7.4)
0629 116 FORMAT('0',40X,'RESULTADOS DEL ANALISIS ELASTICO')
0630 117 FORMAT('1',40X,'RESULTADOS DEL ANALISIS PLASTICO')
0631 118 FORMAT(10A8)
0632 119 FORMAT('0',/,40X,'CARACTERISTICAS DE LA DEFORMACION',/,11X,'X-COMP
0633 1', 'FUERZA ',5X,'Y-COMP FUERZA ',5X,'X-TENS FUERZA ',
0634 25X,'Y-TENS-FUERZA ',3X,'XY-CORTANTE')
0635 120 FORMAT(1H1,4X,10A8//)
0636 122 FORMAT(5F10.0)
0637 123 FORMAT(1H0,I4,2X,'INCREMENTOS PLASTICOS COMPLETADOS')
0638 124 FORMAT('0',I5,5E20.6)
0639 125 FORMAT('0', 'ELEM',5X,'SIG-X',5X,'SIG-Y',4X,'SIG-XY',
0640 15X,'EPS-X',5X,'EPS-Y',4X,'EPS-XY',7X,'Y,1',7X,'Y,2',
0641 27X,'Y,3',4X,'E(1,1)',4X,'E(2,2)',4X,'E(3,3)',2X,'Z/C')
0642 126 FORMAT('0',55X,'CONDICIONES DE CONTORNO',//,(24I5))
0643 127 FORMAT('0', 'EL SISTEMA COMPLETO ES ELASTO-PLASTICO ',
0644 1'SOLUCION NO ADMISIBLE')
0645 128 FORMAT(I10,2F10.0)
0646 129 FORMAT('0', 'SIN ESFUERZOS INICIALES')
0647 130 FORMAT('0', 'LAS FUERZAS INICIALES SON: SIGX=',F10.3,5X,
0648 1'SIGY=',F10.3,5X,'SIGXY=',F10.3)
0649 131 FORMAT('0', 'DEFORMACION ANISOTROPICA GENERALIZADA DE COULOMB')
0650 132 FORMAT('0', 'DEFORMACION EXTENDIDA DE VON MISES')
0651 133 FORMAT('0', 'ESPECIFICADA SOLO LA SOLUCION ELASTICA')
0652 134 FORMAT('0', 'EJECUCION TERMINADA-- ELEMENTO',I6, ' I'
0653 1'S PLASTICO')
0654 135 FORMAT(8F9.0)
0655 END
0656 C *****
0657 C ***** SUBROUTINA ELSTIF *****
0658 C *****
0659 SUBROUTINE ELSTIF(I,ISTR)
0660 C *****
0661 C SUBROUTINA PARA FORMAR LA MATRIZ DE RIGIDEZ
0662 C *****
0663 C *****
0664 C SI ISTR NO ES IGUAL A CERO, LOS CALCULOS
0665 C EVALUARAN SOLO LOS ESFUERZOS
0666 C *****
0667 C IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
0668 C LOGICAL*4 BPX,BPY,PLAST
0669 C INTEGER*2 NOD,NBP,NB,NP,NAP,NLAST
0670 C REAL*4 UTX,UTY
0671 C COMMON SXX(450,9),SXY(450,9),SYX(450,9),SYY(450,9),
0672 1S(6,6),P(6),T(3,6),E(3,3),ERT(3,3),TP(3,6),XORD(450),
0673 2YORD(450),E1(20),E2(20),TKY(20),ANIE(20),R(3,3),STD(3)
0674 3,PR1(20),PR2(20),GE(20),DX(20),CY(20),TX(20),TY(20);
0675 4STX(900,6),X(3),Y(3),UX(450),UY(450),FX(450),FY(450),
0676 5DXMAX(100),DYMAX(100),GRSIG(2),DELSIG(3),DELEPS(3),V2
0677 6,UTX(450),UTY(450),LL(3),INDSTR,NBP(100),NB(100),

```

```

0676      7NLAST(20),NAP(450),NP(450,9),NOD(900,3),BFX(450),
0679      BFPY(450),FLAST(900)
0680      DO 1 J=1,3
0681      K=NOD(I,J)
0682      X(J)=XORD(K)
0683      1 Y(J)=YORD(K)
0684      V2=X(1)*(Y(2)-Y(3))+X(2)*(Y(3)-Y(1))+X(3)*(Y(1)-Y(2))
0685      P(1)=(Y(2)-Y(3))/V2
0686      P(2)=(Y(3)-Y(1))/V2
0687      P(3)=(Y(1)-Y(2))/V2
0688      P(4)=(X(3)-X(2))/V2
0689      P(5)=(X(1)-X(3))/V2
0690      P(6)=(X(2)-X(1))/V2
0691      DO 2 J=1,3
0692      K=J+3
0693      T(1,J)=P(J)
0694      T(1,K)=0.0
0695      T(2,J)=0.0
0696      T(2,K)=P(K)
0697      T(3,J)=P(K)
0698      2 T(3,K)=P(J)
0699 C      *****
0700 C      DEFINE LA MATRIZ ANISOTROPICA DE ELASTICIDAD "E"
0701 C      *****
0702      DO 3 J=1,3
0703      DO 3 K=1,3
0704      3 E(J,K)=0.0
0705      J=i
0706      4 IF(I-NLAST(J).LE.0) GO TO 5
0707      J=J+1
0708      GO TO 4
0709      5 EE=E1(J)/E2(J)
0710      DE=E2(J)/((1.+PR1(J))*(1.-PR1(J)-2.*EE*PR2(J)**2))
0711      E(1,1)=(EE*(1.-EE*PR2(J)**2))*DE
0712      E(1,2)=(EE*PR2(J))*DE*(1.0+PR1(J))
0713      E(2,1)=E(1,2)
0714      E(2,2)=(1.-PR1(J)**2)*DE
0715      E(3,3)=GE(J)
0716 C      *****
0717 C      DEFINE LA MATRIZ DE TRANSFORMACION
0718 C      *****
0719      ANG=ANIE(J)
0720      IF(ANG.LE..0001) GO TO 8
0721      ANG=ANG*3.14159/180.
0722      C=DCOS(ANG)
0723      D=DSIN(ANG)
0724      R(1,1)=C*C
0725      R(1,2)=D*D
0726      R(1,3)=-2.*C*D
0727      R(2,1)=R(1,2)
0728      R(2,2)=R(1,1)
0729      R(2,3)=-R(1,3)
0730      R(3,1)=C*D
0731      R(3,2)=-R(3,1)

```

```

0732      R(3,3)=R(1,1)-R(1,2)
0733      DO 6 J=1,3
0734      DO 6 K=1,3
0735      ERT(J,K)=0.0
0736      DO 6 L=1,3
0737      6 ERT(J,K)=ERT(J,K)+E(J,L)*R(K,L)
0738      DO 7 J=1,3
0739      DO 7 K=1,3
0740      E(J,K)=0.0
0741      DO 7 L=1,3
0742      7 E(J,K)=E(J,K)+R(J,L)*ERT(L,K)
0743 C      *****
0744 C      E ES LA MATRIZ TRANSFORMADA DE ESFUERZO TENSIONES
0745 C      *****
0746      8 IF(.NOT.PLAST(I)) GO TO 9
0747 C      *****
0748 C      DEFINE LA MATRIZ DE ESFUERZO ELASTICO-PLASTICO TENSIONES
0749 C      INVIERTE E
0750 C      *****
0751      Y(1)=E(2,2)*E(3,3)-E(2,3)*E(3,2)
0752      Y(2)=E(3,1)*E(2,3)-E(2,1)*E(3,3)
0753      Y(3)=E(2,1)*E(3,2)-E(3,1)*E(2,2)
0754      X(1)=E(1,1)*Y(1)
0755      X(2)=E(1,2)*Y(2)
0756      X(3)=E(1,3)*Y(3)
0757      DEN=1.0/(X(1)+X(2)+X(3))
0758      X(1)=E(1,1)*E(2,2)-E(1,2)*E(2,1)
0759      X(2)=E(1,1)*E(3,3)-E(3,1)*E(1,3)
0760      X(3)=E(1,2)*E(3,1)-E(1,1)*E(3,2)
0761      E(1,1)=Y(1)*DEN
0762      E(1,2)=Y(2)*DEN
0763      E(2,1)=E(1,2)
0764      E(1,3)=Y(3)*DEN
0765      E(3,1)=E(1,3)
0766      E(2,2)=X(2)*DEN
0767      E(2,3)=X(3)*DEN
0768      E(3,2)=E(2,3)
0769      E(3,3)=X(1)*DEN
0770 C      *****
0771 C      DEFINE LAS DERIVADAS DE LA DEFORMACION Y(1), Y(2), Y(3)
0772      IF(INDSTR.EQ.0) GO TO 10
0773      O=(CX(J)+TX(J))/(2.0*CX(J)*TX(J))
0774      Z=(CY(J)+TY(J))/(2.0*CY(J)*TY(J))
0775      Q=1.0/(TXY(J)*TXY(J))
0776      OO=(TX(J)-CX(J))/(2.0*CX(J)*TX(J))
0777      PP=(TY(J)-CY(J))/(2.0*CY(J)*TY(J))
0778      DEN=1.0/DSQRT(2.0*Q*O*O*(O*O-OO*OO))
0779      A=2.0*Z*Z*(2.0*O*O-0.5*Z*Z)/(Q*O*O)
0780      B=DEN*(2.0*PP*O*O+OO*Z*Z)
0781      C=2.0*DEN*OO*(2.0*O*O-0.5*Z*Z)

```

```

0752      D=DEN*0.0
0753      C=2TX(I,1)-STX(I,2)
0754      DEN=1.0/DSQRT(DABS(A*C*0+4.0*STX(I,3)*STX(I,3)))
0755      Y(1)=0.5*(A*C*DEN-B)
0756      Y(2)=-0.5*(A*C*DEN+C)
0757      Y(3)=2.0*STX(I,3)*DEN
0758      GO TO 11
0759  10  A=TXY(J)*(CX(J)+TX(J))/(CX(J)*TX(J))
0790      B=TXY(J)*(CY(J)+TY(J))/(CY(J)*TY(J))
0791      DE=0.5*TXY(J)*(TX(J)-CX(J))/(CX(J)*TX(J))
0792      EE=0.5*TXY(J)*(TY(J)-CY(J))/(CY(J)*TY(J))
0793      X(1)=A*STX(I,1)-B*STX(I,2)
0794      X(2)=1.0/DSQRT(X(1)*X(1)+4.0*STX(I,3)*STX(I,3))
0795      Y(1)=0.5*A*X(1)*X(2)-DE
0796      Y(2)=-0.5*B*X(1)*X(2)-EE
0797      Y(3)=2.0*STX(I,3)*X(2)
0798  11  R(1,1)=1.0
0799      R(2,1)=Y(2)/Y(1)
0800      R(3,1)=Y(3)/Y(1)
0801      R(1,2)=E(1,2)-E(1,1)*Y(2)/Y(1)
0802      R(1,3)=-E(1,1)*Y(3)/Y(1)
0803      R(2,2)=E(2,2)-E(2,1)*Y(2)/Y(1)
0804      R(2,3)=-E(2,1)*Y(3)/Y(1)
0805      R(3,2)=0.0
0806      R(3,3)=E(3,3)
0807  C  *****
0808  C  INVIERTE R
0809  C  *****
0810      X(1)=R(3,1)*(R(1,2)*R(2,3)-R(2,2)*R(1,3))
0811      X(2)=R(3,3)*(R(2,2)-R(2,1)*R(1,2))
0812      X(3)=1.0/(X(1)+X(2))
0813  C  *****
0814  C  FORMACION FINAL DE LA MATRIZ
0815  C  *****
0816      E(2,1)=(R(3,1)*R(2,3)-R(2,1)*R(3,3))*X(3)
0817      E(2,2)=(R(3,3)-R(3,1)*R(1,3))*X(3)
0818      E(2,3)=(R(2,1)*R(1,3)-R(2,3))*X(3)
0819      E(3,1)=-R(3,1)*R(2,2)*X(3)
0820      E(3,2)=R(3,1)*R(1,2)*X(3)
0821      E(3,3)=(R(2,2)-R(2,1)*R(1,2))*X(3)
0822      E(1,1)=-Y(2)*E(2,1)/Y(1)-Y(3)*E(3,1)/Y(1)
0823      E(1,2)=-Y(2)*E(2,2)/Y(1)-Y(3)*E(3,2)/Y(1)
0824      E(1,3)=-Y(2)*E(2,3)/Y(1)-Y(3)*E(3,3)/Y(1)
0825  9  IF(ISTR.NE.0) RETURN
0826      DO 17 J=1,3
0827      DO 17 K=1,6
0828      TP(J,K)=0.0
0829      DO 17 L=1,3
0830  17  TP(J,K)=TP(J,K)+E(J,L)*T(L,K)
0831      DO 18 J=1,6

```

```

0832      DO 18 K=1,6
0833      S(J,K)=0.0
0834      DO 17 L=1,3
0835 19  S(J,K)=S(J,K)+TP(L,J)*T(L,K)
0836 18  S(J,K)=S(J,K)*V2/2
0837 C      *****
0838 C      SE FORMAN AHORA LOS ELEMENTOS DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ
0839 C      *****
0840      RETURN
0841      END
0842 C      *****
0843 C      ***** SUBROUTINA ASSEM *****
0844 C      *****
0845 C      SUBROUTINE ASSEM(I, ISIGN)
0846 C      *****
0847 C      SUBROUTINA PARA ENSAMBLAR LA MATRIZ FINAL DE RIGIDEZ
0848 C      *****
0849 C      *****
0850 C      SI ISIGN NO ES IGUAL A CERO, EL ELEMENTO I DE RIGIDEZ
0851 C      SE SUBSTRAE DE LA MATRIZ TOTAL DE RIGIDEZ
0852 C      *****
0853      IMPLICIT REAL*8(A-H,D-Z)
0854      LOGICAL*1 BPX, BPY, PLAST
0855      INTEGER*2 NOD, NBP, NB, NP, NAP, NLAST
0856      REAL*4 UTX, UTY
0857      COMMON SXX(450,9), SXY(450,9), SYX(450,9), SYY(450,9),
0858      IS(6,6), P(6), T(3,6), E(3,3), ERT(3,3), TP(3,6), XORD(450),
0859      2YORD(450), E1(20), E2(20), TXY(20), ANIE(20), R(3,3), STD(3),
0860      3, PR1(20), PR2(20), GE(20), CX(20), CY(20), TX(20), TY(20),
0861      4STX(900,6), X(3), Y(3), UX(450), UY(450), FX(450), FY(450),
0862      5DXMAX(100), DYMAX(100), GRSIG(2), DELSIG(3), DELEPS(3), V2
0863      6, UTX(450), UTY(450), LL(3), INDSTR, NBP(100), NB(100),
0864      7NLAST(20), NAP(450), NP(450,9), NOD(900,3), BPX(450),
0865      8BPY(450), PLAST(900)
0866      DO 160 L=1,3
0867 160 LL(L)=NOD(I,L)
0868      DO 150 L=1,3
0869      LX=LL(L)
0870      DO 150 M=1,3
0871      MX=0
0872 170 MX=MX+1
0873      IF(NP(LX,MX).EQ.LL(M)) GO TO 180
0874      IF(NP(LX,MX).NE.0) GO TO 170
0875 180 NP(LX,MX)=LL(M)
0876      IF(MX.LE.9) GO TO 190
0877      WRITE(3,114) LX
0878      PLAST(I)=.TRUE.
0879 190 IF(ISIGN.NE.0) GO TO 200
0880      SXX(LX,MX)=SXX(LX,MX)+S(L,M)
0881      SXY(LX,MX)=SXY(LX,MX)+S(L,M+3)

```

```

0882      SYX(LX,MX)=SYX(LX,MX)+S(L+3,M)
0883      SYX(LX,MX)=SYX(LX,MX)+S(L+3,M+3)
0884      GO TO 150
0885  200  SXX(LX,MX)=SXX(LX,MX)-S(L,M)
0886      SXY(LX,MX)=SXY(LX,MX)-S(L,M+3)
0887      SYX(LX,MX)=SYX(LX,MX)-S(L+3,M)
0888      SYX(LX,MX)=SYX(LX,MX)-S(L+3,M+3)
0889  150  CONTINUE
0890  114  FORMAT(1H0,34HMAS DE 8 NUDOS ADYACENTES AL NUDO,14)
0891      RETURN
0892      END
0893  C    *****
0894  C    ***** SUBROUTINA SOLVE *****
0895  C    *****
0896  C    SUBROUTINE SOLVE(NNODE,NELEM,NF,INTER,MAXIT,ERROR,DRF)
0897  C    *****
0898  C    SE TRATA DEL METODO DE ITERACION GAUSS-SEIDEL PARA LA SOLUCION
0899  C    *****
0900      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
0901      LOGICAL*1 BFX,BPY,PLAST
0902      INTEGER*2 NOD,NBP,NB,NF,NAP,NLAST
0903      REAL*4 UTX,UTY
0904      COMMON SXX(450,9),SXY(450,9),SYX(450,9),SYY(450,9),
0905      1S(6,6),P(6),T(3,6),E(3,3),ERT(3,3),TP(3,6),XORD(450),
0906      2YORD(450),E1(20),E2(20),TXY(20),ANIE(20),R(3,3),STD(3),
0907      3,PR1(20),PR2(20),GE(20),CX(20),CY(20),TX(20),TY(20),
0908      4STX(900,6),X(3),Y(3),UX(450),UY(450),FX(450),FY(450),
0909      5DXMAX(100),DYMAX(100),GRSIG(2),DELSIG(3),DELEPS(3),V2
0910      6,UTX(450),UTY(450),LL(3),INDSTR,NBP(100),NB(100),
0911      7NLAST(20),NAP(450),NP(450,9),NOD(900,3),BFX(450),
0912      8BPY(450),PLAST(900)
0913      NCVOL=INTER
0914      DO 90 IT=1,MAXIT
0915      SUMR=0.0
0916      DO 80 I=1,NNODE
0917      L=NAP(I)
0918      RX=0.0
0919      RY=0.0
0920      IF(BPX(I)) GO TO 75
0921      RX=-FX(I)
0922      DO 70 J=1,L
0923      N=NP(I,J)
0924  70  RX=RX+SXX(I,J)*UX(N)+SXY(I,J)*UY(N)
0925      UX(I)=UX(I)-DRF*RX/SXX(I,1)
0926  75  IF(BPY(I)) GO TO 80
0927      RY=-FY(I)
0928      DO 71 J=1,L
0929      N=NP(I,J)
0930  71  RY=RY+SYX(I,J)*UX(N)+SYY(I,J)*UY(N)

```

```

0932      80 SUMR=SUMR+DABS(RX)+DABS(RY)
0933      IF(SUMR.LE.ERROR) GO TO 130
0934      IF(IT.LT.NCYCL) GO TO 90
0935      IF(SUMR.LT.0.1E 60) GO TO 85
0936      WRITE(3,120)IT,SUMR
0937      WRITE(3,121)(SXX(I,1),SYY(I,1),I=1,NNODE)
0938      CALL WRITER(NNODE,NELEM,1,IPUNCH)
0939      STOP
0940      85 WRITE(3,119) IT,SUMR
0941      NCYCL=NCYCL+INTER
0942      IF(NF.EQ.0) GO TO 90
0943      DO 89 I=1,NF
0944      K=NBP(I)
0945      IF(BPX(K)) GO TO 87
0946      IF(DXMAX(I).EQ.0.0) GO TO 87
0947      IF (UX(K)+UTX(K).LT.DXMAX(I)) GO TO 87
0948      UX(K)=DXMAX(I)-UTX(K)
0949      BPX(K)=.TRUE.
0950      87 IF(BPY(K)) GO TO 87
0951      IF(DYMAX(I).EQ.0.0) GO TO 89
0952      IF(UY(K)+UTY(K).LT.DYMAX(I)) GO TO 89
0953      UY(K)=DYMAX(I)-UTY(K)
0954      BPY(K)=.TRUE.
0955      89 CONTINUE
0956      90 CONTINUE
0957      WRITE(3,112)
0958      112 FORMAT(1H0,'MAXIMO DE ITERACIONES COMPLETADO SIN CONVERGENCIA')
0959      119 FORMAT(1H0,I4,2X,21HITERACIONES COMPLETAS,4X,
0960      121HTOTAL ERROR ACTUAL = ,E15.6)
0961      120 FORMAT('0','CONVERGENCIA PERDIDA', 'IT=',I5,'SUMR=',E20.5)
0962      121 FORMAT(' ',2E30.5)
0963      130 WRITE(3,119)IT,SUMR
0964      RETURN
0965      END
0966 C *****
0967 C ***** SUBROUTINA WRITER *****
0968 C *****
0969 SUBROUTINE WRITER(NNODE,NELEM,IWRITE,IPUNCH)
0970 IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
0971 LOGICAL*1 BPX,BPY,PLAST
0972 INTEGER*2 NOD,NBP,NB,NF,NAP,NLAST
0973 REAL*4 UTX,UTY
0974 DIMENSION S1(2),S2(2),THETA(2)
0975 COMMON SXX(450,9),SXY(450,9),SYX(450,9),SYY(450,9),
0976 13(6,6),F(6),T(3,6),E(3,3),ERT(3,3),TP(3,6),XORD(450),
0977 2YORD(450),E1(20),E2(20),TXY(20),ANIE(20),R(3,3),STD(3)
0978 3,PR1(20),PR2(20),GE(20),CX(20),CY(20),TX(20),TY(20),
0979 4STX(900,6),X(3),Y(3),UX(450),UY(450),FX(450),FY(450),
0980 5DXMAX(100),DYMAX(100),GRSIG(2),DELSIG(3),DELEPS(3),V2
0981 6,UTX(450),UTY(450),LL(3),INDSTR,NBP(100),NB(100),

```



```

0982      7NLAST(20),NAP(450),NP(450,7),NOD(900,3),BFX(450),
0983      BFPY(450),PLAST(900)
0984      WRITE(3,100)
0985      DO 6 I=1,NELEM
0986      DO 4 L=1,2
0987      K=0
0988      IF(L.EQ.2) K=3
0989      S3=STX(I,K+3)/L
0990      CENT=0.5*(STX(I,K+1)+STX(I,K+2))
0991      XDIF=0.5*(STX(I,K+1)-STX(I,K+2))
0992      TMAX=DSQRT(XDIF*XDIF+S3*S3)
0993      S1(L)=CENT+TMAX
0994      S2(L)=CENT-TMAX
0995      THETA(L)=28.647889*DARSIN(S3/TMAX)
0996      IF(STX(I,K+2).LT.STX(I,K+1)) GO TO 4
0997      TEMP=90.0
0998      IF(S3.LT.0.0) TEMP=-90.0
0999      THETA(L)=TEMP-THETA(L)
1000      4 CONTINUE
1001      WRITE(3,119)I,(NOD(I,J),J=1,3),(STX(I,J),J=1,3),(S1(L),
1002      S2(L),THETA(L),L=1,2)
1003      6 CONTINUE
1004      150 WRITE(3,113)
1005      DO 140 I=1,NNODE
1006      SUMX=-FX(I)
1007      SUMY=-FY(I)
1008      L=NAP(I)
1009      DO 3 J=1,L
1010      K=NP(I,J)
1011      SUMX=SUMX+SXX(I,J)*UX(K)+SXY(I,J)*UY(K)
1012      3 SUMY=SUMY+SYX(I,J)*UX(K)+SYY(I,J)*UY(K)
1013      IF(IWRITE.EQ.0) GO TO 139
1014      WRITE(3,115)I,XORD(I),YORD(I),FX(I),FY(I),UTX(I),UTY(I)
1015      1,SUMX,SUMY
1016      GO TO 140
1017      139 WRITE(3,115)I,XORD(I),YORD(I),FX(I),FY(I),UX(I),UY(I)
1018      1,SUMX,SUMY
1019      140 CONTINUE
1020      100 FORMAT('1','ELEM',3X,'I',3X,'J',3X,'K',9X,'SIG-X',
1021      17X,'SIG-Y',6X,'SIG-XY',7X,'SIG-1',7X,'SIG-3',7X,
1022      2'THETA',7X,'EPS-1',7X,'EPS-3',7X,'THETA')
1023      113 FORMAT('1','NODE',11X,'XORD',11X,'YORD',13X,'FX',
1024      113X,'FY',13X,'UX',13X,'UY',13X,'RX',13X,'RY')
1025      115 FORMAT(' ',14,8F15.6)
1026      119 FORMAT(' ',4I4,2X,6F12.2,2F12.8,F12.2)
1027      RETURN
1028      END
*END PRINT

```

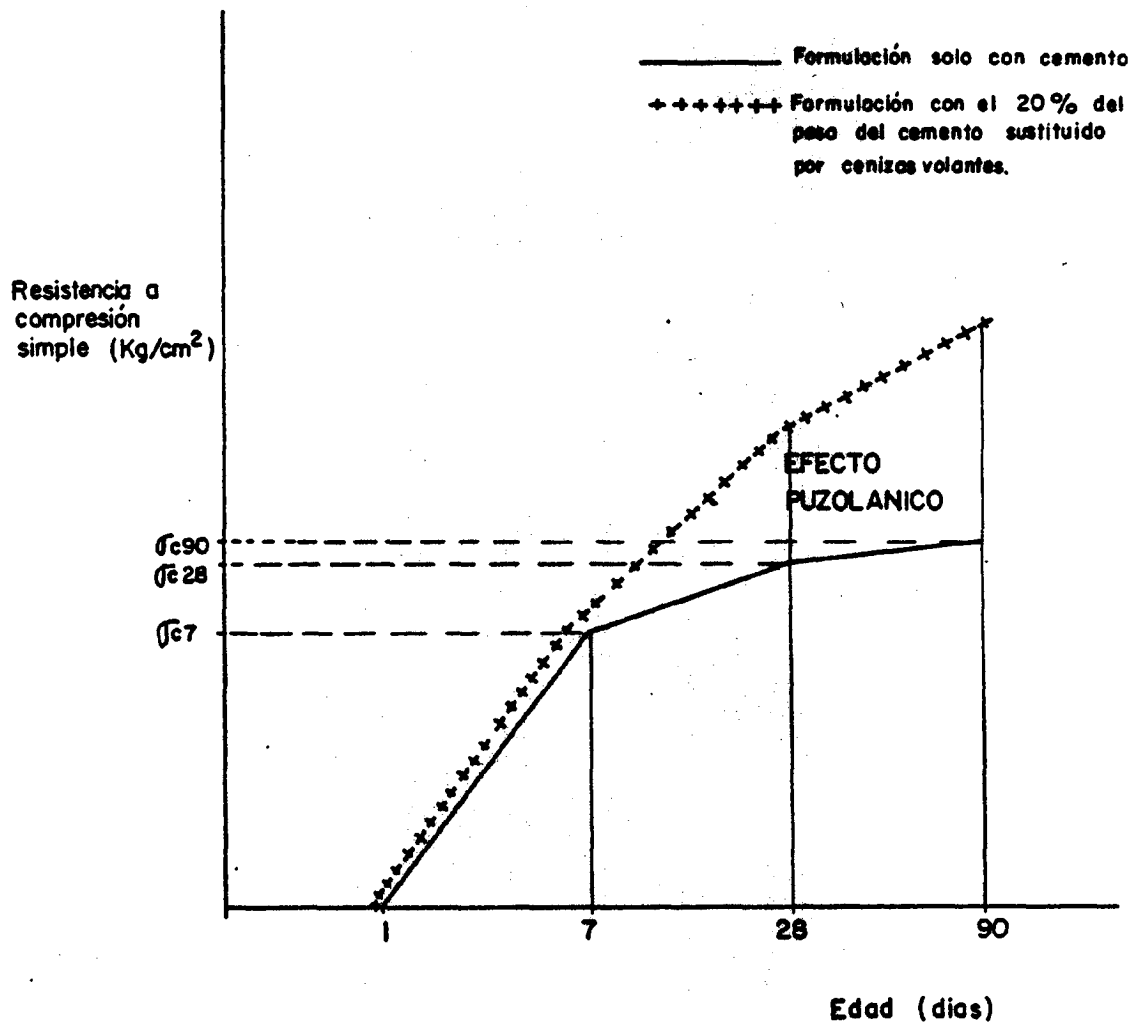


Fig. N<sup>o</sup> 12.- EFECTO PUZOLANICO

### **3.- TRABAJOS REALIZADOS**

En los apartados siguientes describiremos los trabajos realizados que se refieren a: recopilación bibliográfica, elección de componentes, ensayos previos, resultados de las formulaciones y análisis del modelo geomecánico.

#### **3.1. RECOPIACION BIBLIOGRAFICA**

Como base para iniciar este trabajo de investigación se ha efectuado una extensa recopilación bibliográfica de la literatura, nacional y extranjera, existente sobre el tema. Entre los trabajos de más interés que hemos estudiado hay que destacar el Simposio sobre "Aplicación de la Mecánica de Rocas a la minería del corte y relleno" que, organizado, por la Universidad de Lulea (Suecia) se celebró a primeros de Junio de 1980. La calidad y actualidad de los trabajos presentados ha sido una base muy importante para el progreso de esta investigación. La tesis doctoral de DALH (1969) presentada en la Pennsylvania State University ha permitido la utilización de un programa de elementos finitos que, al considerar el estado de plasticidad, resulta especialmente idóneo para tratar los rellenos consolidables. También merecen

destacarse los numerosos informes correspondientes a los trabajos que ha financiado el U.S. Bureau of Mines en su centro de investigación de Spokane que han facilitado enormemente la definición de las formulaciones a investigar.

### 3.2. CARACTERISTICAS DE LAS MATERIAS PRIMAS

Una vez definidas las líneas maestras de la investigación los primeros trabajos se dirigieron a caracterizar los distintos componentes que iban a formar parte de las formulaciones para poder tener una base firme de fiabilidad que permita extrapolar los resultados obtenidos.

#### 3.2.1 Estériles

El primer problema que se plantea es que los estériles de la minería del carbón presentan una cierta inhomogeneidad en cuanto a su composición química y granulometría. La falta de homogeneidad no es muy acusada en lo que se refiere a su composición química, GONZALEZ-CANIBANO (1981), lo cual es lógico ya que estos materiales están compuestos en su totalidad de rocas encajantes de las capas del carbonífero asturiano que

son de similar composición a escala de una mina. El problema es más grave por lo que se refiere a la granulometría ya que es muy variable de unas a otras conforme se ha puesto en evidencia en estudios anteriores realizados por el IGME (1980). En el caso de los lavaderos la granulometría de los estériles disponibles no presenta grandes variaciones ya que por un lado los procesos de lavado son bastante homogéneos y, por otro, solo se ha empleado la fracción correspondiente al lavado de los menudos.

Para clasificar los estériles se empleará el tamaño máximo del árido y el porcentaje de arenas que contienen.

El tamaño máximo influye sobre la trabajabilidad del hormigón que será tanto mejor cuanto menor sea la dimensión del tamaño máximo del árido.

El contenido de arenas, que es la fracción comprendida entre 0 y 5 mm, debe ser conocida ya que debe variar entre estrechos límites si se quiere que el hormigón sea manejable, compacto y duradero. Un exceso de arena supondría un grave problema ya que para corregirlo sería necesario realizar un cribado con el consiguiente aumento de costes. En caso de defec

to de arena es conveniente y posible su corrección. Conveniente por las razones que se han dado. Posible porque pueden completarse los finos que faltan con cenizas volantes que son un producto de deshecho, cuyo almacenamiento crea graves problemas, y que están disponibles a bajo coste en la región asturiana.

Dado que el tamaño máximo no tiene sentido real en la granulometría de una escombrera se ha sustituido, a efectos prácticos, por el tamaño medio del huso granulométrico que corresponde al tamiz que deja pasar el 90% del material. Con esta modificación y la definición de la proporción de arena que se ha dado antes se han clasificado los estériles de las cinco escombreras asturianas que reúnen las mejores características para ser aprovechadas, IGME (1981), y de los cinco lavaderos más significativos de HUNOSA obteniéndose los resultados que se indican en el cuadro N° 8.

Analizando los datos contenidos en el cuadro N° 8 los estériles estudiados pueden clasificarse en los tres grupos que se indican en el cuadro N° 9.

PROCEDENCIA DE LOS ESTERILES	T.M. (*) (m.m.)	CONTENIDO EN ARENA %
ESCOBRERA DE S. INOCENCIO	50	30
ESCOBRERA DE ESKAR	50	30
ESCOBRERA DE REICASTRO	30	42
ESCOBRERA DE MORGAO	30	42
ESCOBRERA DE LADA	30	42
LAVADERO DE CANDIN	10	60
LAVADERO DE MODESTA	10	60
LAVADERO DE SOVILLA	10	60
LAVADERO DE TURON	10	60
LAVADERO DE MIERES	10	60

(\*) T.M.: Tamaño medio del intervalo definido en el huso para el 90% del material que pasa.

Cuadro Nº 8 CARACTERISTICAS DE ALGUNOS ESTERILES DE LA MINERIA  
ASTURIANA DEL CARBON

PROCEDENCIA	T.M. (mm.)	CONTENIDO EN ARENA
ESCOBRERAS A	50	30
ESCOBRERAS B	30	42
MENUDOS DE LAVADERO	10	60

Cuadro Nº 9 CLASIFICACION DE LOS ESTERILES PARA FABRICAR  
RELLENOS CONSOLIDABLES

### 3.2.2 Conglomerantes

A la vista de los condicionantes económicos y de trabajo que han de cumplir los rellenos consolidables se han definido dos materiales conglomerantes: uno principal y otro secundario. El conglomerante principal es el que debe dar la resistencia al relleno; pero, como la dosificación de cemento debe ser lo más baja posible para que el relleno sea económico, es necesario que se complemente con otro conglomerante secundario que permita dar a la mezcla el grado deseado de trabajabilidad.

Como conglomerante principal se ha empleado cemento Portland P-450 ARI que permite obtener una alta resistencia inicial. Este cemento se encuentra habitualmente en el mercado y no existen problemas de suministro.

Como conglomerante secundario se han empleado cenizas volantes de central térmica que, además de ejercer un papel sustitutivo de las arenas, realizan una función importante debido a sus propiedades hidráulicas o puzolánicas y, por consiguiente, contribuyen a aumentar la resistencia mecánica de los hormigones.



A continuación trataremos con detalle las características más importantes de las cenizas volantes.

### 3.2.3 Cenizas volantes

Las cenizas volantes se producen en las centrales térmicas por la combustión del carbón en una proporción que puede variar entre el 5 y el 50% del carbón quemado. Este porcentaje puede variar, así como las propiedades físicas y químicas de las cenizas, en función del origen y naturaleza del carbón, su grado de molienda, el proceso de combustión y el sistema de recogida de las partículas finas. Por todo ello de una central térmica a otra se presentarán sensibles variaciones en las características de las cenizas volantes. Las centrales que quemen lignitos darán lugar a cenizas cálcicas que actuarán como conglomerantes hidráulicos y cuando se quemen hullas las cenizas tendrán carácter ácido y serán capaces de reaccionar con el hidróxido de cal para dar un conglomerado puzolánico.

Si el carbón a quemar es de grano grueso apenas se producirán cenizas volantes, que alcanzarán una proporción elevada en el caso de carbón finamente pulverizado.

A pesar de todas estas circunstancias cuando una central térmica determinada quema carbones de la misma procedencia, las cenizas que produce presentan pocas variaciones y se pueden considerar de características homogéneas.

Las cenizas tienen los mismos componentes que tenía el carbón de que proceden, a excepción del carbono y el agua, que en general son: carbonato de calcio, hierro y magnesio, cuarzo, compuestos arcillosos y sulfuros de hierro.

Algunos de estos compuestos, como los carbonatos, pueden transformarse en el proceso de combustión donde, además, las partículas de sílice se funden dando lugar a pequeñas esferas de aspecto vítreo que tienen cierta porosidad.

En el cuadro N<sup>o</sup> 10 se muestra la composición media de las cenizas volantes producidas en las principales térmicas españolas.

COMPONENTES PROCEDENCIA	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	Sin dosi- ficar	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	P.R.C
	ALMERIA	43,7	31,6	13,9	4,6	1,0	1,6	---	1,6	---	---	---
BADALONA	44,2	18,9	11,5	---	1,1	3,4	0,5	---	---	---	---	0,8
BADALONA	50,2	28,8	9,4	3,4	1,7	2,2	---	4,2	---	---	---	---
BURCEÑA	39,4	26,7	11,7	5,3	2,1	0,4	---	4,8	---	---	---	9,5
CADIZ	43,7	31,6	13,9	4,6	1,0	1,6	---	1,6	---	---	---	3,0
COMPOSTILLA II	44,4	24,2	8,8	7,3	2,4	2,6	3,3	---	---	---	---	9,0
ENSIDESA	37,6	25,5	27,9	5,9	1,1	0,9	---	---	---	---	---	1,1
ENSIDESA	51,4	30,3	9,9	2,2	1,6	0,3	---	---	0,3	0,2	---	3,0
ENSIDESA	47,1	29,6	9,1	0,9	1,4	0,7	2,6	---	---	0,1	0,1	7,3
ESCATRON	39,0	28,7	24,9	5,3	0,6	0,9	0,4	---	---	0,4	---	0,2
FIGOLS	46,4	11,6	19,7	---	1,4	2,3	0,1	---	---	---	---	0,1
FIGOLS	46,0	21,1	8,6	---	1,4	2,6	0,2	---	---	---	---	0,7
GUARDO	44,8	24,2	8,8	7,3	2,4	2,6	3,3	---	---	---	---	9,0
MALAGA	43,7	31,6	13,9	4,6	1,0	1,6	---	1,6	---	---	---	3,0
PUERTOLLANO	46,9	34,8	11,0	4,1	1,5	---	0,8	0,4	---	---	---	---
SOTO DE RIBERA	50,3	31,7	7,7	---	2,1	0,6	3,5	---	---	---	---	4,6
SOTO DE RIBERA	49,6	31,0	7,6	---	2,0	---	3,1	---	---	---	---	2,2
UJO	36,4	24,8	18,1	11,3	2,9	3,0	0,5	---	---	---	---	33,8

Cuadro Nº 10 COMPOSICION MEDIA DE LAS CENIZAS VOLANTES EN ESPAÑA

Fundamentalmente las cenizas volantes se caracterizan por ser un subproducto que, pese a sus numerosas aplicaciones potenciales, en el momento actual ofrece importantes problemas de almacenamiento. Desde el punto de vista de la fabricación de rellenos consolidables interesan, sobre todo, sus propiedades hidráulicas y puzolánicas que exponemos a continuación.

### 3.2.3.1 Propiedades hidráulicas de las cenizas volantes

Se dice que un material presenta propiedades hidráulicas si en presencia de agua tiene la posibilidad de fraguar o endurecerse. Las cenizas volantes que tienen un contenido en cal superior al 40% presentan propiedades hidráulicas. Esta cal, en presencia de la sílice y la alúmina, produce silicatos y aluminatos cálcicos que son los que permiten el fraguado. Se define como Índice de Hidraulicidad de una ceniza volante a la relación:

$$I = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO} \quad (71)$$

Donde cada formula significa la proporción del compuesto que representa. A la relación inversa de I se la denomina Módulo Hidráulico. Unas cenizas volantes presentan un buen comportamiento hidráulico si su Índice de Hidraulicidad está comprendido entre 0,15 y 0,40. En la literatura soviética se sustituyen los óxidos de hierro por los álcalis resultando para el Módulo Hidráulico la expresión

$$M = \frac{CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + Al_2O_3} \quad (72)$$

En este caso para que las cenizas volantes tengan buenas propiedades hidráulicas M debe estar comprendido entre 0,10 y 0,15.

En el caso concreto de esta investigación, al tratarse de cenizas volantes procedentes de la combustión de la hulla, las propiedades hidráulicas de estos materiales son bastante débiles.

### 3.2.3.2 Efecto puzolánico de las cenizas volantes

Cuando un material es capaz de reaccionar, formando compuestos hidráulicos, en presencia de agua y de la cal liberada en la hidratación del cemento y a temperatura ambiente se dice de él que tiene propiedades puzolánicas.

Esto exige que las cenizas tengan proporciones elevadas de sílice y alúmina. Como medida de la actividad puzolánica puede emplearse el Módulo de Hidraulicidad definido por (72) ya que el efecto puzolánico puede considerarse inverso del efecto hidráulico.

El efecto hidráulico produce un aumento de la resistencia a corto plazo, fraguado, mientras que el puzolánico incrementa la resistencia a largo plazo. Esto está gráficamente expresado en la figura N° 12.

De acuerdo con lo anterior las cenizas volantes empleadas en esta investigación, que provienen de las centrales de LADA y SOTO DE RIBERA, presentan un elevado efecto puzolánico.

#### 3.2.4 Acelerantes de fraguado

Como es preciso, en esta investigación, lograr la mayor resistencia posible del hormigón a corto plazo se han empleado aceleradores de fraguado. Los acelerantes de fraguado deben ser solubles en el agua de amasado para que se distribuya homogéneamente, deben ser fáciles de manejar y ha de resultar económico. El producto más empleado para estos fines es el cloruro cálcico que, además de ser un acelerador del fraguado, es un plastificante y, por lo tanto, para obtener una docilidad dada puede reducir la relación agua/cemento con la consiguiente mejora de la resistencia mecánica y calidad del hormigón. La única objeción sería que puede achacarse al cloruro cálcico es su posible acción corrosiva sobre las armaduras del hormigón; pero, en nuestro caso esto no supone ningún problema ya que en la utilización de estos materiales como rellenos consolidables a corto plazo no puede existir ningún problema serio de corrosión. Hay que tener presente que el cloruro cálcico puede actuar tanto como retardador como de acelerador según la proporción en que esté presente. En el caso de que se quiera emplear como acelerador la proporción que resulta más adecuada resulta ser el 3% del peso de cemento de acuerdo

con las figuras 13 y 14 que corresponden a investigaciones realizadas por el Instituto Eduardo Torroja. El cloruro cálcico a que se refieren estas investigaciones es químicamente puro; pero, en las aplicaciones reales se suele emplear cloruro cálcico comercial que tiene un contenido en  $\text{Cl}_2\text{Ca}$  comprendido entre el 70 y 80% circunstancia que debe tenerse en cuenta a la hora de realizar una formulación.

Además del cloruro cálcico se han empleado otros compuestos como aceleradores de fraguado como el sulfato potásico y compuestos comerciales específicos para este fin.

El sulfato potásico se ha empleado combinado con el sulfato cálcico que tiene buenas propiedades hidráulicas y es un subproducto de la industria. Ambos compuestos se emplean en minería para la fabricación de muros de protección de las galerías frente a las presiones generadas en el avance de los tajos, con un éxito notable.

También se ha empleado el ISOCRET que es un aditivo para el hormigón proyectado con propiedades acelerantes, impermeabilizantes, adherentes, plastifi



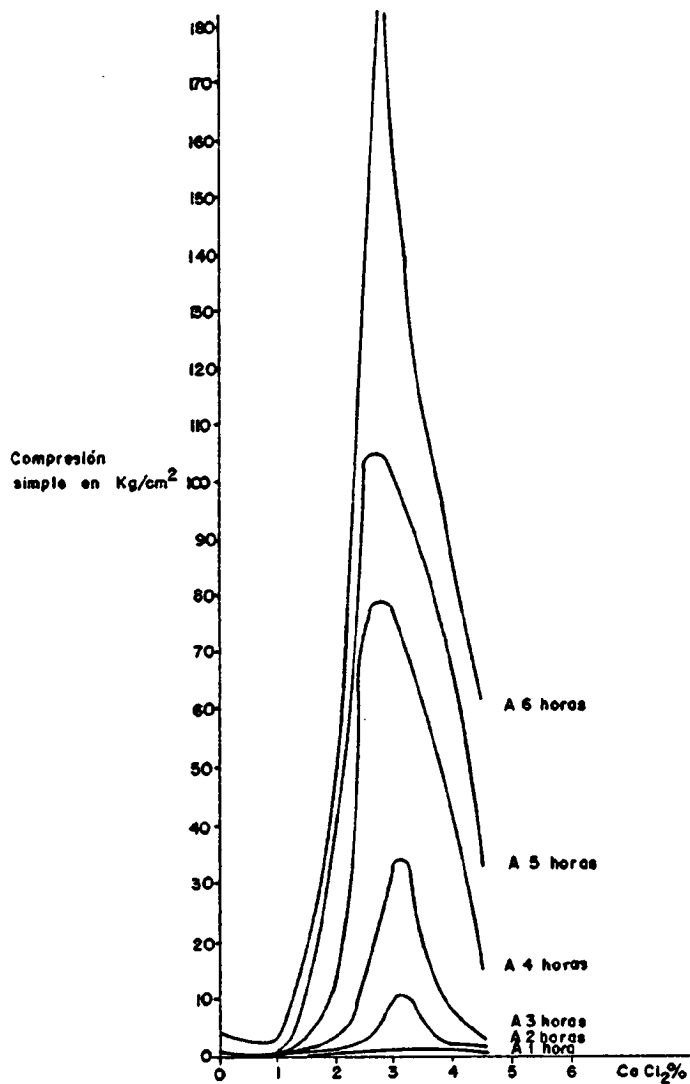


Fig. Nº 13.- RESISTENCIAS A LA COMPRESION, A CORTO PLAZO, EN FUNCION DEL TANTO POR CIENTO DE CLORURO CALCICO CON RELACION AL PESO DEL CEMENTO. CURADO AL AIRE.

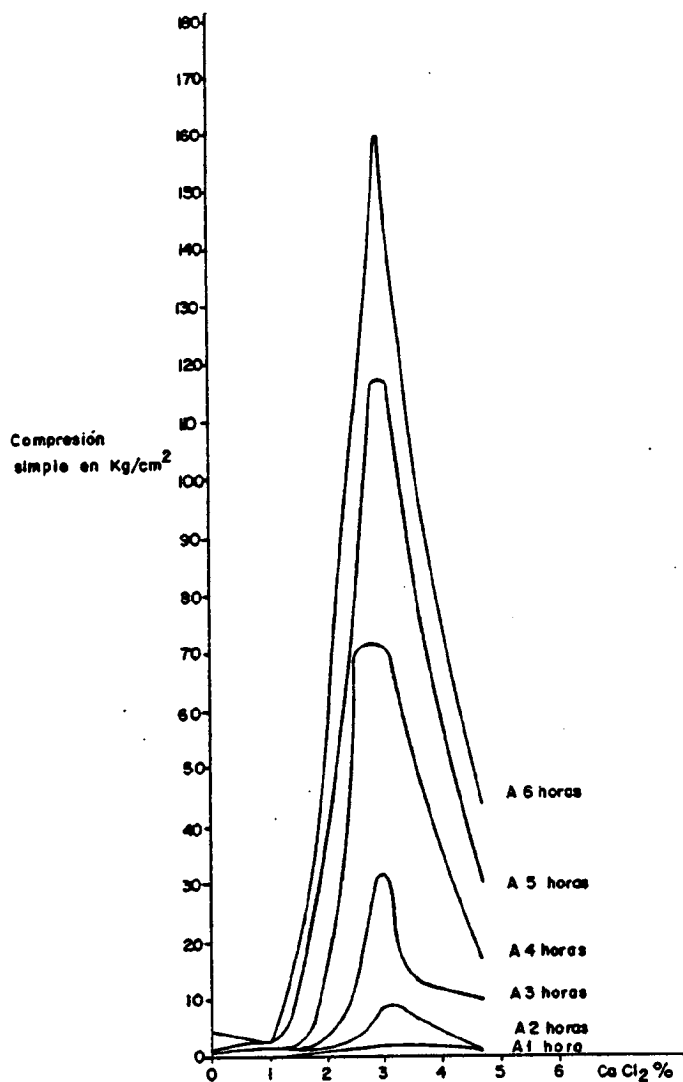


Fig. N<sup>o</sup> 14.- RESISTENCIAS A LA COMPRESION, A CORTO PLAZO, EN FUNCION DEL TANTO POR CIENTO DE CLORURO CALCICO CON RELACION AL PESO DEL CEMENTO. CURADO EN CAMARA HUMEDA.

cantes y cohesionantes. El ISOCRET es un polvo blanco con densidad de 750 gr/litro que se utiliza en proporciones comprendidas entre el 3 y 5% del peso del cemento, con lo cual en las aplicaciones normales se consigue que el fraguado se inicie al cabo de 2 a 4 minutos. el ISOCRET puede ser aplicado tambien por vía líquida doblando en este caso las proporciones a emplear.

### 3.3. ENSAYOS PREVIOS

Dado que para lograr un buen hormigón es necesario tener un buen mortero, una vez establecidos los materiales para la fabricación de los rellenos consolidables, los primeros esfuerzos se han dedicado a definir las características del mortero adecuado. Para ello se han efectuado diez masas con distintas mezclas de cenizas-cemento y cenizas-cal añadiéndoles, a dos de ellas, cloruro cálcico en la proporción del 2% del peso del cemento. Las cenizas volantes procedían de las centrales térmicas de LADA y SOTO DE RIBERA en Oviedo. De cada masa se han fabricado nueve probetas prismáticas, de dimensiones 4x4x16 cm, que se han roto a la edad de 3,7 y 28 días.

los resultados medios obtenidos para cada formulación han sido los siguientes:

CENIZAS DE LA TERMICA DE SOTO DE RIVERA

Formulación 1: cenizas/cemento = 30/1; Agua 29,1% sobre la mezcla

EDAD DE ROTURA	RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE
3 dias	4,4 Kg cm <sup>2</sup>
7 dias	7,9 Kg cm <sup>2</sup>
28 dias	20,6 Kg cm <sup>2</sup>

Formulación 2: cenizas/cemento = 30/1; Agua = 29,1% sobre la mezcla, Cloruro cálcico : 2% del peso del cemento

EDAD DE ROTURA	RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE
3 dias	5,3 Kg cm <sup>2</sup>
7 dias	9,0 Kg cm <sup>2</sup>
28 dias	28,5 Kg cm <sup>2</sup>

Formulación 3: cenizas/cemento = 60/1; Agua = 29,6% sobre la mezcla

EDAD DE ROTURA	RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE
3 dias	3,1 Kg cm <sup>2</sup>
7 dias	5,0 Kg cm <sup>2</sup>
28 dias	10,4 Kg cm <sup>2</sup>

Formulación 4: ceniza/cal = 30/1; Agua = 30,1% sobre la mezcla

EDAD DE ROTURA	RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE
3 dias	2,6 Kg cm <sup>2</sup>
7 dias	3,1 Kg/cm <sup>2</sup>
28 dias	7,2 Kg/cm <sup>2</sup>

Formulación 5 : Ceniza/cal = 60/1; Agua = 30,6% sobre la mezcla

EDAD DE ROTURA	RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE
3 dias	1,6 Kg/cm <sup>2</sup>
7 dias	2,0 Kg/cm <sup>2</sup>
28 dias	4,6 Kg/cm <sup>2</sup>

CENIZAS DE LA TERMICA DE LADA

Formulación 1 bis : Cenizas cemento = 30/1; Agua = 38,9% so  
bre la mezcla.

EDAD DE ROTURA	RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE
3 dias	1,9 Kg/cm <sup>2</sup>
7 dias	3,6 Kg/cm <sup>2</sup>
28 dias	10,7 Kg/cm <sup>2</sup>

Formulación 2 bis : Cenizas/cemento = 30/1; Agua = 38,9% so  
bre la mezcla

Cloruro Cálcico = 2% del peso del cemento

EDAD DE ROTURA	RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE
3 dias	2,7 Kg/cm <sup>2</sup>
7 dias	4,5 Kg/cm <sup>2</sup>
28 dias	7,3 Kg/cm <sup>2</sup>

Formulación 3 bis : Cenizas cemento = 60/1, Agua = 39,6% so  
bre la mezcla

EDAD DE ROTURA	RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE
3 dias	1,5 Kg/cm <sup>2</sup>
7 dias	2,6 Kg/cm <sup>2</sup>
28 dias	8,6 Kg/cm <sup>2</sup>

Formulación 4 bis : Cenizas/cal = 30/1; Agua = 39,8% sobre la mezcla

EDAD DE ROTURA	RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE
3 dias	1,5 Kg/cm <sup>2</sup>
7 dias	2,3 Kg/cm <sup>2</sup>
28 dias	4,7 Kg/cm <sup>2</sup>

Formulación 5 bis : Cenizas/cal = 60/1; Agua = 40,4% sobre la mezcla

EDAD DE ROTURA	RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE
3 dias	1,4 Kg/cm <sup>2</sup>
7 dias	2,2 Kg/cm <sup>2</sup>
28 dias	3,9 Kg/cm <sup>2</sup>



A la vista de estos resultados es posible establecer las siguientes conclusiones

- \* Las formulaciones que incluyen las cenizas de LADA dan unas resistencias, a muy corto plazo, sensiblemente inferiores a las homólogas fabricadas con cenizas de SOTO DE RIBERA. Aunque las relaciones Agua/cemento han sido algo superiores en el caso de las cenizas de LADA es lógico suponer que las formulaciones en las que se incluyen cenizas de SOTO DE RIBERA darán siempre mayor resistencia a corto plazo.
- \* En las siguientes fases de la investigación se emplearán exclusivamente cenizas de LADA que representan la condición más desfavorable.
- \* Las propiedades hidráulicas de las cenizas volantes, mejoradas con cal, son sensiblemente inferiores que las de la mezcla cenizas-cemento.
- \* Las propiedades resistentes de los morteros obtenidos con proporciones de cenizas/cemento = 30/1 son sensiblemente mejores que las obtenidas con la proporción cenizas/cemento = 60/1.

- \* la presencia de cloruro cálcico, en la proporción del 2% del peso de cemento, ejerce una influencia positiva sobre la resistencia a compresión simple del mortero a corto plazo.

De acuerdo con estas conclusiones previas se preparó una formulación de hormigón patrón con los siguientes componentes:

- CENIZAS DE LADA ..... 800 Kg/m<sup>3</sup>
- CEMENTO P-450 ..... 27 Kg/m<sup>3</sup>
- ARIDO CALIZO SIN CRIBAR CON  
TAMAÑO MAXIMO DE 40 mm. .... 1.200 Kg/m<sup>3</sup>
- AGUA ..... 392 litros/m<sup>3</sup>

Con esta composición se elaboró una masa de 20 litros con la que se fabricaron tres probetas cilíndricas, de 15 x 30 cm, que tras ser curadas en una cámara húmeda a una temperatura de 20 ± 2°C se sometieron a ensayos de compresión simple con los resultados que se muestran en el cuadro N° 10 bis.

EDAD DE ROTURA	RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE
3 dias	1,1 Kg/cm <sup>2</sup>
7 dias	1,7 Kg/cm <sup>2</sup>
28 dias	7,9 Kg/cm <sup>2</sup>

Cuadro N° 10 bis RESISTENCIAS OBTENIDAS CON LA FORMULACION TIPO

Estos resultados en principio son satisfactorios ya que según se ha indicado en el apartado 1.2.2 en los talleres con relleno colgado las presiones habituales sobre la tela son bastante inferiores a los 1,7 Kg/cm<sup>2</sup> que soporta el hormi<sub>g</sub>ón de la formulación tipo. Por otro lado ya hemos indicado que, según HILL (1975) un relleno de calidad debiera tener una resistencia a compresión simple, a los siete días, de 1,68 Kg/cm<sup>2</sup>.

En las siguientes fases de la investigación se han con<sub>f</sub>ccionado nuevas formulaciones empleando los estériles de mina y cenizas de LADA, a partir de la formulación patrón, para tratar de optimizar esta tanto desde un punto de vista técnico como económico. Los resultados obtenidos son los que se exponen a continuación.

### 3.4. OPTIMIZACION DE LA FORMULACION TIPO

La formulación tipo establecida en los ensayos previos ha servido de base para realizar una extensa investigación que ha permitido determinar la composición idónea de un relleno consolidable empleando los estériles de la minería del carbón. Dado que en el apartado 3.2.1 se han clasificado los estériles de la minería del carbón en tres grandes grupos, en esta fase de la investigación se han realizado 18 formulaciones válidas de las que tres corresponden a los estériles de escombrera de tipo A, ocho a los estériles de escombreras de tipo B y siete a los menudos de lavadero.

La composición de las formulaciones investigadas no difiere sustancialmente de la formulación de tipo por lo que se refiere a la cantidad de cemento; pero las cenizas volantes al jugar, fundamentalmente, el papel corrector del déficit de arena están muy relacionadas con la granulometría de los estériles disponibles. En cualquier caso para cada tipo de estériles se han elaborado las formulaciones que se han considerado necesarias para lograr unos resultados satisfactorios.

Dada la gran influencia que tiene la granulometría de los estériles las conclusiones de los ensayos realizados se han clasificado en dos grandes grupos: el primero se refiere a las conclusiones que se han obtenido para cada uno de los tres tipos de estériles; mientras que en el segundo

se han recogido las conclusiones que tienen un carácter más general.

### 3.4.1 Conclusiones particulares

De cada formulación, además de controlar su composición, se ha determinado la consistencia mediante el cono de Abrams y se han confeccionado probetas para efectuar ensayos de compresión simple y de corte. Se ha determinado el peso de cada probeta para calcular la densidad aparente de cada una.

Los gráficos de los ensayos de compresión simple se incluyen en el Anejo II; mientras que los correspondientes a los ensayos de corte se encuentran en el Anejo I.

Se ha efectuado un análisis estadístico de los resultados de las determinaciones del peso y densidad de las probetas y de los ensayos de compresión simple, obteniéndose unos coeficientes de variación que, en general, son muy buenos e indican que la confección de las masas y probetas es homogénea y que se ha seguido una metodología de ensayo correcta.

Por lo que se refiere a los ensayos de corte hay que señalar que se han efectuado bajo tensiones normales de  $\sigma_c/3$  ;  $\sigma_c/2$  y  $\sigma_c$  reteniéndose en cada

caso el valor de la resistencia al corte residual. Con los pares de valores (  $\sigma$  ,  $\tau$  ) representativos de los estados de rotura se ha hecho un ajuste lineal por mínimos cuadrados a fin de estimar el ángulo de rozamiento interno y la cohesión aparente. Como se ha trabajado con la resistencia al corte residual que, lógicamente, dentro del campo de variación de la tensión normal permanece constante; resulta que en la gran mayoría de los casos cuando aumenta la cohesión por efecto del fraguado disminuye el ángulo de rozamiento interno.

A continuación se presentan los resultados obtenidos con las formulaciones realizadas, que se han agrupado según el tipo de estéril empleado de acuerdo con lo definido en el apartado 3.2.1.

Se ha considerado como formulación idónea en cada caso, la que ha dado mayor resistencia a compresión simple a 1 día.

#### **3.4.1.1 Estériles de escombrera de tipo A**

Se han realizado tres formulaciones con estériles que proceden de escombreras de tipo A,

que se han denominado F-6, F-7 y F-1B. Las características de cada una de ellas y los resultados de los ensayos efectuados se muestran en los cuadros 11, 12 y 13 respectivamente.

Las máximas resistencias las proporciona la formulación F-7, cuadro N° 12, que con un 10% de cloruro cálcico,  $300 \text{ Kg/m}^3$  de cenizas volantes, relaciones Arena/cemento = 30/1 y Agua/cemento = 11,3 da resistencias a compresión simple de  $2,25 \text{ Kg/cm}^2$  a 1 día y de  $3,35 \text{ Kg/cm}^2$  a 7 días. Estos resultados superan ampliamente a los obtenidos con la formulación tipo y deben de considerarse como muy satisfactorios. El coste de los materiales empleados en la confección de esta formulación cemento y cloruro cálcico asciende a  $273 \text{ Pts/m}^3$ .

#### 3.4.1.2 Estériles de escombreras de tipo B

Se han realizado ocho formulaciones con estériles que habían sido clasificados como procedentes de escombreras de tipo B, corresponden a las denominaciones F-3; F-8; F-9; T-2; T - 1B ;

FECHA : 30.7.81

TIPO ESTERIL : ESCOMBRERA A

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{30}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 10,6$$

CLORURO CALCICO : 4 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	30
AGUA	160
CENIZAS	300
CLORURO CALCICO	1,2

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7 d.	28 d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	11.030	2,08	1,47			
	2	11.090	2,09	1,31			
	3	11.006	2,08	1,43			
	4	11.185	2,11	1,42			
	5	11.022	2,08	1,34			
	6	10.990	2,07		1,94		
	7	11.170	2,11		2,21		
	8	10.956	2,09		2,07		
	9	10.600	2,00			3,56	
	10	10.675	2,01			3,60	
	11	10.763	2,03			3,65	
	12	10.152	1,91				4,19
	13	10.323	1,95				4,03
	14	10.386	1,96				
	$\bar{x}$	10.810	2,04	1,39	2,07	3,60	4,11
	$\sigma_{n-1}$	333,8	0,064	0,066	0,135	0,045	0,113
	$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$	3,1	3,1	4,8	6,5	1,2	2,7

	EDAD	RESULTADOS	
		C' (kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,92	45
	1 d.	0,75	50
	7 d.		

CUADRO Nº 11

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION F - 6



FECHA : 3.8.81

TIPO ESTERIL : ESCOMBRERA A

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{30}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 11,3$$

COLORURO CALCICO : 10 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	30
AGUA	180
CENIZAS	300
COLORURO CALCICO	3

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28 d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	11.040	2,08	1,59			
	2	10.940	2,06	1,65			
	3	10.820	2,04	1,44			
	4	10.940	2,06	1,54			
	5	11.100	2,09	1,68			
	6	10.908	2,06		2,36		
	7	10.908	2,06		2,31		
	8	10.889	2,05		2,08		
	9	10.420	1,96			3,23	
	10	10.805	2,04			3,27	
	11	10.565	1,99			3,55	
	12	10.632	2,00				4,26
	13	10.647	2,01				4,35
	14	10.548	1,99				
	$\bar{x}$	10.797	2,03	1,58	2,25	3,35	4,30
	$\sigma_{n-1}$	202	0,038	0,09	0,149	0,14	0,06
	$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$	1,9	1,9	6,0	6,6	4,2	1,4

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,73	51
	1 d.	0,76	50
	7 d.		

CUADRO Nº 12

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION F - 7 140.

FECHA : 19.8.81

TIPO ESTERIL : ESCOMBRERA A

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{30}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 6,7$$

CLORURO CALCICO : 8 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	30
AGUA	130
CENIZAS	300
CLORURO CALCICO	2,4

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	9.768	1,84	1,16			
	2	9.926	1,87	1,43			
	3	9.997	1,88	1,69			
	4	10.107	1,91	1,40			
	5	9.920	1,87	1,39			
	6	10.021	1,89		1,71		
	7	10.070	1,90		1,62		
	8	10.141	1,91		2,00		
	9	9.692	1,83			3,30	
	10	9.817	1,85			2,27	
	11	9.950	1,88			2,65	
	12	9.341	1,77				2,47
	13	9.750	1,84				3,18
	14	9.416	1,78				
	$\bar{x}$	9.851	1,86	1,41	1,78	2,74	2,82
	$\sigma_{n-1}$	242	0,04	0,18	0,20	0,52	0,50
	$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$	2,4	2,3	13,3	11,1	18,9	17,8

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,70	46
	1 d.	0,87	43
	7 d.	0,60	44

CUADRO Nº 13

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION F - 1B

T-3B; F-9B y T-4. Las características de cada una de ellas y los resultados de los ensayos efectuados se muestran en los cuadros 14 a 21 respectivamente.

Las resistencias máximas las proporciona la formulación T-1B, cuadro N° 18, que con un 10% de cloruro cálcico,  $160 \text{ Kg/m}^3$  de cenizas volantes, una relación Arena/cemento = 32/1 y Agua/cemento = 8,5 da resistencia a compresión simple de  $1,77 \text{ Kg/cm}^2$  a 1 día y de  $3,57 \text{ Kg/cm}^2$  a 7 días. Al igual que ha sucedido con los estériles de escombreras de tipo A, estos resultados superan ampliamente a los obtenidos con la formulación tipo y deben ser considerados como muy satisfactorios. El coste de los materiales empleados en la confección de esta formulación asciende a  $273 \text{ Pts/m}^3$ .

Se ha llegado a esta formulación tratando de poner en juego el papel puzolánico de las cenizas volantes para lo cual se plantearon las formulaciones T-1; T-2 y T-3 en los tres casos la composición de estas formulaciones suponía incorporar  $100 \text{ Kg/m}^3$  de cenizas volan

FECHA : 23.7.81

TIPO ESTERIL : ESCOMBRERA TIPO B

$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{30}{1}$

$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 9,2$

CLORURO CALCICO : 4 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	30
AGUA	160
CENIZAS	60
CLORURO CALCICO	1,2

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28 d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	9.680	1,82	0,98			
	2	10.040	1,89	1,18			
	3	10.040	1,89	1,11			
	4	10.540	1,99	1,06			
	5	9.800	1,86	0,92			
	6	10.010	1,89		1,37		
	7	10.180	1,92		1,54		
	8	9.870	1,86		1,26		
	9	10.010	1,89			3,24	
	10	9.350	1,76			1,86	
	11	10.240	1,93			3,14	
	12	9.600	1,81				3,74
	13	9.464	1,78				3,53
	14	9.498	1,79				
	$\bar{x}$			1,05	1,39	2,74	3,63
	$\sigma_{n-1}$			0,09	0,11	0,62	0,10
	$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$			8,7	8,2	22,9	2,8

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,85	35
	1 d.	0,88	36
	7 d.		

CUADRO Nº 14

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION F - 3 143.

FECHA : 11.8.81

TIPO ESTERIL : ESCOMBRERA TIPO B

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{30}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 8,5$$

CLORURO CALCICO : 8 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	30
AGUA	140
CENIZAS	60
CLORURO CALCICO	2,4

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	9.963	1,88	1,00			
	2	10.005	1,89	0,99			
	3	10.107	1,91	1,09			
	4	10.148	1,91	1,05			
	5	10.217	1,93	1,16			
	6	10.195	1,92		1,56		
	7	10.193	1,92		1,57		
	8	10.323	1,95		1,63		
	9	9.810	1,85			2,84	
	10	10.096	1,90			3,12	
	11	10.265	1,94			3,26	
	12	9.663	1,82				3,23
	13	9.943	1,87				3,47
	14	9.994	1,88				
	$\bar{x}$			1,05	1,58	3,07	3,35
	$\sigma_{n-1}$			0,06	0,03	0,17	0,12
	$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$			5,8	1,8	5,6	3,5

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg./cm <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,62	57
	1 d.	0,85	49
	7 d.		

CUADRO Nº 15

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION F - 8

FECHA : 12.8.81

TIPO ESTERIL : ESCOMBRERA TIPO B

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{30}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 8,5$$

CLORURO CALCICO : 10 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	30
AGUA	140
CENIZAS	60
CLORURO CALCICO	3

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	9.785	1,84	1,01			
	2	9.806	1,85	1,08			
	3	9.851	1,86	1,06			
	4	9.886	1,86	1,11			
	5	10.144	1,91	1,24			
	6	9.731	1,83		1,51		
	7	10.001	1,89		1,56		
	8	10.098	1,90		1,82		
	9	9.726	1,83			2,64	
	10	9.545	1,80			2,38	
	11	9.613	1,81			2,29	
	12	9.596	1,81				2,87
	13	9.418	1,78				2,47
	14	9.175	1,73				
	$\bar{x}$			1,1	1,63	2,43	2,67
	$\sigma_{n-1}$			0,07	0,135	0,10	0,20
	$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$			7	8,2	6,0	7,4

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,87	47
	1 d.	0,96	46
	7 d.	1,19	43

CUADRO Nº 16

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION F - 9

FECHA : 19.8.81

TIPO ESTERIL : ESCOMBRERA TIPO B

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{32}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 8,1$$

CLORURO CALCICO : 4 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	( kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	1.900
CEMENTO	30
AGUA	110
CENIZAS	160
CLORURO CALCICO	42

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	9.415	1,77	0,83			
	2	9.502	1,79	0,74			
	3	9.400	1,77	0,89			
	4	9.255	1,74	0,92			
	5	9.625	1,81	1,07			
	6	9.198	1,73		1,14		
	7	9.310	1,76		1,28		
	8	9.312	1,76		1,06		
	9	9.436	1,78			2,07	
	10	9.172	1,73			1,87	
	11	9.113	1,72			1,45	
	12	9.173	1,73				2,02
	13	9.091	1,71				1,98
	14	9.424	1,78				
	$\bar{x}$			0,89	1,16	1,79	2,0
	$\sigma_{n-1}$			0,10	0,09	0,25	0,02
	$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$			12,1	7,7	14,4	1,0

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,98	40
	1 d.	0,8	47
	7 d.	0,87	45

CUADRO Nº 17

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION T - 2

FECHA : 24.8.81

TIPO ESTERIL : ESCOMBRERA TIPO B

$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{32}{1}$

$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 8,5$

CLORURO CALCICO : 10 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	1.900
CEMENTO	30
AGUA	120
CENIZAS	160
CLORURO CALCICO	3

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7 d.	28 d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	9.985	1,88	0,92			
	2	10.210	1,92	1,08			
	3	10.009	1,89	0,84			
	4	9.978	1,88	0,85			
	5	10.053	1,90	0,93			
	6	9.867	1,86		1,87		
	7	9.860	1,86		1,77		
	8	9.982	1,88		1,69		
	9	10.108	1,91			3,82	
	10	10.175	1,92			3,84	
	11	9.740	1,84			3,07	
	12	9.700	1,83				4,75
	13	9.508	1,79				4,71
	14	9.645	1,83				
	$\bar{x}$			0,92	1,77	3,67	4,73
	$\sigma_{n-1}$			0,08	0,07	0,35	0,02
	$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$			9,1	4,1	9,8	0,4

	EDAD	RESULTADOS	
		C' (kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,95	42
	1 d.	0,82	45
	7 d.	1,18	39

CUADRO Nº 18

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION T - 1B 147.



FECHA : 25.8.81

TIPO ESTERIL : ESCOMBRERA TIPO B

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{32}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} =$$

CLORURO CALCICO : 8 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	1.900
CEMENTO	30
AGUA	120
CENIZAS	160
CLORURO CALCICO	2,4

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	9.680	1,82	0,88			
	2	9.855	1,86	0,73			
	3	9.555	1,80	0,76			
	4	9.540	1,80	0,76			
	5	9.915	1,87	0,70			
	6	10.039	1,89		1,62		
	7	9.770	1,84		1,59		
	8	9.534	1,80		1,44		
	9	9.766	1,84			2,04	
	10	10.095	1,90			2,67	
	11	9.985	1,88			2,65	
	12	9.795	1,85				3,62
	13	9.451	1,78				3,44
	14	10.012	1,89				
	$\bar{x}$	9.785	1,84	0,76	1,55	2,45	3,53
	$\sigma_{n-1}$	210	0,039	0,07	0,096	0,358	0,127
	$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$	2,1	2,1	9,0	6,2	14,6	3,5

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,95	32
	1 d.	0,85	49
	7 d.	0,77	45

CUADRO Nº 19

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION T - 3B 148.

FECHA: 27.8.81

TIPO ESTERIL: ESCOMBRERA TIPO B

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{15}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 3,7$$

CLORURO CALCICO: 10 % PESO DE CEMENTO

Sulfato potásico: 2% peso sul.cal.

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	30
AGUA	30
CENIZAS	150
CLORURO CALCICO	60
Sulfato potásico	0,6
Cloruro Cálculo	3

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28 d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	10.546	1,99	0,89			
	2	10.130	1,91	0,90			
	3	10.100	1,90	0,84			
	4	9.985	1,88	0,75			
	5	10.155	1,92	0,79			
	6	10.130	1,91		1,35		
	7	10.400	1,96		1,78		
	8	10.445	1,97		1,48		
	9	10.222	1,93			3,01	
	10	9.913	1,87			2,65	
	11	9.905	1,87			2,49	
	12	9.758	1,80				3,82
	13	10.248	1,93				4,01
	14	10.035	1,89				
$\bar{x}$	10.141	1,91	0,83	1,53	2,71	3,91	
$\sigma_{n-1}$	221	0,042	0,06	0,22	0,26	0,13	
$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$	2,1	2,2	7,7	14,4	9,8	3,4	

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,9	45
	1 d.	0,88	44
	7 d.	1,02	41

CUADRO Nº 20

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION F - 9B

FECHA : 30.11.81

TIPO ESTERIL : ESCOMBRERA TIPO B

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{30}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 8,5$$

CLORURO CALCICO : % PESO DE CEMENTO  
Isocrete : 2% peso de cemento

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	30
AGUA	160
CENIZAS	60
CLORURO CALCICO	
Isocrete	0,6

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	9.351	1,76		1,13		
	2	9.533	1,80		1,11		
	3	9.589	1,81		1,10		
	4	9.885	1,86		1,36		
	5	9.748	1,84		1,28		
	6	9.772	1,84		1,30		
	7	9.705	1,83		1,21		
	8	9.720	1,83			2,54	
	9	9.797	1,85			2,41	
	10	9.850	1,86			2,45	
	11	9.535	1,80			1,95	
	12	9.397	1,77			1,93	
	13	9.544	1,80			1,68	
	14	9.570	1,80			2,15	
	$\bar{X}$	9.642	1,82		1,21	2,16	
	$\sigma_{n-1}$	164	0,031		0,10	0,32	
	$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{X}} \cdot 100$	1,7	1,7		8,5	14,8	

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.		
	1 d.	0,68	48
	7 d.	0,62	52

CUADRO Nº 21  
COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION T - 4

tes a la cantidad que hubiera sido necesaria para corregir el deficit de finos de los estériles empleados.

Tambien se han ensayado nuevos aditivos como el ISOCRETE que, pese a causar una buena impresión durante la confección y desmoldeo de las probetas, no ha dado las resistencias que se esperaban. En una fase posterior de la investigación se debieran proseguir las inves tigaciones sobre este producto, quizás emplean dolo en fase líquida.

Se ha confeccionado una formulación em pleando como material conglomerante el sulfato cálcico, además del cemento P-450 ARI, comple mentando su acción con la adición de sulfato potásico. Los resultados han sido buenos pero no alcanzan los valores de la formulación ópti ma de este grupo. En futuras investigaciones parece que podría ser interesante proseguir estas investigaciones combinando la presencia del sulfato cálcico con una mayor proporción de cenizas volantes como en la formulación T-1B.

### 3.4.1.3 Estériles de menudos de lavadero

Se han realizado siete formulaciones con estériles constituidos por menudos de lavaderos que corresponden a las denominaciones F-4; F-5; M-1; M-2; M-4; M-5 y F-2B. Las características de cada una de ellas y los resultados de los ensayos efectuados se muestran en los cuadros 22 a 28 respectivamente.

Las resistencias máximas las proporciona la formulación F-4, cuadro N° 22, que con un 4% de cloruro cálcico, sin cenizas volantes, una relación arena/cemento = 30/1 y agua/cemento = 3,25 da resistencias a compresión simple de  $1,32 \text{ Kg/cm}^2$  a 1 día y de  $1,98 \text{ Kg/cm}^2$  a siete días.

Estos resultados son algo inferiores a los obtenidos con los estériles de escombros pero son algo superiores a los obtenidos con la formulación tipo por lo que deben calificarse como buenos ya que superan el objetivo planteado para esta investigación.

FECHA : 27.7.81

TIPO ESTERIL : MENUDOS DE LAVADERO

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{30}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 3,25$$

CLORURO CALCICO : 4 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	40
AGUA	60
CENIZAS	0
CLORURO CALCICO	1,6

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	9.800	1,85	0,73			
	2	9.980	1,88	0,77			
	3	9.920	1,87	0,78			
	4	9.790	1,87	0,79			
	5	9.870	1,86	0,77			
	6	9.760	1,84		1,33		
	7	9.690	1,83		1,30		
	8	9.790	1,85		1,33		
	9	9.560	1,80			2,09	
	10	9.530	1,80			2,01	
	11	9.510	1,79			1,86	
	12	9.460	1,78				1,94
	13	9.400	1,77				2,04
	14	9.403	1,77				
$\bar{x}$	9.675,9	1,82	0,76	1,32	1,98	2,0	
$\sigma_{n-1}$	195,7	0,04	0,02	0,01	0,11	0,07	
$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$	2,02	2,19	2,6	1,0	5,5	3,5	

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,47	51
	1 d.	0,65	47
	7 d.		

CUADRO Nº 22

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION F - 4. 153.

FECHA : 28.7.81

TIPO ESTERIL : MENUDOS DE LAVADERO

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{30}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 3,25$$

CLORURO CALCICO : 10 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	40
AGUA	60
CENIZAS	0
CLORURO CALCICO	4

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28 d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	9.001	1,70	0,82			
	2	9.129	1,72	0,91			
	3	9.057	1,71	0,78			
	4	9.340	1,76	1,08			
	5	8.990	1,70	0,82			
	6	9.160	1,73		1,21		
	7	8.880	1,68		1,09		
	8	9.020	1,70		1,03		
	9	8.810	1,66			1,73	
	10	9.040	1,71			1,85	
	11	8.770	1,65			1,60	
	12	8.932	1,68				2,28
	13	8.481	1,60				
	14	9.025	1,70				
	$\bar{x}$	8.973,9	1,69	0,88	1,11	1,72	2,28
	$\sigma_{n-1}$	202,23	0,03	0,12	0,09	0,12	
	$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$	2,25	1,77	13,6	8,10	6,9	

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,33	53
	1 d.	0,81	45
	7 d.		

CUADRO Nº 23

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION F - 5

FECHA: 5.8.81

TIPO ESTERIL: MENUDOS DE LAVADERO

$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{43,3}{1}$

$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 5,1$

CLORURO CALCICO: 8 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	30
AGUA	60
CENIZAS	100
CLORURO CALCICO	2,4

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	9.690	1,83	0,35			
	2	9.632	1,82	0,31			
	3	9.642	1,82	0,31			
	4	9.648	1,82	0,33			
	5	9.640	1,82	0,32			
	6	9.725	1,83		0,49		
	7	9.640	1,82		0,45		
	8	9.625	1,81		0,47		
	9						
	10	9.183	1,73		0,89		
	11	9.303	1,75		1,00		
	12	9.040	1,70				1,74
	13	9.011	1,70				1,68
	14	9.014	1,70				
$\bar{x}$	9.445,6	1,78	0,32	0,47	0,94	1,71	
$\sigma_{n-1}$	287,0	0,05	0,01	0,02	0,07	0,04	
$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$	3,03	2,80	4,3	4,2	7,4	2,3	

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,58	61
	1 d.	0,79	51
	7d.		

CUADRO Nº 24

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION M - 1

155.



FECHA : 6.8.81

TIPO ESTERIL : MENUDOS DE LAVADERO

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{50}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 6,7$$

CLORURO CALCICO : 8 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	30
AGUA	60
CENIZAS	300
CLORURO CALCICO	2,4

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	9.820	1,85	0,37			
	2	10.023	1,89	0,44			
	3	10.055	1,90	0,50			
	4	10.018	1,89	0,52			
	5	10.034	1,89	0,50			
	6	9.912	1,87		0,71		
	7	9.990	1,88		0,81		
	8	9.901	1,87		0,78		
	9	9.682	1,83			1,99	
	10	9.645	1,82			2,19	
	11	9.716	1,83			2,10	
	12	9.451	1,78				3,21
	13	9.292	1,75				3,27
	14	9.441	1,78				
	$\bar{x}$			0,46	0,76	2,09	3,24
	$\sigma_{n-1}$			0,05	0,04	0,08	0,03
	$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$			11,5	5,3	3,8	0,9

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,70	58
	1 d.	0,49	60
	7 d.		

CUADRO Nº 25

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION M - 2 156.

FECHA : 13.8.81

TIPO ESTERIL : MENUDOS DE LAVADERO

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{32,5}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 3,8$$

CLORURO CALCICO : 8 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	40
AGUA	60
CENIZAS	100
CLORURO CALCICO	3,2

	PROBETA Nº	PESQ gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	10.089	1,90	0,46			
	2	10.215	1,93	0,55			
	3	10.254	1,93	0,59			
	4	10.263	1,93	0,61			
	5	10.294	1,94	0,60			
	6	9.892	1,86		0,70		
	7	10.018	1,89		0,78		
	8	10.020	1,89		0,72		
	9	9.840	1,86			1,96	
	10	9.702	1,83			1,60	
	11	9.997	1,88			2,10	
	12	9.318	1,76				2,69
	13	9.380	1,77				2,62
	14	9.295	1,75				
	$\bar{x}$	9.898,3	1,86	0,56	0,73	1,88	2,65
	$\sigma_{n-1}$	351,15	0,06	0,06	0,04	0,25	0,05
	$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$	3,5	3,2	10,7	5,4	13,3	1,8

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg/cm <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,78	54
	1 d.	0,83	47
	7 d.	0,84	44

CUADRO Nº 26

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION M - 4 157.

FECHA : 17.8.81

TIPO ESTERIL : MENUDOS DE LAVADERO

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{32,5}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 2,8$$

CLORURO CALCICO : 4 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	40
AGUA	20
CENIZAS	100
CLORURO CALCICO	1,6

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	8.565	1,61	0,32			
	2	8.720	1,64	0,33			
	3	8.654	1,63	0,32			
	4	8.671	1,63	0,36			
	5	8.702	1,64	0,38			
	6	8.563	1,61		0,73		
	7	8.588	1,62		0,69		
	8	8.634	1,63		0,75		
	9	8.461	1,60			1,34	
	10	8.399	1,58			1,23	
	11	8.428	1,59			1,46	
	12	8.330	1,57				1,90
	13	8.403	1,58				1,93
	14	8.545	1,61				
$\bar{x}$	8.547,3	1,61	0,34	0,72	1,34	1,91	
$\sigma_{n-1}$	124,6	0,23	0,02	0,03	0,11	0,02	
$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$	1,45	1,42	7,0	4,16	8,2	1,04	

	EDAD	RESULTADOS	
		C'(kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,38	59
	1 d.	0,77	48
	7 d.	0,62	48

CUADRO Nº 27

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION M - 5

FECHA : 26.8.81

TIPO ESTERIL : MENUDOS DE LAVADERO

$$\frac{\text{ARENA}}{\text{CEMENTO}} = \frac{30}{1}$$

$$\frac{\text{AGUA}}{\text{CEMENTO}} = 3,25$$

CLORURO CALCICO : 8 % PESO DE CEMENTO

COMPOSICION	(kg./m <sup>3</sup> )
ESTERILES	2.000
CEMENTO	40
AGUA	60
CENIZAS	0
CLORURO CALCICO	3,2

	PROBETA Nº	PESO gr.	DENSIDAD APARENTE gr./cm <sup>3</sup>	EDAD			
				12 h.	24 h.	7d.	28d.
ENSAYOS DE COMPRESION SIMPLE	1	8.910	1,68	0,58			
	2	8.675	1,64	0,44			
	3	8.693	1,61	0,49			
	4	8.500	1,60	0,51			
	5	8.751	1,65	0,49			
	6	8.597	1,62		0,98		
	7	8.447	1,59		0,67		
	8	8.857	1,67		1,20		
	9	8.635	1,63			1,65	
	10	8.463	1,60			1,20	
	11	8.652	1,63			1,69	
	12	8.238	1,55				1,26
	13	8.558	1,61				1,73
	14	8.265	1,56				
$\bar{x}$	8.588,6	1,6	0,41	0,95	1,51	1,5	
$\sigma_{n-1}$	195,84	0,03	0,06	0,26	0,27	0,33	
$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100$	2,28	1,8	12,5	27,3	17,8	2,2	

	EDAD	RESULTADOS	
		C' (kg./cm. <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)
ENSAYOS DE CORTE	12 h.	0,76	33
	1 d.	0,58	47
	7 d.	1,52	32

CUADRO Nº 28

COMPOSICION Y RESULTADOS DE LA FORMULACION F - 2B

los estériles que han servido como áridos para la realización de estas formulaciones son, como ya se ha dicho, los que se obtienen en el lavado de la fracción de menudos. En general la granulometría de estos estériles es muy pobre en la fracción gruesa y, por el contrario, rica en finos. Como las cenizas volantes ejercen, en esta investigación, el papel de corrección de los finos no se han empleado en las formulaciones básicas que se han preparado con estos estériles: F-2B; F-4 y F-5.

Independientemente de lo anterior se ha pretendido aprovechar el efecto puzolánico de las cenizas volantes y, por ello, se han preparado las formulaciones M-1; M-2; M-4 y M-5 en cuya composición entran cantidades variables de estas cenizas. Se vio que la adición moderada de cenizas volantes, sin aumentar la cantidad de cemento, producía una caída importante de la resistencia al aumentar notablemente la relación arena/cemento; esto ha ocurrido en la formulación M-1. Sin embargo una adición masiva de cenizas volantes, formulación M-2, ha dado buenos resultados a partir de siete días; pero, como en esta investigación lo que importa es la resistencia a corto plazo, esta formulación no ha sido la óptima. Posiblemente aumentando la proporción del cloruro cálcico, se puedan mejorar los resultados obtenidos.

### 3.4.2 Conclusiones generales

A la vista de los resultados obtenidos se puede afirmar que el objetivo general de esta investigación ha sido superado con creces pues, sea cual sea el tipo de estéril empleado, las resistencias obtenidas superan ampliamente las presiones que habitualmente se miden en el relleno colgado de los talleres con frente invertido; por otro lado las resistencias obtenidas en esta investigación superan las especificaciones dadas por HILL (1975) para los rellenos consolidables que se emplean en U.S.A.

En el cuadro N° 29 se muestran las características de las formulaciones óptimas para cada uno de los tipos de estériles empleados.

TIPO DE ESTERIL	CARACTERISTICAS DE COMPOSICION				CARACTERISTICAS RESISTENTES			
	Cenizas Volantes	Arena Cemento	Agua Cemento	Cloruro Cálculo	$\sigma_{c1}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{c7}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$C_1'$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)
ESCOMBRERA TIPO A	300 Kg/m <sup>3</sup>	30/1	11,3	10%	2,25	3,35	0,73	51
ESCOMBRERA TIPO B	160 Kg/m <sup>3</sup>	32/1	8,5	10%	1,77	3,57	0,82	45
MENUDOS DE LAVADERO	-----	30/1	3,25	4%	1,32	1,98	0,47	51

Cuadro N° 29 CARACTERISTICAS DE LAS FORMULACIONES OPTIMAS

Como líneas futuras de investigación se pueden apuntar el empleo de acelerantes enérgicos tipo ISOCRETE, la combinación de sulfato cálcico con cenizas volantes y el empleo masivo de cenizas volantes con adición de cloruro cálcico en el caso de los menudos de lavado. Obviamente en todos los casos aumentarán las resistencias de los rellenos consolidables si se disminuye la relación arena/cemento por adición de material conglomerante.

#### 3.4.2.1 Influencia del tipo de estéril

El tipo de estéril tiene una clara influencia sobre la resistencia a compresión simple del relleno consolidable; pues, conforme se pone de manifiesto en la figura N° 15, cuanto mayor es el tamaño de los estériles mayor es la resistencia que se obtiene. Esta constatación coincide totalmente con la práctica de la realización de hormigón en masa. Desde el punto de vista que interesa a esta investigación hay que indicar que una forma simple de mejorar las caracte

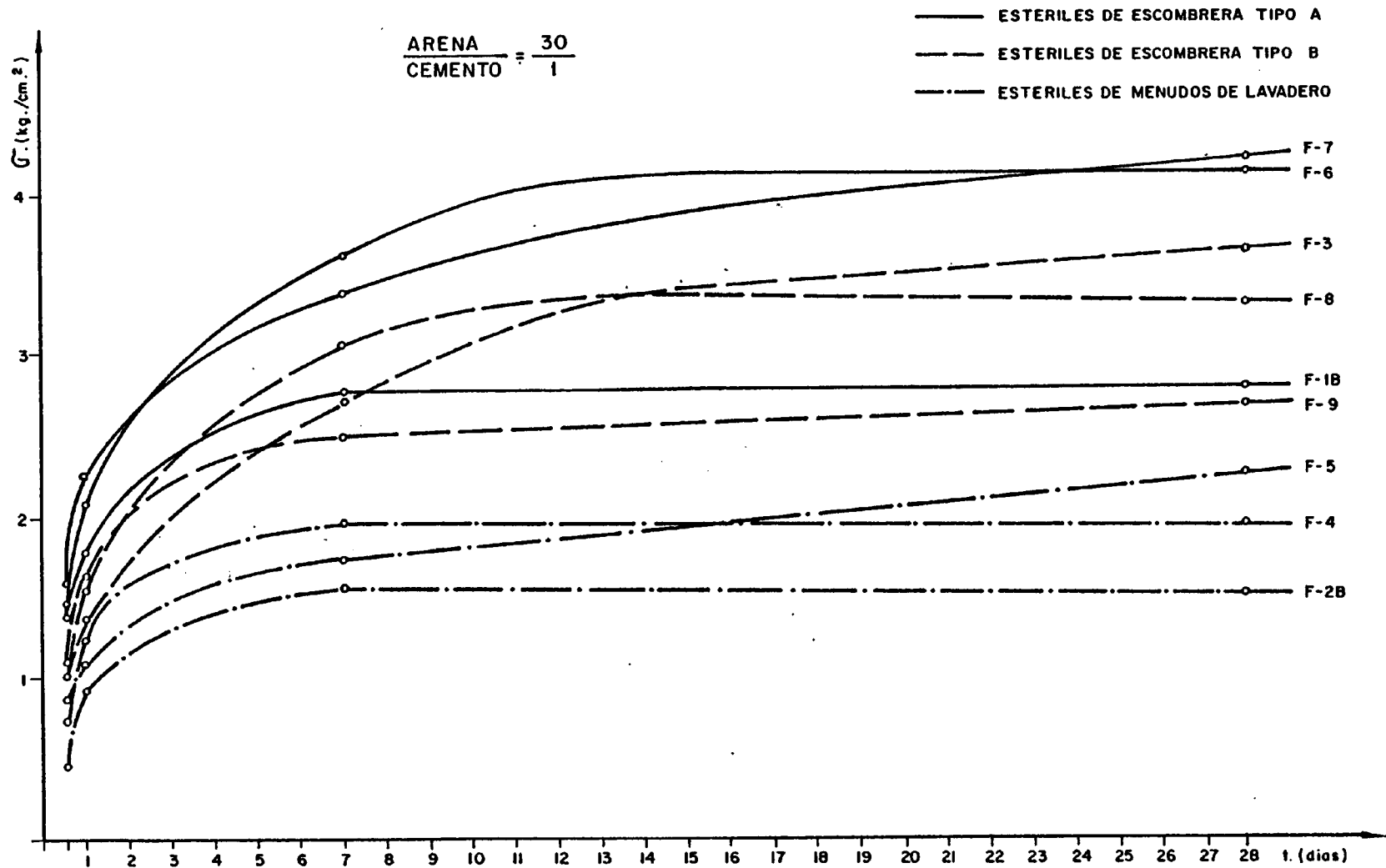


Fig. N° 15 RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE EN FUNCION DEL TIEMPO SEGUN EL TIPO DE ESTERILES



terísticas de los rellenos consolidables fabricados con menudos de lavadero sería mezclar los menudos con estériles gruesos de escombreras.

Otra consecuencia importante radica en el hecho de que los escombros procedentes del avance de galerías, que normalmente son triturados en el interior antes de emplearlos en los talleres de explotación, constituirían un material excelente para fabricar rellenos consolidables.

#### 3.4.2.2 Influencia de las cenizas volantes

La adición de cenizas volantes tiene como principal fin eliminar el déficit de arena en cada formulación y como fin secundario aportar una resistencia suplementaria debido a su acción puzolánica. En la figura N° 16 se pone de manifiesto que la adición de cantidades importantes de cenizas volantes se traduce en incrementos apreciables de la resistencia a compresión simple. Como ya se ha indicado que el efecto

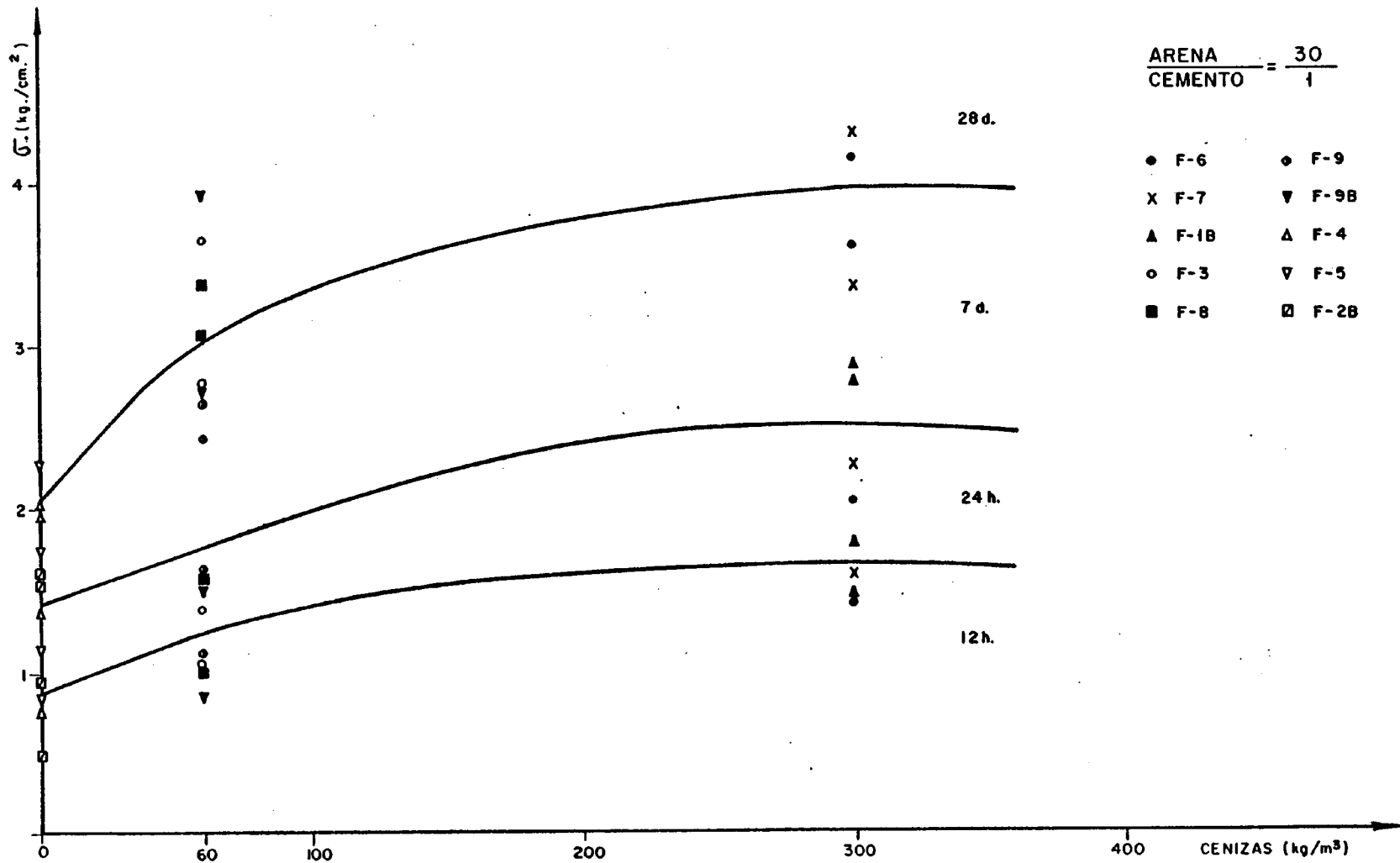


Fig. N°16 RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE EN FUNCION DE LAS CENIZAS VOLANTES SEGUN EL TIEMPO DE FRAGUADO

puzolánico se manifiesta a medio-largo plazo es necesario encontrar en cada caso el acelerante adecuado para que la resistencia inicial sea lo más alta posible.

Aunque esta investigación está dirigida a mejorar el sistema del relleno colgado, que es un freno importante para la mecanización de las capas inclinadas de carbón, no hay que olvidar que a largo plazo un relleno de mejor calidad producirá menores movimientos de los terrenos y, en consecuencia, menores trabajos de conservación de las galerías y menores hundimientos en superficie. Por ello la adición, en gran cantidad, de cenizas volantes resulta una posibilidad muy ventajosa que todavía se acrecienta si se tiene en cuenta los grandes problemas de almacenamiento que presentan las cenizas volantes.

#### 3.4.2.3 Influencia del cloruro cálcico

El cloruro cálcico que se ha agregado a las formulaciones como acelerante de fraguado ha actuado de dos formas claramente diferenciadas

conforme se ilustra en la figura N° 17. En el caso de las formulaciones realizadas con estériles procedentes del lavado de menudos, que no tienen en su composición cenizas volantes, el cloruro cálcico ha realizado un papel de acelerante del fraguado del cemento conforme a lo expuesto en el apartado 3.2.4. Consecuentemente la máxima resistencia, en un plazo muy corto, se obtiene con una proporción baja de cloruro cálcico, lo cual está de acuerdo con la práctica habitual.

Sin embargo cuando en la formulación del relleno consolidable entran a formar parte las cenizas volantes la proporción de cloruro cálcico que da los mejores resultados es la más alta de las tres ensayadas, es decir el 10%, como ocurre con las formulaciones F-7 y T-1B. Esto es lógico ya que el cloruro cálcico debe acelerar tanto el fraguado del cemento P-450, para lo cual se necesita el 4%, como el carácter puzolánico de las cenizas volantes para lo cual se requiere una cantidad suplementaria de acelerante. En este caso es posible que proporciones de cloruro cálcico, mayores que el 10% ensayados puedan proporcionar una

ARENA = 30  
CEMENTO = 1

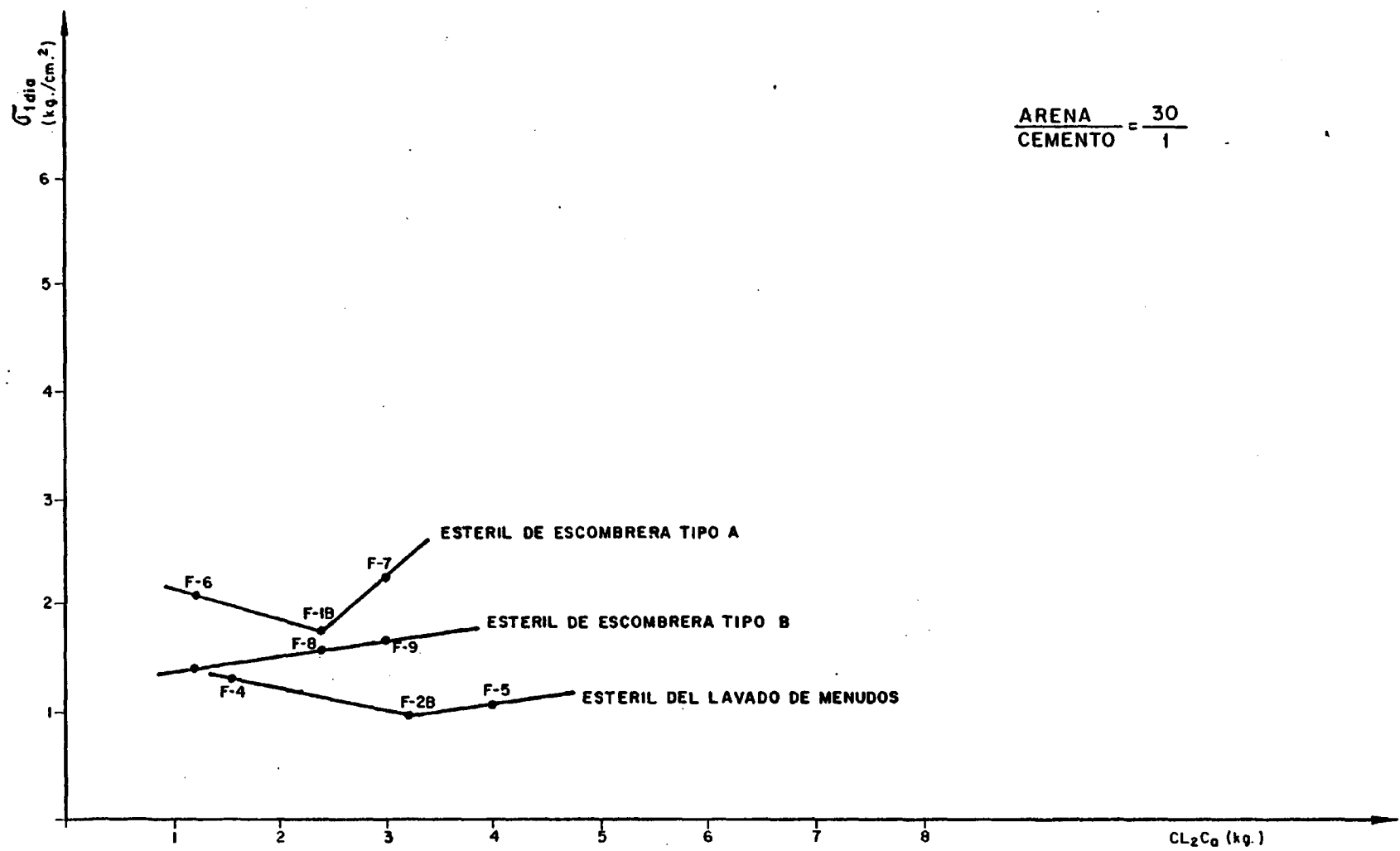


Fig. N° 17 RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE EN FUNCION DEL CONTENIDO DE CLORURO CALCICO SEGUN EL TIPO DE ARIDO

acción más enérgica que se traduzca en una mayor resistencia a corto plazo. Esto último deberá ser objeto de ensayo en posteriores investigaciones.

### 3.5. RESULTADOS DE LA MODELIZACION GEOMECANICA

Para poder establecer la influencia que ejerce un relleno consolidable sobre la distribución de presiones en un tajo con relleno se ha empleado el modelo geomecánico que ha sido descrito en los apartados 2.4. Se han realizado dos aplicaciones del método de los elementos finitos, una en la que el relleno es consolidable y otra en la que el relleno tiene las características de un relleno normal al que no se le han añadido aditivos de ningún tipo. Por comparación de los resultados obtenidos en ambos problemas se ha establecido la influencia que puede ejercer el relleno consolidable.

#### 3.5.1 Características del modelo

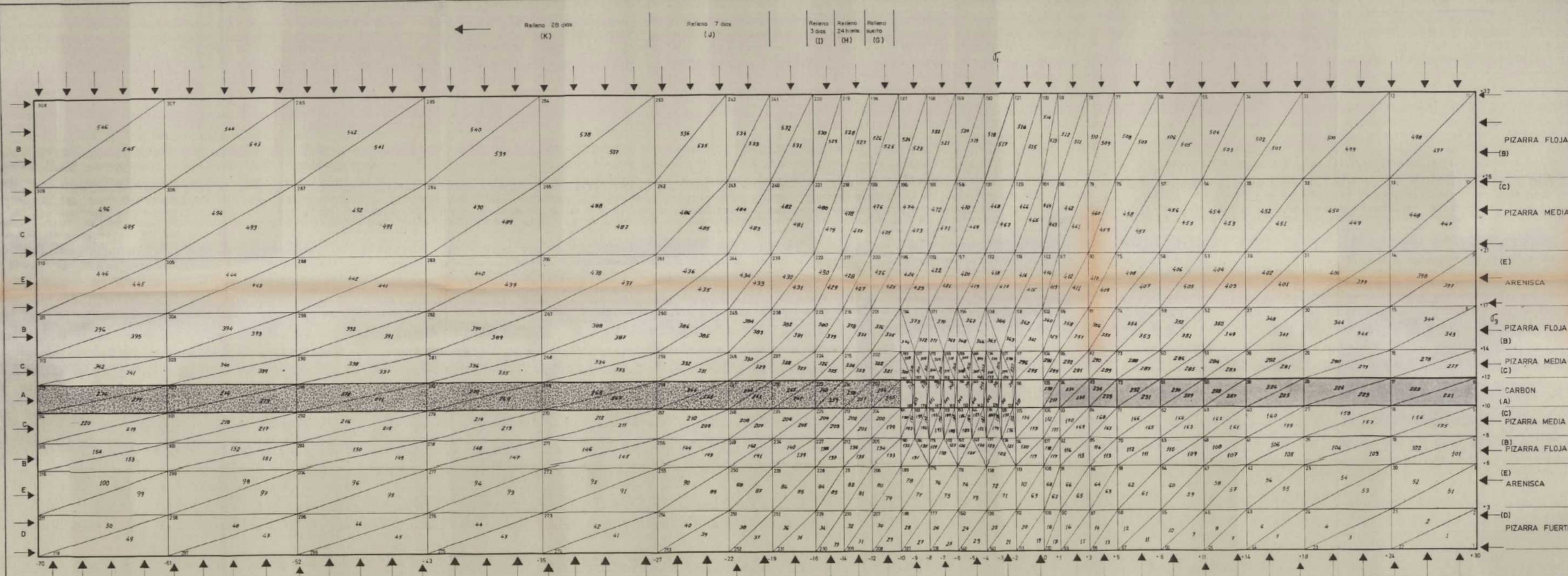
El modelo empleado comprende un área de 100m x 32m y corresponde a un corte transversal paralelo a la dirección de avance del taller. El modelo consta de

318 nudos y 546 elementos triangulares. En el plano G-8109-1 se muestra la configuración geométrica del modelo empleado. La potencia de la capa es de 2m. y el modelo incluye los materiales situados hasta 20m. al techo de la capa y 10m. al muro de ella. Al muro se han modelizado, por orden de proximidad a la capa, estratos de: pizarra media, pizarra floja, arenisca y pizarra fuerte. Se ha supuesto que el techo está formado por: pizarra media, pizarra floja, arenisca, pizarra media y pizarra floja.

El modelo incluye 30m. de terreno por delante del tajo y 70 m. por detrás de él. Se ha supuesto una calle de trabajo de 2m. de ancho, ocho filas de mampostas de madera y 60m. de relleno.

Se ha supuesto que el modelo está sometido a una tensión normal, en sus caras superior e inferior, de 8 MPa lo cual corresponde a un taller situado a una profundidad de unos 320m. Se ha supuesto que las caras laterales están sometidas a una tensión horizontal de 4,28 MPa lo cual supone un coeficiente de reparto de  $K = 0,535$ .

Como condiciones del modelo se ha supuesto que los nudos: 1; 22; 23; 44; 45; 66; 67; 88; 89; 110; 111;



DISEÑADO: <i>[Signature]</i> FECHA: 9 Diciembre 1981 COMPROBADO: <i>[Signature]</i> AUTOR: <i>[Signature]</i> ESCALA: 1:100 CONDUCTOR: <b>ESBOGA</b>	<b>MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA</b> <b>INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA</b> PROYECTO DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS EXISTENTES DE UN RELLENO CONSOLIDABLE PARA SU EMPLEO EN CAPAS INCLINADAS DE CARBON <b>MODELIZACION GEOMECANICA DEL TALLER CON RELLENO</b>	 CLAVE: G-8109 PLANO Nº: G-8109-1
---	---	---



140; 149; 178; 187; 208; 209; 230; 231; 252; 253; 274;  
275; 296; 297 y 318, que forman la parte inferior del  
modelo, permanecen fijos.

Se ha limitado el movimiento vertical de los nu  
dos que forman la cota superior de la capa de carbón  
y de relleno de acuerdo con el cuadro N° 30.

LIMITACION DEL MOVIMIENTO VERTICAL EN NUDOS																			
CAPA DE CARBON										RELLENO									
NUDO	17	28	39	50	61	72	83	105	192	203	214	225	236	247	258	269	280	291	302
MOVIMIEN TO MAXIMO SEGUN OY (m)	0,01	0,01	0,01	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,15	0,15	0,15	0,1	0,05	0,05	0,01

Cuadro N° 30 LIMITACION DEL MOVIMIENTO VERTICAL EN EL CARBON Y RELLENO

Estas limitaciones, que corresponden totalmente  
a la realidad práctica, es necesario imponerlas ya  
que en caso contrario el ordenador no es capaz de en

samblar la matriz de rigidez del modelo y se pierde la convergencia parandose el proceso de cálculo.

### 3.5.2 Características de los materiales

El modelo incluye once materiales distintos, de los que cinco corresponden a las rocas que integran la estratigrafía de la capa que ya se ha descrito antes, uno corresponde a las mampostas de madera y los cinco restantes a distintos estados del relleno. Se ha supuesto que el relleno natural sufre, por efecto de la convergencia, un "endurecimiento" de tal forma que a 27 metros por detrás del frente sus características son las mismas que las del relleno consolidable un día después de su colocación. En cuanto al relleno consolidable se ha supuesto que sus características mejoraban, a medida que se producía el fraguado, según transcurre el tiempo desde su colocación. Dado que el relleno va a trabajar confinado se ha supuesto que su resistencia a compresión simple es tres veces superior a la determinada en el laboratorio. Esta hipótesis se ha aplicado tanto al relleno consolidable como al relleno normal. En el cuadro N° 31 se muestran las características de

los materiales empleados y en el plano G-8109-1 se in  
dica su disposición geométrica en el modelo.

Se ha supuesto, también, una condición de isotrop  
pía dentro de cada estrato del mismo material. Esta  
hipótesis supone una cierta desviación de la realidad;  
pero, como actualmente no se conocen adecuadamente  
las características anisotrópicas de las rocas del carbon  
bonífero asturiano, el error que se cometería estimánd  
las puede ser sensiblemente mayor que el que se deriva  
de asumir esta hipótesis.

Por último hay que recordar que solo pueden exist  
tir dos parámetros elásticos independientes de modo  
que una vez definidos  $E$  y  $\nu$  por ejemplo,  $G$  está  
automaticamente fijado.

### 3.5.3 Análisis de resultados

Se han hecho diez pasadas por el ordenador hasta consegu  
guir que el contorno del modelo, que no está fijado  
de antemano, se comporte ante las presiones de una  
forma acorde con la experiencia práctica.

TIPO DE MATERIAL	PARAMETROS						
	PESO ESPECIFICO $\gamma \frac{MN}{M^3}$	COEFICIENTE DE POISSON $\nu_1 = \nu_2$	MODULO DE ELASTICIDAD $E_1 = E_2 (MPa)$	RESISTENCIA A COMPRESION $C_x = C_y (MPa)$	RESISTENCIA A TRACCION $T_x = T_y (MPa)$ ( $0,1 \cdot C_x$ )	MODULO DE RIGIDEZ $G (MPa)$	RESISTENCIA AL CORTE $S_{xy} (MPa)$
A.- CARBON	0,016	0,45	5.000	10	1	1.724	1,04
B.- PIZARRA FLOJA	0,020	0,25	6.000	30	3	2.400	3,14
C.- PIZARRA MEDIA	0,023	0,20	11.000	50	5	4.583	5,2
D.- PIZARRA FUERTE	0,025	0,15	18.000	70	7	7.826	7,3
E.- ARENISCA	0,027	0,15	23.000	90	9	10.000	9,4
F.- MADERA	0,009	0,40	800	25	2,5	285	2,63
G.- RELLENO SUELTO	0,018	0,40	7	0,1	0,01	2,5	0,014
H.- RELLENO CONSOLIDABLE A 24H	0,020	0,40	13	0,4	0,04	4,6	0,041
I.- RELLENO CONSOLIDABLE A 3 DIAS	0,02	0,35	20	0,7	0,07	7,4	0,07
J.- RELLENO CONSOLIDABLE A 7 D.	0,020	0,30	25	0,9	0,09	9,6	0,094
K.- RELLENO CONSOLIDABLE A 28 DIAS	0,020	0,30	30	1,2	0,12	11,5	0,12

Cuadro N° 31 CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN EL MODELO GEOMECANICO

En el Anejo I se incluyen las salidas del ordenador correspondiente a las aplicaciones 9 y 10 del modelo geomecánico. En primer lugar se presenta la solución elástica en la que se supone que ningún elemento se plastifica. En este caso la salida incluye un listado de cada triángulo elemental, con la designación de los vértices o nudos que lo componen y las tensiones que actúan en el centro de gravedad del elemento. En primer lugar se listan las tensiones según  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y el cortante; para, a continuación expresar la magnitud de las tensiones y deformaciones principales y su orientación. Lógicamente los ángulos de orientación de las tensiones y deformaciones principales han de coincidir. La salida del ordenador proporciona, a continuación, el listado de los nudos que componen el modelo, sus coordenadas y las fuerzas que están aplicadas. A continuación se indican los desplazamientos de cada nudo, según  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$ , y las reacciones que se generan en el ante las fuerzas aplicadas.

El ordenador ofrece seguidamente resultados del cálculo plástico que realiza aplicando tres niveles de carga. Los resultados que presenta para cada nivel de carga son el listado de los elementos que están plastificados y las tensiones y deformaciones de cada uno de ellos.

Una vez finalizado el listado de los elementos plastificados en el tercer nivel de carga el ordenador da, al igual que en la solución elástica, el listado de los elementos del modelo, con los nudos que los componen, y las tensiones y deformaciones resultantes en el centro de gravedad de cada triángulo.

Por último la salida de ordenador ofrece el listado de los nudos que integran el modelo, sus coordenadas y los desplazamientos y reacciones que se producen en cada uno de ellos.

Obsérvese que las salidas de la solución elástica y la solución plástica son totalmente diferentes; sobre todo puede comprobarse que en la solución plástica las reacciones en los nudos más cargados son notablemente inferiores a las que se producen considerando un comportamiento exclusivamente elástico.

Por lo que se refiere a las aplicaciones al tajo con relleno consolidable y relleno suelto el análisis detallado de las dos salidas de ordenador es excesivamente arduo por lo que sintetizaremos las conclusiones más importantes.

- \* En las inmediaciones de la calle de trabajo, nudo 203, el relleno consolidable tiene un desplazamiento en dirección al frente del taller que es inferior en un 3% por término medio, al que presenta el relleno no consolidable.
  
- \* En esa misma zona el relleno consolidable admite una reacción, en dirección al frente del taller, que es más de 13 veces superior a la que admite el relleno no consolidable.
  
- \* El macizo de carbón en las proximidades de la calle de trabajo, nudo 94, presenta en el caso del relleno consolidable un desplazamiento hacia la calle de trabajo que es del orden del 0,5% inferior al que se produce en el caso del relleno normal.
  
- \* El macizo de carbón en las proximidades de la calle de trabajo, nudo 94, presenta las mismas reacciones tanto con relleno consolidable como con relleno normal.

- \* Al nivel de los nudos del contorno, que están li  
bres, las diferencias entre el modelo con relleno  
consolidable y el modelo con relleno normal no  
son significativas.

Estas conclusiones ponen de manifiesto el importante  
papel que juega el relleno consolidable sobre la  
distribución de esfuerzos en las proximidades de la  
calle de trabajo del taller que es donde, de acuerdo  
con la experiencia practica, el peligro de las presiones  
que se producen con el relleno normal es mayor.

En este mismo orden de ideas, PARISEAU (1976)  
indica que un relleno consolidable con un módulo de  
elasticidad de  $700 \text{ Kg/cm}^2$  reduce en un 75% la convergencia  
que se produce en el tajo.

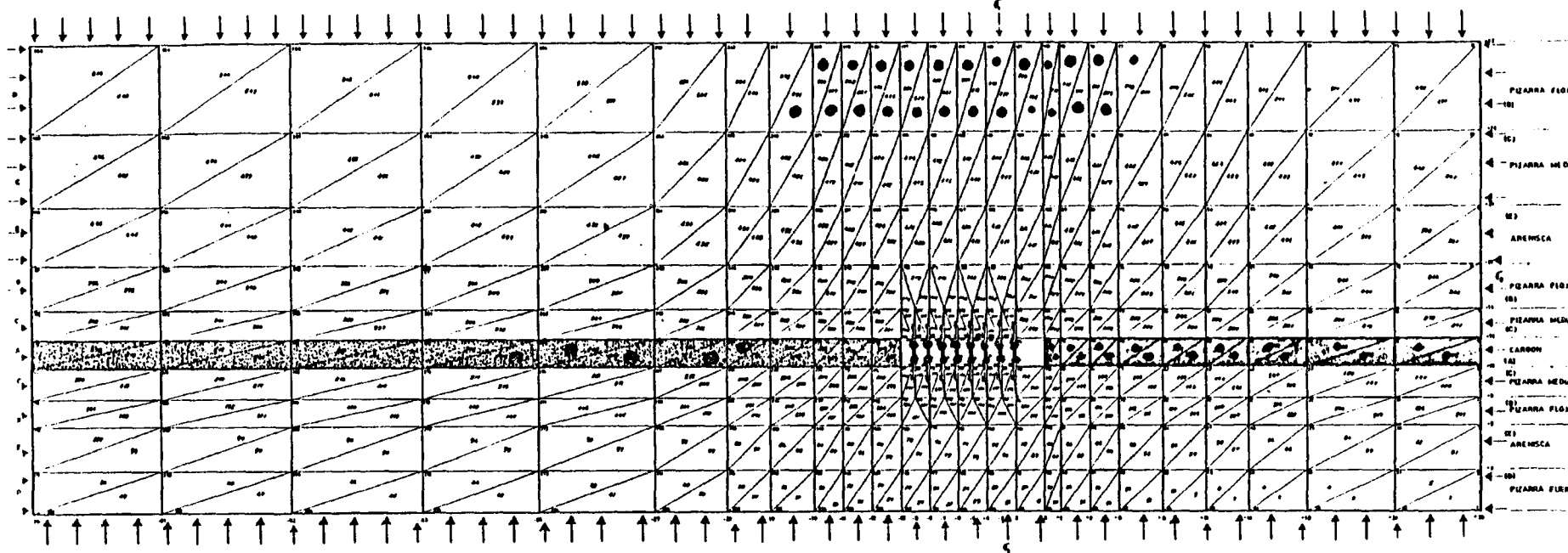
La estratigrafía del taller que se ha modelizado  
ha sido escogida arbitrariamente; pero, al estar constituida  
por los terrenos más representativos del carbonífero  
asturiano, responde a un tipo medio totalmente  
representativo.

Consecuentemente con las conclusiones obtenidas  
del modelo geomecánico se puede afirmar que la importa



tancia del papel que juegan los rellenos consolidables será tanto más grande cuanto más desfavorables sean las condiciones de la explotación desde el punto de vista del trabajo del relleno colgado. Así en talleres con techos de muy buena calidad, donde las convergencias sean pequeñas y el relleno normal no pueda mejorar su calidad al fallar el confinamiento, la utilización del relleno consolidable supondrá una garantía total para evitar situaciones críticas. Otro tanto pasará cuando el rozamiento entre el relleno y los hastiales se vea disminuído, ya sea por la poca rugosidad de estos o la presencia de agua, y también habrá una ventaja sustancial cuando exista riesgo de liquefacción del relleno por la influencia de vibraciones producidas por voladuras.

En las condiciones normales el empleo de un relleno consolidable presenta la gran ventaja de poder disminuir las labores de refuerzo de los talleres que resultan imprescindibles, en el momento de colocar el relleno, en los talleres donde se emplea relleno normal. Esto está perfectamente ilustrado en las figuras N<sup>o</sup> 18 y 19 en la que se muestran, respectivamente, los elementos que han plastificado, al aplicar el 71% de la carga final, en el caso de que se emplee un relleno consolidable y un relleno normal. Puede apreciarse



● Elemento plastificado

Fig. 18.- ELEMENTOS PLASTIFICADOS EN EL TALLER CON RELLENO CONSOLIDABLE AL APLICAR EL 17% DE LA CARGA.

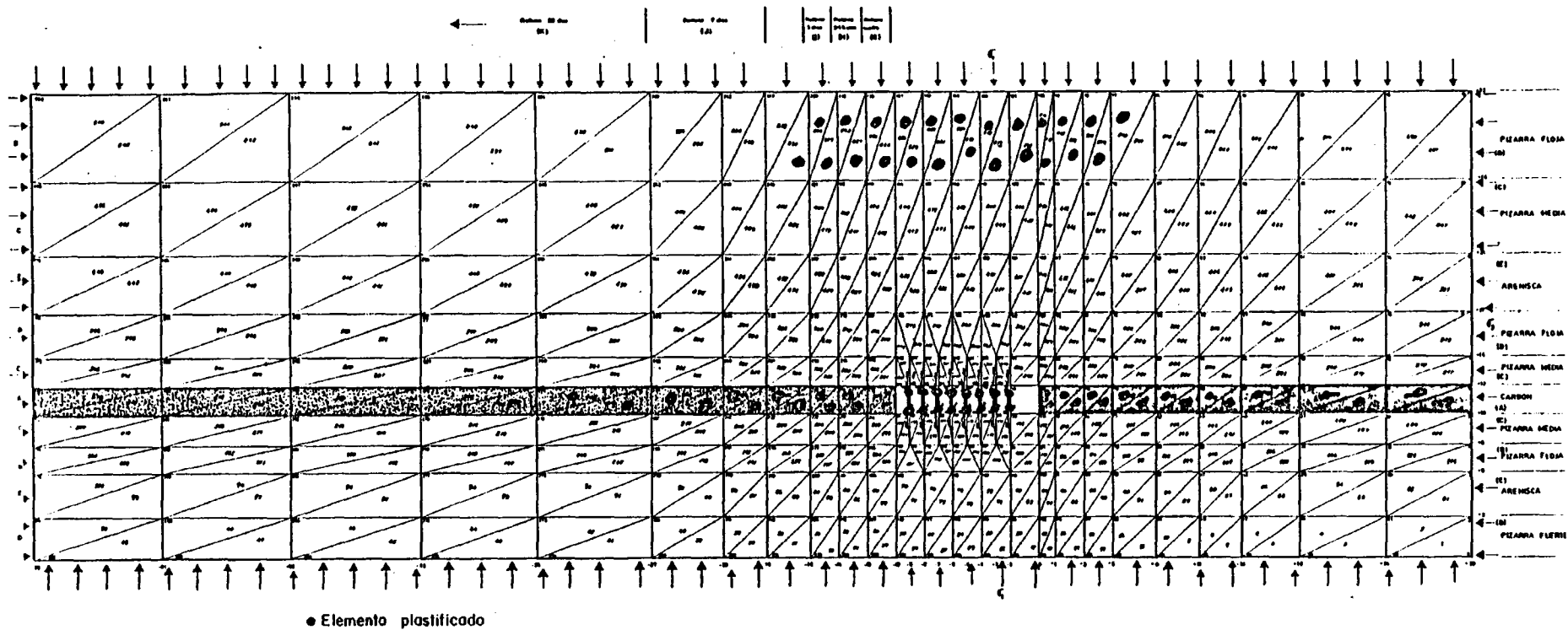


Fig. 19.- ELEMENTOS PLASTIFICADOS EN EL TALLER CON RELLENO NORMAL  
 AL APLICAR EL 17% DE LA CARGA.

claramente que, a pesar de que las condiciones de plastificación de la capa de carbón no varian cualitativamente, en el relleno los elementos que han plastificado cerca de la calle de trabajo, son mucho menores en el caso de rellenos consolidables que en el caso de emplear rellenos normales.

Por último hay que llamar la atención sobre el hecho de que el modelo que se ha empleado tiene por objeto exclusivo estudiar el comportamiento del relleno en las inmediaciones de la calle de trabajo del tajo.

Por ello el análisis que se ha efectuado no muestra ninguna diferencia entre el relleno consolidable y el relleno normal por lo que se refiere a los nudos del contorno del modelo que no están prefijados en su movimiento. Esto está en clara contradicción con la exigencia práctica que indica que el empleo de un relleno de buena calidad repercute directa y favorablemente sobre la disminución de hundimiento en superficie. Con una modelización, menos detallada a nivel de la calle de trabajo del tajo, que recogiera una mayor superficie indudablemente se pondría de manifiesto este efecto que no está dentro de los objetivos de esta investigación.

#### **4.- CONCLUSIONES**

El carbón debe desempeñar un importantísimo papel en la producción energética de nuestro país; pero, debido a las difíciles condiciones geológicas de los yacimientos españoles, la mecanización de la explotación subterránea de las capas inclinadas de carbón tropieza con notables dificultades. Los métodos de explotación, que se aplican en el mundo para explotar este tipo de yacimientos, se basan casi siempre en el empleo de rellenos para controlar el espacio deshullado.

La experiencia que se tiene, después de varias decenas de años explotando capas inclinadas con relleno colgado, indica que en todos los casos se produce un efecto de arco que limita el nivel de las presiones que actúan sobre las telas de contención.

En estas condiciones el empleo de un relleno consolidable presenta notables ventajas ya que por un lado se podrían disminuir notablemente los trabajos de refuerzo en los tajos y por otro lado se eliminarían los riesgos potenciales de deslizamientos debidos a la presencia de agua en los tajos con riesgo de fluidificación.

Para fabricar los rellenos consolidables resulta de especial interés emplear como áridos los estériles que se producen

en el lavado del carbón y los que ya están almacenados en las escombreras.

Apoyándose en investigaciones realizadas con anterioridad por el IGME sobre las características de los estériles de la minería del carbón y en las experiencias habidas en el extranjero, fundamentalmente derivadas de investigaciones financiadas por el U.S. Bureau of Mines, se han estudiado las formulaciones más idóneas para fabricar rellenos consolidables y, después de realizar más de 500 ensayos de resistencia, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- \* En las formulaciones investigadas se han empleado cenizas volantes, tanto como correctoras del defecto de finos como para aprovechar sus propiedades aglomerantes, lo cual supone una gran ventaja ya que el almacenamiento de las cenizas volantes representa hoy un problema de dimensiones importantes.
  
- \* Se han clasificado los estériles disponibles en tres grupos, de acuerdo con su granulometría, y para cada uno de ellos se ha definido la formulación óptima, resultando que, para cada grupo, es posible obtener las siguientes resistencias a compresión simple:

TIPO DE ESTERIL	RESISTENCIAS A COMPRESION SIMPLE	
	1 Dia (Kg/cm <sup>2</sup> )	7 Dias (Kg/cm <sup>2</sup> )
Escombrera Tipo A	2,25	3,35
Escombrera Tipo B	1,77	3,57
Lavado de Menudos	1,32	1,98

Estos resultados son altamente satisfactorios como lo prueba el hecho de que se hayan superado los niveles de resistencia que se consideran como buenos en las investigaciones del U.S. Bureau of Mines.

- \* Se espera que puedan mejorarse los resultados anteriores empleando cenizas volantes de la Central Térmica de Soto de Ribera, de acuerdo con las investigaciones preliminares realizadas.
- \* El coste de los materiales para fabricar estas formulaciones resulta perfectamente competitivo al estimarse inferior a 300 Pts/m<sup>3</sup>.
- \* Los resultados del modelo geomecánico, por elementos finitos, que se ha aplicado confirman que, al aplicar el 71% de la carga, el relleno consolidable sufre una menor plastificación

que el relleno suelto en las proximidades de la calle de trabajo. En concreto el relleno consolidable admite unas reacciones más de trece veces superiores a las que puede soportar el relleno normal.

Los alentadores resultados obtenidos en esta fase inicial de la investigación, en un tema que afecta tan directamente a la minería española del carbón; abren unas nuevas perspectivas de estudio, a proseguir en el futuro, que permiten avanzar en este campo hasta conseguir la metodología de colocación de un relleno consolidable en condiciones óptimas de seguridad y economía. Con ésto, el método de explotación con rellenos consolidables podrá entrar en fase de utilización industrial contribuyendo a impulsar la mecanización de las capas inclinadas de carbón y, así, se facilitará la consecución de los objetivos incluidos en el Plan Energético Nacional.

## **5.- BIBLIOGRAFIA**

- \* BORGESSON, L.  
Mechanical properties of hydraulic backfill  
Symposium on "Application of rock mechanics to cut and fill mining". Lulea 1-3 Junio 1980



- \* BRAUNER, G.  
 Mediciones de la presión del relleno colgado y de la resistencia de las mamostas de madera en capas inclinadas.  
 Gluckauf Forschungshefte, Oct. 1966
  
- \* BRAUNER, G.  
 Estado actual de conocimientos sobre las presiones del relleno colgado en yacimientos inclinados.  
 Gluckauf, Sept. 1967
  
- \* BRAUNER, G.  
 Cálculo de presión del relleno colgado  
 Gluckauf Forschungshefte. Junio 1968
  
- \* CARRASCO, J.; CELADA, B.  
 La exposición de equipos de minería de Düsseldorf  
 Industria Minera, Oct. 1981
  
- \* CELADA, B.; LUQUE, V.; RAMBAUD, C.  
 Recursos de carbón en España. Prospectiva de la mecanización de capas inclinadas.  
 Simposio sobre el uso industrial del subsuelo  
 Madrid, Abril 1981.

- \* CORSON, D.R.  
 Laboratory study of effect of cement and dispersant additives  
 on a hydraulic backfill.  
 United States Department of the Interior. Bureau of Mines,  
 RI - 6831, 1966
  
- \* CORSON, D.R.  
 Stabilization of hydraulic backfill with portland cement  
 United States Department of the Interior, Bureau of Mines,  
 RI - 7327, 1970
  
- \* WYSZOMIRSKI, J.; MILKOWSKI, W.; ADAMEK, R.  
 Properties of Hydraulic Stowing Materials  
 Colliery Guardian, Vol 212, N° 5479, Apr 1966
  
- \* CORSON, D.R.; WAYMENT, W.R.  
 Load - displacement measurements in backfilled stope of a  
 Deep Vein Mine.  
 United States Department of the Interior  
 Bureau of Mines, RI 7038 1967
  
- \* CORSON, D.R.  
 Field Evaluation of Hydraulic Backfill Compaction at the  
 lucky Friday Mine. Mullan, Idaho.  
 United States Department of the Interior, Bureau of Mines  
 RI 7546, 1971

- \* CORSON; D.R.; DORMAN, K.R.; SPRUTE, R.H.  
 Improving the support characteristics of hydraulic fill  
 Symposium on "Application of rock mechanics to cut and fill  
 mining". Lulea 1-3 Junio 1980
  
- \* DAHL, H.D.  
 A Finite Element Model for Anisotropic Yielding in Gravity  
 loaded Rock  
 The Pennsylvania State University, Ph. D. Thesis 1969
  
- \* DEJEAN, M.J.P.; ENCHAYAN, B.  
 Volume d'influence d'une exploitation en gisement penté  
 Revue de l'Industrie Minerale, Junio 1979
  
- \* DUROCHER, M.  
 Choix et mise au point d'une methode d'exploitation descend  
 dante sous remblais cimentés pour la mine filonienne de la  
 societe Peñarroya à Noailhac-Saint-Salvy (France)  
 Revue de l'Industrie Minerale, Julio 1980
  
- \* FISEKCI, H.Y.; GRIMLEY, A.W.T.  
 Etudes sur le controle du toit a la mine hydraulique  
 6<sup>eme</sup> Conference Internationale sur les pressions de Terrains  
 Banff. Canada. 23-28 Sept. 1977

- \* GONZALEZ CAÑIBANO, J.  
 fabricación de materiales de construcción a partir de los  
 estériles del carbón.  
 II Curso sobre Escombreras y Presas de Resíduos  
 Fundación Gomez-Pardo, Madrid 10-13 Noviembre 1981
  
- \* HILL, R.  
 The Mathematical Theory of Plasticity  
 The Clarendon Press, Oxford, 1950
  
- \* HILL, J.R.M.; Mc DONALD, M.; Mc NAY, L.M.  
 Support performance of hydraulic backfill  
 United States Department of the Interior  
 Bureau of Mines, RI 7850 1975
  
- \* INSTITUTO ARTE MINERARIA POLITECNICO DI TORINO  
 INSTITUTO ARTE MINERARIA UNIVERSITA ROMA  
 MINERARIA VARITINA S.p.A.  
 MINERARIA MONTA AMIATA S.p.A.  
 SOLMINE S.p.A.  
 TALCO GRAFITE VAL CHISONE  
 Explotacion de yacimientos difíciles en Italia: ventajas y  
 práctica del método con relleno cementado.  
 X Congreso Mundial de Minería, Turkía Sep 1969

- \* INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA  
 Estudios de parámetros geomecánicos con vistas al estudio de estabilidad de balsas y escombreras en la minería del carbón.  
 División de Geología aplicada a la Ingeniería  
 IGME, Madrid 1980
  
- \* INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA  
 Determinación de las características resistentes de un relleno consolidable para su empleo en capas inclinadas de carbón  
 División de geología aplicada a la Ingeniería  
 IGME, Madrid 1981
  
- \* ISAKSON, G.; ARMEN, H.; PIFKO, A.  
 Discret Element Methods for the Plastic Analysis of Structures  
 NASA Contract on Report CR-803, Oct. 1967
  
- \* LEKHNITSKII, S.G.  
 Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body  
 Traducción del ruso de P. Fern. Holden Day, S. Francisco, 1963
  
- \* MUSSO, L.; PRUNA, V.; MILANESE, P. STRAGIOTTI, L.; PELIZZA, S.  
 Lucha contra los golpes de carga por medio del empleo de rellenos cementados: estudio sobre un nuevo método de laboreo para la mina de RAIBL  
 VII Congreso Internacional de Minería, Perú 1972

- \* NEHRDICH, J.  
El método de explotación clave en los talleres de alto rendimiento .  
Chantiers d'abattage a haute performance dans les charbonnages.  
Commission des Communautés Europeennes. Luxembourg 29 Sept. 10 Oct 1976.
  
- \* PARISEAU, W.G.  
Plasticity Theory for Anisotropic rocks and Soils  
10<sup>th</sup> Symposium on Rock Mechanics, Austin, Texas, 1968.
  
- \* PARISEAU, W.G.; HILL, J.R.M.; Mc DONALD, M.M; Mc NAY, L.M.  
A support - performance prediction method for hydraulic backfill  
United States Department of the Interior  
Bureau of Mines, RI 8161 1976
  
- \* SALLE, P.L.; BONETTI, A.; VAIANI, G.  
La cimentation integral du remblai facteur determinant pour l'exploitation economique d'un amas de pyrite.  
VI Congreso Internacional de Minería, Madrid 1970
  
- \* SINGH, K.H.; HEDLEY, D.G.F.  
Review of fill mining technology in Canada  
Symposium on "Application of rock mechanics to cut and fill mining". Lulea 1-3 Junio 1980

- \* SPRUTE, R.H.; KELSH, D.J.  
Slimes consolidation at the Henderson Mine  
United States Department of the Interior, Bureau of Mines  
RI 8441, 1980
  
  - \* VENUAT, M.; PAPADAKIS, M.  
Control y ensayo de cementos, morteros y hormigones  
Ed. Urmo 1966
  
  - \* WAGNER, R.H.; J.I. ARTIEDA  
La Cuenca Minera Cifera - Matallana.  
S.A. Hullera Vasco-Leonesa, León 1970
  
  - \* YI-LIN, L.; PANG, Y.  
Lois regissant les phenomenes de pressions de terrain en  
liaison avec l'abattage hydraulique des couches epaisses.  
6<sup>eme</sup> Conference Internationale sur les pressions de terrains  
Banff, Canada, 23-28 Sep. 1977.
-