

MINISTERIO DE INDUSTRIA

DIRECCION GENERAL DE MINAS

INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

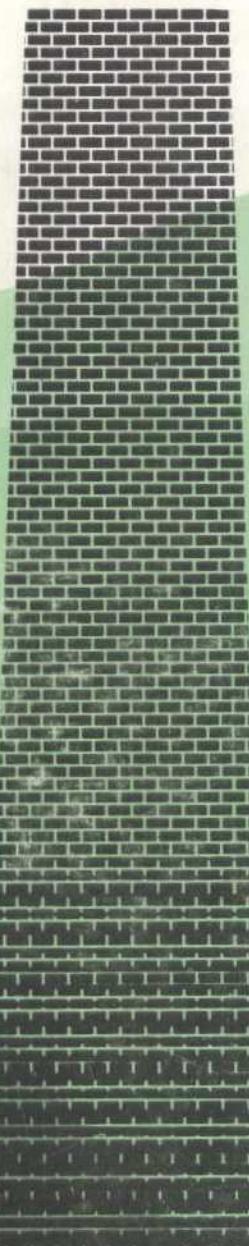
PLAN NACIONAL DE LA MINERIA

PROGRAMA NACIONAL DE INVESTIGACION MINERA

00211

INVESTIGACION DE PROBLEMAS GEOMECANICOS EN EL ARRANQUE : VIBRACIONES PRODUCIDAS POR VOLADURAS Y PRECORTE

MEMORIA



MINISTERIO DE INDUSTRIA
DIRECCION GENERAL DE MINAS
INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE
ESPAÑA

PLAN NACIONAL DE MINERIA
PROGRAMA NACIONAL DE IN
INVESTIGACION MINERA

00211

INVESTIGACION DE PROBLEMAS GEOMECANICOS EN EL
ARRANQUE: VIBRACIONES PRODUCIDAS POR VOLADURAS

Y PRECORTE

MEMORIA

El presente estudio ha sido
realizado por la Empresa Na-
cional ADARO de Investigacio-
nes Mineras, S.A. (ENADIMSA)
en régimen de contratación -
con el Instituto Geológico y
Minero de España.

ANTECEDENTES

El proyecto que se propone se emarca dentro del PINGEON programa sectorial del Programa Nacional de Investigaciones - Mineras integrantes del Plan Nacional de Minería. Este programa sectorial se dirige fundamentalmente al establecimiento de las bases de actuación necesaria en el campo de la geología - aplicada, bajo los aspectos de investigación de rocas industriales, geotecnia urbana y geotecnia minera.

Este último aspecto responde al enfrentamiento técnico de los problemas de las explotaciones mineras que derivan de las características y comportamiento mecánico de los terrenos en interacción con los trabajos llevados a cabo por la minería.

La utilización de los explosivos es una de las facetas más importantes en cualquier explotación minera y el correcto empleo de los mismos puede llegar a tener especial transcendencia tanto técnica como económica.

INDICE

	<u>Págs</u>
ANTECEDENTES	I
CAPITULO I: CONSIDERACIONES GENERALES EN TORNO A LOS FENOMENOS OPERANTES EN UNA VOLADURA	1
1.- INTRODUCCION	2
2.- FACTORES OPERANTES EN UNA EXPLOSION - CONFINADA	4
2.1.- PARAMETROS DEL EXPLOSIVO	4
2.2.- PARAMETROS DE LA CARGA	5
2.3.- PARAMETROS DE LA ROCA	7
3.- SUCESIVOS FENOMENOS FISICOS OBSERVADOS EN UNA EXPLOSION CONFINADA	10
4.- LEYES DE PROPAGACION Y GENERACION ...	16
4.1.- ANALISIS TEORICOS	17
4.2.- ANALISIS EXPERIMENTALES	20
BIBLIOGRAFIA	24
CAPITULO II: VIBRACIONES PRODUCIDAS POR VOLADURAS Y CRITERIOS DE DAÑOS	28
1.- INTRODUCCION	29
2.- CONSIDERACIONES GENERALES	31
2.1.- TIPOS DE ONDAS	31
2.2.- LEY GENERAL DE PROPAGACION DE LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS POR UNA VOLADURA	34
2.3.- EQUIPOS DE REGISTRO	37
3.- FACTORES QUE AFECTAN AL NIQUEL DE VI- BRACIONES PRODUCIDAS POR VOLADURAS ..	40

	<u>Págs</u>
3.1.- DISPOSICION GEOMETRICA DE LOS BARRENOS	40
3.2.- EXPLOSIVOS	41
3.3.- NATURALEZA DEL TERRENO.....	44
4.- REDUCCION DE LOS NIVELES DE VIBRA- CIONES	46
5.- ASPECTOS LEGALES	48
6.- CRITERIOS DE DAÑOS	50
6.1.- PERTURBACIONES TRANSMITIDAS A TRAVES DEL AIRE	51
6.1.1.- Voladuras superficia- les	51
6.1.2.- Voladuras subterráneas	54
6.2.- PERTURBACIONES TRANSMITIDAS A TRAVES DEL TERRENO	56
6.2.1.- Voladuras superficia- les	57
6.2.2.- Voladuras subterráneas	65
6.3.- COMENTARIOS EN TORNO A LOS - CRITERIOS EXPUESTOS.....	67
6.4.- CRITERIOS DE DAÑOS RECOMENDA- DOS	70
6.5.- APRECIACION SUBJETIVA	71
7.- METODOLOGIA DE LA EJECUCION DE UNA INVESTIGACION VIBROGRAFICA	74
8.- ESTIMACION DEL COSTE DE LOS DAÑOS - QUE PUEDEN OCASIONARSE POR LAS VI- BRACIONES DE UNA VOLADURA	76
BIBLIOGRAFIA	78
CAPITULO III: ANALISIS DE LAS TECNICAS DE VOLADURAS CONTROLADAS CON ATENCION PREFERENTE A LA TECNICA DE PRECORTE	87
1.- INTRODUCCION	88

	<u>Págs</u>
2.- DIFERENTES TECNICAS DE VOLADURAS CONTROLADAS	90
3.- PRECORTE	94
3.1.- BREVE RESEÑA HISTORICA ...	97
3.2.- INTERACCION DE LAS ONDAS - DE ESFUERZO Y PRESION DE GAS EN EL PROCESO DE FRAC- TURA EXISTENTE ENTRE DOS - BARRENOS ADYACENTES	100
3.3.- INFLUENCIA DEL ESTADO TEN- SIONAL	103
3.4.- ANALISIS CUANTITATIVO	104
3.5.- CONSIDERACIONES PRACTICAS.	110
BIBLIOGRAFIA	112
CAPITULO IV: CAMPAÑA EXPERIMENTAL	116
1.- INTRODUCCION	117
2.- BREVE DESCRIPCION DE LAS EXPLOTA- CIONES MINERAS EN LAS QUE SE REA- LIZO LA CAMPAÑA	119
3.- CAMPAÑA DE VIBRACIONES	123
3.1.- ASPECTOS GENERALES DE LA CAMPAÑA	123
3.2.- EQUIPO EMPLEADO	123
3.3.- MEDIDA DE LOS NIVELES DE VIBRACION PRODUCIDOS POR LAS VOLADURAS SUPERFICIA- LES	125
3.4.- MEDIDA DE LOS NIVELES DE VIBRACION PRODUCIDOS POR VOLADURAS EN EXCAVACIONES SUBTERRANEAS	132
3.5.- CONCLUSIONES	134
4.- CAMPAÑA DE PRECORTE	136

	<u>Págs</u>
4.1.- ASPECTOS GENERALES DE LA CAMPAÑA	136
4.2.- CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS MATERIALES DE LAS - ZONAS	137
4.3.- PRECORTE A CIELO ABIERTO..	138
4.4.- PRECORTE SUBTERRANEO	140
4.5.- ANALISIS CUANTITATIVO	144
4.6.- CONCLUSIONES	149
BIBLIOGRAFIA	151
CAPITULO V: CONCLUSIONES	152

CAPITULO I

CONSIDERACIONES GENERALES EN TORNO
A LOS FENOMENOS DINAMICOS OPERANTES
EN UNA VOLADURA.

1.- INTRODUCCION

Dado que en los procesos de voladuras se encuentra implícita una compleja interacción de fenómenos mecánicos y físico-químicos, resulta poco sorprendente que la técnica de voladuras haya permanecido en un estado empírico. Por consiguiente el desarrollo de una teoría que nos proporcione fórmulas de aplicación práctica es extremadamente difícil. Además, la roca no es un material uniforme y homogéneo: con frecuencia es altamente anisótropo, contiene diaclasas, fracturas y zonas de debilidad y, sometido a carga, se deforma de manera no lineal.

A pesar de todas estas limitaciones, los estudios analíticos de los procesos de voladuras nos han proporcionado - información cualitativa de gran utilidad, que nos da la base de una aproximación racional a la voladura de macizos rocosos.

En este sentido, la dinámica de rocas, al actuar como elemento de unión con los problemas de voladuras, abarca diferentes áreas que centran la atención de muchos esfuerzos - de investigación. Así, entre los problemas más importantes - que han acaparado la atención de estas investigaciones, encontramos: el mecanismo de generación y propagación de las ondas, el mecanismo de fractura, participación energética de

los explosivos, formación de cráteres, niveles de vibraciones generados por las voladuras, además de otros problemas - de menor relevancia.

En algunos casos, estos problemas han recibido una respuesta completa a la vez que adecuada, en tanto que, en otros, se han generado nuevos problemas al intentar responder a los ya existentes. No obstante, se observa un progreso significativo en las áreas en investigación.

Por ejemplo, un enfoque que ha proporcionado una valiosa información, consiste en el empleo de modelos a escala reducida de ensayos de voladuras. Variando las propiedades - del material del modelo y la carga del mismo se obtiene experimentalmente una información de gran utilidad, la cual puede aplicarse a voladuras como prototipo.

Una segunda aproximación al estudio de los procesos - de voladuras se ha polarizado en intentar separar los diferentes procesos físico-químicos y mecánicos que intervienen en una explosión confinada. Tal enfoque ha proporcionado ya resultados prácticos como el de la mejor comprensión de las voladuras controladas tal como se emplea en la técnica de pre-corte. Por otra parte se piensa que ha de conducir también a una mejor apreciación de los problemas de voladuras en rocas diaclasadas, y a una mejor comprensión de las razones a que se debe el que los resultados de los ensayos de voladuras en rocas altamente fisuradas difieran en gran medida de los llevados a cabo en roca sana. Finalmente, de un estudio de este tipo pueden subseguirse medidas prácticas utilizables en un mejoramiento de los resultados del empleo de explosivos en bloques o rocas estratificadas.

2.- FACTORES OPERANTES EN UNA EXPLOSION CONFINADA

La eficacia de un explosivo como instrumento para la fragmentación de rocas radica en su facilidad para descargar de un modo casi instantáneo una gran cantidad de energía - sobre una porción limitada de la roca.

De esta forma, cuando una carga explosiva se inicia - en un barreno, su energía se libera en una pequeña fracción de segundo mediante los gases, a unas presiones y temperaturas extremadamente altas.

El mecanismo de transferencia de esa energía a la roca y, por consiguiente, la rotura resultante, es complejo y está explicado de modo aún incompleto, no obstante, se han identificado varios factores que participa de forma significativa en el proceso de fragmentación. Tales factores pueden agruparse en tres categoría: parámetros de explosivo, parámetros de la carga y parámetros de la roca.

2.1.- PARAMETROS DEL EXPLOSIVO

Se suele considerar los siguientes:

Densidad
Velocidad de detonación
Impedancia de detonación
Volumen de gas
Energía disponible.

De entre ellos, la presión de detonación es probablemente el mejor indicador de la facilidad de un explosivo para romper la roca, pudiendo además considerar que dicho parámetro es aproximadamente proporcional al producto de la densidad del explosivo por el cuadrado de su velocidad de detonación.

Por otra parte, la facilidad relativa con la que diferentes explosivos pueden transmitir esfuerzos en una roca dada es función de su impedancia de detonación ($\approx V_D^2$), en tanto que el volumen de gas liberado en la detonación del explosivo juega un papel importante en los últimos estados de rotura y de gran importancia en voladuras de rocas blandas o naturalmente fracturadas.

La energía disponible o "strength" del explosivo ha sido universalmente empleada para medir su facilidad rompedora. De modo grosero, podemos decir que la energía disponible y la presión de detonación van ligadas entre sí; sin embargo, explosivos con productos de detonación no usuales o que liberan su energía con velocidad relativamente lenta como consecuencia de una detonación no ideal, pueden dar lugar a una P_D bastante diferente de la de otros explosivos con la misma energía disponible. Tanto por medio de estudios experimentales como en trabajos prácticos se ha mostrado que la energía disponible, en sí misma, no es un factor satisfactorio para predecir la rotura.

2.2.- PARAMETROS DE LA CARGA

Estos parámetros juegan una influencia considerable en el proceso de fragmentación y, con frecuencia, ocultan el

papel de los parámetros del explosivo:

Diámetro
Longitud
Atacado
Grado de confinamiento
Tipo de iniciación
Punto de iniciación.

Por supuesto, para algunos explosivos, el diámetro de la carga, el grado de confinamiento y el tipo de iniciación, influyen directamente en los parámetros del explosivo. Por ejemplo, para un cierto diámetro límite de velocidad de detonación puede decrecer el disminuir el diámetro de la carga.

Medidas experimentales del grado de confinamiento, definido como la razón $\frac{d_{\text{barreno}}}{d_{\text{cartucho}}}$, muestran que la amplitud de la onda de velocidad producida en la roca es, aproximadamente, inversamente proporcional a $\frac{(d_b)^{1,5}}{(d_c)}$. Y, para aquellos explosivos con V_D y P_D dependientes del grado de confinamiento, el efecto producido por el mismo se traduce incluso en un efecto mayor debido a que la P_D del explosivo disminuirá con un incremento del mismo.

La geometría de la carga, generalmente definida por la relación $\frac{l}{d}$, y el punto en el cual se inicia la misma, son parámetros adicionales que tienen una gran importancia en el proceso de rotura, especialmente en el caso de cargas cilíndricas que son generalmente las que se emplean en la práctica. Diversos estudios teóricos y experimentales muestran que, combinando la relación $\frac{l}{d}$ y el punto de iniciación de

la carga de un explosivo dado, pueden producir grandes diferencias en el valor de pico de la onda de esfuerzos transmitida a la roca, y, por tanto, de naturaleza análoga que si hubiésemos empleado explosivos de diferencia considerable en el valor de su P_D .

2.3.- PARAMETROS DE LA ROCA

Pueden considerarse como tales los siguientes:

- Densidad
- Velocidad de propagación
- Impedancia característica
- Energía de absorción
- Resistencia a la compresión
- Resistencia a la tracción
- Alteración de la roca
- Estructura del macizo

El primero de estos parámetros se emplea frecuentemente como un indicador general de las dificultades que pueden esperarse para romper la roca. Así, con materiales muy densos son necesarios explosivos con elevada P_D , en tanto que, los materiales poco densos o rocas más porosas, parecen absorber parte de la energía disponible de forma tal que hacen bastante difícil obtener la fragmentación deseada.

La velocidad con la que la onda de esfuerzos se propaga en la masa rocosa es de suma importancia; primero, debido a que ello afecta a la distribución espacial y duración de las tensiones impuestas sobre la masa rocosa por el explosivo detonado y, segundo, porque representa una medida de la elasticidad de la roca.

La impedancia característica ($\approx \rho V$) es un parámetro de gran utilidad cuando queremos analizar la transferencia de energía originada por la onda de detonación, en el explosivo, a la onda de esfuerzo en la roca. Por otro lado, la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción suelen ser, en ocasiones, estimadas para cualificar la resistencia que la roca ofrece al ser rota por un explosivo. Un parámetro de característica común a la roca y que resulta esencial en el proceso de fragmentación viene representado por la relación $\frac{\sigma_c}{\sigma_T}$, la cual suele oscilar entre 10 y 100, que mide la susceptibilidad de la roca a la rotura por esfuerzos originados por pulsos de reflexión. Dicho parámetro ha sido definido por Hino (Ref. 17) como "coeficiente de volatilidad", coeficiente sin relaciones directas con lo que en España se suele entender como tal.

Otra característica que no debemos olvidar es el grado de alteración de la roca. Desgraciadamente los materiales que ordinariamente nos encontramos no son ni homogéneos ni isotropos. Asimismo, el grado de variación de las propiedades de las rocas en posición y dirección son también importantes en el diseño de voladuras. Así, en rocas con un grado de heterogeneidad elevado puede esperarse como resultado una gran dispersión en la fragmentación. De igual forma, el efecto producido por la anisotropía sobre la rotura ha sido ampliamente reconocido incluso por explotadores de canteras que, por ejemplo, en el caso del granito, han descrito las direcciones de "rift", "grain" y "hardway" como las más resistentes a la rotura. Se han realizado estudios experimentales sobre este tema por el U.S.B. of Mines, llegando en sus conclusiones a una fuerte correlación entre las direcciones

preferentes de rotura y direcciones de máxima y mínima velocidad de propagación con las características microestructurales identificables de la roca.

3.- SUCESIVOS FENOMENOS FISICOS OBSERVADOS EN UNA EXPLO- SION CONFINADA

La violencia y extremada rapidez con que se produce - una explosión, han puesto obstáculos considerables a la investigación de los procesos implicados en la voladura de rocas. De esta forma es generalmente imposible observar directamente los fenómenos presentes en dicho proceso, limitándonos únicamente a poder apreciar el tamaño y forma final de - crater y el montón de fragmentos.

Como hemos expuesto con anterioridad, los avances rea lizados en este sentido, se han basado en el empleo de modelos a escala reducida y cámaras fotográficas ultrarrápidas. De cualquier manera, la total comprensión de dicho proceso - está todavía muy lejos de ser completa. Así, muchos investigadores centran su atención sobre algún aspecto particular del proceso con exclusión de otros efectos significativos. Algunos consideran la mayor parte del proceso de fragmentación como una consecuencia del impacto generado en la roca por el explosivo, en tanto que otros, de forma análoga, atribuyen - si no todo, si parte del proceso, a la presión del gas desarrollada en el barreno una vez que ha pasado la onda detonante y la onda de deformación asociada a la roca. En este sentido, Kutter (Ref. 23) realiza un intento para desarrollar

una teoría en la que entren en juego ambos efectos así como su interacción.

Por otro lado, estudios teóricos y medidas experimentales indican que, aunque la onda de esfuerzos y la presión del gas son efectos cada uno de ellos de una presión función continua del tiempo, ambos pueden considerarse válidamente - por separado. Debe no obstante reconocerse, que la roca sujeta al efecto de la presión del gas ha sido precondicionada - por la onda de detonación.

La mayor dificultad para estimar dichos efectos en voladuras convencionales es la rapidez con que uno sigue al otro, siendo virtualmente imposible separarlos. De cualquier forma, dicha teoría es la que más se aproxima a la situación real y es por tanto la que vamos a exponer a continuación de la manera más esquemática posible.

Todas las fuerzas, dinámicas y quasi-estáticas generadas en una explosión, resultan como se sabe de la detonación de una carga química confinada. La presión desarrollada, después de una elevación casi instantánea, disminuye suavemente en función del tiempo en un intervalo decreciente.

Dado que la rápida expansión de los gases a alta presión comprimen la roca, una intensa onda de presión se transmite a la misma de forma tal que, cuanto más capaces son de expandirse antes de encontrar los contornos de la roca los productos de la combustión y la onda de impacto precursora, - más baja es la presión de pico en el momento del impacto. Este es el principal efecto del grado de confinamiento (retacado) donde la presión ejercida sobre las caras del barreno se

reduce haciendo el diámetro del mismo, mayor que el de la carga. Así la presión actuante sobre el contorno de la roca se elevará casi instantáneamente a su valor de pico, el cual para todos los efectos puede considerarse del orden de $1/2 - 1/4$ del valor de la P_D y, entonces, cae más o menos exponencialmente como consecuencia del enfriamiento de los gases y la expansión de la cavidad. Su duración es muy pequeña y, aunque la presión del gas cae inicialmente con bastante rapidez, permanece lo suficientemente elevada como para continuar la expansión de la cavidad y ejercer una presión quasi-estática sobre los contornos de la roca por un tiempo relativamente largo. En algunos casos, la ventilación de los gases a través del contorno de la roca o de grandes grietas, pueden reducir drásticamente la duración de la acción ejercida por la presión de gas.

Generalmente se reconoce que la energía almacenada por la onda viene a presentar una pequeña fracción de la energía total liberada por el explosivo. Diversos ensayos en granito y gneiss han revelado que dicha energía es del orden del 10 - 18% del total de la energía relajada, en tanto que en rocas salinas se ha encontrado que dicho valor representa únicamente del 2 - 4%.

Pasando ya a las zonas de alteración física presentes alrededor de una explosión confinada, básicamente, podemos distinguir tres zonas según su grado de destrucción y deformación (Figs.1.1 y 1.2): zona hidrodinámica, zona de transición o no lineal y zona o región elástica. En la primera, que ya ce en la región inmediatamente próxima a la cavidad, los es fuerzos originados por el explosivo exceden en varias veces la resistencia a la compresión de la roca, siendo esta inten

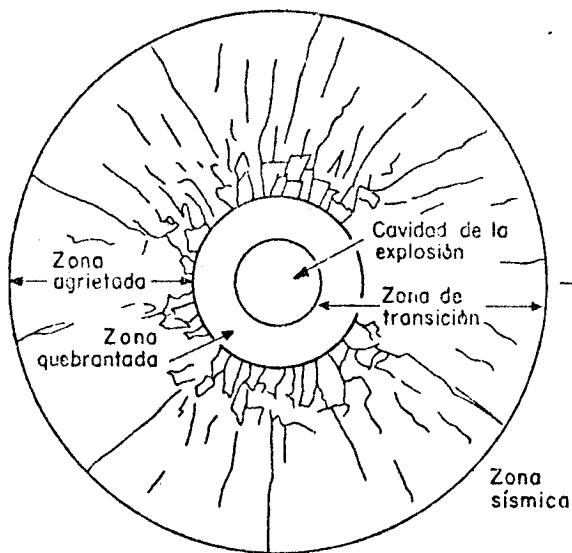


Fig. 1.1 — Zona de fragmentación alrededor de una explosión en roca.

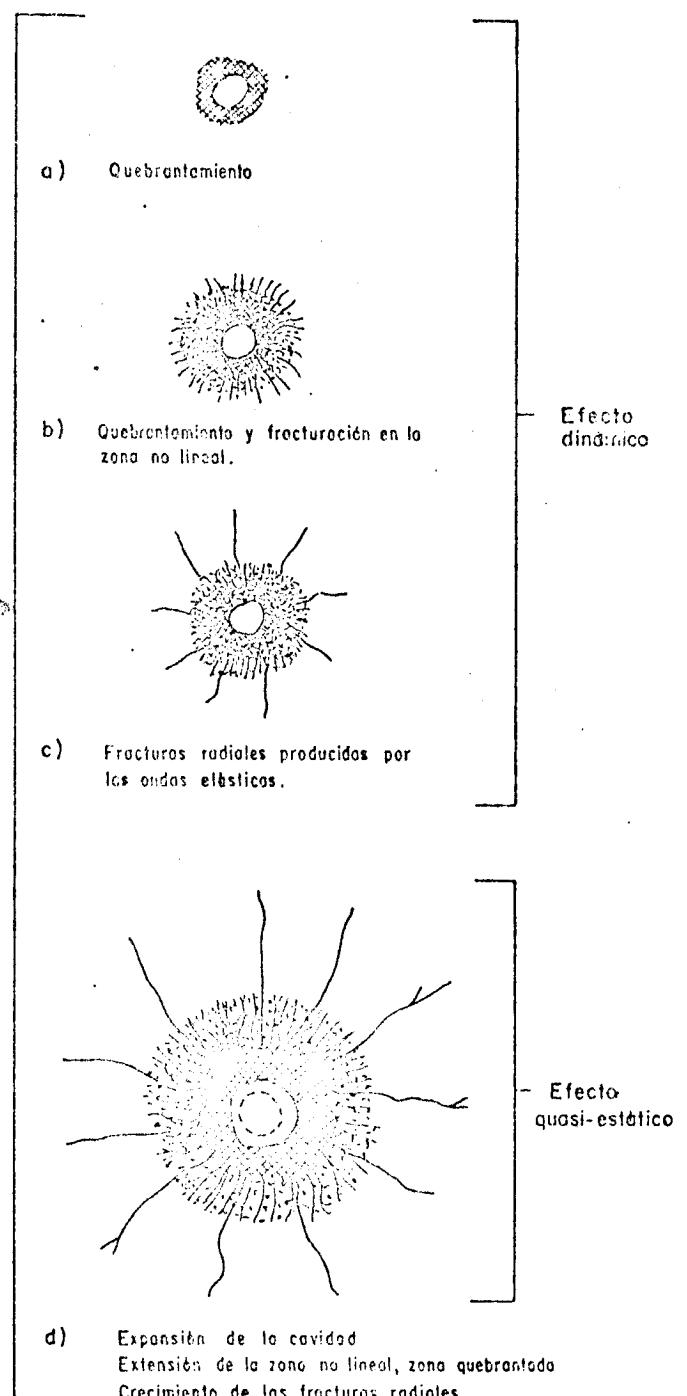


Fig. 1.2. — Esquematización de los estados sucesivos del proceso de fracturación originado por una explosión totalmente confinada.

samente fracturada. Esta excesiva desintegración está asociada a un consumo elevado de energía, resultando la rigidez elástica de la roca en esta región prácticamente insignificante.

La segunda, está caracterizada por un incremento de la resistencia al corte, aunque las ondas de esfuerzo se encuentran todavía sustancialmente por encima de la resistencia a la rotura. Los fenómenos de fractura asociados a esta zona van desde una severa fracturación con deformación plástica a una fracturación parcial.

La región exterior exhibe de forma predominante fracturas radiales producidas por la componente tangencial de la onda elástica previa. Esta región elástica es la más extensa y no tiene, en teoría, un límite externo. Incluso su fracturación es grande si la comparamos con las dos zonas internas, siendo, consecuentemente, la más interesante cuando consideramos la rotura alrededor de un explosivo confinado en rocas frágiles.

Las zonas hidrodinámica y no lineal únicamente tienen importancia práctica al actuar como filtro de esfuerzos y determinar qué porcentaje de esfuerzos generados por el explosivo se transmiten desde el interior a la región elástica. En esta última, la propagación de las ondas se caracteriza por efectuarse con amplitud de pico menor que el límite elástico de la roca y por una velocidad constante. Pudiéndose, por tanto, obtener expresiones analíticas para la generación de ondas elásticas por cargas esféricas y cilíndricas.

Los resultados más relevantes respecto a la rotura co rresponden a la atenuación de la onda, habiéndose determina-do que para una onda escalonada la amplitud máxima de la com ponente radial es teóricamente proporcional a r^{-1} en el ca-so de cargas esféricas y, a $r^{-1/2}$, en el caso de cargas ci líndricas. Siendo r la distancia radial desde el centro de la cavidad y, además, el espectro de frecuencia función del tamaño de la carga, incrementándose por tanto la porción de bajas frecuencias con el tamaño de la carga.

Las explicaciones teóricas a todo este proceso, tan complejo, están basadas sobre el principio de la conservación de la energía. En rocas, sin embargo, la energía será absorbida en forma de fricción, calor o fracturación y, consecuentemente, debe esperarse, una atenuación más rápida de la amplitud de los esfuerzos mencionados anteriormente. Experimentalmente se ha encontrado que la relación $\sigma_{\text{prin}} = \sigma_0 r^{-n}$, con $n = 1,5 - 3,0$ según el tipo de roca, satisface los valores obtenidos para la componente radial.

Por otra parte se ha prestado muy poca atención a la componente tangencial. Esta, aunque se atenúa más rápidamente que la radial, siendo prácticamente despreciable a grandes distancias, es sin embargo la que más directamente influye en la zona inmediatamente próxima a la carga. Además, la fracturación dentro de la zona elástica es debida únicamente a tensiones tangenciales, ya que la componente radial, prácticamente compresiva y con amplitud de pico menor que la resistencia la compresión de la roca, no puede ser la causa de la iniciación de las fracturas (Ref. 23).

Bajo la influencia de la onda de esfuerzos las partí-culas se mueven radialmente hacia afuera, resultando una de-formación y un esfuerzo de tracción en la dirección tangen-

cial. Como la resistencia a la tracción de las rocas es considerablemente menor que la resistencia a la compresión, la componente tangencial es lo suficientemente grande como para causar fracturas radiales, incluso aunque la compresión radial asociada haya descendido por debajo de la resistencia a la compresión. Estas fracturas pueden ser iniciadas bien como continuación de las fracturas generadas en la zona no lineal o por nuevas fracturas originadas a partir de microfisuras propias de la roca. Una vez que la componente tangencial se ha atenuado por debajo de un valor crítico, la onda se transmite por el medio rocoso sin producir fractura alguna.

Por otra parte, los gases procedentes de la combustión de los productos químicos comienzan a penetrar por las primivas fisuras radiales, ejerciendo una presión quasi-estática elevada, como consecuencia de la expansión de los mismos, sobre el contorno de la cavidad ya dilatada. Esto da lugar a un incremento de la zona fragmentada ya que la resistencia estática y el límite de rotura son menores que los dinámicos. Producíendose de esta forma la extensión de las fisuras ya existentes y, debido al estado tensional elástico, puede darse asimismo la posibilidad de generación de nuevas fracturas radiales.

4.- LEYES DE PROPAGACION Y GENERACION

Se han investigado diferentes modelos físico-matemáticos en un intento de descripción del comportamiento de las ondas en el interior de las masas rocosas. Estas investigaciones, sin embargo, se han basado fundamentalmente en ondas planas o en ondas esféricas de modo que las ecuaciones que gobiernan el fenómeno deberían describirlo a distancias sísmicas, hecho que no se da.

En efecto otras investigaciones, bien valiéndose de análisis teóricos o bien de resultados experimentales tanto - en campo como en laboratorio, han sido más ambiciosas y han buscado representaciones matemáticas que definen las leyes de propagación de las ondas a cualquier distancia del origen o punto en el que se produce la alteración.

Si consideramos la onda de esfuerzos, se observa que es claramente dependiente de los parámetros mencionados en el epígrafe 2.2, los cuales determinan la forma, longitud e intensidad de la onda de esfuerzos transmitida a la roca. No obstante, al no tenerse en cuenta la interacción de todos estos parámetros, es posible simplificar el problema y tratarlo como de ondas esféricas o cilíndricas originadas por el explosivo en el interior de la roca circundante. Veamos a continuación

los diferentes enfoques que tratan de describir éste fenómeno.

4.1.- ANALISIS TEORICOS

Sharpe (1942) mostró en uno de sus trabajos que el mecanismo de generación de ondas por explosivos es el más conocido de los tres procesos implicados en la prospección sísmica: generación, propagación y registro de las ondas. Por tanto, trataremos de proporcionar una visión rápida de los análisis teóricos realizados, pudiendo el lector interesado acudir a las Refs 6 y 32, en donde podrá encontrarlo con una descripción detallada.

Bajo este punto deberíamos dividir el tipo de ondas en dos grupos: ondas elásticas e inelásticas, según los diferentes modelos empleados por los investigadores para tratar de definir el comportamiento del material. Por un lado, las ecuaciones clásicas de ondas elásticas son inadecuadas para describir los fenómenos observados en el campo; tales como atenuación, dispersión, cambio de longitud de onda y superposición de las mismas. Por otro, una solución completa de la ecuación de ondas esféricas en un medio viscoelástico no se ha desarrollado todavía y las ecuaciones para ciertos modelos viscoelásticos han mostrado una fiabilidad limitada de ser aplicables a masas rocosas y, en particular, cuando estamos tratando con fenómenos dinámicos.

De aquí que sean muchos los esfuerzos encaminados a describir el fenómeno de propagación y generación de ondas. En el caso de ondas esféricas elásticas, se han producido las investigaciones realizadas por Sharpe (1942), Blake (1952) Kolsky (1953), Duvall (1953) Lee (1964), Clark (1952, 1966) y Favreau (1969). Todos ellos, excepto el último, parten de las hipótesis siguientes para la ecuación que gobierna el fenómeno.

no: la variable desplazamiento radial es reemplazada por un desplazamiento potencial, se considera el módulo de Poisson $\nu = 1/4$ y se suponen despreciables las variaciones de densidad inducidas en el medio como consecuencia de la explosión.- Favreau, por su parte, suponiendo también un medio homogéneo e isótropo, considera un explosivo de baja P_D y, además, que los gases generados obedecen a la ecuación de estado expresada en función de su volumen específico.

Por otra parte, en todas estas investigaciones se resuelve el problema considerando que la fuerza aplicada viene definida en función del tiempo. Sharpe (1942) considera una función exponencial decreciente; Blake (1952) la supone sinusoidal; Duvall (1953) considera una doble exponencial; Clark (1952), tomando la misma función empleada por Sharpe, resuelve el problema por medio de las transformaciones de Laplace, en tanto que Sharpe lo hizo por integrales de Fourier; Lee (1964) supone un modelo sólido fricción y disipación constante; Collins efectúa el análisis de la ecuación de ondas planas para un modelo viscoelástico (modelo de Voigt) considerando una relación determinada entre el esfuerzo y la deformación y aunque, en este caso, satisface la condición de que la atenuación es función del cuadrado de la frecuencia, cumpliéndose por tanto la condición de Boltzman para la superposición, no parece describir el fenómeno de los sólidos reales para to as las frecuencias. Rupert, en el caso de ondas esféricas, al considerar un estado estacionario sinusoidal, aporta una solución análoga a la de Kolsky para ondas planas pero sin aplicar las condiciones de contorno. Lee (1964) desarrolla para un estado estacionario el caso de una función sinusoidal de esfuerzos que, sin embargo, no satisface la respuesta a un "input" de tipo impulso.

Mattice y Lieber, en forma de una integral de Fourier, ofrecen una solución parcial a la ecuación de ondas en un modelo de Voigt para una función exponencial decreciente. Lee (1964) obtuvo asimismo una solución para una función exponencial decreciente considerando el modelo de Voigt modificado, e introduciendo, como simplificación, que la atenuación obedece a un factor de disipación constante, lo cual destruye su aplicabilidad a un modelo de Voigt e introduce dentro del problema algunas dificultades matemáticas.

Knopoff propone un modelo sólido-fricción, lo que es equivalente a considerar la relación esfuerzo-deformación de tal forma que implica que la atenuación es una función de primer orden de la frecuencia. Clark, finalmente, prosigue las investigaciones empleando el modelo de Voigt.

En el caso de ondas cilíndricas existen asimismo soluciones matemáticas suponiendo que la detonación se produce instantáneamente a lo largo de toda la columna de carga. Los trabajos más notables realizados en este sentido fueron los llevados a cabo por Heelan (Ref. 16) y Jordan (Ref. 18).

Dado que en la práctica no se cumple la hipótesis de detonación instantánea de la columna, Plewman y Starfield sugieren un método aproximado en el que la onda de deformación debida a una carga cilíndrica es sustituida por la superposición de ondas originadas por cargas concentradas alineadas, que detonan, según la V_D del explosivo, a intervalos regulares de tiempo. Su análisis está basado en relaciones empíricas obtenidas para cargas esféricas.

4.2.- ANALISIS EXPERIMENTALES

El problema básico relativo al análisis de la propagación de ondas en medios rocosos está intimamente unido a las características del comportamiento del material, ya que las ecuaciones determinantes para una geometría definida de la cavidad y del medio no presentan problemas.

Desafortunadamente, las propiedades dinámicas de las rocas no suelen estar en consonancia con las propiedades impuestas a los medios idealizados. Consecuentemente, ninguna de las soluciones teóricas sobre generación de ondas de esfuerzos como consecuencia de la aplicación de una fuerza al contorno interno de una cavidad esférica o cilíndrica parece ser satisfactorio del todo para explicar los resultados experimentales. Esto no significa que los trabajos teóricos sean un camino erróneo, sino únicamente que las propiedades dinámicas no han sido tenidas en consideración en los estudios teóricos realizados hasta el presente. Los trabajos teóricos se centran en un ambicioso análisis como es el de obtener una comprensión básica del fenómeno físico de la rotura, generación de ondas y propagación de las mismas y, en efecto, parece aconsejable que las investigaciones teóricas futuras deberían intentar separar la generación de ondas de su propagación. Quizá de poder separarse ambos fenómenos se podría ser capaz de resolver satisfactoriamente alguno de ellos y al menos, de forma que la teoría y los resultados experimentales estuvieran en consonancia.

En el caso que estamos tratando existen poco información en la que se proporcione reglas prácticas que puedan emplearse en problemas de voladuras. Cuando esto sucede, sin

duda como consecuencia de la dificultad de tratamiento teórico de los problemas, resulta de gran utilidad adoptar aproximaciones empíricas y recopilar datos experimentales que puedan emplearse en la resolución de problemas prácticos, a la vez que puedan ser útiles para mover a su vez nuevos enfoques teóricos.

En principio, la información necesaria puede obtenerse experimentalmente a través de dos caminos diferentes:

- a) Observaciones "in situ" de voladuras o alteraciones sísmicas.
- b) Ensayos de laboratorio sobre pequeñas muestras de la roca pertinente.

Sin embargo, en la práctica, ambos tipos de aproximaciones se han establecido con dificultad y están sujetos a críticas válidas. Por un lado, las observaciones "in situ" - deben llevarse a cabo bajo condiciones relativamente incontroables incluyendo, en general, el grado de incertidumbre implícito en el conocimiento de la disposición precisa del medio: estratificación, fallas, heterogeneidades, etc. Por otro, las muestras investigadas en el laboratorio pueden no ser representativas del medio real en cuestión, poseyendo necesariamente diferentes geometrías y no representada con toda probabilidad las variaciones estadísticas del material - existente en las condiciones reales "in situ".

a.- ensayos de campo.

El U.S. Bureau of Mines adopta esta metodología empírica, siempre que se le reclama para investigar los proble-

mas de vibraciones producidas por voladuras de canteras y el efecto que esas vibraciones ejercen sobre las estructuras.

El Bureau no intenta resolver teóricamente como se produce la generación de ondas, cómo estas ondas se atenúan con la distancia al propagarse por diferentes medios y cómo influye la amplitud y la frecuencia de las vibraciones sobre estructuras de diferentes tipos. En lugar de ello, optan desde un principio por la ejecución y análisis de ensayos de campo numerosos. Como resultado de ello se posibilita el empleo de los datos obtenidos para hacer estimaciones razonables de los niveles de vibraciones originados por las voladuras en las canteras tanto para diferentes cargas de explosivo, a distancias variables de las estructuras, como para diversas condiciones del medio.

b.- ensayos de laboratorio.

Goldsmith, basándose en diferentes criterios tales como la posibilidad de que el material no pueda representarse por un modelo elástico, expresa en este sentido que esta segunda técnica, la experimental en laboratorio, ofrece mejores posibilidades en una la obtención de datos cuantitativos de la ecuación macroscópica de estado para diferentes rocas, que las que pueden observarse con ensayos "in situ".

El comportamiento hidrodinámico se estudió con anterioridad por otros autores (Refs. 2, 11, 25, 26), incluyendo en sus estudios rocas tales como las salinas, mármoles, granitos, basaltos, calizas, gabros, tobas, grauwacas y argilitas, en las que se midió la velocidad de partícula en la superficie libre y en la de impacto; llegó a establecer la relación presión-densidad con la ayuda de la relación de Rankine-Hugoniot.

La investigaciones de Grine (Ref.11,12) nos muestran que un grado elevado de porosidad produce un gran efecto de alteración en la onda esfuerzo y rotura posterior del material a un nivel tensional relativamente más bajo que en rocas con baja porosidad.

El contraste con las investigaciones "in situ", existe poca información de los ensayos dinámicos de laboratorio. De la existente, encontramos que Bruckshaw y col. (Ref. 4) estudian los cambios producidos en los valores de las constantes elásticas de diferentes rocas y, asimismo, que emplean una excitación de 40-120 c.p.s. en estado estacionario se observa un aumento de 2,5% en los mismos, en tanto que la variación disminuye para valores elevados de la frecuencia. Además llegan a que la disipación por ciclo debida a la frecuencia es independiente de la misma en dicho dominio y que esa disipación es menor para rocas duras que para rocas blandas. Por su parte Bacon (Ref. 1) estudia la resistencia a la tracción de muestras de basalto y de arenisca empleando la barra de Hopkinson, a la vez que diversas amplitudes de deformación con el fin de determinar ecuaciones dinámicas que sean representativas.

Sin embargo, siempre que algún mecanismo disipativo, lineal o no lineal, esté presente en las rocas, las disperiones observadas pueden deberse a otros factores distintos al de un comportamiento inelástico del medio.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Bacon, L.O.: A Method of Determining Dynamic Tensile Strength of Rock at Minimum Loading. U.S. Bureau of Mines R.I. 6067, 1962.

- 2.- Bais, R.C, Hawk, H.L. and Chabai, A.J.: Hugoniot Data for Some Geologic Materials, Sandia Corp., Research Report - 1963.

- 3.- Blake, F.G. Jr.: Spherical Wave Propagation in Solid Media J. Acoust. Soc. Am. vol 24, 1952, pp. 211-215

- 4.- Bruckshaw, J. McG. and Mahanta, P.C.: The Variation of the Elastic Constants in Rocks with Frequency. Petroleum, vol. 17, 1954, p.14.

- 5.- Clark, G.B.: Propagation of Small Shock Waves from a Spherical Cavity in an Infinite Isotropic Elastic Medium. Ph. D. Thesis, University of Illinois, 1952.

- 6.- Clark, G.B.: Blasting and Dynamic Rock Mechanics. 8th Symposium on Rock Mechanics, September 1966.

- 7.- Collins, F.: Plane Compressional Voigt Waves. Geophysics, 1960, vol. 25, pp. 483-492.

- 8.- Duvall, W.I.: Strain Wave Shapes in Rock Near Explosions Geophysics, vol. 18, 1953, pp. 310-323.

- 9.- Duvall, W.I., Atchison, T.C. and Fogelson, D.E.: Empirical Approach to Problems in Blasting Research. 8th Symposium on Rock Mechanics, September 1966.
- 10.- Favreau, R.F.: Generation of Strain waves in Rock by an Explosion in a Spherical Cavity. Journal of Geophysical Research, vol 74, N° 17, August, 1969, pp. 4267-4280.
- 11.- Grine, D.R.: Finite Amplitude Stress Waves in Rocks. Poulter Laboratory Tech. Report 012-59, Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif., Oct. 1, 1959.
- 12.- Grine, D.R.: Equations of State of Granite and Salt. Report Prepared for Un. of California, L.R.2., 1961
- 13.- Goldsmith, W. and Austin, G.F.: Some Dynamic Characteristics of Rock Stress Waves in Inelastic Solids. Ed. by H. Kolsky. Springer-Verlog. Berlin, 1964, p. 277.
- 14.- Goldsmith, W. and Allen. W.A.: Graphical Representation of the Spherical Propagation of Explosive Pulses in Elastic Media. Jour. of the Acous. Soc. Am. vol. 27, No. 1, 1955, p. 47.
- 15.- Goldsmith, W.: Pulse Propagation in Rocks, 8th Symposium on Rock Mechanics, September 1966.
- 16.- Heelan, P.A.: Radiation from a Cylindrical Source of Finite Length. Geophysics. vol, 18, 1953, pp. 685-696.
- 17.- Hino, K.: Theory of Blasting with Concentrated Charge. J. Ind. Explos. Soc. Japan. vol. 15, 1954, pp.233-249.
- 18.- Jordan, Dow.: The Stress Wave from a Finite Cylindrical Explosive Source. Jour. of Math. and Mec., vol. 11 1962, pp. 503-552

- 19.- Kolsky, H.: Stress Waves in Solids. Oxford Press 1953.
-
- 20.- Knopoff, L.: The Seismic Pulse in Materials Possessing - Solid Friction I. Plane Waves. Bull. of the Seis. Soc. Am vol 56, 1956, p.175
-
- 21.- Knopoff, L. and McDonald, G.J.F.: Attenuation of Small - Amplitude Stress Waves in Solids. Rev. of Mod. Physics. vol. 30, no 4, 1958, P. 1178.
-
- 22.- Knopoff, L.: The Seismic Pulse in Materials Possesseing Solid Friction II. Lamb's Problem. Bull. of the Seis. Soc Am., vol 49, 1959, p. 403.
-
- 23.- Kutter, H.K. and Fairhurst, C.: On the Fracture Process in Blasting. Int. I. Rock Mech. Min. Sci, Vol. 8, 1971 pp. 181-202.
-
- 24.- Lee, T.M.: Spherical Waves in Viscoelastic Media, Journal of Aconst. Soc. of Am, December 1964 od 36 pp 2402-2407.
-
- 25.- Lombard, D.B., The Hugoniot Equation of State of Rocks - University of California, Laurence Radiation Laboratory, Livermore, UCRL Report 6311, Feb-28, 1961.
-
- 26.- Lombard, D.B., and Adelmon, F.L. The Hugoniot Equation - of State of Granite, University of California, Laurence Radiotion Laboratory, Livermore. UCRL Report 6419, June 1961.
-
- 27.- Mattice. H.C., and Lieber, P. On Attenuation of Waves Pro duced in Viscoelastic Materials. Transoctions of American Geoph. Union. 1954. vol. 35, pp 613-625.
-

- 28.- Persson, P.A., Lundborg, N. and Johanson, C.H: The basic mechanisms in rock blasting. *L'Industrie Minérale*, Número Special, Novembre 1971, pg. 125-134.
-
- 29.- Plewman, R.P. and Starfield, A.M.: The Effects of Finite Velocities of Detonation and Propagation on the Strom - Pulses Induced in Rock by Single Charges *Journal of S. Africam Inst of Min and Met*, 1965, vol 66, No 3, pp 77-96.
-
- 30.- Rinehart, J.S.: On Fractures Caused by Explosions and Impacts. *Col. Seh. Mines Q.*, vol. 55, 1960, pp.155
-
- 31.- Rupert, G.B.: A Study of Plane and Spherical Compressional Waves in a Voigt Viscoelastic Medium, PhD Thesis, - University of Missouri at Rolla, 1964.
-
- 32.- Sharpe J.A.: The Production of Elastic Waves by Explosion Pressure Part 1 Theory and Empirical Field Observations *Geophysics* 1942, vol 7 No. 2 pp. 144-154.
-
- 33.- Starfield, A.M.: Strain Wave Theory in Rock Blasting Proc. of the Eighth Symp. on Rock Mech., University of Minnesota, Minneapolis, 1966.
-
- 34.- Weber, P. et Esteve, B.: Calcul de la propagation d'une onde de contrainte à symétrie sphérique ou cylindrique. Application au tir d'explosif. *L'Industrie Minérale*, Número Special, Novembre 1971, pag. 56-75
-
- 35.- Weber, D. et de Montille, G.: La résistances dynamiques des roches. *L'Industrie Minérale*, Número Special, Novembre 1971, pg. 37-46.
-

CAPITULO II

VIBRACIONES PRODUCIDAS POR
VOLADURAS Y CRITERIOS DE DAÑOS.

1.- INTRODUCCION

La investigación sobre vibraciones distintas a las producidas por voladuras son una preocupación constante tanto en la ingeniería civil como en la industrial. En efecto, el tráfico ferroviario y por carretera, el esfuerzo del viento sobre las estructuras, las vibraciones mecánicas, etc., no son más que unos pocos de los ejemplos que se registran de modo rutinario. Por el contrario, las vibraciones producidas por voladuras no son tan conocidas a pesar de que han sido intensamente estudiadas de modo continuo en los 15-20 últimos años.

Evidentemente, se trata de un tipo de vibraciones que ha venido a desarrollarse a gran escala durante las últimas décadas como consecuencia del incremento sufrido en el empleo de explosivos y del gran desarrollo experimentado por muchas ciudades, lo que origina una la proliferación de la aplicación de voladuras en la proximidad de propiedades privadas y de estructuras. Asimismo, la necesidad de una mayor producción de materiales de construcción cuya localización óptima en un sentido económico hace situar a numerosas canteras en las proximidades de centros urbanos, incrementa la posibilidad de que las vibraciones, tanto al propagarse a través del terreno como de la atmósfera, puedan producir perturbaciones en el medio en que vivimos.

Claro es que muchas de las reclamaciones que se registran sobre daños producidos por voladuras tienen un fundamento lógico en tanto que, en otras muchas ocasiones, tales reclamaciones no son más que consecuencia de daños registrados como resultado de problemas de cimentación, naturaleza - deficiente de los materiales empleados, etc.

En general, las reclamaciones y quejas suelen ser - harto numerosas y constituyen uno de los grandes problemas- para los técnicos relacionados con voladuras. Por tanto, esto impone la necesidad de una evaluación tecnológica del problema, con el fin de apreciar o correlacionar los problemas- asociados con las vibraciones según los niveles de las mismas.

Estas vibraciones, por lo general, son de corta duración 1 a 2 sg.-, y consisten fundamentalmente en ondas con una frecuencia inicial elevada y baja amplitud y que, posteriormente, se transforman en ondas de baja frecuencia y amplitud variable, que se amortiguan rápidamente. Finalmente , puede existir una segunda onda de elevada frecuencia originada por las perturbaciones transmitidas por el aire.

2.- CONSIDERACIONES GENERALES

2.1.- TIPOS DE ONDAS

Como hemos expuesto en el capítulo anterior, cuando se produce la detonación de una carga explosiva en el interior de una masa rocosa sucede que, a excepción de una zona próxima a la cavidad en la que tiene lugar todo el daño efectivo causado en la roca por el explosivo, las únicas ondas significativas que se transmiten a dicha masa rocosa resultan ser ondas elásticas de baja energía.

Sin embargo, se sabe que el movimiento superficial - como resultado directo de la influencia de estas ondas de baja energía-, puede causar un daño considerable a las estructuras superficiales que encuentre en su camino. Vamos, pues, a prestar atención aunque brevemente, a la naturaleza de las diferentes ondas elásticas presentes en un problema de este tipo. Cada tipo de onda la representaremos simbólicamente de acuerdo con los criterios convencionales empleados en geofísica.

Se generan los tipos básicos de ondas elásticas por una explosión: "ondas internas", que se propagan por el interior, en este caso, del sólido rocoso, y "ondas superficiales", que únicamente se transmiten por la superficie del material. Dentro de las primeras se encuentran las ondas de compresión o principales - ondas P -, y las ondas de cizallamiento o secundarias - ondas S -. Las ondas P inducen a la

partícula un movimiento oscilatorio longitudinal y cuando es tas inciden sobre un contorno libre o de cambio de material, transversal con su dirección de propagación, uno de los efec tos resultantes es dar lugar a una sonda S en la que la partícula se mueve en dirección transversal sin comprimir el material. Naturalmente, las ondas P se propagan en cualquier material que resista la compresión por ellas impuesta en tan to que las ondas S, dado que dependen de la facilidad del ma terial en que se propagan para resistir cambios de forma, únicamente pueden existir en un sólido.

La existencia y velocidad de propagación de todas las ondas elásticas a través de un medio es función de la densidad y constantes elásticas del mismo, dando lugar a las ya conocidas expresiones de:

$$C_P^2 = \frac{K + 4/3\mu}{\rho}$$

$$C_S^2 = \frac{\mu}{\rho}$$

en donde

ρ = densidad

K = módulo de bulk

μ = módulo de rigidez

C_P = velocidad de propagación de las ondas P

C_S = velocidad de propagación de las ondas S

Respecto a las voladuras, las "ondas internas" únicamente transportan una pequeña fracción del total de la energía disponible, particularmente si el explosivo, como sucede

normalmente, no está colocado a gran profundidad. Por tanto, la mayor parte de la energía la transportan las ondas superficiales, de las que las ondas Rayleigh y Love son las más conocidas. Así, una partícula sometida a una onda Rayleigh - ondas R - sigue un camino de propagación elíptico en un movimiento retrógrado, sin llevar consigo desplazamiento en el cizallamiento; esto es, en la cresta de su propagación, (el eje mayor generalmente es vertical) (ver Refs.7,32) la partícula se mueve con dirección al punto de donde procede la onda. Por otra parte, una partícula sometida a una onda Love - ondas Q -, vibra con un movimiento transversal sin ejercer, en teoría, influencia alguna en los registros de medida tomados en las dos direcciones ortogonales con el desplazamiento transversal. Su movimiento no tiene componente vertical, pudiéndose propagar a través de un medio subyacente a una superficie de reflexión ideal, tal como una discontinuidad representada por roca-aire, y, asimismo, infrayacente a un medio en el que la velocidad de las ondas S es superior a la que tienen estas en el material original de propagación.

En tercer lugar tenemos las ondas hidrodinámicas -ondas H-, cuya acción sobre las partículas está en el mismo - plano, de forma análoga a como lo hacen las ondas R pero, en las H, el movimiento no es retrógrado. El movimiento de estas ondas obliga a una partícula a describir una órbita curvilínea similar a las de las R, con la excepción de que el frente de su órbita se mueve hacia adelante como una onda sobre el agua. Al igual que en las R, el movimiento se verifica en un plano vertical orientado en la dirección de propagación de las ondas.

Finalmente tenemos las ondas de superposición -ondas C - como resultado de la combinación de las ondas P y S, en las que la partícula describe un movimiento elíptico bien -

retrógrado o bien hacia adelante. El plano de la elipse está inclinado un cierto ángulo, menor que 90° , con la dirección de propagación de la onda, y la partícula se mueve en la dirección de una de las diagonales de una malla rectangular situada según la dirección de propagación.

Las ondas H y C se han registrado de forma satisfactoria solo en registros obtenidos en ensayos sobre materiales no consolidados, pero no han sido sometidas a un análisis matemático de detalle.

Cada una de las ondas hasta aquí descritas tienen una velocidad única para cualquier medio de propagación y, aunque la teoría sugiere un valor para las ondas $R \approx 0,9 C_S$, en la práctica resulta sumamente difícil sostenerlo. Hay evidencia, sin embargo, de que en las ondas superficiales se da la secuencia C, H, Q y R, en orden decreciente de velocidad. Pero, sobre distancias cortas de propagación, su separación individual puede con frecuencia resultar extremadamente difícil.

2.2.- LEY GENERAL DE PROPAGACION DE LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS POR UNA VOLADURA

Teóricamente, el valor de pico (A) del desplazamiento, velocidad o aceleración de la partícula causada por una explosión, sería proporcional a la raíz cuadrada de la energía liberada por el explosivo. Si consideramos que dicha energía es directamente proporcional a la carga del explosivo B, podemos obtener una ecuación de la forma:

$$A \propto B^{1/2}$$

De modo más general dicha ecuación puede expresarse:

$$A \propto W^{1/2},$$

en la que W es igual al producto de B por el producto de la potencia por el peso del explosivo, expresándose este último producto o parámetro en función de la goma pura en el caso de los explosivos nacionales.

Como ya hemos expuesto con anterioridad, parte de la energía de la explosión se disipa debido a la desigual impedancia entre el explosivo y la roca y, con frecuencia, también por la existencia de un retacado deficiente. Nicholls - (Ref. 36) piensa que el grado de confinamiento del explosivo es de suma importancia en el proceso de la transmisión de energía, siendo, por tanto, contrario a las conclusiones de Morris (Ref. 33) quien arguye que el grado de confinamiento de la carga no ejerce ningún efecto. Por otro lado, se da una disipación posterior de energía al desintegrarse la roca próxima a la cavidad y todo ello hace sugerir que la relación dada es inadecuada, excepto en el caso de pequeñas - cargas colocadas en un medio de baja resistencia tal como la arena. Por tanto, una expresión más aceptable sería:

$$A = K_1 W^n,$$

en la que K_1 y n son constantes.

Por otra parte, como la amplitud de las ondas propagadas desde el contorno de la zona desintegrada -bajo condiciones elásticas - decrece en relación inversa a la raíz cuadrada de la distancia, al suponer un exponente n de propagación

ción que incluya cualquier frecuencia independiente de la atenuación, la ecuación general puede transformarse en:

$$A = K_2 D^{-m},$$

en donde K_2 es una constante, m varia entre 1 y 2 y D es la distancia entre el punto de medida y la voladura.

Combinando las dos últimas ecuaciones resulta una ley de propagación que en su forma más simple puede expresarse como:

$$A = K W^n D^{-m}$$

en la que la amplitud es una función de dos variables distancia y peso de la carga explosiva, y K , m , n son constantes - que dependen de las condiciones geológicas de la zona, y en ocasiones, del tipo de pega efectuado. Además los valores de n y m están condicionados por la componente medida del parámetro del estado de vibraciones - velocidad, aceleración etc, - que se haya considerado.

Tanto los métodos teóricos como los experimentales - se han empleado para estimar los valores de m y n . Los valores típicos con que generalmente nos encontramos varían de 0'4 a 1 para n , y, para m , de 1 a 2; es evidente que cualesquiera que sean las condiciones de propagación, los valores experimentales obtenidos para m son muy próximos al valor de 2 n , de este modo, se llega a obtener una simplificación de la ley de propagación cuya expresión es:

$$A = K \left(\frac{W}{D^2} \right)^n$$

El parámetro A, como se ha indicado, puede representar tanto el valor de pico del desplazamiento, como el de la velocidad, o el de la aceleración, variando, en consecuencia, los constantes K y n según la magnitud medida.

2.3.- EQUIPOS DE REGISTRO

Las variables empleadas para estudiar las vibraciones del terreno (desplazamiento, velocidad o aceleración de la partícula) deben medirse en función del tiempo, siendo, en general, el registro proporcional a la magnitud medida. El desplazamiento es la magnitud más frecuentemente medida debido a la facilidad con que puede registrarse por medio de un sismógrafo portátil.

Un sismógrafo no es más que un instrumento que mide y proporciona, al mismo tiempo, un registro continuo de las vibraciones del terreno. Su elemento principal está integrado por un peso suspendido de un muelle, de forma tal que su inercia le haga mantenerse en reposo si su soporte se mueve.

Existen muy diferentes caminos de registrar el movimiento relativo entre peso y soporte y de esa forma obtener la magnitud del movimiento del último. El lector interesado puede acudir a la monografía "Earth Waves, Leet, Harvard University Press, 1950 p. 27" en la que encontrará una descripción detallada del comportamiento y características de un sismógrafo.

Las magnitudes básicas para la obtención de datos de una medida sismográfica son: la amplitud y la frecuencia del

terreno, o estructura, en movimiento, que directamente son registradas por el sismógrafo.

Su análisis, si bien resulta sencillo en el caso de una onda única sinusoidal, necesita de una gran experiencia y de un cuidado extremo para definir la frecuencia real cuando ondas de más de una frecuencia coinciden en un mismo registro.

Se han diseñado sismógrafos especiales para el estudio de las ondas que se originan en el terreno, particularmente en conexión con las que son capaces de producir daños en estructuras y, accidentalmente, para investigar las características que las hacen perceptibles o molestas. No obstante, todo sismógrafo opera sobre el mismo principio ya descrito.- Los instrumentos difieren, sin embargo, en el mecanismo por el cual se realiza el registro de dicho movimiento. Así, en el sismógrafo de Leet, se emplea un mecanismo de balancín. Posteriormente, para reducir el tamaño y peso necesario empleado por este sistema, se ha recurrido en otros al sistema de espejos o de barras acopladas mediante hilos de materiales frágiles, que cambian de longitud con la temperatura, o por hilos de nylón que lo hacen con la humedad.

Ultimamente se vienen empleando circuitos electrónicos, ya que sus señales de salida pueden compararse fácilmente por cualquier operador, si se han calibrado antes de realizar los registros. Un sismógrafo adecuado al tipo de estudio a que estamos refiriendonos, debe registrar las tres componentes ortogonales del movimiento: dos horizontales y una - vertical.

Existen dos vibrógrafos standard que han sido muy uti
lizados en este tipo de estudios: "Nobel Vibrograf" y "Cam-
bridge Vibrograf". El primero fue diseñado especialmente pa
ra vibraciones producidas por voladuras, y registra la compo
nente horizontal y transversal de la onda de choque. En tan-
to que el segundo registra la componente vertical y horizon-
tal de la misma. En el anejo n° 1 exponemos las caracterís-
ticas de alguno de los equipos de registro más empleados en
la actualidad.

3.- FACTORES QUE AFECTAN AL NIVEL DE VIBRACIONES PRODUCIDAS POR VOLADURAS

El proceso de una voladura implica una serie de pasos para su preparación y, a su vez, una compleja secuencia de fenómenos a lo largo de la detonación del explosivo, así como a continuación. Cada uno de ellos desempeña su papel en las vibraciones ocasionadas, que son el producto residual de la operación, haciéndolas perceptibles al ser humano y gobernando los efectos de las mismas sobre las estructuras.

El nivel y naturaleza de las vibraciones de las voladuras son afectados por un cierto número de factores, algunos de los cuales pueden manejarse adecuadamente para reducir los efectos de aquéllas. En estos factores se incluyen la disposición geométrica de los barrenos, la naturaleza geológica del terreno y las propiedades de los materiales alrededor de la voladura, así como propiedades del explosivo y tipo de iniciación.

3.1.- DISPOSICION GEOMETRICA DE LOS BARRENOS

La preparación de una voladura comienza con la perforación de los barrenos que van a alojar el explosivo, y, en dicha operación, tienen una influencia considerable sobre el resultado final, los que hemos llamado parámetros de carga (ver epígrafe 2.2(1)). De este modo, han de considerarse obligatoriamente el diámetro y profundidad de los barrenos, el espa-

ciamiento, la piedra, la localización del explosivo en los barrenos y la cantidad de explosivo necesario para volar el volumen de roca que se desee. En este sentido, la regla que suele aplicarse más generalmente en torno al efecto de estas operaciones sobre los niveles de vibraciones, es la de que la disposición de los barrenos y de la carga explosiva que producen la rotura más eficaz de la roca originará, al mismo tiempo el nivel mínimo de vibraciones. Por tanto, en la elección del explosivo ha de estar implícita la necesidad de considerar las propiedades del explosivo y de la roca, resultando, de la combinación de ambos factores (capacidad, por un lado, de los explosivos para generar vibraciones y, por otro, naturaleza de la roca para propagarlas), el nivel final de vibraciones.

3.2.- EXPLOSIVOS

No vamos a entrar en las consideraciones de naturaleza físico-química que explican el proceso de la detonación de un explosivo; esto, siendo importante, es quizás el punto de menor trascendencia desde un punto de vista práctico. Hemos de limitarnos, pues, a manejar convenientemente los parámetros que definen las características de un explosivo para una aplicación racional en la técnica de voladuras. Por ello vamos a describir, someramente, algunos puntos de carácter general. En el anejo nº 2 exponemos un breve análisis sobre el tema.

La efectividad de un explosivo para romper la roca y generar vibraciones depende de la energía total liberada por el mismo, del intervalo en que es liberada y de la eficacia con la que esa energía se transmite a la roca circundante. Como es natural, estos factores no pueden controlarse a tra-

vés de una simple propiedad del explosivo. Por un lado, el contenido total de energía es una característica de suma utilidad para comparar unos explosivos con otros. Por otro, una densidad del explosivo relativamente alta entraña una compactación eficaz entre sus granos y que, por tanto, el frente de onda de detonación ha de transmitirse de grano a grano de forma más eficaz que si la densidad fuera baja. Asimismo, la velocidad y presión de detonación se relacionan directamente con la densidad y ambas son de extrema importancia en el proceso de rotura ya descrito.

Existe un amplio rango de explosivos industriales - disponibles en el mercado. De forma general pueden dividirse en cuatro grupos principales y cuyas propiedades, desde un punto de vista de generación de vibraciones, dependen de su potencia, velocidad de detonación y densidad.

Estos grupos son los siguientes:

- (i) Gomas: Alta potencia relativa (65-100%), densidad - (1,5 - 1,6 gr/cm³) y velocidad de detonación (5.000 - 7.500 m/seg).
- (ii) Gomas especiales: En general, su potencia relativa - (60-95%), densidad (1,35-1,60 gr/cm³) y velocidad - de detonación (5.000 - 7.000 m/seg) son inferiores a las anteriores.
- (iii) Explosivos pulverulentos: Comprende un grupo de explosivos con una potencia relativa muy similar (70- -77%), una velocidad de detonación media (3.000 - - 4.500 m/seg) y una densidad baja (0,90 - 1,2 gr/cm³)

- (iv) Slurries: Son explosivos de potencia, densidad y velocidad de detonación alta, aunque inferior a la de las gomas. Su ventaja fundamental es su densidad de carga y su insensibilidad, necesitándose un multiplicador de PENTOLITA para iniciarlos.

Fácilmente puede deducirse que todos estos tipos de explosivos pueden producir diferentes intensidades de energía sísmica en forma de vibraciones. En efecto, cuanto más alta es la potencia del explosivo más concentrada será la carga en el barreno y, consecuentemente, mayor será el choque.

De forma similar, cuanto más elevada sea la velocidad de detonación del explosivo existirá mayor probabilidad de que la onda de choque sea mayor y, lo que es más importante, la onda asociada transmitida a través del aire también será mayor.

Con frecuencia los barrenos se diseñan inadecuadamente de forma que se solicita del explosivo la realización de un trabajo mayor o menor del que es capaz de hacer. En estas condiciones, los explosivos rompedores son capaces de producir a una distancia determinada amplitudes más altas que las originadas por explosivos de menor potencia. Este incremento en la amplitud es pequeño y suele ser enmascarado por las heterogeneidades del material. Además, un barreno sobrecargado dará lugar a un exceso de ondas a través del aire, lo que, - si en sí mismo no produce daños de importancia, puede no obstante ser molesto y provocar reclamaciones y quejas.

Los explosivos de baja densidad alterarán también la amplitud de las vibraciones del terreno, ya que, por un lado, el efecto de su propia densidad y, por otro, la necesidad de una mayor longitud de carga de columna, crearán una zona de influencia mayor que reducirá, por tanto, las vibraciones -

del terreno.

3.3.- NATURALEZA DEL TERRENO

Es indudable que la magnitud del movimiento transmitido a una estructura por las vibraciones dependerá también de la naturaleza del terreno sobre él que dicha estructura descansa. Esto se debe, fundamentalmente, al tipo de respuesta de los diferentes materiales de la corteza terrestre al aplicárseles una fuerza determinada. El diferente comportamiento de los materiales, al ser sometidos a esfuerzos dinámicos, puede evaluarse por lo que se denomina "coeficiente - del terreno". De este modo, si el efecto de una onda vibratoria en un punto determinado de una masa rocosa nos proporciona un coeficiente igual a la unidad, se ha observado que la misma onda en el mismo punto originará un desplazamiento, en una estructura situada sobre un recubrimiento medio de suelo (inferior a $1/4$ - $1/2$ de la longitud de onda), de un valor de diez veces como máximo. Osea, que dicho recubrimiento puede considerarse que tiene un coeficiente del terreno igual a diez. Existen, de forma anormal, recubrimientos profundos ($\approx 1/2$ la longitud de onda) que proporcionan coeficientes elevados del terreno (≈ 30). Dicho coeficiente no debe confundirse con el efecto de amortiguamiento sufrido según el tipo de material.

La cantidad de energía liberada por una voladura causará un tipo de onda que variará de acuerdo con el tipo de roca o suelo en el cual se transmita. De este modo, la frecuencia de una alteración sísmica será mayor cuando se transmite a través de rocas que cuando lo hace sobre un recubrimiento de arcilla o grava. Y, como la gran mayoría de las estructuras están cimentadas en suelo, las frecuencias, asociadas con suelos son las más importantes desde el ángulo de

las vibraciones producidas por voladuras. Estas frecuencias oscilan generalmente entre 3 - 16 c.p.s., en tanto que, en el caso de materiales rocosos, suelen ser algo más altas, - alcanzándose valores entre 25 - 50 c.p.s. o superiores a estos.

Por otra parte, la amplitud de la vibración depende rá de la resistencia de la roca o suelo a distorsionarse. - Así, la resistencia de las rocas es mayor que la de los suelos y, por tanto, lleva asociada amplitudes menores que la de una arcilla o suelo de recubrimiento, que dará una amplitud mayor para una misma fuente de energía.

Existe la creencia general de que las estructuras - que se han cimentado sobre capas arcillosas de un espesor considerable, son menos susceptibles de afectaciones que aquellas que descansan sobre roca. Esto no es del todo correcto y dicha creencia se debe la mayor capacidad del ser humano para percibir amplitudes de alta frecuencia que para las de baja. En efecto, la arcilla tiene resistencia menor que la roca y vibra, aunque con baja frecuencia, a amplitudes más altas para una misma fuente de energía. Por tanto, las estructuras sobre arcillas estarán sujetas a mayores movimientos y serán más susceptibles de sufrir daños.

4.- REDUCCION DE LOS NIVELES DE VIBRACIONES

Desde hace años se vienen realizando diversas investigaciones con el fin, entre otros, de reducir los niveles de las vibraciones producidas por voladuras, estudiándose la influencia ejercida por los factores que entran en juego en las mismas (ver epígrafe 2. Capítulo I).

De estas investigaciones se han obtenido las conclusiones siguientes: (i) el empleo de detonadores de retardo y, especialmente, de microrretardo mejoran la fragmentación y reducen la sobrerrotura y los niveles de vibraciones; (ii) existe un número óptimo de barrenos con microrretardo que proporciona el resultado más eficaz; (iii) la reducción exacta de los niveles de vibraciones por el empleo de detonadores - de retardo y microrretardo dependerá del intervalo del mismo, características de la zona y tipo de material; (iv) el tiempo ideal de retardo podrá obtenerse únicamente por medio del análisis del área con un vibrógrafo y, aproximadamente, puede decirse que alrededor de los 2/3 de la máxima carga instantánea admisible puede detonarse en cada retardo sin incrementarse el nivel de vibración, excepto cuando las voladuras - se realizan en la vecindad de propiedades donde la influencia de las ondas de cizallamiento y de compresión, pueden reducir el intervalo real de retardo; (v) las vibraciones como producto residual que son de la energía de una voladura, nos indican, cuando su nivel es pequeño, un empleo eficiente de la

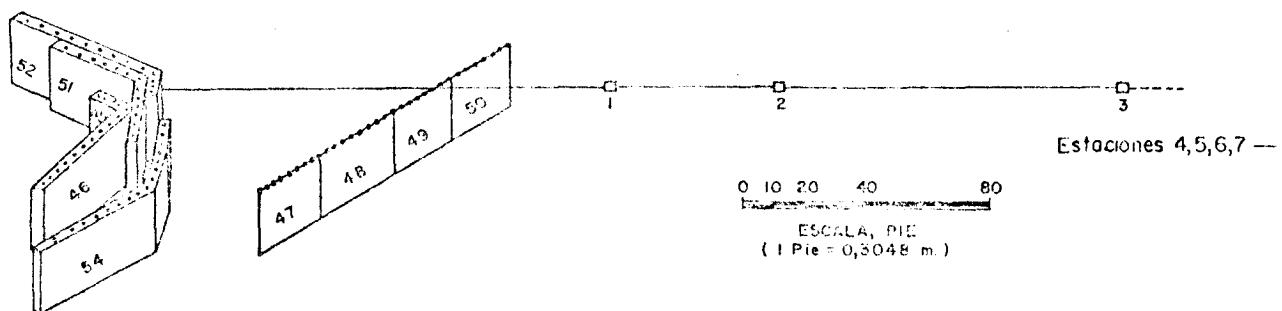
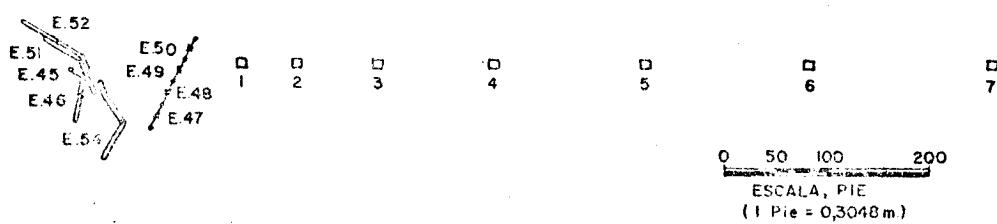
fuerza del explosivo, que principalmente se aplicará en la - rotura de la roca.

De igual forma se ha estudiado la técnica del precorte como una posibilidad de reducir las vibraciones, aunque - en este sentido, las conclusiones no son tan claras. En efecto, mientras que en algunos estudios se obtiene una reducción del nivel de vibración transmitidos a una estructura, - al interponerse un precorte entre la estructura y la voladura (Fig. 2.1.), en otros, dicha reducción no se pone de manifiesto (ver Ref. 8).

Naturalmente otro sistema de reducción estribaría en reducir la carga instantánea, pero esto no es posible en muchos casos y, con frecuencia, resulta necesario incrementarla.

Finalmente, respecto de las perturbaciones transmitidas a través del aire, se ha demostrado que las reclamaciones y protestas responden más a efectos sicológicos que a - causas lógicas derivadas de un mal diseño de la voladura. No obstante, en cualquier caso, conviene mantenerlas a un nivel bajo que, económicamente, sea posible.

N



LEYENDA

- Barrenos
- Estaciones de medida
- Áreas voladas
- ✗ Centro de la carga
- Líneas de precorte
- E Ensayo

Figura 2.1. - Plano y perspectiva del área de ensayo, Washington, D.C.
(U.S. Bureau of Mines)

5. - ASPECTOS LEGALES

El reglamento de Policia Minera no establece ningún criterio respecto a los niveles de vibraciones admisibles - por las estructuras o normas a seguir para evitar reclamaciones como consecuencia de los daños que se producen en las mismas. En contactos con el Sindicato Nacional de Compañías de Seguros, con la intención de conocer si en nuestro país dichas compañías disponían de algún elemento de juicio para estos problemas, la respuesta fue absolutamente negativa. En general, las Compañías de Seguros no extienden pólizas que cubran este tipo de daños y, únicamente, algunas compañías - reaseguradoras extienden pólizas especiales para trabajos de voladuras también especiales.

No obstante, en nuestro interés por aportar en este punto algún elemento clarificador, hemos mantenido contactos con distintas compañías de seguros de los EE.UU así como con Organismos Oficiales de dicho país, para conocer los criterios que allí se siguen.

Distintos estados Pennsylvania, New Jersey, Massachusetts, etc, y Organismos Oficiales como el U.S. Corpe of Engineers establecen su propios criterios de daños. La American Insurance Association, al realizar sus propias contrastaciones, llega a la conclusión de que el criterio aportado por

el U.S. Bureau of Mines resulta ser el más idóneo en la evaluación de niveles de vibraciones que pueden causar daños en las estructuras.

En el apartado n° 3 exponemos un estudio más detallado - sobre este punto, así como la relación de los diferentes organismos y compañías consultadas.

6.- CRITERIOS DE DAÑOS

La predisposición natural de una persona es completamente contraria a la permanencia, bien sea como persona comprometida en la voladura ya ajena a la misma, en lugares próximos a donde se llevan a cabo trabajos de voladuras y ese malestar suele ser causante de la tendencia a imaginar daños y a exagerar los que realmente hayan podido causársele como consecuencia de voladuras.

Entre los efectos producidos en personas figuran, en primer lugar, las alteraciones que se producen en el aire y que el ser humano recibe como ruido o viento. De otro tipo son los que recibe en forma de movimiento perceptible transmitido por el medio, natural o edificado que pisa.

Hay que establecer una clara diferenciación entre las perturbaciones transmitidas por el aire y las que se propagan dentro de estructuras naturales. Las primeras suelen ser la fuente más importante de reclamaciones por su espectacularidad (rotura de cristales, caída de objetos, etc.), pero son las segundas las más importantes en cuanto a daños. En consecuencia, trataremos separadamente unas de otras.

Asimismo, resulta necesario hacer una clara distinción entre los criterios de daños producidos por vibraciones de vo

laduras superficiales y aquellos originados por voladuras en obras subterráneas.

6.1.- PERTURBACIONES TRANSMITIDAS A TRAVES DEL AIRE

La perturbación producida por la detonación de un explosivo, confinado o no, da origen a una onda de compresión en el aire, mayor en el segundo caso que en el primero, y que es independiente de la que transmite el ruido de la explosión. La forma de percepción de la misma es el viento que se produce. La presión que este genera sobre una superficie plana se expresa por:

$$P = 0,95 \cdot 10^{-6} V^2$$

P = presión en kg/cm^2

V = velocidad del viento en km/hora .

6.1.1.- Voladuras superficiales

Windes (Ref. 53), como consecuencia de una investigación del U.S. Bureau of Mines sobre el tema, encuentra, a partir de sus ensayos, que los paneles de ventanas no sufren ningún daño cuando la presión originada por la perturbación es igual o menor que $0,7 \text{ lb}/\text{pulg}^2$ ($\approx 0,049 \text{ kg}/\text{cm}^2$), en tanto que presiones iguales o mayores que $1,5 \text{ lb}/\text{pulg}^2$ ($\approx 0,105 \text{ kg}/\text{cm}^2$), originarán daños de forma inevitable. Finalmente expone que un posible índice para la evaluación de este tipo de daños, puede quedar establecido por una presión máxima de $1 \text{ lb}/\text{pulg}^2$ ($\approx 0,07 \text{ kg}/\text{cm}^2$).

El propio Windes (Ref. 56), en un estudio posterior, expresa que las ventanas son siempre el primer elemento de la estructura que sufre daños. Su principal conclusión queda

expresada en el sentido de que los daños originados por las perturbaciones transmitidas a través del aire, no representan un gran problema en las operaciones normales de canteras. De los resultados que obtiene expone que una presión de 2 lb/pulg² ($\approx 0,14 \text{ kg/cm}^2$) puede tomarse como índice de daños. No obstante, señala que las condiciones de montaje influyen en el resultado final, observando que, debido a un mal montaje, se produjo rotura de ventanas a presiones tan bajas como 0,1 lb/pulg² ($\approx 0,007 \text{ kg/cm}^2$) y que la misma carga explosiva, - confinada a la misma distancia de los paneles que las situadas al aire libre, no produjo daños en los mismo.

La rotura de cristales puede, sin embargo, ser función de otros factores que los debidos a una exceso de presión; - factores tales como las ya citadas condiciones de montaje y duración del impulso.

Así, Sewell y Kinney (Ref. 50) empleando los resultados de los efectos de voladuras sobre aviones, exponen que el daño potencial de una voladura no es simplemente función del valor máximo de la presión, sino que es el resultado de la combinación de ese valor, las características de la onda y la respuesta dinámica de la estructura.

Reed et al. (Ref. 49) analizan los daños sufridos - por ventanas de varios edificios y factorías de San Antonio, como consecuencia de la detonación accidental de 111.500 lb. ($\approx 50.175 \text{ kg/cm}^2$), de explosivos rompedores. La mayoría de las ventanas que sufrieron daños estaban precisamente en zonas en las que la sobrepresión alcanzada fue menor -0,28 a -0,069 lb/pulg² ($\approx 0,0196 \text{ a } 0,0483 \text{ kg/cm}^2$) - Reed y col. manifiestan que algunos de estos daños podrían atribuirse a un

mal montaje, pero considerando que las presiones actuantes - fueron muy similares a los valores calculados, era evidente que valores muy bajos de presión pudieron aparentemente causar un daño significativo en las ventanas, como consecuencia de la duración del impulso.

El Ballistic Research Laboratories (B.R.L.) (Refs: 43,44), llevando a cabo una exhaustiva investigación muy similar a la de Windes, establece el siguiente criterio:

$P \geq 0,1 \text{ lb/pulg}^2 (\approx 0,007 \text{ kg/cm}^2)$ para ventanas con - montaje inadecuado.

$P \geq 0,75 \text{ lb/pulg}^2 (\approx 0,0525 \text{ kg/cm}^2)$ para ventanas con motaje adecuado.

Edwards y Northwood (Ref. 12) miden la presión generada en el aire por voladuras durante su estudio de vibraciones. El intervalo de medidas fue entre $0,01$ y $0,2 \text{ lb/pulg}^2$ ($\approx - 0,0007$ y $0,014 \text{ kg/cm}^2$). En ningún caso pudo observarse daños

Nicholls, Johnson y Duvall (Ref. 37) analizan los datos de perturbaciones transmitidas a través del aire y los daños producidos por éstas. En sus conclusiones insisten en la influencia que ejerce las condiciones de montaje y resistencia del cristal, señalando que, para ventanas con un montaje en condiciones razonablemente buenas, muy pocas veces sufirán daños al ser sometidas a una presión menor o igual que $0,75 \text{ lb/pulg}^2$ ($\approx 0,0525 \text{ kg/cm}^2$), en tanto que, casi todas, fallarán a una presión de 2 lb/pulg^3 ($\approx 0,14 \text{ kg/cm}^2$).

Finalmente, el U.S. Bureau of Mines publica en 1971 - las conclusiones de una extensa investigación, llevada a cabo

en un programa de diez años; para estudiar los problemas originados por las vibraciones producidas por voladuras de canteras. En este estudio se establece una presión de $0,5 \text{ lb/pulg}^2$ ($\approx 0,035 \text{ kg/cm}^2$) como valor seguro para las perturbaciones transmitidas a través del aire. A pesar de que la aplicación de la raíz cúbica del peso de la carga como factor de distancia (scaled distance) implica una propagación de ondas esféricas desde la fuente de la alteración y, por tanto, muy distinta a la configuración normal producida por una voladura de cantera, en la práctica resulta muy normal tal aproximación para el tipo de vibraciones que estamos tratando. Y, así, mediante su aplicación, proponen la siguiente expresión.

$$P = K \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-\beta}$$

en donde:

P = valor de pico de la presión

K = cte.; cte, dependiente de la zona

W = peso máximo de la carga en un mismo intervalo de tiro.

D = distancia desde el punto de medida a la pega.

$\frac{D}{W^{1/3}}$ = factor de distancia (Scaled distance)

β = cte.; cte, dependiente de la zona

6.1.2.- Voladuras subterráneas

En las voladuras llevadas a cabo en excavaciones subterráneas influyen dos factores importantes sobre los niveles de presión generados: la compleja geometría que rodea a la fuente de alteración y el confinamiento de la carga expló

siva. El primero tiende a amplificar el nivel de presiones en tanto que, el segundo, tiende a reducir los niveles de presión.

Así, debido a la compleja geometría de la mina, Hanna y Zabetakis (Ref. 17) encuentran que la aplicación de la raíz cúbica del peso de la carga como factor de distancia, tiende a subestimar los niveles de presión producidos por la detonación de explosivos no confinados.

Taylor (Ref. 52) experimentó asimismo en configuraciones geométricas muy variadas, y encontró que podían producirse amplificaciones extremadamente elevadas, hasta diez veces los valores normales.

Ireland (Ref. 20) realizó con pequeñas cargas de dinamita varios experimentos muy sencillos, econtrando que el nivel de presión originado por una carga confinada, era seis veces menor que el aportado por la misma carga cuando esta se detonaba al aire libre. Observó además que el frente de ondas de una voladura detonada al aire libre era de mayor pendiente que el originado por la carga confinada. No obstante, la reducción del nivel de presión que proporciona el confinamiento y el atacado, no ha sido determinado satisfactoriamente para voladuras típicas de excavaciones subterráneas.

Aunque las excavaciones subterráneas no tienen, en general, estructuras con ventanas, Olson (Ref. 40) realiza una investigación en una mina subterránea explotada por huecos y pilares, con el fin de comparar sus resultados con los criterios existentes para voladuras superficiales. El intervalo de presiones obtenido en sus ensayos fue de 0,7 - 1,75

lb/pulg² ($\approx 0,049 - 0,122$ kg/cm²), siendo por tanto superiores al nivel de seguridad de los criterios empleados en voladuras superficiales.

6.2.- PERTUBACIONES TRANSMITIDAS A TRAVES DEL TERRENO

Especial atención merecen, sin embargo, los efectos - que pueden derivarse de las perturbaciones transmitidas por las estructuras rocosas, que son realmente las que han sido y son estudiadas más exhaustivamente desde un punto de vista teórico y práctico, por los daños que pueden producir.

Los movimientos producidos en estructuras naturales o en edificaciones de cualquier tipo han sido objeto de mediciones sistemáticas, especialmente en Estados Unidos, Suecia y Alemania. Se admite que la vibración puede representarse, para un período completo, por una oscilación sinusoidal de amplitud A, siendo 2A la distancia vertical, medida sobre el sismograma, entre dos puntos de deflección consecutivos en direcciones opuestas. Entonces el análisis del movimiento sinusoidal permite calcular del propio sismograma la frecuencia f y de ella:

$$\begin{aligned}
 \text{desplazamiento} &= s = A \sin 2\pi f t \\
 \text{velocidad} &= v = 2\pi f A \\
 \text{aceleración} &= a = 4\pi^2 f^2 A \\
 \text{fuerza} &= f = \frac{W}{g} 4\pi^2 f^2 A \\
 \text{energía cinética} &= E_c = \frac{W}{2g} 4\pi^2 f^2 A^2
 \end{aligned}$$

Fundamentalmente, la propiedad de una onda de movimiento que gobierna el efecto sobre estructuras, está en la energía que dicha onda descarga sobre la estructura. Esto puede expresarse en función de la amplitud, la frecuencia, la velo-

ciudad o la aceleración. Todas estas cantidades están sujetas a mediciones directas y pueden emplearse diversas combinaciones como expresión contrastadora de los daños potenciales que pueden originarse.

Sin embargo, a pesar de la importancia que tiene la frecuencia de las vibraciones para determinar el tipo de respuesta de las estructuras sometidas a aquellas, no estamos todavía en condiciones para predecir el valor máximo de la vibración. La frecuencia de este nivel máximo de vibración disminuirá generalmente al alejarse del punto de explosión, ya que las frecuencias más altas se atenúan más rápidamente que las bajas. De esta forma, la frecuencia de la amplitud máxima será menor que 5 Hz (c.p.s.) en aquellas distancias en las que los daños tienen cierta probabilidad de producirse. Por ello, normalmente solo son de interés la velocidad de partícula o la aceleración, y la mayor parte de la instrumentación empleada en el registro de vibraciones está proyectada para medir dichos parámetros.

6.2.1.- Voladuras superficiales

Son muchas las investigaciones que se han realizado sobre el efecto en edificios y otros tipos de estructuras producido por vibraciones de voladuras. Así, uno de los primeros trabajos fue el realizado por Rockwell (1927) que en sus conclusiones no dice que el efecto destructivo causado por las vibraciones de voladuras, necesita de la determinación de algunos aspectos de la energía descargada sobre la estructura, y esa energía es proporcional a $f^2 A^2$. Termina diciendo que las voladuras de canteras, según se realizan normalmente, no causarán daños en edificios si estos se encuentran a una distancia de más de 200-300 pies ($\approx 61 - 91,50$ m) de la cantera.

El U.S. Bureau of Mines realiza en la década de 1930-1940 una extensa investigación sobre los problemas originados por la voladuras de canteras. Este estudio, que representa el primer gran esfuerzo para establecer criterios de daños sobre estructuras, intenta asimismo desarrollar una ley general de propagación de las vibraciones a través del terreno. En sus conclusiones, basadas en la medida experimental de la aceleración sufrida por la estructura, establece un criterio de daños en el que una aceleración de 1 g representa el índice de daños más indicativo, en tanto que valores de la aceleración comprendidos entre 0,1-1 g únicamente producen ligeros daños y aceleraciones menores que 0,1 g no originan daños. De igual forma, desarrollan una ley de propagación en función del desplazamiento, peso de carga y distancia; siendo recomendada su aplicación únicamente dentro de las distancias y pesos de la carga especificadas.

Thoenen y Windes (1942) realizan uno de los primeros estudios completos sobre vibraciones producidas por voladuras, y en el que analizan el efecto ejercido por el peso de la carga sobre el desplazamiento de la partícula. Establecen un criterio de daños basados en la frecuencia y en la amplitud (valor de pico del desplazamiento de la partícula) materializándolo por medio de la expresión: $f^2 A$, siendo f la frecuencia en c.p.s. y A la amplitud expresada en pulgadas. Según este criterio, si el valor de $f^2 A$ excede a diez el límite de daños de mayor entidad es alcanzado. Sin embargo, Crandell sugiere la expresión $f \cdot A$ como límite de daños. Ambas relaciones dan como límites de seguridad; en la primera $f^2 A = 1$ y $f \cdot A = -0,527$ en la segunda.

El U.S. Bureau of Mines (Ref. 52), a partir de una investigación empírica, propone la siguiente expresión:

$$A = W^{2/3} (0,07 e^{-0,00143 D} + 0,001)$$

en donde:

A = amplitud máxima en pulg.

W = peso de la carga en lb

D = distancia en pies

De este modo:

(i) Fijada la amplitud máxima del movimiento permitida, y conocida la distancia al punto de detonación, se puede determinar la cantidad máxima de explosivo - que se puede volar de un modo esencialmente instantáneo.

(ii) Conocida la cantidad de explosivo que se vuela instantáneamente y la distancia del punto de detonación al de posible daño, calcular la amplitud resultante.

Crandell (1949), basándose en medidas experimentales - de los niveles de vibración en la proximidad de estructuras, establece un criterio de daños sobre la base de la energía transmitida a través del terreno, para lo que define la "Razón de Energía" o "Energy Ratio" ($E.R. = \frac{a^2}{f^2}$) como la relación del cuadrado de la aceleración en pies por segundo, al cuadrado de la frecuencia en c.p.s.

Sus ensayos demuestran que cuando E.R. fue menor que 3, comprendido entre 3-6 y mayor que 6, las estructuras próximas resultaron sin daños -zona de seguridad- ligeramente dañadas- zona de precaución - y dañadas -zona de daños-, respectivamente. Cradell señala también que el desplazamiento y la frecuencia podrían asimismo emplearse para determinar el valor de - E.R.

Morris (1950) establece un nuevo criterio de daños basado también en la amplitud y en el que tiene en cuenta la introducción de un factor de corrección, la naturaleza rocosa - relativa de ambos puntos, de detonación y de asentamiento de la estructura, cuyos daños se estudian. La expresión es de la forma:

$$A = k \frac{\sqrt{W}}{D}$$

en donde

A = amplitud máxima en pulg

W = peso de la carga explosiva en lb

K = factor de la zona

D = distancia en pies

Morris expone que si la componente horizontal de la vibración de un edificio es menor que 0,008 pulg ($\approx 0,202$ mm) - no existe posibilidad de daños.

Esta fórmula es de una aplicación más general y puede emplearse una vez que se tenga un conocimiento aproximado de la geología de la zona. Naturalmente el valor de K variará según las condiciones de la zona. Se han tabulado los valores - de k, deducidos de la experiencia, que varían entre 0,04 y - 0,40, aunque bajo condiciones severas puede alcanzar valores de 0,50.

Las principales aplicaciones de este criterio han sido en grandes voladuras y las desviaciones obtenidas entre los valores calculados y medidos para A no han sido mayores del 4%.

Morris y Westwater (1953), tomando diferentes casos de daños producidos por voladuras, analizan los criterios existentes y comparan los daños previstos por cada uno de ellos. En sus conclusiones exponen que debido a la gran variación en el tipo de estructuras, éstas deberían clasificarse de forma aproximada en cuatro grupos:

- (i) Estructuras de gran valor y fragilidad, en las que estarían incluidas edificios de gran antigüedad, monumentos y aquellas estructuras proyectadas deficientemente.
- (ii) Propiedades, viviendas, etc., muy congregadas.
- (iii) Propiedades aisladas.
- (iv) Estructuras de ingeniería civil.

Tomando un factor de seguridad apropiado y después de investigar la zona por medio de una campaña vibrográfica, establecen un criterio de daños basado en el desplazamiento máximo permisible (amplitud), en el que los límites de seguridad son: 0,004, 0,008, 0,016 y 0,030 pulg. (\approx 0,101, 0,202, -0,404 y 0,759 mm) respectivamente para cada uno de los grupos mencionados.

Dos trabajos adicionales (Refs 16,21) analizan la relación existente entre desplazamiento y carga del explosivo, es

tableciendo ambos una ley de propagación para una zona específica y, por tanto, de escasa aplicación general.

Durante el período que abarca de 1949-1960, diferentes estados y organizaciones estadounidenses adoptaron criterios de daños. Así, por ejemplo, New Jersey y Massachusetts toman un valor de E.R. = 1 como límite permisible para operaciones de voladuras. Pennsylvania adopta un desplazamiento de 0,03 - pulgadas ($\approx 0,759$ mm) como límite de seguridad. Operaciones de voladuras realizadas por el U.S. Corps of Engineers y el New York Power Authority especifican asimismo un criterio de daños basado en un valor E.R. = 1 como límite permisible.

Teichmann y Westwater (1957) presentan un sumario muy breve pero de gran utilidad del estado del conocimiento presente en materia de vibraciones producidas por voladuras, incluyendo movimientos de terreno, perturbaciones transmitidas por el aire, susceptibilidad humana, aspectos legales y otros tópicos.

Langefors, Kihlstrom y Westerberg (1958), como resultado de una amplia serie de estudios sobre vibraciones de voladuras, proponen un criterio de daños sobre la base de la velocidad de partícula en el terreno próximo a la estructura. Es tablecen una velocidad de partícula de 2,8 pug/seg, ($\approx 71,12$ mm/seg) como umbral de daños, por encima del cual los daños - pueden ocurrir.

Edward y Northwood (1960) presentan los resultados de su estudio, en el que seis estructuras fueron sometidas a vibraciones originadas por voladuras. La evaluación de los datos obtenidos por medio de una instrumentación adecuada en la

que estaban incluidas medidas de la aceleración, velocidad de partícula y desplazamiento, les lleva a establecer que la velocidad de partícula es la magnitud cuantitativa más idónea - sobre la que los criterios de daños deben basarse. Finalmente, proponen para la velocidad de partícula un límite de seguridad de 2 pulg/seg ($\approx 50,8$ mm/sg).

Nodolski (1968) expone las conclusiones de la investigación llevada a cabo por el U.S. Army Engineer Nuclear Crating Group sobre daños causados por explosiones nucleares, indicando que el umbral de daños de menor entidad en estructuras, debería expresarse en función de la aceleración sufrida por las mismas y que dicho parámetro (Pseudo Aceleración Absoluta, PSAA) expresa satisfactoriamente los posibles daños. Así mismo sugiere que un valor de $PSAA = 16 \text{ cm/sg}^2$ ($\approx 0,016 \text{ g}$) - sería un umbral apropiado para daños de menor entidad en edificios.

Finalmente consideran que el criterio basado en la velocidad de partícula propuesta por el U.S. Bureau of Mines, - debe aplicarse cautelosamente en el caso de edificios, aunque manifiestan que dicho criterio puede ser apropiado para los de altura elevada y para grandes estructuras cuya frecuencia natural es menor que 5 Hz.

Todavía no ha sido desarrollado un procedimiento simple para predecir los daños en grandes edificios; por tanto, el análisis de los posibles daños en este tipo de estructuras necesitará de la colaboración de un experto en tal materia.

En 1971 el U.S.B. of Mines presentan los resultados de su extensa investigación. Sus conclusiones proporcionan crite

rios de recomendación en los que se establece una velocidad de partícula de 2 pulg/seg ($\approx 50,8$ mm/sg) como límite de seguridad.

Asimismo se muestra que el empleo de microretardo reduce el nivel de vibración si se compara con el obtenido en voladuras instantáneas, a la vez que el empleo de detonadores eléctricos de retardo ofrecen una ligera reducción en el nivel de vibración comparados con el obtenido cuando se emplea cordón detonante. Por último, se dà un límite de seguridad de 50 pies/lb $1/2$ ($\approx 22,6$ m/kg $1/2$), basado en la distancia y considerando el factor de escala. Se agurye que puede emplearse sin la necesidad de instrumentación aunque, no obstante, se recomienda que es necesario un conocimiento de la velocidad de partícula y de las características de propagación del lugar para asegurarse que el límite establecido de 2 pulg/seg - ($\approx 50,8$ mm/sg) no se sobrepase.

Las conclusiones quedan resumidas en los puntos siguientes:

- (i) Si una o más de las tres componentes ortogonales (radial, vertical y transversal) de la vibración del terreno, tienen un valor de pico de su velocidad de partícula superior a 2 pulg/seg ($\approx 50,8$ mm/sg) en la proximidad de una estructura, existe una gran probabilidad de que se originen daños en la misma, en tanto que, si es inferior, tal probabilidad es muy baja.
- (ii) Que el valor de pico de la velocidad de partícula, para cualquiera de las tres componentes, puede expresarse en función de la carga por intervalo de retardo y de la distancia a la voladura, por medio de la ecuación.

$$v = K \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-\beta}$$

en donde:

v = valor de pico de la velocidad de partícula en pulg/seg

D = distancia en pies

W = peso de la carga en lb

$\frac{D}{W^{1/2}}$ = factor de distancia (Scaled distance)

K = cte., dependiente de la zona

β = cte., dependiente de la zona

(iii) Que un factor de distancia ($\frac{D}{W^{1/2}}$) (Scaled distance) de 50 pies/lb^{1/2} ($\approx 22,6$ m/kg^{1/2}) puede aplicarse en aquellas zonas en la que no se disponga de instrumentación, con la casi total seguridad de que no se alcanzará el umbral de daños ($v = 2$ pulg/sg ($\approx 50,8$ mm/sg)), en tanto que, en zonas con instrumentación, se recomienda en principio un valor de 20 pies/lb^{1/2} (≈ 9 m/kg^{1/2}).

6.2.2.- Voladuras subterráneas

Mientras que en general la mayoría de las investigaciones se han centrado en voladuras superficiales, se ha prestado muy poco atención, por el contrario a las voladuras en obras subterráneas y a los problemas presentados por sus vibraciones. Esto, sin duda, se debe a la menor entidad de los efectos producidos por las mismas y que pueden traducirse en reclamaciones de otras compañías ajenas al trabajo de la vola

dura. No obstante, últimamente, se vienen realizando trabajos al respecto que tratan de paliar los problemas que se origina en muchas ocasiones.

Así, Hanna y Zabetakis (1968) realizan una investigación en una cantera subterránea, exponiendo en sus conslusiones que la duración de voladuras con explosivos no confinados es mayor que la que se obtiene, en la misma situación, con voladuras superficiales.

Olson, Dick, Fogelson y Fletcher (1970) exponen, basándose en los resultados obtenidos en su investigación, que tanto la raíz cuadrada como la raíz cúbica del peso de la carga pueden ser un camino eficaz para agrupar y estudiar los datos de vibraciones de voladuras en excavaciones subterráneas. No obstante, expresan la necesidad de futuras investigaciones que determinen un factor de escala apropiado, el cual pueda establecer si los datos obtenidos sobre vibraciones producidas en diferentes minas puedan eventualmente extrapolarse y emplearse para estimar la amplitud de las vibraciones. Además, exponen que dichos estudios deberían determinar si las recomendaciones dadas para los límites de seguridad en canteras a cielo abierto $-50 \text{ pies/lb}^{1/2} \simeq 22,6 \text{ m/kg}^{1/2}$ para zonas sin instrumentación y $20 \text{ pies/lb}^{1/2} \simeq 9 \text{ m/kg}^{1/2}$ para zonas con instrumentación-, pueden asimismo utilizarse en el diseño de pegas en excavaciones subterráneas, lo que limitaría los daños originados por las vibraciones.

Olson y Fletcher (1971) expresan la mayor complejidad de las ondas registradas en excavaciones subterráneas, su mayor duración y la presencia de numerosas llegadas secundarias debidas a reflexiones en los hastiales. Muestran asimismo que

la carga con retardo cero produjo la única sobrepresión elevada y que los más altos niveles de sobrepresión originados por voladuras subterráneas confinadas, fueron mucho mayores que los niveles asociados con daños a edificios y ventanas por una gran voladura superficial.

Olson y Fogelson, Dick y Hendrikson (1972) llevan a cabo una extensa investigación en la que registran los niveles de la velocidad de partícula y de la frecuencia asociadas con las vibraciones, para determinar la naturaleza y la intensidad de las vibraciones del terrenos producidas por voladuras subterráneas. En su estudio indican que la raíz cúbica del peso de la carga se ajusta mejor como factor de escala, que la raíz cuadrada de la misma. Quedando, por tanto, determinada la velocidad de partícula por la expresión:

$$V = K \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-\beta}$$

en la que cada uno de los parámetros que la integran, tienen el mismo significado físico que el expuesto en voladuras superficiales.

6.3.- COMENTARIOS EN TORNO A LOS CRITERIOS EXPUESTOS

De toda la información existente respecto a las vibraciones producidas por voladuras y los efectos de estas sobre estructuras, se deduce claramente que no puede establecerse un umbral absoluto de daños, y que la severidad de los daños, dependerá tanto del tipo y condiciones del edificio como del nivel de la vibración a la que éste está sometido.

El análisis de las medidas experimentales han llevado a la conclusión de que la causa que hace que las vibraciones puedan producir daños en estructuras, está en la energía que aquellas transmiten a éstas; y, como sabemos, dicha energía depende de la longitud de onda y amplitud de la vibración. - Así, nos encontramos que, para un desplazamiento equivalente, vibraciones con una longitud de onda larga con relación al - tamaño de la estructura, producen menos daños que los causados por aquellas con longitud de onda más corta.

Por otra parte, un factor que no es definible por las medidas de los valores máximos de la aceleración, velocidad, energía cinética o cualquier otro parámetro, es la "energía-total" de la vibración que, a su vez, es condicionada por la duración de la misma. Tal duración, si bien resulta muy significativa en el caso de terremotos, es, sin embargo, insignificante en el caso de voladuras.

Ahora bien, dado que resultaría sumamente engoroso - operar con un criterio de daños basado en la determinación - de la energía, ya que esto llevaría consigo el conocimiento del peso de las estructuras afectadas, el camino seguido por los investigadores ha sido proporcionarnos unos criterios de daños-en consonancia, en mayor o menor grado, con la teoría y los resultados experimentales- basados en la determinación de aquellos parámetros más fácilmente cuantificables. Así - pues, el problema consiste en determinar cuál de esas magnitudes produce daños y cómo mantenerla en un nivel aceptable.

De todos esos criterios expuesto, y dado que el desplazamiento con respecto al tiempo de un punto superficial - es equivalente a la amplitud de la velocidad de partícula, -

y que las velocidades más altas están asociadas con frecuencias más altas, la medida directa de la velocidad de partícula proporciona un índice más idóneo en la apreciación de los daños potenciales, que si midiésemos el desplazamiento o la aceleración. Morris (Ref. 33, 34) analiza las razones que hacen desechar la aceleración como un parámetro indicador de grandes daños, en una línea análoga a la expuesta y, en efecto, confirmada experimentalmente por Edwards y Northwood - (Ref. 12) que fueron capaces de demostrar que un criterio de daños basado en la velocidad de partícula encerraba un efecto de la frecuencia. Sin embargo, los recientes pruebas nucleares indican que la mayoría de los criterios de daños establecidos sobre la experiencia de voladuras con explosivos rompedores y medidas vibrográficas, deberían reconsiderarse. Así, el U.S. Army Engineer Nuclear Cratering Group, basándose en los resultados de sus investigaciones, expone que los valores límites propuestos por esos criterios para daños de menor - cuantía en viviendas, deberían expresarse en función de la aceleración sufrida por el edificio, como consecuencia del movimiento al que es sometido; y que esa respuesta del edificio (Pseudo Aceleración Absoluta, PSAA) viene ligada al daño probable que pueda experimentar.

De cualquier forma, como señalan Edwards y Northwood - (Ref. 12) y Roberts (Ref. 47) ninguno de los criterios de daños recomendados tienen en consideración el efecto de resonancia, ya que no sólo son las frecuencias más altas las más propensas a causar daños a estructuras superficiales, sino que la condición de resonancia puede asimismo desarrollarse cuando la frecuencia del tren de ondas es igual a la frecuencia natural de la estructura; no obstante dicho fenómeno no

suele presentarse respecto a la frecuencia propia del edificio considerado en su conjunto, y los daños suelen ser por distorsión, bien sea por alargamiento, esfuerzo cortante o flexión, pudiéndose producir resonancia, si acaso, respecto a algún elemento aislado. Por otra parte, como el propio Roberts (Ref. 47) indica, ninguno de los criterios considera cierta apreciación sugetiva desde el punto de vista del habitat humano, lo que es de suma importancia.

6.4.- CRITERIOS DE DAÑOS RECOMENDADOS

De todos los criterios expuesto, son sin duda los recomendados por el U.S. Bureau of Mines (basado en la velocidad de partícula) y por el U.S. Army Engineer Nuclear Cratering - Group (basado en la aceleración) los que mejor responden a los daños causados realmente en estructuras.

El primero establece 3 niveles de daños según el valor de PSAA: $PSAA \leq 16 \text{ cm/seg}^2$ zona prácticamente sin daños. $PSAA = 17 \text{ a } 99 \text{ cm/seg}^2$ zona de daños de menor cuantía y $PSAA \geq 100 \text{ cm/seg}^2$ zona de grandes daños. De cualquier forma este criterio es excesivamente conservador y, por tanto, menos generalizado en la actualidad que el propuesto por el U.S. Bureau of Mines.

El segundo desarrollado sobre la base de un estudio estadístico de los datos publicados por Langefors (Fig. 2.2) y Edwards y Northwood (Fig. 2.3) compuesta de 171 ensayos (con variaciones de la carga desde 25-19.650 lb ($\approx 11,25-8.842,50$ kg) por retardo, del factor de escala $\frac{D}{W^{1/2}}$ desde 3,39-369 - pis/lb $^{1/2}$ ($\approx 1,5-165,9$ m/kg $^{1/2}$), de la amplitud de la velocidad de partícula desde 0,000808-20,9 pulg/seg -

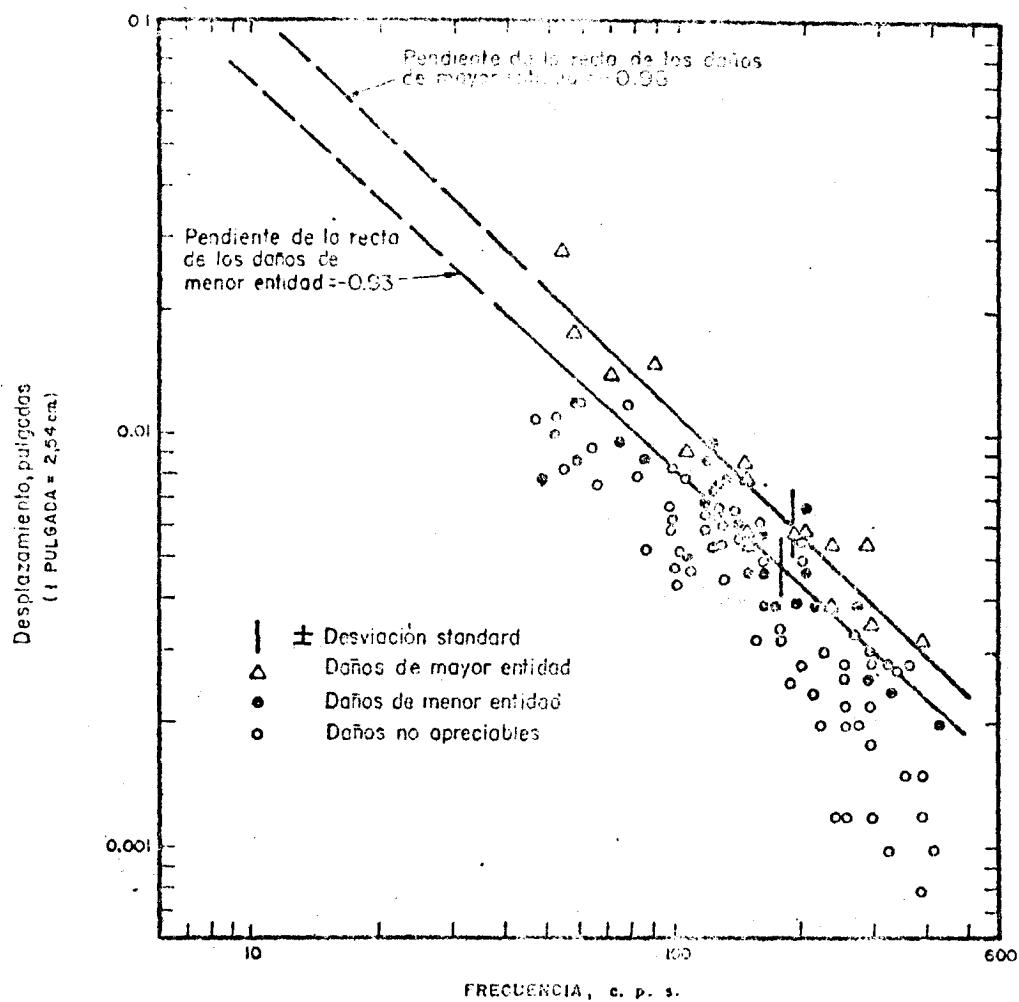


Figura 2.2 .- Gráfico de desplazamiento de la partícula en función de la frecuencia según los daños observados por Langefors

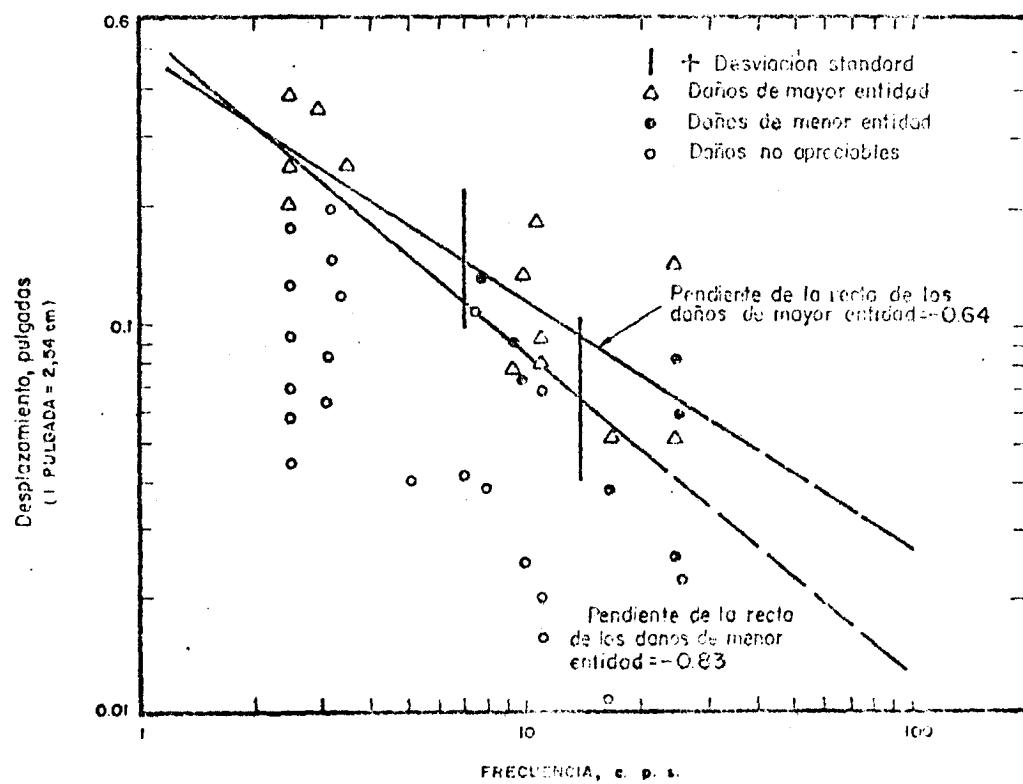


Figura 2.3 .- Gráfico de desplazamiento de la partícula en función de la frecuencia según los daños observados por Edwards y Northwood

($\approx 0,02 - 528,7$ mm/sg) y de la frecuencia desde 7-200 c.p.s.), es representado gráficamente por medio de la Figs 2.4 y 2.5.

El límite de seguridad $-V \leq 2$ pulg/sg ($\approx 50,8$ mm/sg) - propuesto por este criterio, no representa un valor absoluto por debajo del cual no se van a producir daños y por encima - del mismo tengan que producirse necesariamente, ya que muchas estructuras pueden resistir niveles superiores a dicho límite. Su verdadero significado está en que la probabilidad de daños se incrementará o disminuirá según que el nivel de la vibración se aleje en un sentido o en otro de dicho valor.

6.5.- APRECIACION SUBJETIVA

Mientras que se ha realizado un avance considerable para establecer los efectos de vibraciones del terreno en relación con los daños causados en estructuras por voladuras y otras operaciones, queda todavía mucho por realizar para desarrollar unos criterios cualitativos que tengan en cuenta el grado de disconformidad y de polución del habitat humano. Así, las multiples técnicas de apreciación subjetiva han demostrado tener un gran valor como método para determinar el grado de confort en otros aspectos de dicho habitat; por ejemplo: en ventilación, aire acondicionado y grado de luminosidad. No hay razones lógicas pues, por las que técnicas similares no puedan - aplicarse a las vibraciones del terreno y al ruido.

Por tanto, es necesario tener en cuenta el efecto causado sobre los habitantes de las casas vecinas a una voladura, no solamente porque, si la intensidad de las vibraciones les parece grande, estarán mucho más dispuestos a reclamar, a examinar detenidamente los edificios, y a atribuir a las explosion

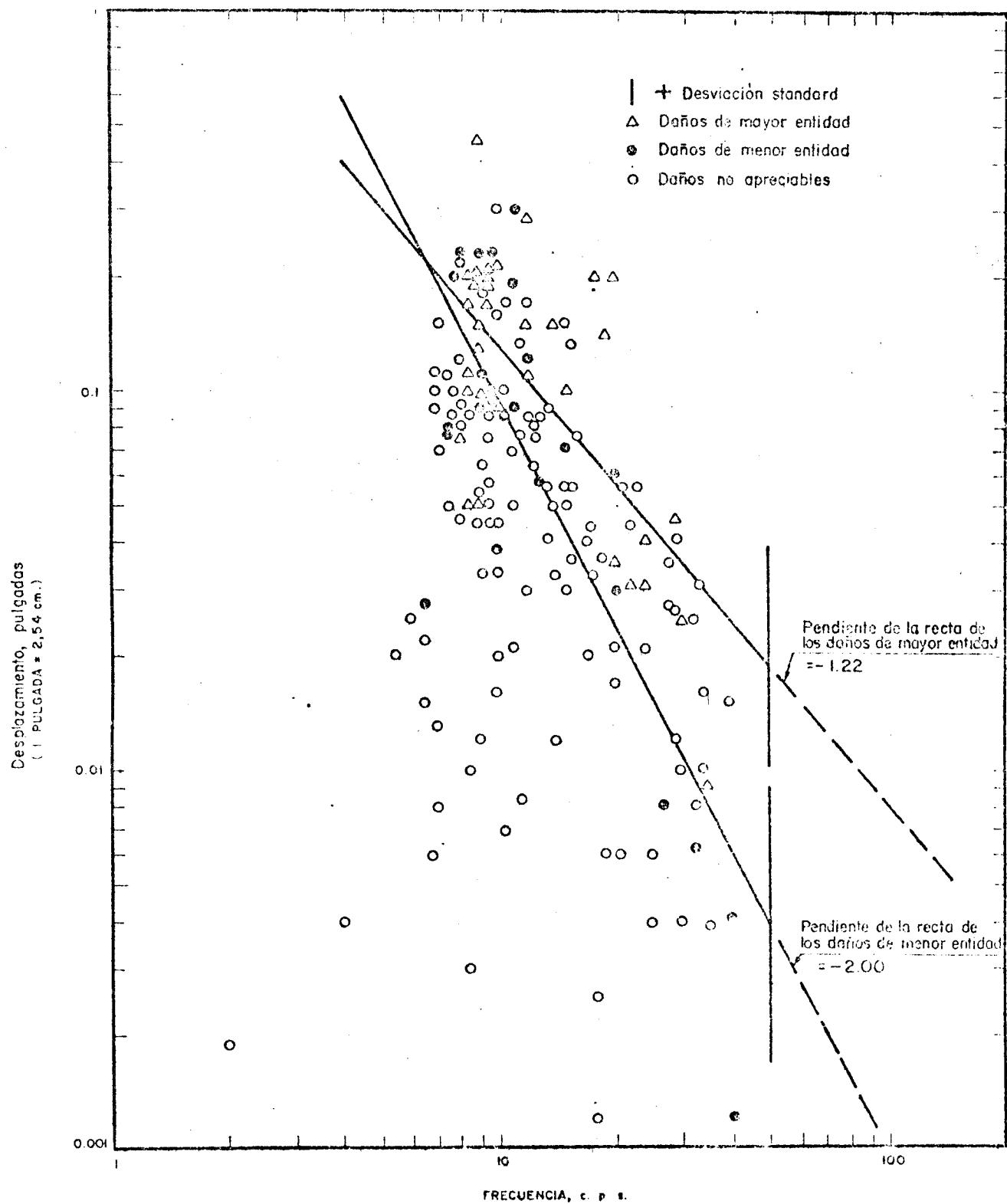


Figura 2.4.- Gráfico de desplazamiento de la partícula en función de la frecuencia según los daños observados por el U. S. Bureau of Mines

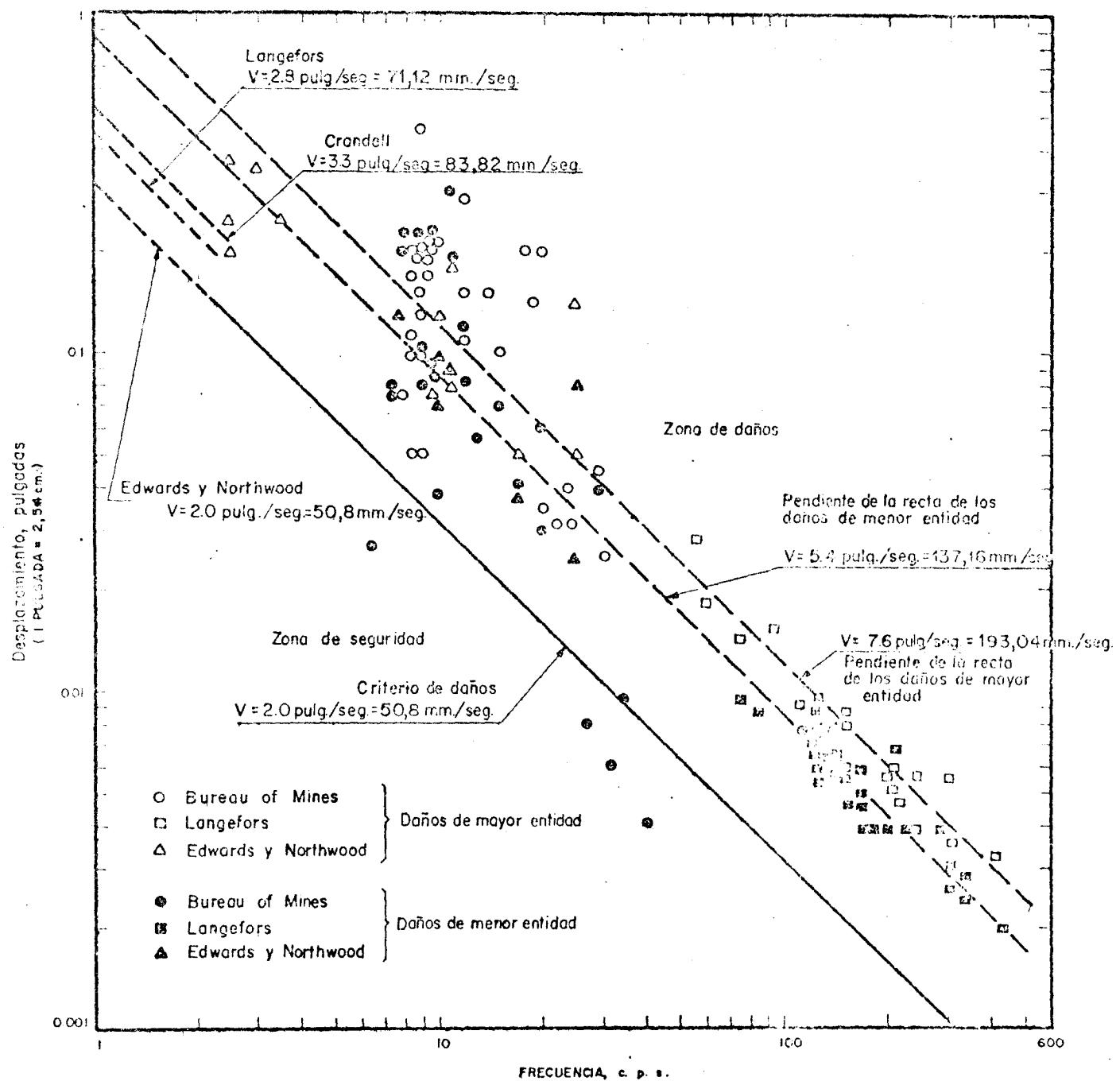


Figura 2.5. - Criterio de daños recomendado por el U. S. Bureau of Mines.

nes todos los daños que descubran, aunque a veces se trate de grietas antiguas, sino porque las vibraciones constituyen una molestia por sí mismas que no pueden imponerse más que en de terminadas circunstancias.

Reiher y Meister (Ref. 46) estudiando la reacción humana frente a las vibraciones producidas por el tráfico ferroviario, establecen la escala que lleva su nombre (Fig. 2.6) como método de apreciación subjetiva de la reacción humana a las vibraciones. Seis niveles de respuesta fueron definidas:

- (i) Imperceptibles
- (ii) Ligeramente perceptibles
- (iii) Claramente perceptibles
- (iv) Molestas
- (v) Desagradables
- (vi) Intolerables

Se han hecho algunos intentos para relacionar estos niveles con los criterios objetivos de daños en estructuras - (Figs 2.7, 2.8). Sin embargo, todavía no ha podido probarse tal correlación.

Sutherland (Ref. 51) expone los resultados del efecto sobre estructuras producido por las vibraciones resultantes del tráfico de vehículos pesados próximo a las mismas. Ningún daño pudo apreciarse en las estructuras; asimismo mostró que las personas percibían las vibraciones a niveles mucho menores que las que originarían daños en las estructuras, y que las vibraciones causantes de una gran disconformidad por parte de la gente, producirían escaso daño en las estructuras.

Jenkins (Ref. 22) analiza y discute los datos de - Reiher y Meister sobre la reacción humana a las vibraciones, manifestando que la gente debería estar informada de que una persona normal, puede percibir vibraciones que van desde -

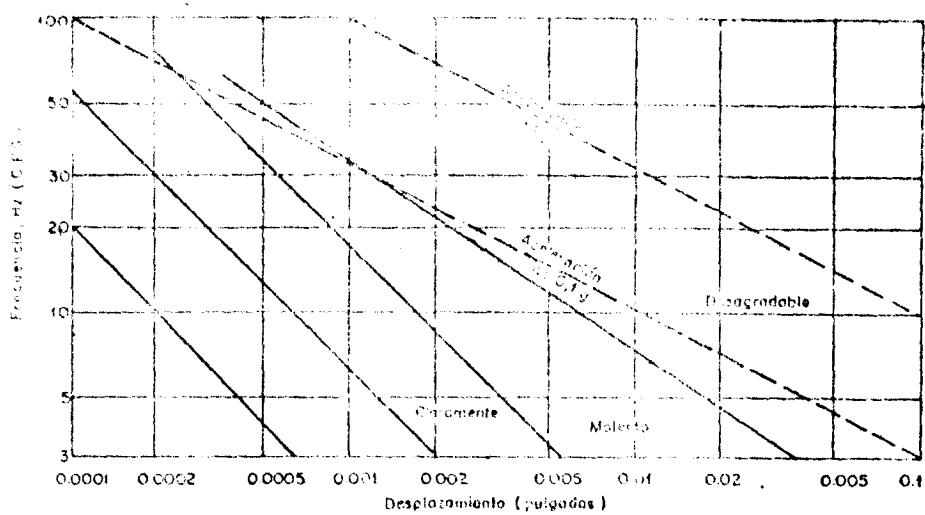


Fig. 2.6. — Escala de Reiber-Meister.

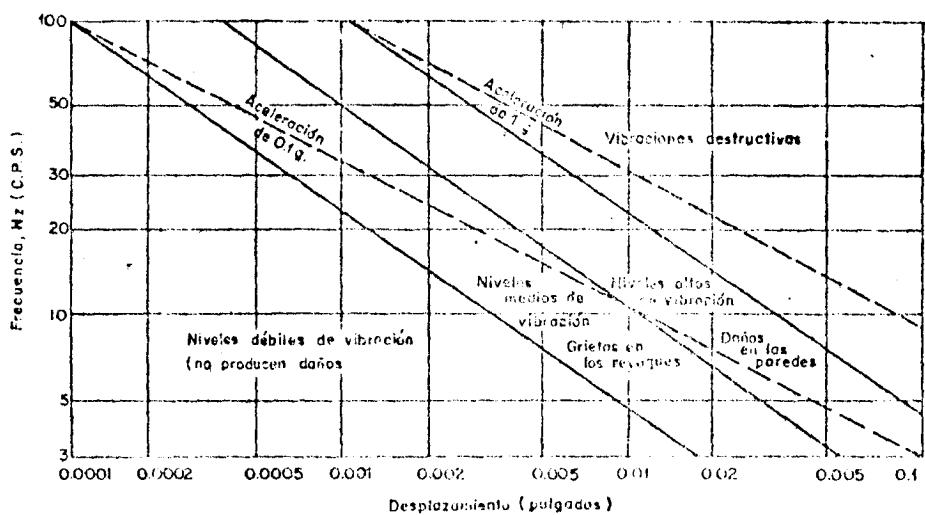


Fig. 2.7. — Correlación entre la escala de Reiber-Meister y los criterios físicos.

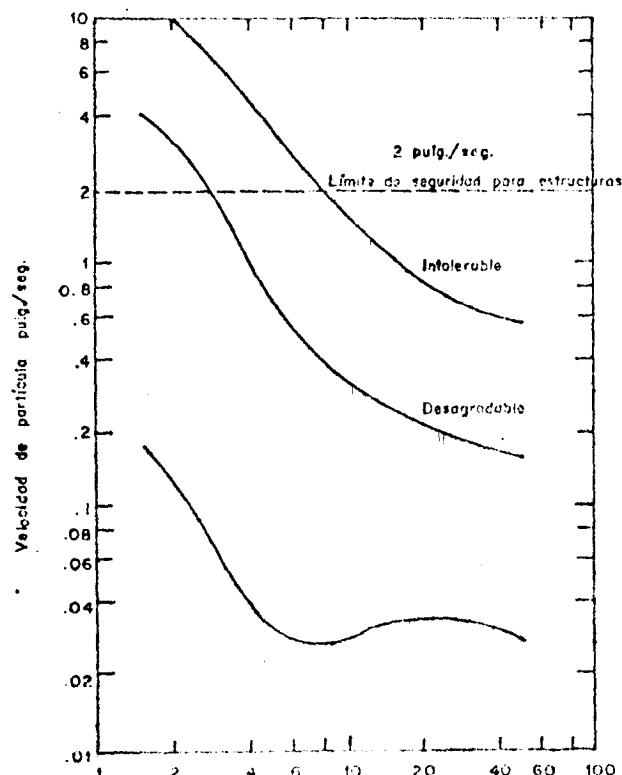


Fig. 2.8. — Respuesta subjetiva del cuerpo humano a las vibraciones (Según Goldman).

1/100 - 1/1000 de la magnitud necesaria para producir daños - en estructuras.

Un caso similar existe con el ruido asociado con las presiones originadas por las perturbaciones transmitidas por el aire. En la mayoría de las voladuras, esas presiones son considerablemente menores que las necesarias para causar daños en los cristales de las ventanas. Sin embargo, una presión de 0,01 lb/pulg² ($\approx 0,007 \text{ kg/cm}^2$) origina un nivel de ruido comparable al producido por un remachador de neumáticos a cuatro pies de distancia (Ref. 37).

Hirsch (Ref. 18) analizó numerosos trabajos sobre los efectos de las perturbaciones transmitidas por el aire en la estructura del oido de personas y animales, que le llevaron a la conclusión de que la presión necesaria para producir daños en la estructura del oido humano fue aproximadamente igual a 5 lb/pulg² ($\approx 0,35 \text{ kg/cm}^2$). Sin embargo algunos datos indicaron que con frecuencia pueden producirse daños en el oido interno sin apreciable alteración del oido medio. Finalmente recomienda el empleo de protectores cuando se espera que la presión va a sobrepasar las 4 lb/pulg² ($\approx 0,28 \text{ kg/cm}^2$).

Grant, Murphy y Bowser (Ref. 14) determinan, en relación con el ruido asociado a las voladuras, el efecto de las variables atmosféricas sobre su propagación a través de la atmósfera. Las variables más significativas fueron en orden de importancia: velocidad y dirección del viento, presión barométrica, y temperatura. Se encontró que la intensidad y duración del ruido sufrió un incremento en la dirección del viento, en tanto que las temperaturas y presiones barométricas elevadas se hallaban asociadas a una intensidad y duración bajas. Asimismo encontraron que la duración se incrementaba con la distancia a la voladura, para cualquier estado de las variables citadas.

7.- METODOLOGIA DE LA EJECUCION DE UNA INVESTIGACION VIBROGRAFICA

Una investigación vibrográfica a base de pruebas previas a la ejecución de toda voladura con algunas características singulares, ya sea porque se efectúe en la proximidad de estructuras o porque se detone una carga explosiva fuera de lo normal, puede ahorrar muchos quebraderos de cabeza a los encargados del proyecto, al mismo tiempo que disminuir el coste del mismo que en principio pudiera parecer incrementado por el coste de dicha investigación.

El procedimiento que generalmente se sigue en un estudio de este tipo, consiste en medir la magnitud -desplazamiento, velocidad o aceleración- que defina el criterio de daños elegido en la zona en que se han de llevar a cabo las voladuras. Sea cual fuere este criterio deben medirse las tres componentes (longitudinal, vertical y transversal) del parámetro que haya de medirse, de uno de los modos siguientes:

- (i) a diferentes distancias de la voladura para una carga fija.
- (ii) a la misma distancia de la voladura para cargas -distintas

Con los datos así obtenidos podemos, mediante la ley general de propagación (ver epígrafe), determinar las constantes k y n de dicha ecuación, y, de esta forma, lograr definir la mencionada ley de propagación para la zona en estudio. Por ejemplo, si el criterio elegido es el basado en la velocidad de partícula, dichos datos pueden representarse gráficamente en función de $\frac{W}{D^2}$ o $\frac{D}{W^{1/2}}$ (según la ley de propagación considerada para voladuras superficiales) y el parámetro medido, en un sistema de coordenadas logarítmicas (Figs. 2.9 y 2.10) en donde el valor de las constantes k (constante de la zona), n y β , pueden determinarse a partir de la recta de regresión obtenida.

Definida la ecuación de propagación para la zona en estudio, puede fijarse, suponiendo constante el valor del parámetro medido, el peso de la carga explosiva y la distancia a la que se registraría dicho valor (Fig. 2.11). Asimismo, podemos expresar los resultados gráficamente por medio de segmentos anulares, definidos por líneas "iso-taxas" de velocidad de partícula constante, alrededor del punto de detonación sobre la zona en estudio; indicándose al mismo tiempo la distancia a la que se obtiene dicho valor para la máxima carga de explosivo detonada por intervalo de retardo (Fig. 2.12). Por el contrario si la distancia está fijada de antemano, podemos definir la máxima carga de explosivo que puede detonarse por intervalo de retardo, para que se alcance un valor dado del parámetro de daños.

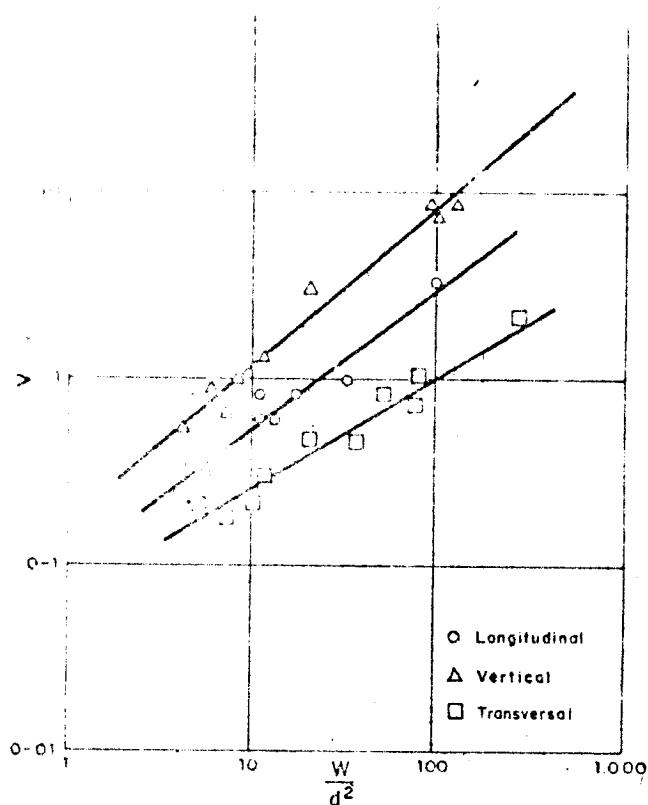


Fig. 2.9.-Velocidad de partícula (V) en función de $\frac{W}{d^2}$

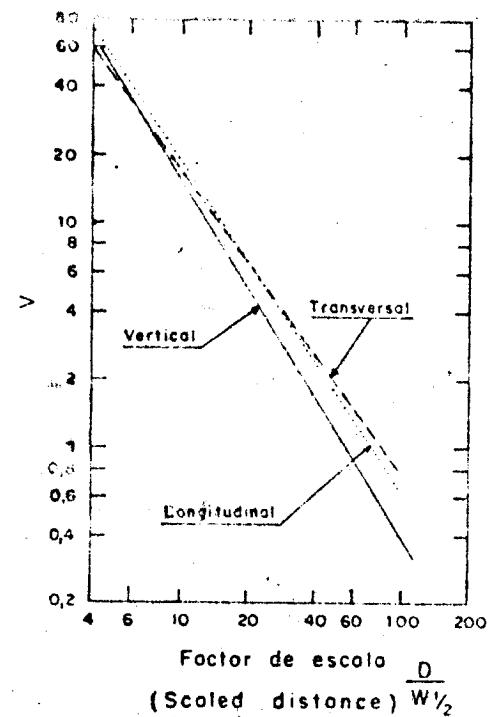


Fig. 2.10-Velocidad de partícula (V) en función del factor de distancia $(\frac{D}{W^{1/2}})$

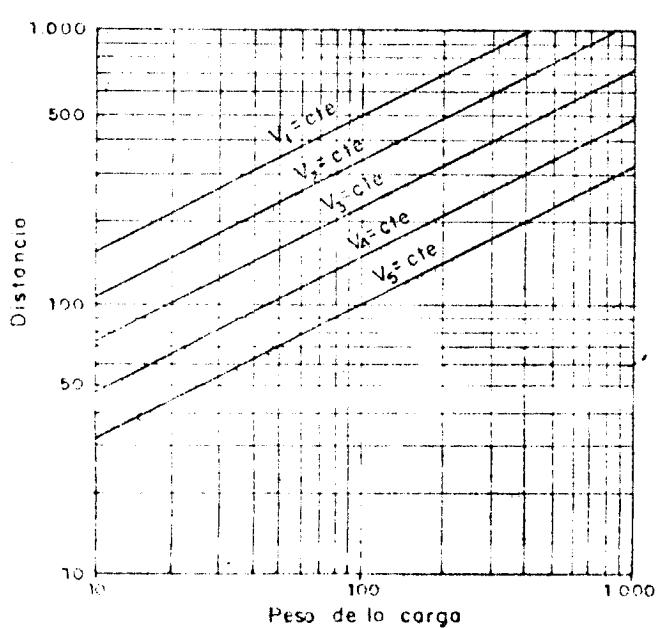


Fig. 2.11-Límites de la velocidad de partícula (componente vertical) en función de la distancia y peso de la carga

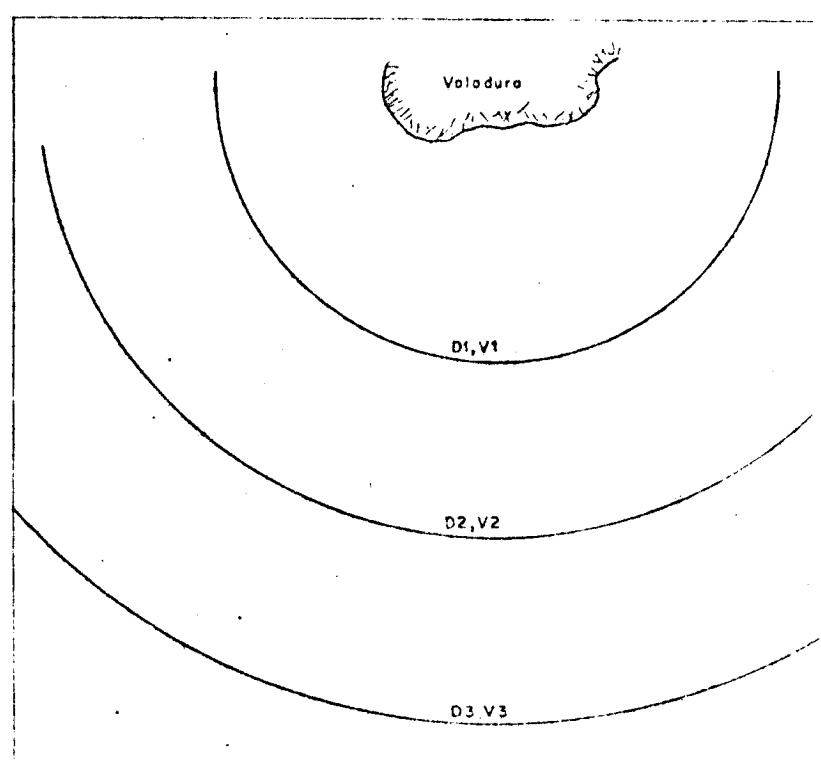


Fig. 2.12 - "lax-tasas" producidas por la misma carga instantánea (W) detonada por intervalo de retardo

8.- ESTIMACION DEL COSTE DE LOS DAÑOS POTENCIALMENTE OCASIONADOS POR LAS VIBRACIONES DE UNA VOLADURA

Hughes (Ref. 19) expone un método para la estimación de dicho coste, basado en el número de reclamaciones posibles en cada segmento anular. Dicho número, a su vez, viene determinado por el número de viviendas existentes en el segmento.

Para la evaluación de dicho coste considera el criterio de Nodolski (Ref. 38). Se basa por tanto en tres niveles de daños, asignando a cada uno de ellos zonas que muestran el tanto por ciento de viviendas de las que pueden esperarse reclamaciones como consecuencia de la aceleración sufrida por las mismas (PSAA). A este tanto por ciento se le denomina - "Factor de Reclamación" (Complaint factor, CF) (Fig. 2.13). La curva en el extremo superior derecho de dicha figura representa el nivel de daños de aquellas estructuras que experimentan una aceleración de 100 cm/seg^2 o mayor; dicho nivel de daños expresado en tanto por ciento del valor de las viviendas es - lo que se denomina "Factor de daños" (Damage Factor, D.F.). - Por otro lado, los daños que sufren las estructuras sometidas a una aceleración menor de 100 cm/seg^2 se consideran que tienen un coste fijo.

El número de reclamaciones en cada segmento anular lo obtienen multiplicando el número de viviendas por el corres-

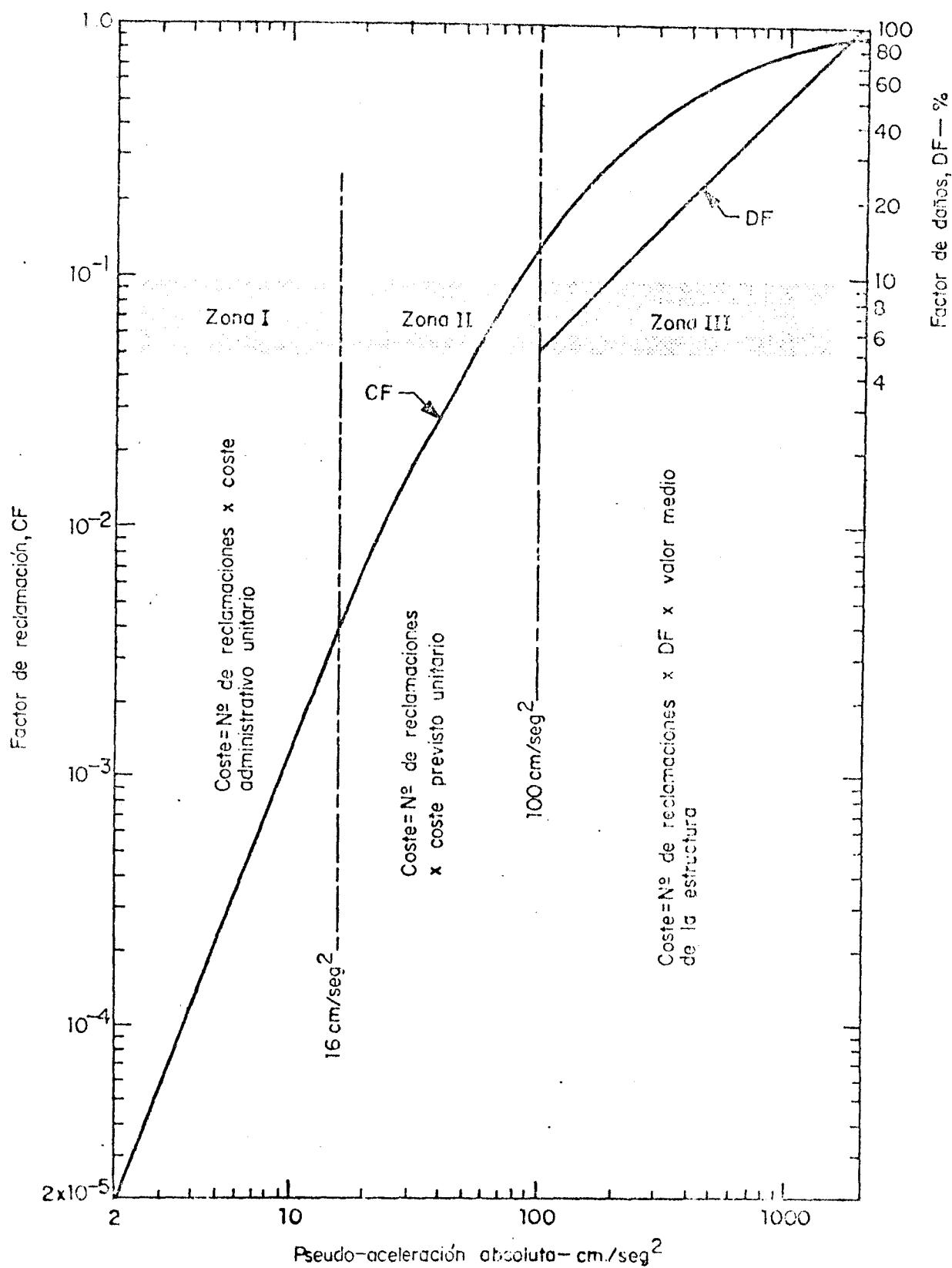


Fig. 2.13. — Factores de reclamación y de daños en función de la respuesta de la estructura

pondiente factor de reclamación (C.F.) (Fig. 2.13).

En la zona I el coste que supondrán las reclamaciones está basado en el hecho de que en esa zona existe poca posibilidad de daños; lo calculan, por tanto, multiplicando el número de reclamaciones en dicha zona por el coste administrativo de una reclamación.

En la zona II también se trata de un coste fijo, pero superior al anterior ya que existe una posibilidad mayor de daños. En este coste está incluido el administrativo. El procedimiento para determinar el coste total es análogo al seguido en la zona I.

En la zona III el coste de las reclamaciones no se basa en un coste unitario fijo, sino sobre la escala de daños que se muestra en la figura 2.13. De este modo el porcentaje de daños en una estructura es considerado como susceptible de variación desde un 5% para un valor de la PSAA= 100 cm/seg^2 a un 100% correspondiente a un valor de 2.000 cm/seg^2 . En esta zona el coste lo estiman multiplicando el número de reclamaciones por el "Factor de daños" (DF) y por el valor medio de los edificios que se encuentran en ese edificio anular.

Finalmente, para estructuras situadas en puntos donde la predicción de la aceleración de la vibración excede a los 2.000 cm/seg^2 , recomiendan que se considere el valor actual de cada estructura más que el valor medio.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Araus, M.: Efectos de las Vibraciones debidas a Voladuras, Industria Minera, n° 126, pág. 1-8.

- 2.- Attewell, P.B., and Farmer, I.W.: Attenuation of Ground Vibrations from Blasting. Qy Man. JnI, 48, 1964, pp. 211.

- 3.- Attewell, P.B., and Farmer, I.W.: Ground Vibrations from Blasting Quarry Mgrs' J., Vol. 48, 1964, pp. 191-198.

- 4.- Attewell, P.B., Farmer, I.W., and Haslam, D.: Prediction of Ground Vibration Parameters from Major Quarry Blasts. Mining Minerals Engineering, December, 1965, pp. 621-626.

- 5.- Crandell, F.J.: Ground Vibration Due to Blasting and Its Effects Upon structures. J. Boston Soc. Civil Engineers, - April 1949, pp. 222-245.

- 6.- Crandell, F.J.: Transmission Coefficient for Ground Vibrations Due to Blasting. J. Boston Soc. Civil Eng., V. 47, - n° 2, April 1960, pp. 152-168.

- 7.- Davies, B., Farmer, I.W., and Attewell, P.B.: Ground Vibrations from Shallow Sub-Surface Blasts. *The Engineer*, V. 217, March, 1964, pp. 553-559.
-
- 8.- Devine, J.F., Beck, R.H., Meyer, A.V.C., and Duvall, W.I.: Vibration Levels Transmitted Across a Presplit Fracture-Plane. *Eng. Mines Rept. of Inv. 6695*, 1965, pp. 29.
-
- 9.- Devine, J.F., Beck, R.H., Meyer, A.V.C., and Duvall, W.I.: Effect of Charge Weight on Vibration Levels from Quarry-Blasting. *Bu Mines Rept. of Inv. 6774*, 1966, pp. 37.
-
- 10.- Duvall, W.I., and Fogelson.: Review of Criteria for Estimating Damage to Residence from Blasting Vibrations. *Bu Mines Rept. of Inv. 5968*, 1962, pp. 1962.
-
- 11.- Duvall, W.I., Johnson, C.F., Meyer, A.V.C., and Devine, J.F.: Vibrations from Instantaneous and Millisecond Delayed Quarry Blasts. *Bu Mines Rept. of Inv. 6151*, 1963, - pp. 34.
-
- 12.- Edwards, A.T., and Northwood, T.D.: Experimental Studies of the Effects of Blasting on Structures. *The Engineer*, V. 210, Sept. 30, 1960, pp. 538-546.
-
- 13.- Fogelson, D.E., R.A. Dick, J.J. Olson, and D.V. D'Andrea: Vibration from Tunnel Blastings at Norad. *Bu Mines Rept. to the U.S. Army Corps of Eng.*, May 1970, pp. 34.
-

- 14.- Grant, R.L., J.N. Murphy, and M.L. Bouser: Effect of Weather on Sound transmission from Explosive shots. Bu Mines Rept. of Inv. 6921, 1967, pp. 13.
-
- 15.- Goldman, D.E.: A Review of Subjetive Responses to Vibrating Motion of the thuman Body in the Frecuency Range, 1 to 70 cycles per second. Naval Medical Res. Inst. Rept.-n° 1, Project NM 004001, Mar. 16, 1948, pp. 17.
-
- 16.- Habberjam, G.M., and Whetton, J.R.: On the Relationship-Between Seismic Amplitude and charge of Explosive Fired-in Routine Blasting Operations, Geophysics, V. 17, n° 1, January 1952, pp. 116-128.
-
- 17.- Hanna, N.E., and M.G. Zabetakis: Pressure Pulses Produced by Underground Blasts. Bu Mines Rept. of Inv. 7147 , 1969, pp. 16.
-
- 18.- Hirsch, F.G.: Effects of Overpressure on the Ear Review. Annals of the N.Y. Acad. Sci., V. 151, Art. 1, Oct. 28 , 1968, pp. 147-162.
-
- 19.- Hughes, B.C.: Nuclear Construction Engineering Technology, NCG Technical Report n°2. September 1968, pp. 181.
-
- 20.- Ireland, A.T.: Desing of Air - Blast Meter and Calibrating Equipment U.S. Bu Mines Tech. paper 634, 1942, pp. 20.
-

- 21.- Ito, Ichiro.: On the Relationship between Seismic Ground Amplitude and the Quantity of Explosives in Blasting. Reprint from Memoirs of the Faculty of Eng., Wyoto Univ. , V. 15, n° 11 April 1953, pp. 579-587.
-
- 22.- Jenkins, J.E.: Human Response to Industrial Blasting Vibrations. AIME Crous Mining Engineering May 1956, pp.535 538.
-
- 23.- Wingery, C.N., and Panill, B.F.: Peak Overpressure Ver - sus Scaled Distance for TNT Surface Bursts (Hemispherical Charges). B.R.L. Rept. n° 1518, April 1964, pp.22.
-
- 24.- Kinney. G.F.: Explosive Shocks in Air. The Mae Millan Co. New York 1962, pp. 75-146.
-
- 25.- Kovach, R.L.F., Lehuer, and R. Miller: Experimental ground amplitudes from small surface explosions, Geophysics V. 27, 1963, pp. 793-798.
-
- 26.- Langefors, U., Kihlstrom, B., and Westerberg, H.: Ground Vibration in Blasting Water Power, V. 10, February 1958, pp. 335-338, 390-395, 421-424.
-
- 27.- Leandri, M., and Pello, H.: Etude Practique des Vibrations Produites par les tirs d' explosifs avec et sans Prédécoupage. Symp. Sr. Int. Mécanique des Roches, Nancy 1971, Sec. III-12.
-

- 28.- Leet, L. Don.: Ground Vibrations Near Dynamic Blasts. Seismological Soc. of America Bull, V. 9, 1939, pp. 487-496.
-
- 29.- Leet, L. Don.: Effects Produced by Blasting Rock, Hercules Powder Company.
-
- 30.- Leet, L. Don.: Blasting Vibrations, Effects, Hercules Powder Company, 1951.
-
- 31.- Leet, L. Don.: Vibrations from Blasting Rock, Harvard University Press, 1960.
-
- 32.- Leet, L. Don.: Vibrations from Construction Blasting. Part I. The Explosive Eng., March-April. pp. 47-53. Part II January-February, pp. 13-30, 1960.
-
- 33.- Morris, G.: Vibrations Due to Blasting and their effects - on building structures, Eng. V. 190. pp. 394-395, 414-418.
-
- 34.- Morris, G.: The Reduction of Ground Vibrations from Blasting Operations Eng. April 21, 1950, pp. 430-433.
-
- 35.- Morris, G., and Westwater, R.: Damage to structures by ground vibrations Due to Blasting. Mine and Quarry Eng., April 1953, pp. 116-118.
-

36.- Nicholls, A.R., and D.E. Fogelson: Controlling seismic effects of Blasting. Nat. Safety Cong. Trans., published by the Nat. Safety Council 1967, pp. 46-53.

37.- Nicholls, H.R., C.F. Johnson, and W.I. Duvall: Blasting Vibrations and their effects on structures. Bu. Mines Bull 656, 1971, pp. 105.

38.- Nodolski, M.E.: Architectural Damage to Residential structures from seismic disturbance. Lawrence Radiation Laboratory Livermore, Rept. UCRL - 71015, April 1968.

39.- Obert, L.: Seismic Effects from Blasting. Crushed Stone Jour, V. 35, n° 1, March 1960, pp. 24-27.

40.- Olson, J.J., R.A. Dick, J.L. Condon, A.D. Hendrickson, and D.E. Fogelson: Mine Roof. Vibration from Underground Blasts. Bullines Rept. of Inv. 7330, 1970, pp. 55.

41.- Olson, J.J., R.A. Dick, D.E. Fogelson, and L.R. Fletcher: Mine Roof. Vibrations from Production Blasts, Shullsburg Mines Shullsburg, Wis. Bu Mines Rept. of Inv. 7462, December 1970, pp. 35.

42.- Olson, J.J. and Fletcher, L.R.: Airblast - Overpressure Levels from confine underground Production Blast. Bu Mines Rept. of Inv. 7574, 1971, pp. 24.

43.- Perkins, Beauregard, Jr., Paul H. Lorain, and William H.: Townsend Forecasting the Focus of Air Blasts Due to Meteorological Conditions in the Lower Atmosphere. Ballistic Research Laboratories Rept. n° 1118, October 1960, pp. 77.

44.- Perkins, Beauregard, Jr., and Willis F.: Jackson Handbook for Prediction of Air Blast Focusing. Ballistic-Research Laboratories Rept. n° 1240, February 1964, - pp. 100.

45.- Reed, J.W., B.J. Pape, J.E. Minor, and R.C. Daltort: Evaluation of Window Pane Damage Intensity in San Antonio Resulting from Medina Facility Explosion on November 13, 1963. Annals of the N.X. Acad. Sci. V. - 151, Art. 1, October 28, 1968, pp. 565-584.

46.- Reiher, H., and F.J. Meister: Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschuettermgen (Sensitivity of Human Beings to Vibration). Torschung anf dem Gebert des Ingenieurvoesens (Berlin), V. 2, February 1931, pp. 381-386.

47.- Roberts, A.: Ground Vibrations Due to Quarry Blasting and Other Sources an Environmental Factor. 11 Rock - Mech. Symp., AIME, Chapter 22. pp. 427-457.

- 48.- Rockwell, E.H.: Vibrations Caused by Quarry Blasting and Their Effect on Structures. Rock Products V. 30, 1927 , pp. 58-61.
-
- 49.- Ricker, N.: The Form and Nature of seismic Waves and the structure of Seismograms. Geophysies, V. 5, n° 4, October 1940, pp. 348-366.
-
- 50.- Sewell, R.G.S. and G.F. Kinney: Response of Structures - to Blast A new Criterion, Anuals of the N.Y. Acad. Sci., V. 151, Art. 1, October 28, 1968, pp. 532-547.
-
- 51.- Sutherland, H.B.: A Study of Vibrations Producedin Structures by Heavy Vehicles. Proc. of the Thirtieth Anual - Meeting of the Highway Research Board Ottawa, December - 1950, pp. 406-419.
-
- 52.- Taylor, W.J.: Blast Wave Behavier in confined Regions. - Anuals of the N.Y. Acad. Sci., V. 151, Art. 1, October 28, 1968, pp. 339-356.
-
- 53.- Teichman, G.A., and R. Westwater: Blasting and Associa - ted Vibrations. Engineering, April 12, 1957, pp.460-465.
-
- 54.- Thoemen, J.R., and S.L. Windes: Seismic Effect of Quarry Blasting. Bu Mines Bull. 442, 1942, pp. 83.
-

55.- Windes, S.L.: Damage from Air Blast. Progress Report. Bu
Mines Rept. of Inv. 3622, 1942, pp. 18.

56.- Windes, S.L.: Damage from Air Blast Bu Mines Rept. of -
Inv. 3708, 1943, pp. 50.

CAPITULO III

ANALISIS DE LAS TECNICAS DE VOLA
DURAS CONTROLADAS (CON ATENCION
PREFERENTE A LA DE PRECORTE).

1.- INTRODUCCION

Desde hace muchos años las excavaciones en roca han venido haciéndose por los métodos convencionales de voladuras, sin tener en cuenta para nada los posibles daños causados a la roca que va a permanecer "in situ" con una responsabilidad - resistente una vez que la excavación se ha completado. Sin embargo, actualmente todo el mundo tiene conciencia de la importancia que representa el realizar las excavaciones con el mínimo daño posible a la superficie circundante. En efecto, reducir al máximo todo exceso de fracturación producido por una voladura así como crear un plano de fractura en una dirección deseada, vienen a ser hoy uno de los primeros requisitos para que una excavación en roca sea, aparte de preservadora de la roca circundante, económica.

Se ha realizado un gran esfuerzo en los últimos años - con el fin de poder aplicar técnicas de voladuras más refinadas y así poder alcanzar los objetivos mencionados. Como consecuencia se han desarrollado diferentes técnicas que, basándose fundamentalmente en pruebas de experimentación tanto en laboratorio como "in situ", van desplazando a los métodos convencionales. De un modo especial ha contribuído el interés - tanto de las compañías mineras como de las empresas de ingeniería civil en obtener una reducción de sus costes y en proporcionar una mayor seguridad en sus labores. Tampoco hay que olvidar el esfuerzo desplegado por las empresas dedicadas a la fabricación de explosivos que, al sacar al mercado nuevos

tipos de explosivos, han facilitado el éxito de las nuevas técnicas.

Tales técnicas de voladuras, que podríamos llamar de precisión, son conocidas como precizallamiento (preshearing), perforación en línea (line drilling), voladura de amortiguación (cushion blasting), precorte (presplitting), etc., y, - aunque en sus líneas generales son muy similares, difieren considerablemente en detalle.

La mayoría de ellas se emplearon por vez primera por la Canadian Ind. Ltd., en el St. Lawrence Seaway Project y en el Niagara River Power Project. Desde entonces, se han venido utilizando con éxito muy variado tanto en ingeniería civil como en minería. Sus ventajas sobre los métodos convencionales empleados para obtener resultados similares, resultan ser los siguientes:

- (I) - Reducir el exceso de fracturación de la roca circundante a la excavación, dando como consecuencia un menor consumo de revestimiento de hormigón.
- (II) - Proporcionar en la roca cortes más limpios, disminuyéndose por tanto el tiempo de saneo.
- (III) - Producir menos destrozos en la roca circundante, incrementándose por tanto el grado de seguridad y minimizándose el coste de soportes y mantenimiento.
- (IV) - Posibilidad de reducir el nivel de las vibraciones producido por la voladura principal y, como consecuencia de ello, el número de quejas y reclamaciones.

2.- DIFERENTES TECNICAS DE VOLADURAS CONTROLADAS

Aunque en este capítulo únicamente ha de tratarse con detalle la técnica de precorte, parece pertinente revisar en este epígrafe, aunque sólo sea brevemente, las restantes técnicas que actualmente vienen empleándose.

(I) Técnica de precizallamiento (Preshearing) :

Esta técnica, empleada sin mucho éxito en el Niagara Power Project, consiste en delimitar la excavación - por medio de la perforación de barrenos muy próximos, de los que se carga uno cada dos o tres barrenos con una serie de cartuchos espaciados entre sí y unidos todos ellos por medio de cordón detonante.

El plano de fractura, y por tanto la detonación de los barrenos, se realiza previamente a la perforación de la voladura principal.

En trabajos de ingeniería civil generalmente se emplean barrenos con un diámetro de 1 1/2-4 pulg. ($\approx 3,7$ - 10 cm), espaciamiento de 1-4 pies ($\approx 0,3$ -1,3 m), - cargas de 0,08-0,75 lb/pie ($\approx 0,13$ -1,2 kg/m), y profundidad de hasta 50 pies ($\approx 16,5$ m), esto último, por supuesto, en función de la desviación de los barrenos.

(II) Técnica de perforación en línea (Line drilling):

Consiste también en delimitar la excavación por medio de la perforación de barrenos separados entre sí de dos a cuatro veces su diámetro, dando por tanto un espaciamiento muy reducido lo que hace que su profundidad sea limitada. Los barrenos se dejan sin cargar, sirviendo de plano de debilidad a lo largo del cual se producirá el corte al actuar la voladura - principal.

En general, en rocas sedimentarias y en ciertas rocas metamórficas, no es tan eficaz como en algunas - rocas ígneas. En las primeras el plano de rotura es desigual, necesitándose por tanto de mayor saneo que el que resultaría necesario para ciertas rocas ígneas. Quizá ese corte desigual ocurre más frecuentemente - en rocas sedimentarias y metamórficas cuando los barrenos más próximos de la pega principal se encuentran de 2 1/2-6 pies ($\approx 0,8-1,9$ m) de la línea de barrenos, posiblemente como consecuencia de la mayor influencia de sus discontinuidades naturales: estratificación, fracturas, diaclasas y otras discontinuidades que originan ondas secundarias de reflexión cuya componente tangencial pueden producir la rotura - más allá de la línea de barrenos.

(III) Técnica modificada de perforación en línea (Modified line drilling):

Difiere del anterior en que cada dos o tres barrenos se carga uno de ellos con muy poca carga, consistente ésta en cartuchos separados, por espaciadores, a intervalos regulares. En los barrenos cargados los

cartuchos se ceban en cabeza y se inician simultáneamente o después de la voladura principal. En ocasiones se emplea cordón detonante.

Con este método se obtienen ciertas mejoras respecto al anterior pero, en cualquier caso, ambos son excesivamente costosos, debido al gran número de barrenos necesarios y a la consiguiente influencia en los costes de perforación y de mantenimiento en un proyecto de voladuras.

(IV) Técnica de voladuras amortiguadas (Cushion blasting):

Esta técnica emplea barrenos de gran diámetro cargados, muy poco, por medio de cartuchos de diámetro pequeño, conectados por cordón detonante y de forma que no toquen el contorno del barreno. El volumen restante del barreno se rellena generalmente con gravilla, detritus, etc., con el fin de que los gases producidos por el explosivo no actúe de un modo inmediato sobre dicho contorno y, de esa forma, amortiguar (cushioned) la voladura. Con frecuencia suelen emplearse barrenos de pequeño diámetro entre los de diámetro mayor, que actúan como guía para producir la fractura. Todos los barrenos se inician instantáneamente y, en general, con anterioridad a la voladura principal.

Dicha técnica tiene su mayor aplicación en formaciones de rocas blandas, ya que éstas deben excavarse con un mínimo de destrozos en el resto de la roca. Los resultados que con ella se obtienen suelen ser muy satisfactorios.

(V) Técnica modificada de voladuras amortiguadas
(Modified cushion blasting):

Su diferencia con la anterior estriba en que se cargan los barrenos de pequeño diámetro en tanto que los de gran diámetro actúan como barrenos guía. Los resultados que proporciona esta técnica son excelentes.

(VI) Técnica de recorte (Smooth wall" o" perimeter of soundwall"):

Se empleó por primera vez en Suecia (1950) y más tarde (1952) fué introducida en Canadá por la Can. Ind. Ltd. Se utiliza principalmente en excavaciones subterráneas y es muy similar a las voladuras amortiguadas. La carga de los barrenos es pequeña, continua y se inician todos ellos instantáneamente.

Los mejores resultados se obtienen cuando la parte central del frente se ha excavado totalmente iniciándose, entonces, la voladura de la zona periférica instantáneamente con cordón detonante. Se considera que la inexactitud de los últimos intervalos de retardo tiene un efecto perjudicial en la obtención de un buen recorte.

3.- PRECORTE

Esta técnica, sin duda la más eficaz de todas, fue desarrollada por Holmes (Ref. 17) quien la empleó a gran escala por vez primera en el Niagara Power Project (Hercules Powder Company, 1962). El propio Holmes la define como: "la creación en la masa rocosa de una superficie plana o plano de cizallamiento, mediante la utilización controlada de los explosivos y sus accesorios en barrenos con una alineación y espaciamiento adecuado". Así pues, su objetivo es obtener un plano de fractura previo a la perforación y detonación de la pegada principal, sin la presencia de una superficie libre paralela al mismo.

Se perfora, para obtener esto, una serie de barrenos - de diámetro medio, con un espaciamiento apropiado, a lo largo de la línea de rotura potencial, o sea, línea de delimitación potencial de la excavación, a la profundidad deseada. Los barrenos se cargan ligeramente con una serie de cartuchos de pequeño diámetro alojados en el centro del barreno, unidos por medio de cordón detonante, con un espaciamiento adecuado entre ellos (generalmente 30 cm., si bien esto depende de las características del precorte) y atacados con gravilla, detritus, etc. Se inician instantáneamente y, naturalmente, con anterioridad a la voladura principal.

Las numerosas ventajas de esta técnica sobre las ya descritas están asociadas fundamentalmente con la reducción de los excesos de fracturación, cortes más limpios y la necesidad de un menor número de barrenos. Asimismo se subraya en

un artículo sobre el Niagara Power Project, que la ejecución de un precorte previo a la voladura principal, ayudaba aparentemente a reducir las vibraciones de la voladura principal. Tal conclusión se basaba en el hecho de que con anterioridad a la aplicación de esta técnica los circuitos eléctricos automáticos de una planta química próxima a las voladuras, sufrían daños, mientras que no experimentaban afectación con el empleo del precorte. Posteriormente, las investigaciones realizadas por Devine y Duvall (Ref. 5) en la proximidad de una cantera y en dos emplazamientos de obras de ingeniería civil, han indicado que no se producía una significativa reducción del nivel de la vibración, al interponerse un precorte vertical entre la voladura principal y la situación de los geófonos. También Obert (Ref. 16) confirma esta conclusión expresando que el precorte no afecta de un modo significativo al nivel de la vibración, observándose incluso que el nivel de la vibración generado por el precorte podía ser mayor que el producido, por la voladura principal. Esto, dependerá fundamentalmente de la máxima carga instantánea de tonada (ver Capítulo II).

La técnica de precorte ha proporcionado excelentes resultados en la excavación de canales, diques, taludes, cimentaciones, túneles, pozos, etc. Por otra parte, son muchas las explotaciones mineras en las que su utilización ha proporcionado ventajas considerables en su aplicación directa en los métodos de explotación; ejemplos, entre muchos existente, son la Climax Molybdenum Company (explotación subterránea), La Cananea Pit (explotación a cielo abierto) y Minas de Río Tirón (explotación subterránea y a cielo abierto).

Actualmente esta técnica es universalmente aceptada y, si bien en nuestro país no existen especificaciones respecto

a su aplicación, en otros países suelen encontrarse ciertas especificaciones sobre el tema. En los EE.UU., el U.S. Army Corps of Engineers, los Departamentos de Autopistas de muchos estados y el Federal Highway Administration, tienen, prácticamente, todos ellos, las mismas especificaciones, aunque, a decir verdad, son arbitrarias y mal definidas. Sin excepción, todas coinciden en que la carga debe iniciarse con cordón detonante, al que deben ir unidos los cartuchos debidamente espaciados, y que los barrenos deben tener una carga de 1/4 lb/pie ($\approx 0,38$ kg/m) de barreno.

Aunque esta técnica ha dado excelentes resultados es la obtención en la roca de cortes verticales o ligeramente inclinados, su aplicación en cortes horizontales, particularmente a grandes profundidades, ha sido menos satisfactoria. Esto es atribuible al hecho de que, predominantemente, las fracturas tienden a desarrollarse en la dirección de la máxima tensión principal. Pero resulta que en la mayoría de las configuraciones dadas en excavaciones subterráneas, esta dirección coincide con la vertical como consecuencia de las acciones gravitatorias sobre la excavación, coincidiendo la dirección preferencial de las fracturas con la vertical más que en la horizontal. Como consecuencia, parece obvia la consideración del estado tensional regional (campo de tensiones regionales) en un análisis completo del mecanismo del precorte. No debemos olvidar, sin embargo, que el desarrollo de las fracturas en el precorte es el resultado de las fuerzas generadas por la explosión.

En este sentido, todas las teorías actuales que intentan explicar el mecanismo del precorte, reconocen la presencia y necesidad del esfuerzo de tracción como ha propuesto -

Duvall (Ref. 7). En efecto, todas ellas atribuyen la formación del plano de fractura al efecto producido por dicho esfuerzo. Las teorías difieren, únicamente, en el mecanismo - que origina dicho esfuerzo: se considera la onda de esfuerzo generada por el explosivo (Ref 1) o, bien, la combinación de esfuerzos creados por dicha onda y la presión de gas en el barreno (Ref. 11).

3.1.- BREVE RESEÑA HISTORICA

Paine, Holmes y Clark (Ref. 17) en una artículo en el que analizan las diferentes técnicas ensayadas en el Niagara Power Project, exponen un tratamiento teórico del mecanismo del precorte y en el que consideran que el factor relevante en la creación del plano de fractura se debe a la superposición de las ondas de esfuerzos en el punto medio de la línea de unión de los barrenos.

Langefors (Ref. 12) dedica un capítulo muy corto a esta técnica en su libro sobre voladuras. Por medio de ensayos de precorte en modelos bi-dimensionales de plexiglás, obtiene las conclusiones sobre su mecanismo, en el que presta énfasis a las fracturas radiales y a la acción ejercida en ellas por la presión del gas. Expone asimismo la posibilidad de que la iniciación de las fracturas sea una consecuencia - del paso de la onda de esfuerzos. Sin embargo, su trabajo es de naturaleza descriptiva y no presenta ningún tratamiento - analítico.

Uno de los primeros trabajos experimentales más completos fue el realizado por Mathias (Ref. 14) en el que, - en un enfoque básicamente empírico, investigó sobre bloques

de plexiglás el efecto producido por distintos parámetros. Si bien en su trabajo expone que un esfuerzo de compresión resulta favorable cuando la dirección en la que actúa coincide con la línea de precorte y desfavorable cuando es perpendicular a dicha línea, no da, sin embargo, explicación teórica - alguna a la dirección preferente de las fracturas entre los barrenos.

Aso (Ref. 1) en un estudio teórico y experimental - estudia el mecanismo del precorte, concentrándose enteramente sobre la acción de las ondas de esfuerzos. Su modelo teórico consiste de dos barrenos infinitamente largos alojados en un medio elástico. En sus conclusiones expone que la fractura deseada se produce como consecuencia del esfuerzo traccional originado por la interacción de las ondas de esfuerzo en el punto medio de la línea conexión de los dos barrenos. La validez de las predicciones teóricas fue chequeada experimentalmente, aunque con una técnica no excesivamente correcta en el registro de la iniciación de las fracturas.

Kutter (Ref. 11) realiza una investigación sumamente completa relacionada más con los diferentes fenómenos físicos operantes en el proceso de fractura de precorte que - con la determinación de los parámetros óptimos de la voladura. En su estudio considera ambos fenómenos, ondas de esfuerzo y presión del gas, manifestando la gran influencia que el último tiene sobre la propagación de las fracturas iniciales formadas por la onda de esfuerzo. Asimismo analiza la influencia del estado tensional y la producida por el diferente grado de no simultaneidad en la detonación de los barrenos.

Nicholls y Duvall (Ref. 15) han realizado recientemente una serie de ensayos "in situ" que pone de manifiesto la influencia ejercida por una tensión regional horizontal estática, perpendicular al plano de un precorte vertical. Sus conclusiones están en consonancia con los ensayos del modelo de Mathias, mostrando la mayor facilidad de realizar el precorte en la dirección de la tensión principal mayor. Exponen asimismo, que la iniciación de las fracturas de tracción se efectúan entre los barrenos y que la expansión de los gases pueda propagar las fracturas iniciales como consecuencia de un efecto de cuña.

Leighton (Ref. 13) ha efectuado una investigación, de carácter experimental, para determinar las condiciones óptimas de una voladura de precorte. En su estudio, excesivamente simple, analiza la influencia de varios parámetros de la carga en la obtención de un precorte.

Tincelin y Weber (Ref. 21) exponen en un artículo sobre precorte en galerías, el principio de una técnica de precorte específica para estados tensionales desfavorables. Tal técnica consiste en excavar el núcleo de la galería con el fin de favorecer la liberación de tensiones, de modo que permita la ejecución del precorte en las casos que sea imposible realizarlo en el estado tensional primitivo.

Weber y Esteve (Ref. 23) presentan, en su estudio sobre propagación de ondas esféricas y cilíndricas, la evolución de la tensión radial y tangencial en función del tiempo, velocidad de detonación del explosivo, naturaleza del material e influencia de detonación simultánea o no simultánea de barrenos adyacentes.

Finalmente, son muchos los trabajos prácticos que pueden citarse. Así, Niagara, Stenhouse, Volta River Project , Akosombo Dam, Kainji Project Nigeria, Doureay, Site of U.K. A.E.A. Power Plant y Lougannet Power Station Project, son unos pocos de los muchos ejemplos en que la aplicación extensiva de la técnica del precorte es altamente aleccionable.

3.2.- INTERACCION DE LAS ONDAS DE ESFUERZO Y PRESION DE GAS EN EL PROCESO DE FRACTURA QUE SE REGISTRA ENTRE DOS BARRENOS ADYACENTES.

Resulta evidente que en el caso de barrenos múltiples, tal como sucede en la técnica de precorte, la complejidad del proceso de fractura se incrementa de un modo considerable, como consecuencia de la influencia que por su proximidad y tipo de iniciación, ejercen unos barrenos sobre los otros. Por otro lado, la elevada probabilidad de que exista un cierto retardo entre la iniciación de las cargas individuales, hace que las interacciones entre barrenos adyacentes tenga lugar no sólo en aquellos puntos situados entre los mismos, sino también en su contorno inmediato.

Los ensayos "in situ" y de laboratorio indican que es prácticamente imposible obtener una iniciación perfectamente instantánea y simultánea de todos los barrenos. Por tanto , un tipo de iniciación no simultánea, debe considerarse como la regla general más que como la excepción, en la técnica actual de precorte. Por ello, Kutter (Ref. 11) realiza un estudio en el que analiza la influencia, en el proceso de fractura, del retardo existente entre la iniciación de dos barrenos adyacentes. En efecto, analizando todas las combinaciones lógicas de la acción de la onda de esfuerzo y presión del gas, puede

obtenerse una interpretación más clara, completa y realista del proceso de fractura operante en la técnica de precorte - tal como realmente tiene lugar en los trabajos prácticos.

Si bien la investigación de Kutter se basa en una serie de hipótesis que no se corresponden totalmente con las situaciones reales encontradas (modelo bidimensional, material elástico, etc), resulta ser, sin embargo, de suma importancia dentro de los trabajos que tratan de explicar el fenómeno.

Viene a considerar los cuatro casos típicos que pueden ocurrir de no simultaneidad entre la iniciación de dos barrenos adyacentes (Fig. 3.1.): (1) retardo tan grande que la presión del primer barreno ha decrecido a un valor despreciable antes de que se inicie el segundo, (2) la onda de esfuerzo del primer barreno (A) ha pasado ya el segundo barreno (B) antes de que este se inicie, pero la presión quasi-estática del primero (A) es todavía activa, (3) el segundo barreno (B) se inicia cuando la onda de esfuerzo del primero - (A) pasa por el segundo (B), (4) iniciación simultánea.

Efectúa un estudio teórico de la superposición de esfuerzos y la interacción entre las fracturas y los esfuerzos, obteniendo las conclusiones siguientes:

- 1) En el caso (1) la obtención del precorte dependerá de la efectividad de la onda de esfuerzo del barreno A para iniciar fracturas en el B. Pero, dada la relativamente elevada absorción de energía por parte de las rocas y espaciamientos empleados "in situ", la onda se habrá atenuado en

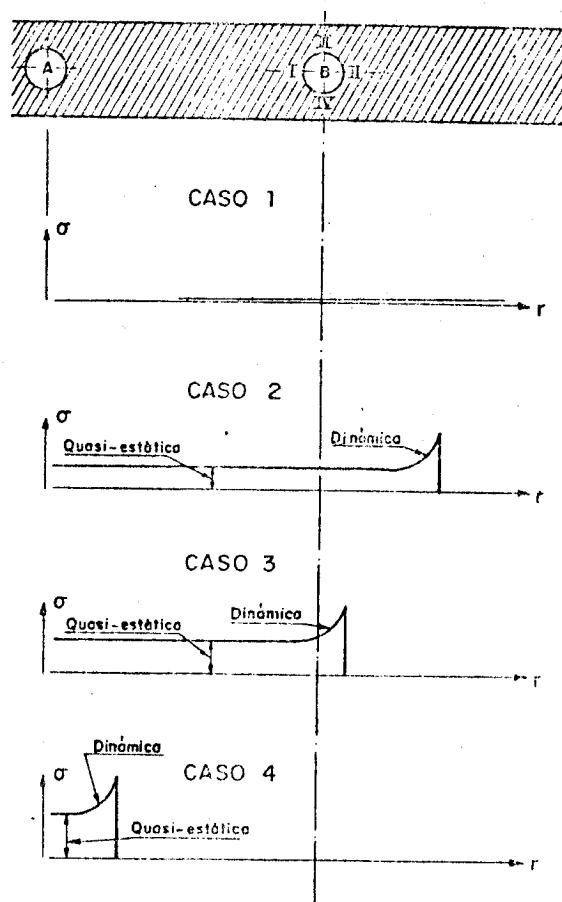


Fig. 3.1.— Casos típicos del retardo existente entre las cargas A y B. Los gráficos se refieren al tiempo de iniciación de la carga.

tal grado que no se excederá la resistencia a la tracción en el contorno del barreno adyacente. De esta forma el brreno A actúa como un barreno único y no se podrá obtener una dirección preferente de fractura.

- 2) En el caso (2), al igual que en el caso anterior, la distribución de fracturas alrededor de A no será influída - por el B, al menos en los primeros estados de formación - de grietas. El campo tensional estático originado por la presión de A produce una concentración de esfuerzos en B, lo suficientemente grande como para favorecer la formación de grietas en la dirección de la línea central. La superposición de la onda de esfuerzos de B y de la presión de A dan lugar a un estado tensional favorable para la formación de grietas en la línea central y que posteriormente pueden extenderse por la acción ejercida por la presión del A.
- 3) En el caso (3) la superposición de los dos campos estáticos da lugar a un estado tensional favorable que junto con la acción de la onda de esfuerzo incrementan considerablemente los factores que favorecen la formación del plano de fractura.
- 4) En el caso de iniciación simultánea de los dos barrenos , situación que, en exclusividad, ha sido siempre analizada en los estudios sobre precorte, se trata de un estado de simetría perfecto pero también el que con menos probabilidad ocurrirá en trabajos prácticos. La evidencia experimental muestra que la intersección de grietas es muy poco probable que ocurriese si las grietas fueran iniciadas en el punto medio de la línea de unión entre barrenos, estando, por tanto, en contraposición con la iniciación de fracturas en dicho punto.

3.3.- INFLUENCIA DEL ESTADO TENSIONAL

Está demostrado que la presencia de un campo de tensiones estáticas, como consecuencia del recubrimiento o, bien de tensiones geológicas, que actúa a través del plano potencial del precorte, modifica de un modo considerable los conceptos, que hemos venido exponiendo, del proceso de fractura de dicho plano, ya que el referido campo tensional origina una concentración de esfuerzos traccionales fuera de la posición de la línea de unión entre barrenos desplazándola hacia la dirección de la tensión principal máxima. Asimismo, elimina cualquier esfuerzo tangencial a lo largo de dicha línea.

Por tanto, si no se encuentra algún camino, aunque este sea sólo de operación temporal, capaz de eliminar dicho campo en la zona del entorno del barreno, se obtendrá con toda seguridad un precorte deficiente. La eliminación de dicho campo no podrá nunca realizarse de un modo estricto. Sin embargo, si se podrá eliminar o, mejor, anular temporalmente - por la superposición de otro campo tensional, bien dinámico o estático, de forma tal que se favorezca con la misma la creación del plano de fractura. En este sentido, Culvert (Ref. 3) sugiere que esto puede lograrse por medio de la aplicación de fuerzas concentradas en aquellos puntos del contorno del barreno en los que se desea que se inicie la fractura. Este método, igualmente que la realización de unas "muescas" en el barreno, resulta, en la práctica, difícilmente aplicable. Tincelin y Weber (Ref. 21) hacen presentación de la técnica, de características muy peculiares, expuesta en el epígrafe 3.1. Por su parte Kutter (Ref. 11), hace un estudio analítico del problema, con las limitaciones de las hipótesis supuestas - (ver epígrafe 3.2.), del modo siguiente:

Dado que el campo tensional "in-situ" introduce únicamente serias dificultades respecto de la creación del plano de fractura en el caso de que exista una diferencia considerable en la magnitud de las tensiones principales-ya que esto d^a lugar a que la distribución de tensiones alrededor de los barrenos no sea uniforme-, Kutter, con el fin de restituir el estado uniforme de dicha distribución, en torno a los barrenos, similar a la originada por un campo hidrostático, recurre a los esfuerzos - tanto al dinámico, como al producido por la presión de gas - resultantes de la detonación del explosivo sobre los barrenos adyacentes, para así obtener el campo adicional necesario que contrarreste el estado tensional original. La presión de gas, por tener una duración considerable, no está supeditada a un cumplimiento rígido de la no simultaneidad en la detonación de los barrenos, característica imprescindible, sin embargo, para un análisis correcto en el caso de los esfuerzos dinámicos. En este sentido, efectúa un análisis de la influencia de la dirección de la máxima tensión principal con respecto al plano del precorte, en las situaciones siguientes:

- (i) Perpendicular a dicho plano
- (ii) Formando un ángulo arbitrario con el mismo

En su estudio llega a la conclusión de que la situación más desfavorable, incluso más que en el caso (i), corresponde a cuando dicho ángulo tiene un valor de 45° y que, por el contrario, cuando dicha dirección coincide con la del plano del precorte, se favorece el proceso de fractura.

3.4.- ANALISIS CUANTITATIVO

Existe muy poca información en la que pueda encontrarse expresiones matemáticas que definan de un modo preciso la

carga a emplear para un determinado espaciamiento o viceversa. No obstante, se han realizado algunos intentos con el fin de dar una aproximación a la solución de los problemas reales.

En este sentido, Paine, Holmes y Clark (Ref. 17) - aportan la siguiente expresión para determinar el volumen a emplear de explosivo.

$$P_b = \frac{V_e P_D}{2 V_c}$$

en donde:

P_b = presión generada en el barreno

P_D = Presión de detonación

V_e = volumen de explosivo

V_c = Volumen de un cilindro de altura el espaciamiento entre centros de cartuchos sucesivos de un - mismo barreno y radio el del barreno.

Para su aplicación, V_e debe elegirse de forma que $P_b < \sigma_c$, siendo σ_c la resistencia a la compresión simple del material. Las figs. 3.2. y 3.3. muestran de un modo gráfico, los resultados que pueden obtenerse en función de la elección de dicho parámetro. Determinado V_e , puede definirse facilmente la longitud del cartucho de explosivo.

Por otra parte, como es natural, a la primera condición a cumplir - $P_b < \sigma_c$ -, resultaría insuficiente para definir la carga a emplear, por ello, debe también verificarse - que el esfuerzo de tracción generado sea mayor que la resis -

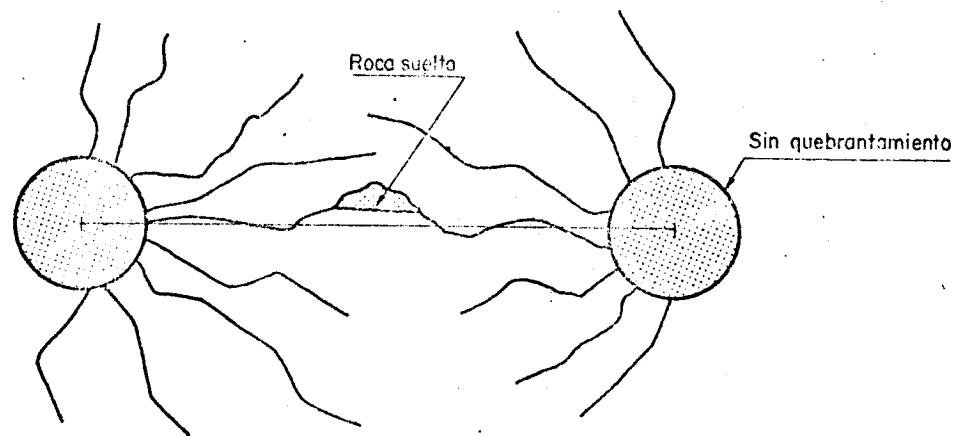


Figura 3.2 .- Cantidad límite de carga

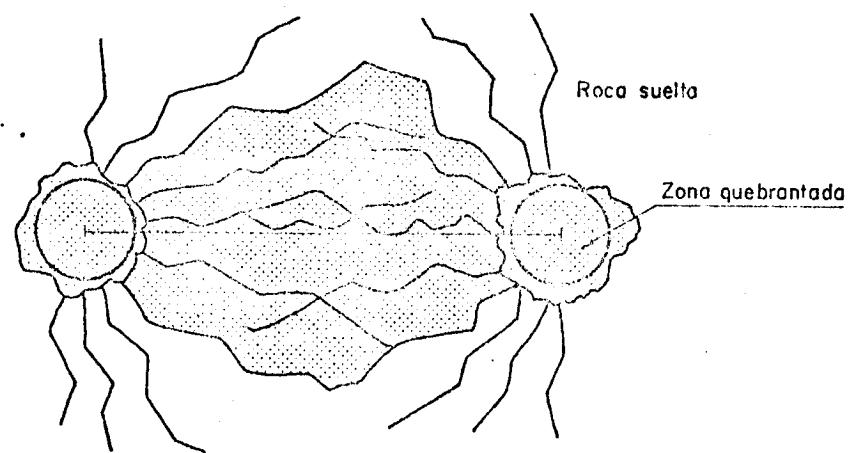


Figura 3.3 .- Cantidad excesiva de carga

tencia a la tracción del material para que sea posible la formación de la fractura. Tal condición queda expresada por:

$$T = P_b \frac{2r}{D} e^{-\frac{KD}{2v}}$$

en donde:

T = $E\varepsilon_0$ = esfuerzo traccional generado

E = módulo de Young

V = módulo de Poisson

D = espaciamiento entre barrenos

r = radio del barreno

v = velocidad de propagación de las ondas

K = constante, función del tiempo

T_t = resistencia a la tracción del material.

Duvall (Ref. 7) sugiere para el coeficiente de amortiguación- $e^{-\frac{KD}{2v}}$, la siguiente expresión:

$$e^{-\frac{\alpha R}{c}}$$

en donde:

$R = \frac{D}{2}$ = distancia radial

c = radio de la carga

α = constante de absorción del material

Mathias (Ref. 14) da la siguiente expresión para predecir la longitud máxima de la fractura originada por la onda dinámica de esfuerzos.

$$L = \left[r/e^{A(L-r)} \right] \left\{ P_D^2 C^2 (1+N)^2 / [\sigma_T^2 (1+NR)^2] \right\}$$

en donde:

L = Longitud de la fractura

P_D = presión de detonación

$$C = \text{constante} = \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu}$$

$$\lambda = \frac{\gamma E}{(1+\gamma)(1-2\gamma)}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\gamma)}$$

σ_T = resistencia dinámica a la tracción del material

R = relación entre las impedancias características - del explosivo y del material.

N = relación entre las impedancias características - del frente de ondas reflejadas y del incidente.

Kutter (Ref. 11) encuentra que, para el caso de ondas esféricas, la distancia máxima a la que se puede iniciar nuevas fracturas es aproximadamente cuatro veces el radio de la cavidad, en tanto que, para el caso de ondas cilíndricas, es aproximadamente seis veces. Asimismo, para el incremento de longitud sufrido por fracturas preexistentes, da la siguiente expresión:

$$\Delta l = \frac{m t' \max}{2,35 \sqrt{\frac{1-\gamma}{1-2\gamma}} - 1} \cdot r$$

en donde:

r = radio de la cavidad

ν = módulo de Poisson

t'_{\max} = parámetro adimensional igual al valor del tiempo - para la amplitud máxima de la onda esfuerzos tangenciales.

m = constante, de valor 1,7 en el caso de ondas esféricas y 3,0 en el caso de ondas cilíndricas.

Estudia, además, las prolongación de las fracturas como consecuencia del efecto ejercido por la presión de gas en los casos siguientes:

- (1) barreno sometido a presión pero sin la presencia de fracturas.
- (2) existencia de fracturas en el barreno y la presión de gas actuando únicamente en el contorno del barreno.
- (3) barreno radialmente fracturado y con la presión de gas actuando sobre el contorno del barreno y las fracturas.

En su estudio encuentra que, siendo R el radio de la zona fracturada o cavidad equivalente sobre la que actúa el gas, la relación entre el esfuerzo radial y el tangencial para los tres casos citados, responde a las siguientes expresiones:

$$\sigma^{(1)} : \sigma^{(2)} : \sigma^{(3)} = 1 : R : R^2 \text{ ondas cilíndricas.}$$

$$\sigma^{(1)} : \sigma^{(2)} : \sigma^{(3)} = 1 : R : R^3 \text{ ondas esféricas}$$

lo que demuestra claramente la importancia que tienen las fracturas radiales en la determinación de la distribución de esfuerzos alrededor de la cavidad.

A pesar del enorme interés de todos los trabajos citados en este epígrafe, deben sin embargo considerarse únicamente como una aproximación a los problemas reales, ya que todas las expresiones expuestas se han derivado a partir de hipótesis que han simplificado considerablemente el problema real. Así, mientras que todos coinciden en suponer un comportamiento elástico del material, Paine, Holmes y Clark suponen, además, que la superposición de las ondas de esfuerzo, en el punto medio de la línea de unión entre barrenos, como la causa mayor en la formación de las fracturas y, asimismo, consideran en sus cálculos la resistencia estática a la compresión y a la tracción, en tanto que en los problemas reales debe considerarse la dinámica la cual, como indican Grine y Fowles (Ref. 8), puede ser 10-12 veces mayor que la estática.

Por su parte, Mathias presupone que el esfuerzo tangencial de las ondas cilíndricas es proporcional a los esfuerzos radiales, lo que únicamente es correcto a distancias considerables y no en la zona inmediata al barreno.

Kutter, por el contrario, aunque su modelo es más completo obtiene, sin embargo, las expresiones citadas para los casos particulares de $\beta = 0,23$ y $0,32$ y, asimismo, relación de la $\frac{\sigma_C}{\sigma_T}$ (dinámicas) = $\frac{16}{1}$

3.5.- CONSIDERACIONES PRACTICAS

Resulta conveniente exponer algunas respecto al método a seguir desde un punto de vista práctico, con el objetivo de alcanzar una metodología de diseño apropiada en esta técnica - del precorte. Naturalmente, un primer paso es identificar las variables más importantes que entran en juego en el proceso. De este modo se podrá determinar que valores deben definirse para un diseño adecuado, de forma que los parámetros que se consideren en el mismo, abarquen la mayor parte de los efectos que ejercen las variables de mayor influencia. Tales variables podemos clasificarlas en las que podríamos llamar:

- (i) variables ambientales
- (ii) variables físicas

Las primeras son aquellas que en cierto modo, si bien no son incontrolables, sí necesitan de un estudio exhaustivo y a la vez muy complejo para su análisis, lo que hace que muchas de ellas, en la práctica apenas se consideren. Estas variables son el tipo de roca, su resistencia, su estructura, su estado tensional, etc., y que dan lugar a fenómenos de disipación, de atenuación, de variación de tensiones, etc., de suma complejidad en su estudio.

Por el contrario, las segundas, son aquellas sobre las que podemos actuar de un modo más directo y, por tanto, forman la base sobre la que hemos de movernos en aplicaciones prácticas. Esas variables son las que se derivan de las características del explosivo y de la metodología empleada.

Así pues, cuando no tengamos un estudio que nos defina

alguna de las variables ambientales sobre las que basar un análisis previo (ver epígrafe 3.4) que nos proporcione unos valores aproximados de los parámetros a emplear en el proyecto, resulta adecuado, en cualquier caso, realizar una serie de ensayos previos a la ejecución del mismo que nos definan los parámetros óptimos a aplicar con las condiciones reales encontradas "in situ".

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Aso, k.: Pehenomena Involved in Presplitting by blasting.
Ph. D. Thesis 66-1. Departament of Mineral Engineering. -
Stanford University, 1966, 177 p.

- 2.- Brown, C.C. and Bigando, J.: Presplitting and Smooth-Wall
Blasting in La Cananea Pit. Mining Engineers, September -
1972, pp. 50-52.

- 3.- Culver, R.: Discussion following the papers on Rock Blas-
ting, Failure and Breakage of Rock. Eighth Symposium on
Rock Mechanics, A.I.M.E., New York, 1967, pp. 549-550.

- 4.- Dannemberg, J.: Tight Presplit Blasting Leaves Clean -
Breaks in Schist. Road and Streets, August 1965, pp. 52 -
55, 58

- 5.- Devine, J.F., et al.: Vibration Levels Transmitted Across
a Presplit Fracture Plane. U.S. Bureau of Mines R.I. 6695,
1965, 29 p.

- 6.- Duvall, W.I. and Petkof, B.: Spherical Propagation of Ex-
plosion - Generated Strain Pulses in Rock. U.S. Bur of Mi-
nes .RI. 5483, 21 p.

- 7.- Duvall, W.I., et al.: Propagation of Peak Strain and Strain Energy in Explosion Generated Strain Pulses in Rock. Quarterly of the Colo. Sch. of Mines, vol. 54, no. 3, July 1959
-
- 8.- Grine, D.R. and Fowles, G.R.: The Attenuation of Shock Waves in Solid Materials with Seismic Applications. Quat. of the Col. Sch. of Mines, vol. 54 no. 3, July 1959.
-
- 9.- Holman, R.C.: Presplitting in Tunnels. Mining and Minerals Engineering, June 1967, pp. 224-228.
-
- 10.-Echiro Ito et al.: Rock Breakage by Smooth Blasting. 2nd - Int. Rock Mech. Congress. I.S.R.M. vol. 3, 5-6, Belgrado, 1970.
-
- 11.- Kutter, H.K.: The Interaction between Stress Wave and - Gas Pressure in the Fracture Process of an Undergound Explosion in Rock, with Particular Application to Presplitting. Ph. D. Thesis, University of Minnesota, Minneapolis 1967, 234 p.
-
- 12.-Langefors, U. and Kihlstrom, B.: Técnica Moderna de Voladura de Rocas. Ed. Urmo, 1968.
-
- 13.-Leighton, F.W.: A Design Method for Presplit Blasting. - MSc. Thesis. Col. Sch. of Mines, 1968, 28 p.
-
- 14.-Mathias, A.J.: Presplit Blasting. M Sc. Thesis. Col. Sch. of Mines, 1965, 173 p.
-

- 15.-Nicholls, H.R. and Duvall, W. I.: Presplitting Rock in the Presence of a Static Stress Field. U.S. Bureau of Mines R. I. 6842, 1966, 19 p.
-
- 16.-Obert, L.: Latest Developments in the Bureau of Mines Research Related to Damage Criterion, Presplitting and Short Delay Blasting, U.S. Bureau of Mines.
-
- 17.-Paine, R.S., Holmes, D.K. and Clark, H.E.: Presplit Blasting at the Niagara Power Project. The Explosives Engineer, May-June 1961, pp. 72-92.
-
- 18.-Smith, A.K. and Barnett, R.M.: Smoothwall Blasting Shows Promise at Climax. Mining Engineering, July 1965, pp. 162-162.
-
- 19.-Stenhouse, D.: Some Applications of the Presplitting Technique in Rock Blasting. Mining and Minerals Engineering, December 1967, pp. 453-464.
-
- 20.-Teller, A.E.: Presplitting Bonuses Optimize Blasting. Rock Products, August, 1972, pp. 58-59-89.
-
- 21.-Tincelin, E. and Weber, P.: Avancement avec Préécoupage dans le Tunnels et Galeries Sour fort Recouvrement. Proc. of the 2nd Congress of the Int. Soc. for Rock Mech. vol. 3, 5-11, Belgrado, 1970.
-
- 22.-Zenoble, R.: Controlled Blasting Near Nuclear Reactor. Civil Engineering - ASCE. January 1968, pp. 68-73.
-

23.-Weber, P. and Esteve, B.: Calcul de la Propagation d'une
onde de contrainte 'a Symétrie Sphérique ou Cylindrique -
L' Industrie Minerale. Número Special, 15 Novembre 1971.

CAPITULO IV

CAMPAÑA EXPERIMENTAL

1.- INTRODUCCION

El objetivo de esta campaña experimental es, por un lado, y en cuanto a lo que al problema de vibraciones se refiere, la elaboración de una sistemática para la ejecución de una campaña vistrográficay, paralelamente, poner a punto una instrumentación con directrices para su manejo. Por otro, y en lo concerniente con la técnica del precorte, intentar establecer una metodología racional que permita diseñar esquemas de precorte adecuados, tanto en labores a cielo abierto como en subterráneas.

Dicha campaña que - con un consumo total de 8.550 kg de explosivo, ejecución de 302 m² de precorte a cielo abierto y 215 m² galería, 101 m.l. de sondeos, toma de bloques, 150 medidas de vibraciones y ensayos de laboratorio - pudiera parecer en principio suficiente, resulta poco significante si tenemos en cuenta el elevado número de variables que entran en juego en los problemas analizados. Por ello se ha intentado - estudiar sólamente un grupo muy reducido de las mismas - en nuestra opinión las más importantes -. En efecto, y a pesar de las limitaciones impuestas por los objetivos del proyecto, se ha analizado la influencia ejercida por factores diversos sobre el nivel de vibración producido por una voladura, así - como en la forma más adecuada de obtener un precorte satisfactorio.

Finalmente, debemos exponer nuestro agradecimiento a las Minas de Linares de la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A. (ENADIMSA) y a la Empresa Criaderos Minerales y Derivados, S.A. (CRIMIDES), que han hecho posible que esta campaña se haya podido llevar a cabo, al permitirnos operar en sus explotaciones mineras, -Linares- y Mina de Cerezo de Río Tirón respectivamente, en las que se ha realizado prácticamente toda la campaña experimental. Asimismo, no podemos olvidar la colaboración prestada por las compañías CAVOSA y DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES. S.A., que nos permitieron realizar medidas de vibraciones; la primera de ellas, de la voladura de la demolición de un edificio en Móstoles y, la segunda, de una voladura dada en una cantera que dicha entidad posee en Arganda.

2.- BREVE DESCRIPCION DE LAS EXPLOTACIONES MINERAS EN LAS QUE SE REALIZO LA CAMPAÑA

Exponemos a continuación un breve comentario acerca de las características de las explotaciones mineras de Minas de Linares y Mina de Cerezo de Río Tirón.

Minas de Linares. El conjunto de explotaciones mineras, propiedad de ENADIMSA, está integrado por los pozos de San Juan, Esmeralda, Uno y Tres. Todas ellas, explotaciones subterráneas que se encuentran ubicadas en el distrito minero de Linares y que se dedican a la explotación de galena.

El substrato de la zona constituyen rocas paleozoicas, recubiertas en amplias zonas por sedimentos más jóvenes. Ambos conjuntos, zócalo paleozoico en que se arman las mineralizaciones y recubrimiento poshercíniano difieren mucho en su composición, estructura y, naturalmente, en importancia minera.

Las rocas más notables de este zócalo paleozoico metalífero son:

Rocas de metamorfismo regional.

Muestran colores pardo-grisáceos con tintes ocasionalmente azulados o verdosos en las que destacan fundamentalmente areniscas y grauwackas: pizarras arcillosas que se com

ponen principalmente de cuarzo, cloritas y sericita y algo de grafito; rocas areniscosas, grauwackas y areniscas que presentan textura clástica con granulometrías heterogéneas y acusada tendencia esquistosa.

Rocas hipogénicas

Granitos.- Comúnmente de color gris; están integrados por elementos de análogo tamaño cercanos en general al centro, cerca del contacto periférico son frecuentes los cambios de este granito normal a variedades rosado pegmatítico o a otras de grano fino.

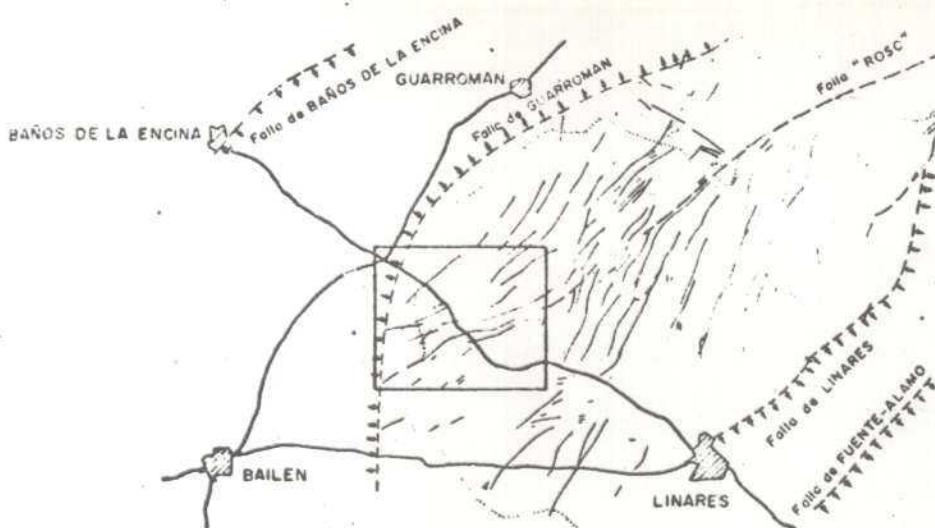
Diques porfídicos.- Encajados en el granito. En las pizarras próximas a su contacto también existen intrusiones tabulares de carácter básico.

Rocas metamorfismo de contacto

Existen en la periferia de las rocas hipogénicas, como consecuencia de las complejas interacciones entre las unidades preexistente y las intrusivas. Las transformaciones experimentadas por las diversas rocas dependen de su proximidad al granito y de su composición particular. Corneanas y pizarras mosqueadas fundamentalmente.

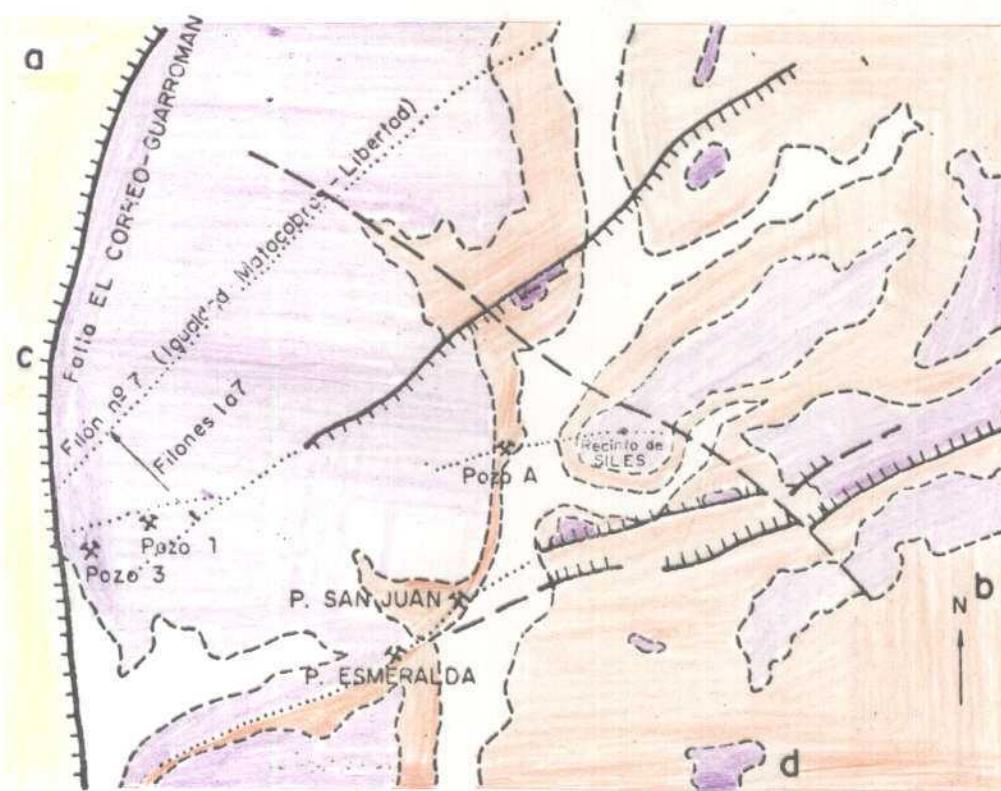
Las estructuras téctónicas mineralizadas del distrito de Linares pueden subdividirse, desde el punto de vista de la dirección de sus fracturas más distendidas, en varias unidades tectónicas, perfectamente diferenciadas y que pueden apreciarse claramente en la Fig. 4.1., en la que puede observarse, además, la localización de cada una de las explotaciones mencionadas.

Fig. 4.1



SITUACIÓN DE LAS MINAS
DE ENADIMSA EN EL
DISTRITO FILONIANO
DE LINARES.

ESCALA 1:200.000



FONDO GEOLOGICO,
MINERALIZACIONES
Y POZOS MAESTROS
DE
"MINAS DE LINARES"

ESCALA 1:32.000

LEYENDA



Mioceno



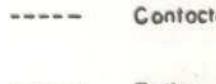
Trias



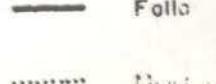
Pizarras



Granito



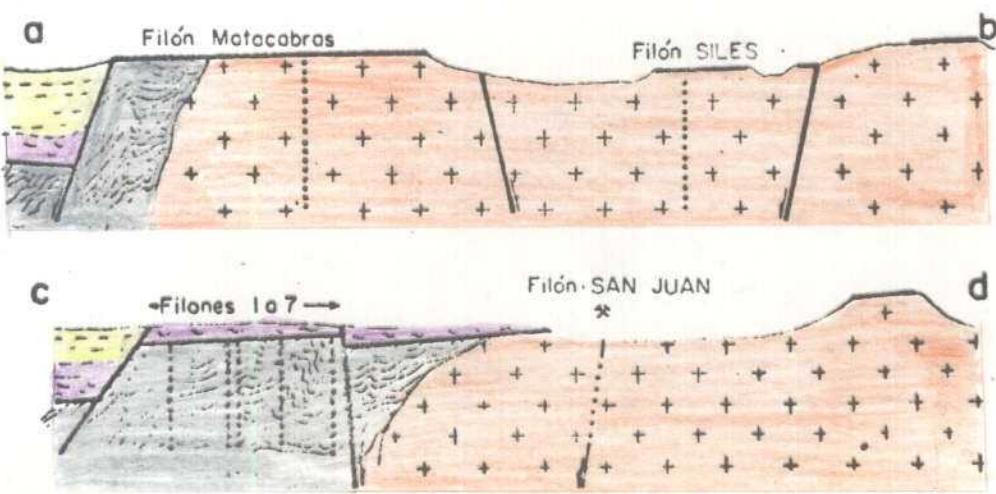
Contacto



Fallo



Recinto



El método de explotación en todas ellas es por cámaras de almacén (realces) sobre galería en filón y galería paralela deszafre, de la que parten los transversales o "traviesas" por los que se realiza el deszafre de los realces.

Mina de Cerezo de Río Tirón. - El conjunto de las explotaciones - a cielo abierto y subterráneas - que integran esta mina, que se encuentra ubicada en Cerezo del Río (Burgos), prácticamente ya en el límite con la provincia de Logroño, explotan la glauberita (sulfato sódico cálcico) formada en margas del Mioceno lacustre. El método de explotación tanto en el interior como en el exterior es por cámaras de dilución.

Son cuatro las capas principales de glauberita existentes, enumeradas en orden descendente, son de 3, 7, 8 y - metros. Actualmente se explotan las de 3 y 7 metros (a cielo abierto) y la de 8 metros (en interior), teniendo esta última de 60 a 70 cm. de intercalación de margas y anhidrita.

La montera tiene un espesor de aproximadamente 12 m. y está formada por una pequeña capa de tierra de labor (30 - 40 cm) y, el resto, por margas y yeso.

Entre la 1^a y 2^a capa hay de 6 a 8m., y de 8 a 10 m, entre la 2^a y 3^a y entre la 3^a y 4^a. En todas ellas, la separación entre capas de mineral son margas, yesos, anhidrita y pequeñas capas despreciables de mineral.

El mineral - la sal - es cristalino, de grano medio y muy compacto. Su color es grisáceo, si bien existe en la 2^a - capa unos 3 m. de color amarillento formados por cristales de glauberita embutidos en margas amarillentas que lo dan color

El yacimiento se dispone prácticamente horizontal y sin trastornos, y afloran en longitud variable de 1 km, a lo largo de los escapes del río Tirón. No obstante la falta de dislocación, se han podido apreciar grietas verticales y paralelas al escarpe del río, que se han producido en la montera del esteril y que no llegan al mineral, probablemente, debido al escarpe por un lado y a la vaguada por el otro, con disolución de los bordes de las capas, variando su volumen y provocando movimientos.

Asimismo, se pueden apreciar en las camaras de la explotación (exterior), fracturas o lisos de 70-90° de buzamiento y sensiblemente paralelas al escarpe del río; en general los labios permanecen perfectamente unidos y sin situación de continuidad aparente de los estratos de mineral, aunque en algunos casos se ha observado relleno en aquellas. Se desconoce su formación, aunque tal vez puedan ser la consecuencia de los movimientos de la base originados por la hidratación de la anhidrita.

3.- CAMPAÑA DE VIBRACIONES

3.1.- ASPECTOS GENERALES DE LA CAMPAÑA

Esta campaña se ha llevado a cabo fundamentalmente en Minas de Linares (voladuras en explotación subterránea) y Mina de Cerezo de Río Tirón (voladuras en explotación a cielo abierto). Asimismo se han tomado medidas de una de las voladuras dadas en una cantera de caliza (Arganda) y de la voladura para la demolición de un edificio (Móstoles).

El conjunto de esta campaña está integrada por 150 medidas, correspondiente a un rango de carga detonada instantáneamente que oscila entre 0,3 kg y 1.300 kg. Por otro lado, el número de barrenos detonados instantáneamente ha variado entre 1 y 156. El explosivo utilizado en estas voladuras ha sido, en general, goma, nagolita y amonita.

Para el análisis de los resultados de dicha campaña, y una vez visto el estudio teórico previamente realizado, se decidió considerar el criterio del U.S. Bureau of Mines como criterio de daños. Los resultados de las medidas de la campaña se dan en el anejo nº 4.

3.2.- EQUIPO EMPLEADO

El equipo base utilizado ha sido el "Vibracorder", fabri

cado por Nitro Consult (Suecia), cuyas características se exponen en el anejo nº 1 y que, esquemáticamente, citamos a continuación.

Este aparato consta de una unidad registradora, compuesta de cuatro canales, que permite la medida constante del valor máximo de la velocidad de partícula, o de la aceleración de una de las tres componentes - vertical, longitudinal o transversal - en cuatro puntos diferentes. Para ello, dispone de cuatro carretes con 100 m de longitud de cable. La unidad trabaja automáticamente y tiene las siguientes características:

Rango de velocidad: 0 - 100 min/seg. En casos especiales puede acoplarse para: 0-200 mm/seg

Rango de aceleración: 0-10 g. En casos especiales puede acoplarse para: 0-20 g.

Rango de frecuencias: 5-500 Hz

Energía: Eléctrica 220 v./50 Hz

Baterías

Asimismo se intentó utilizar un equipo sísmico fabricado por Electro-Tech. de Houston, Texas, compuesto de amplificadores, cables y oscilógrafo registrador, además de 12 geófonos verticalmente sensativos y con frecuencia de resonancia de 7 c.p.s. No se conocía la frecuencia de resonancia de los galvanómetros. La falta de adaptabilidad de dicho aparato hizo desistir de su utilización.

3.3.- MEDIDA DE LOS NIVELES DE VIBRACION PRODUCIDOS POR VOLADURAS SUPERFICIALES.

Esta parte de la campaña se realizó principalmente en la mina de Cerezo de Río Tirón (CRIMIDES), además de un par de medidas aisladas registradas en la cantera de Dragados (Arganda) y en la demolición del edificio de Móstoles ya mencionados.

Mina de Cerezo de Río Tirón. - Se llevaron a cabo los ensayos en una de las cámaras de la explotación a cielo abierto, dividiéndose en tres tipos de ensayos realizados asimismo en tres zonas diferentes de la cámara según puede apreciarse en la Fig. 4.2. Dicha clasificación es la siguiente:

A.- Voladuras en la zanja: medidas en la misma.

B.- Voladuras en la zanja: medidas en su entorno.

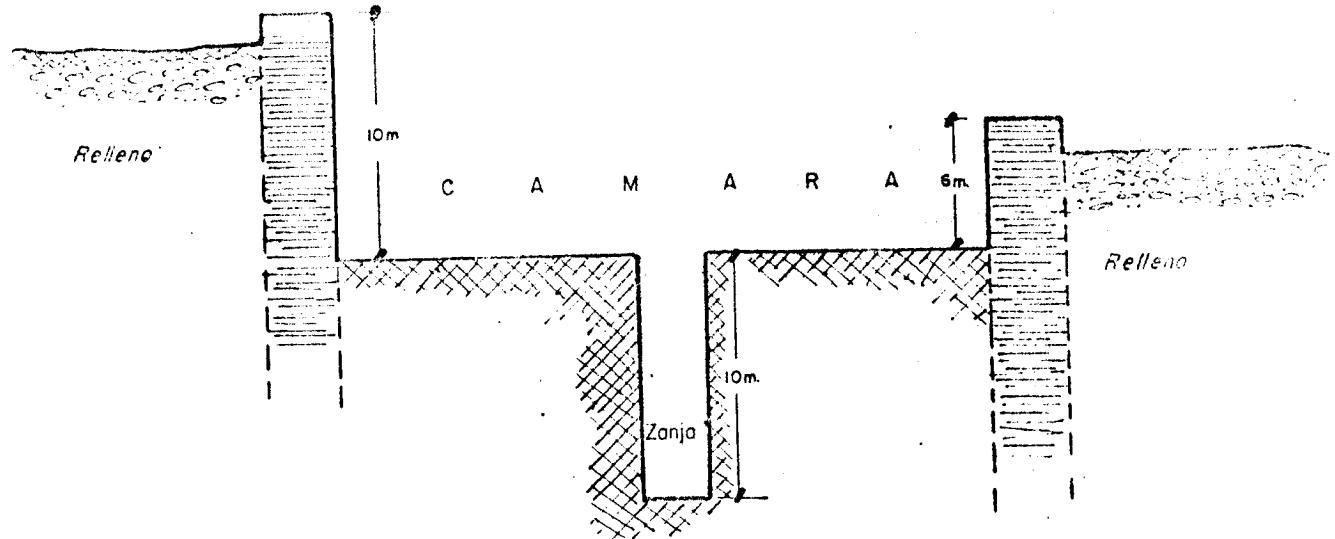
C.- Voladuras en la cámara. Se dividieron en:

(i).- Influencia del encendido.

(ii).- Influencia de la intercalación de un precorte entre la voladura y el punto de medida.

(iii).- Influencia de la intercalación de un doble precorte entre la voladura y el punto de medida.

Las características de cada uno de estos ensayos se exponen en los cuadros nºs 4.1 - 4.5 y las respectivas rectas que definen la ecuación de propagación en cada situación vienen representadas en las Figs. 4.3-4.17.



Croquis

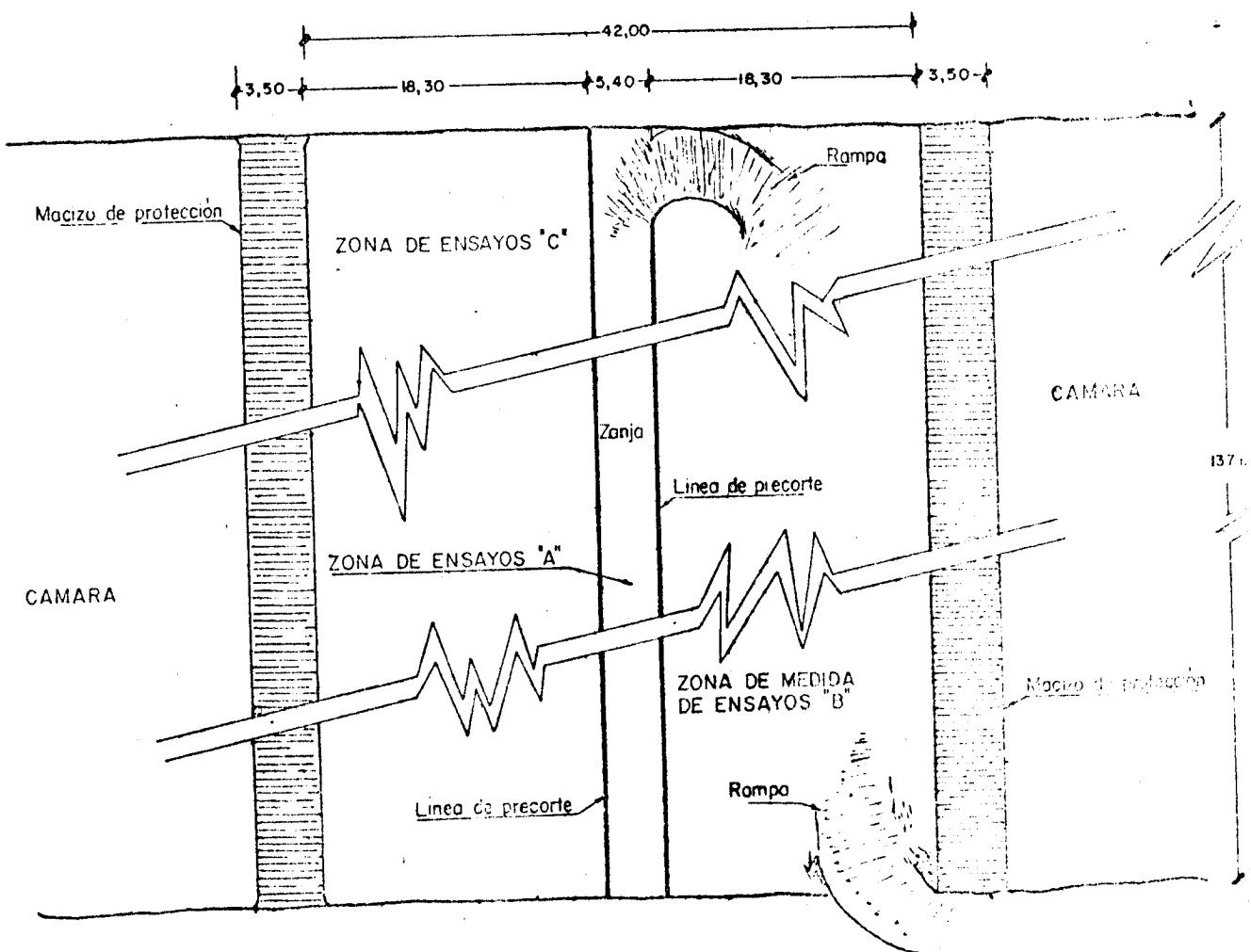


Fig.- 4.2
Situación de las zonas de ensayos. (Mina de Cerezo de Río Tirón)

En el análisis de estos resultados únicamente vamos a considerar el factor de distancia que corresponde al criterio de daños del U.S. Bureau of Mines, es decir para una velocidad de partícula de 50,8 mm/sg (\approx 2 pulg.), sin obtener, por tanto, las ecuaciones de propagación, por otra parte, fácilmente deducibles a partir de las rectas de las figuras, ya que con estudio comparativo de esos factores es suficiente.

Dicho factor de distancia lo hemos definido como el factor de distancia límite (F.D.L.) y, para cada ensayo y componente medida, es el siguiente:

Ensayos "A" (Figs. 4.3. - 4.5.)

F.D.L.
(m/kg 1/2)

Componente longitudinal (V_L) :	7
Componente vertical (V_V) :	6
Componente transversal (V_T) :	8

Asimismo se han representado en dichas figuras, la medida registrada en la zanja del nivel de vibración generado por una voladura separado de dicho punto de medida por material mas blando; suelo de labor y cámara rellena de mineral.

Ensayos "B" (Figs. 4.6. - 4.8.)

F.D.L.
(m/kg 1/2)

Componente longitudinal (V_L) :	4
Componente vertical (V_V) :	3,5
Componente transversal (V_T) :	4,5

CUADRO N° 41.- VOLADURAS EN LA ZANJA : MEDIDAS EN LA MISMA

FACTOR DE DISTANCIA F.D. ($m/kg^{1/2}$)	VALOR DE LAS COMPONENTES DE LA VELOCIDAD (mm/sg)		
	v_L	v_V	v_T
* 2,3	39	44	14
* 2,6	-	-	8
3,54	94	92	90
4,72	92	88	91
5,91	-	85	84
5,91	88	85	89
6,7	55	37	44
8,9	62	25	65
11,16	-	21	14
11,82	18	10	35
22,32	2	0	10

* Voladura realizada fuera de la zanja y separada del punto de medida por material más blando.

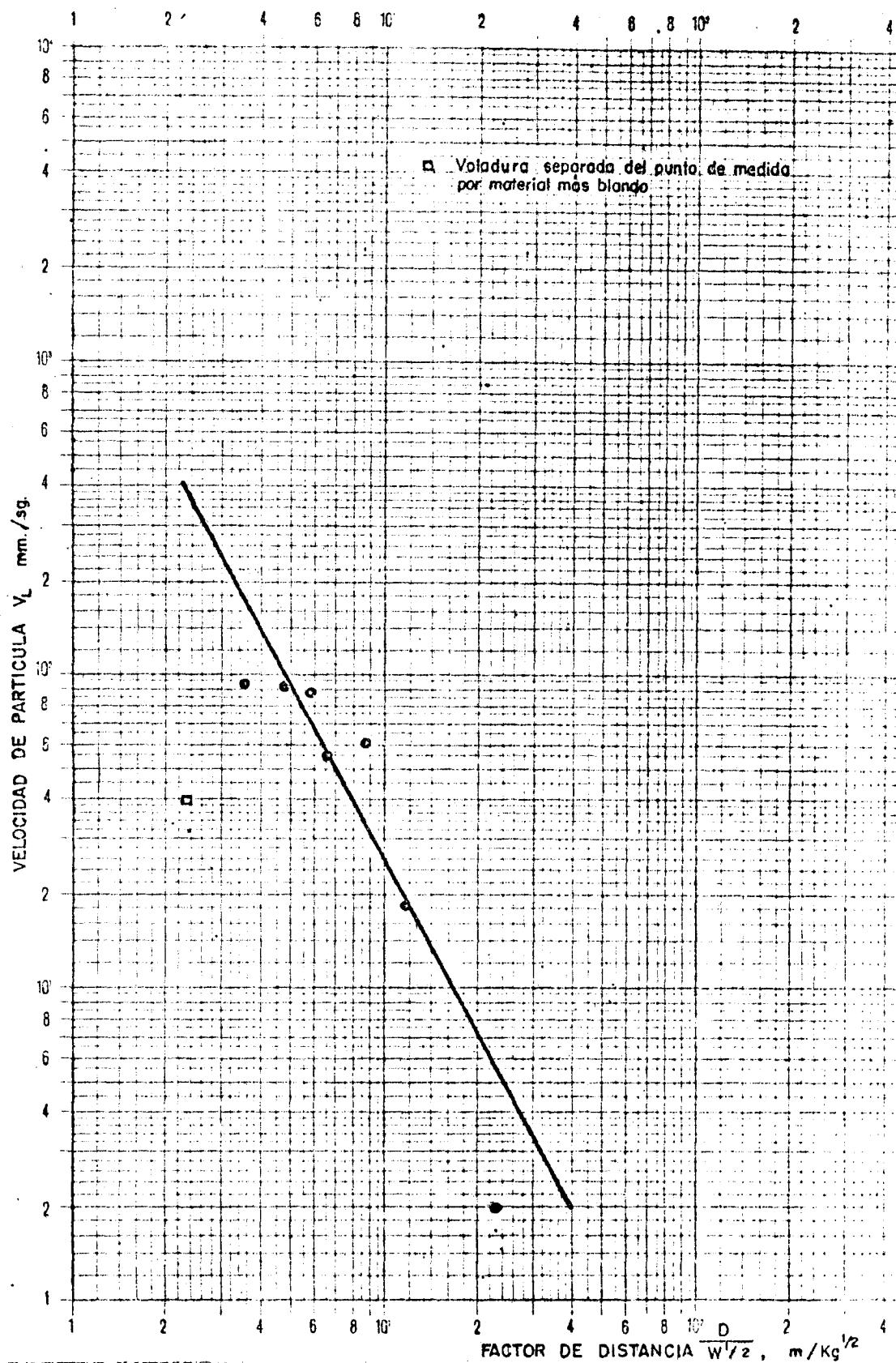


Fig.- 4.3

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente longitudinal
(Minas de Cerezo de Riotrón)

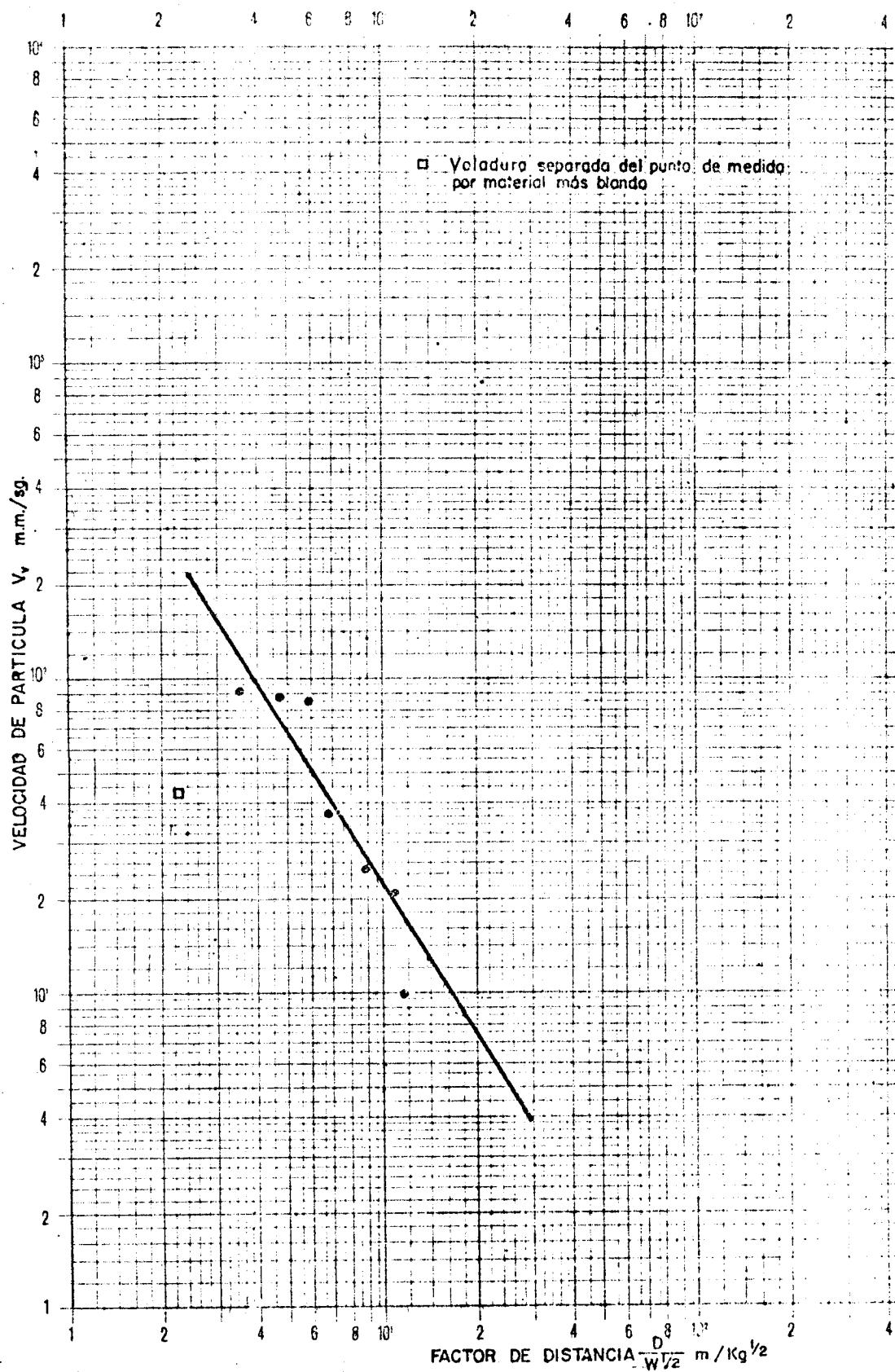


Fig.- 4.4
 Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente vertical
 (Minas de Cerezo de Riotirón)

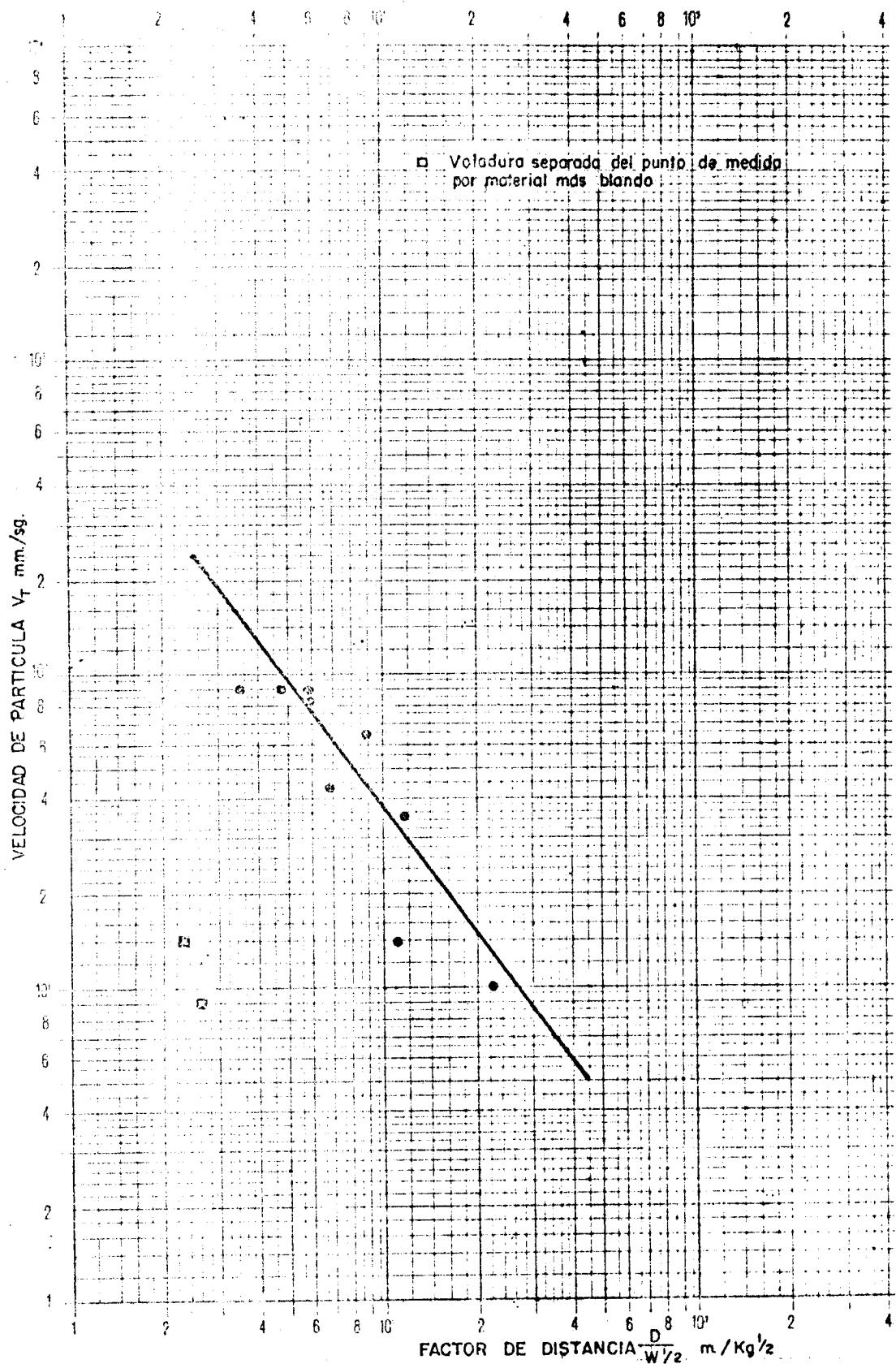


Fig.- 4.5
 Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente transversal
 (Minas de Cerezo de Riotirón)

CUADRO N° 4.2.- VOLADURAS EN LA ZANJA: MEDIDAS EN SU ENTORNO

FACTOR DE DISTANCIA F.D. (m/kg $1/2$)	VALOR DE LAS COMPONENTES DE LA VELOCIDAD (mm/s)		
	v_L	v_V	v_T
3,54	60	50	87
5,91	42	36	33
11,16	10	-	-
11,82	21	21	35
12,6	-	-	5
22,32	4	12	4
31,2	0	3	3

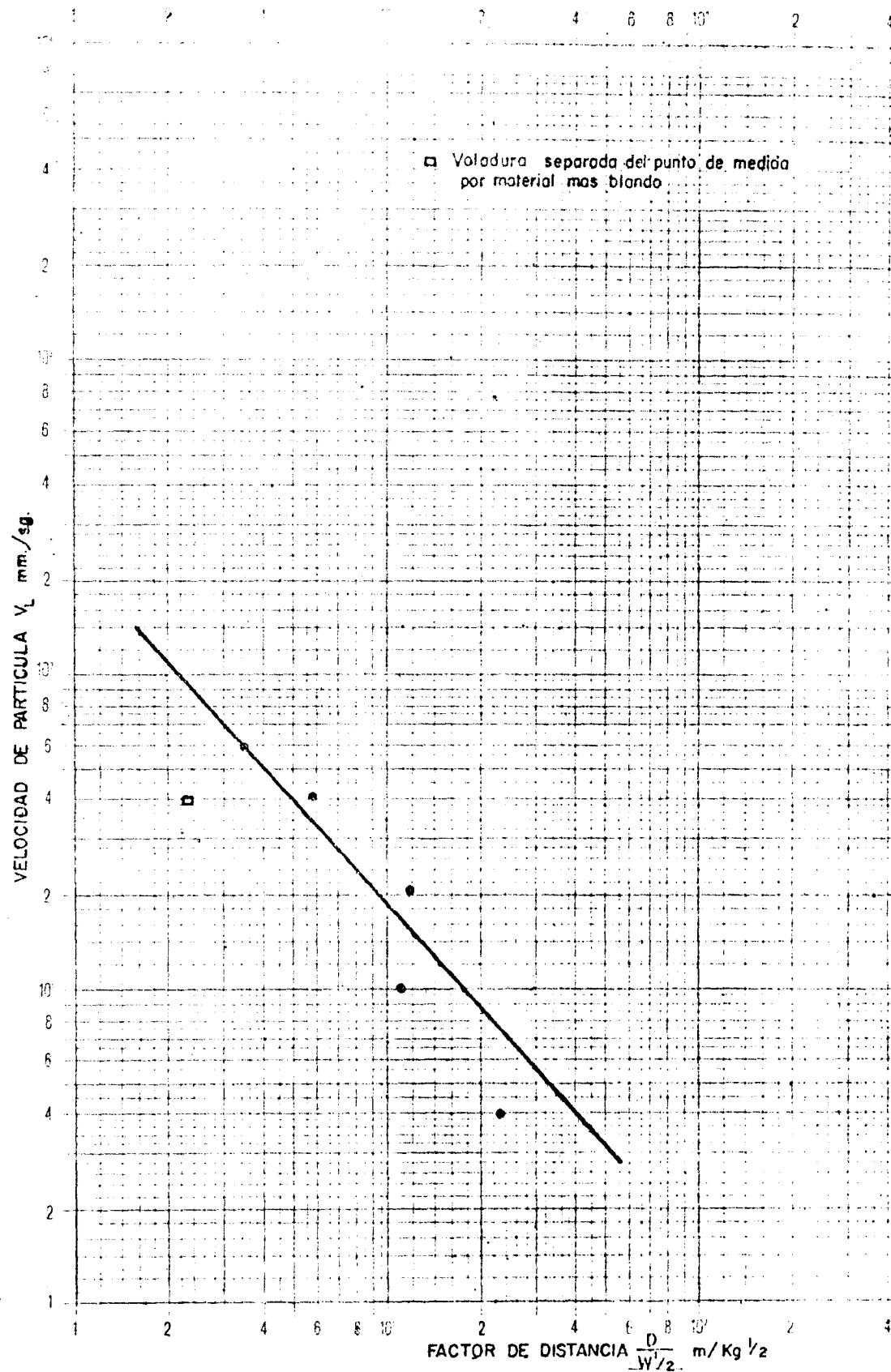


Fig.- 4.6

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente longitudinal
(Minas de Cerezo de Riotirón)

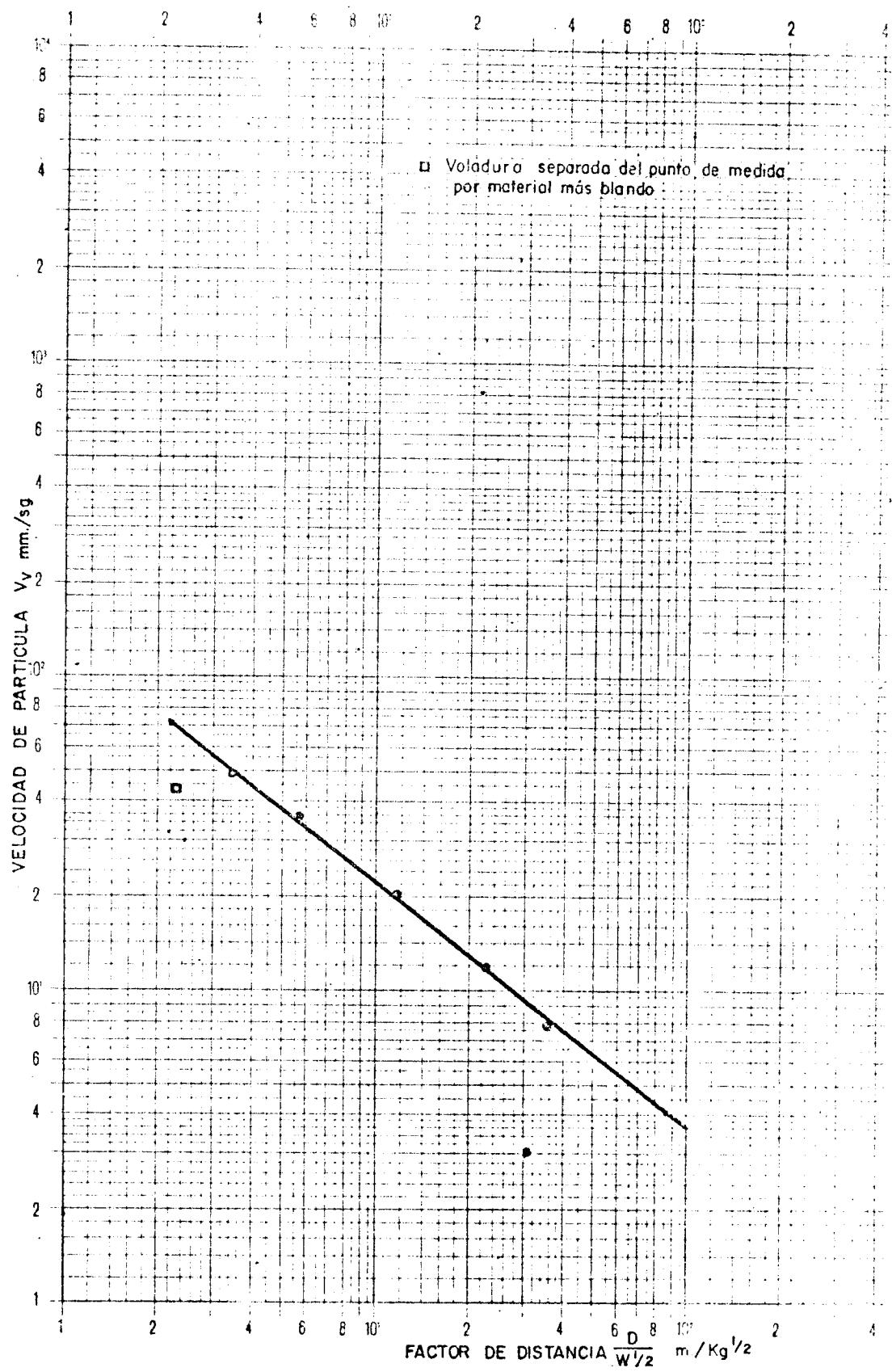


Fig -4.7

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente vertical
(Minas de Cerezo de Riotrón)

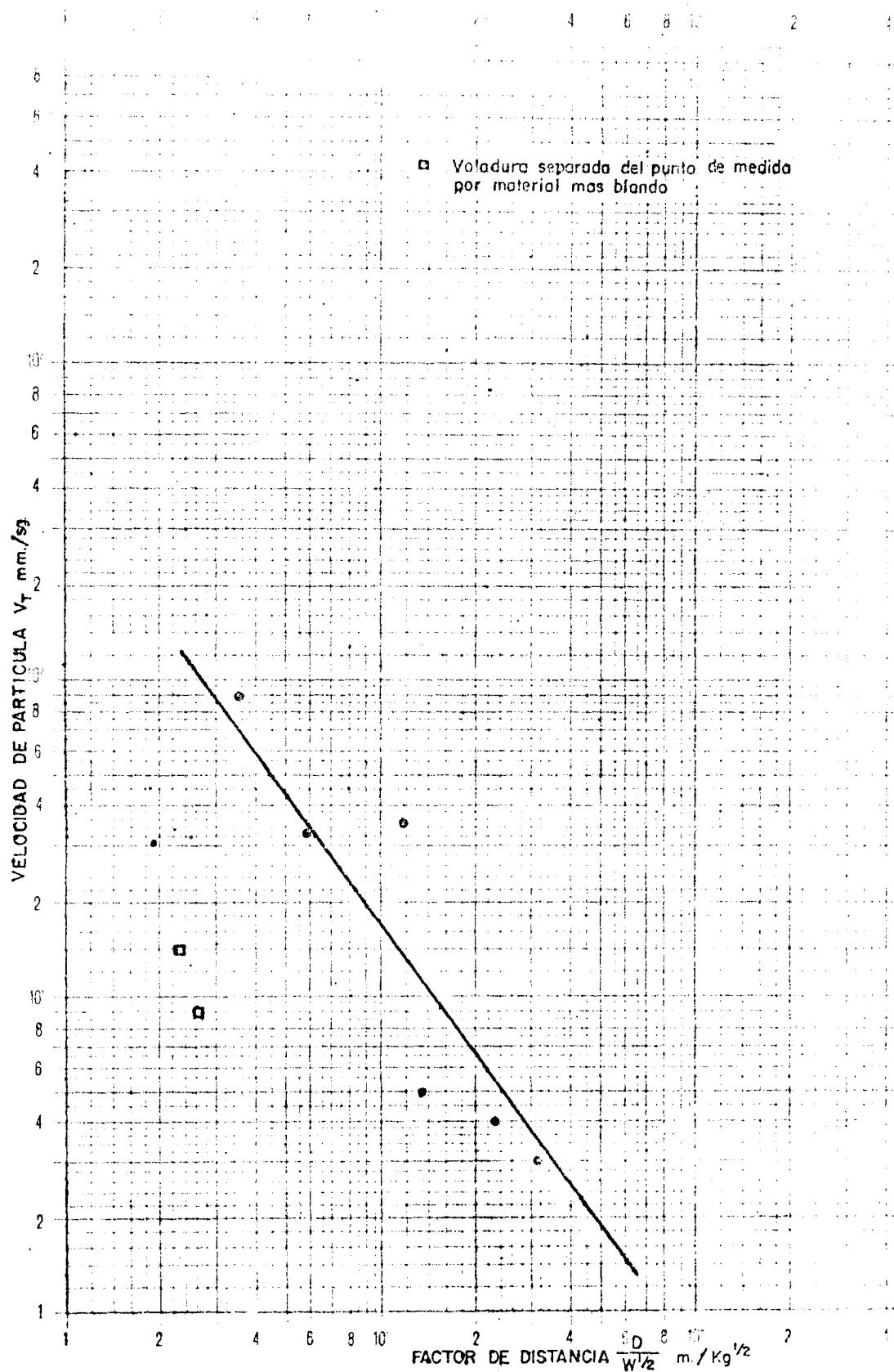


Fig.- 4.8

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente transversal
(Minas de Cerezo de Riotirón)

Ensayos "C" (Figs. 4.9 - 4.17)

(i) Influencia del encendido (Figs. 4.9 - 4.11)

		F.D.L	
		(m/kg 1/2)	
	Inst.	micro.	ret.
Componente longitudinal (v_L):	12,2	12,2	14
Componente vertical (v_V):	9,3	9,3	13
Componente transversal (v_T):	7,6	9,2	4,7

(ii) Influencia de la intercalación de un precorte (Figs. 4.11 - 4.14)

	F.D.L
	(m/kg 1/2)
Componente longitudinal (v_L):	3,8
Componente vertical (v_V):	5,0
Componente transversal (v_T):	3,1

Se han representado también en estas figuras las medidas tomadas con la intercalación de una fractura natural existente en el macizo rocoso. En dichas figuras, la recta de trazo continuo corresponde a la situación sin precorte, es decir, la recta que definiría la ecuación de propagación en el macizo rocoso.

(iii) Influencia de la intercalación de un doble precorte (Figs. 4.15 - 4.17)

CUADRO N° 4.3.- VOLADURAS EN LAS CAMARAS: DETONADORES INSTANTANEOS, MICRORRETADOS Y RETARDOS

FACTOR DE DISTANCIA F.D. (m/kg $^{1/2}$)	VALOR DE LAS COMPONENTES DE LA VELOCIDAD (mm/sg)								
	V _L			V _V			V _T		
	inst.	micro.	ret.	inst.	micro.	ret.	inst.	micro.	ret.
5,62	97	110	97	82,5	86	105	29	50	44
11,23	56	33;35	53	54	44;47,5	67	40	48;51	21
16,85	33	37;35	40;30	16	16	17	37	44;41	27
23,57	33	36;34	30;39	6	10,7	32;23	14	10;8	14;10

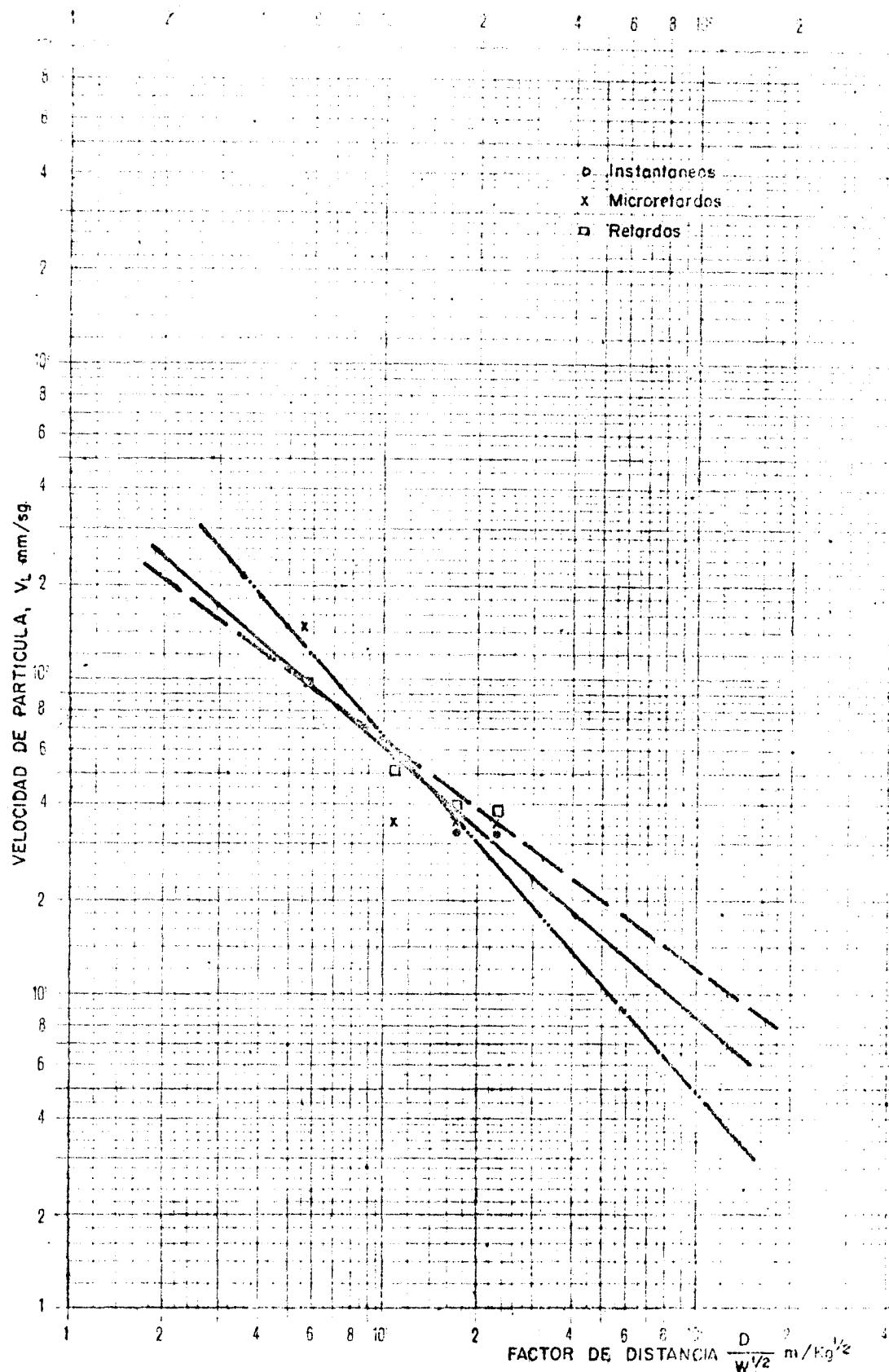


Fig.- 4.9

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente longitudinal
(Minas de Cerezo de Riotirón)

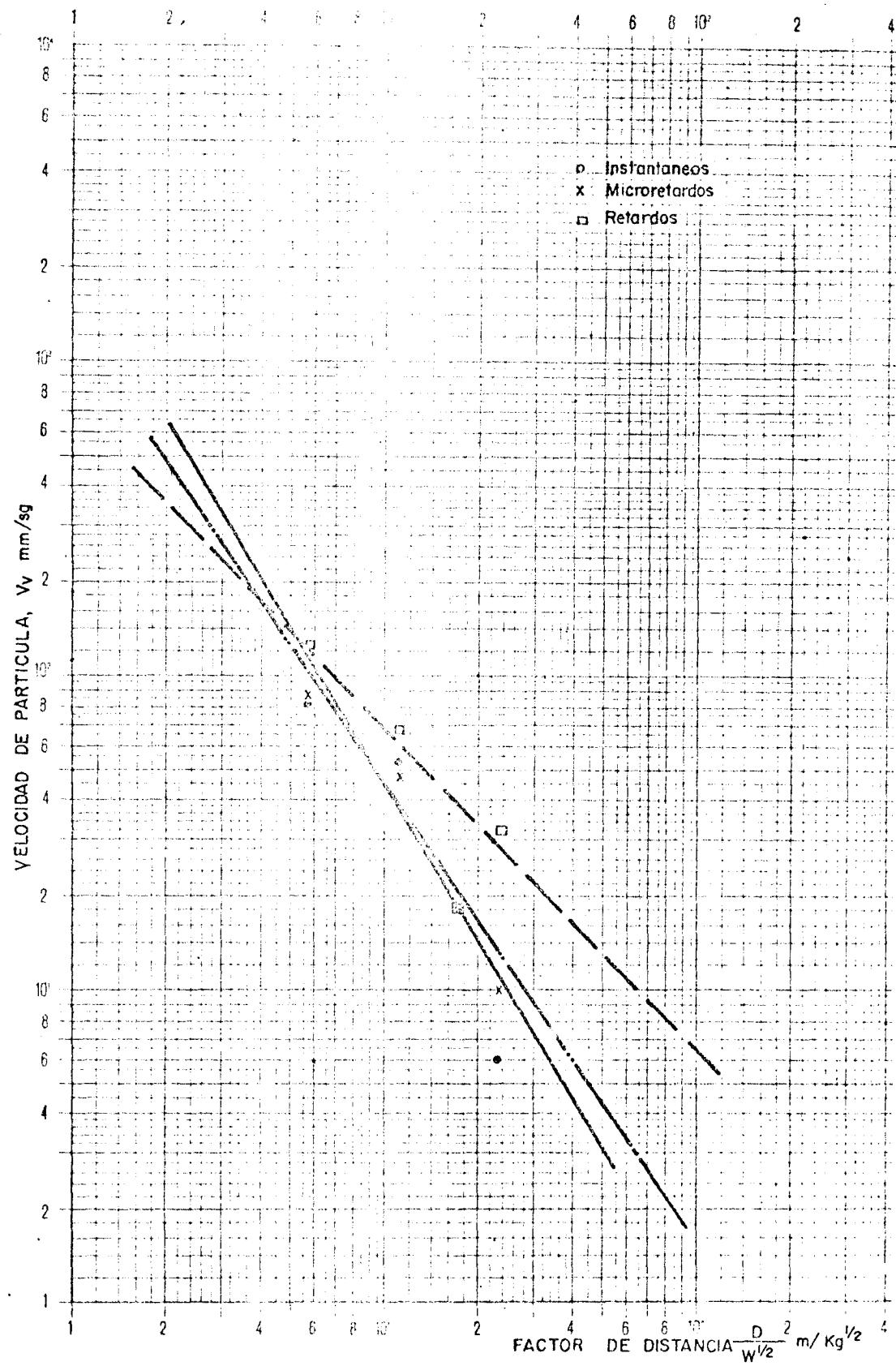


Fig.- 4.10

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente vertical
(Minas de Cerezo de Riotrón)

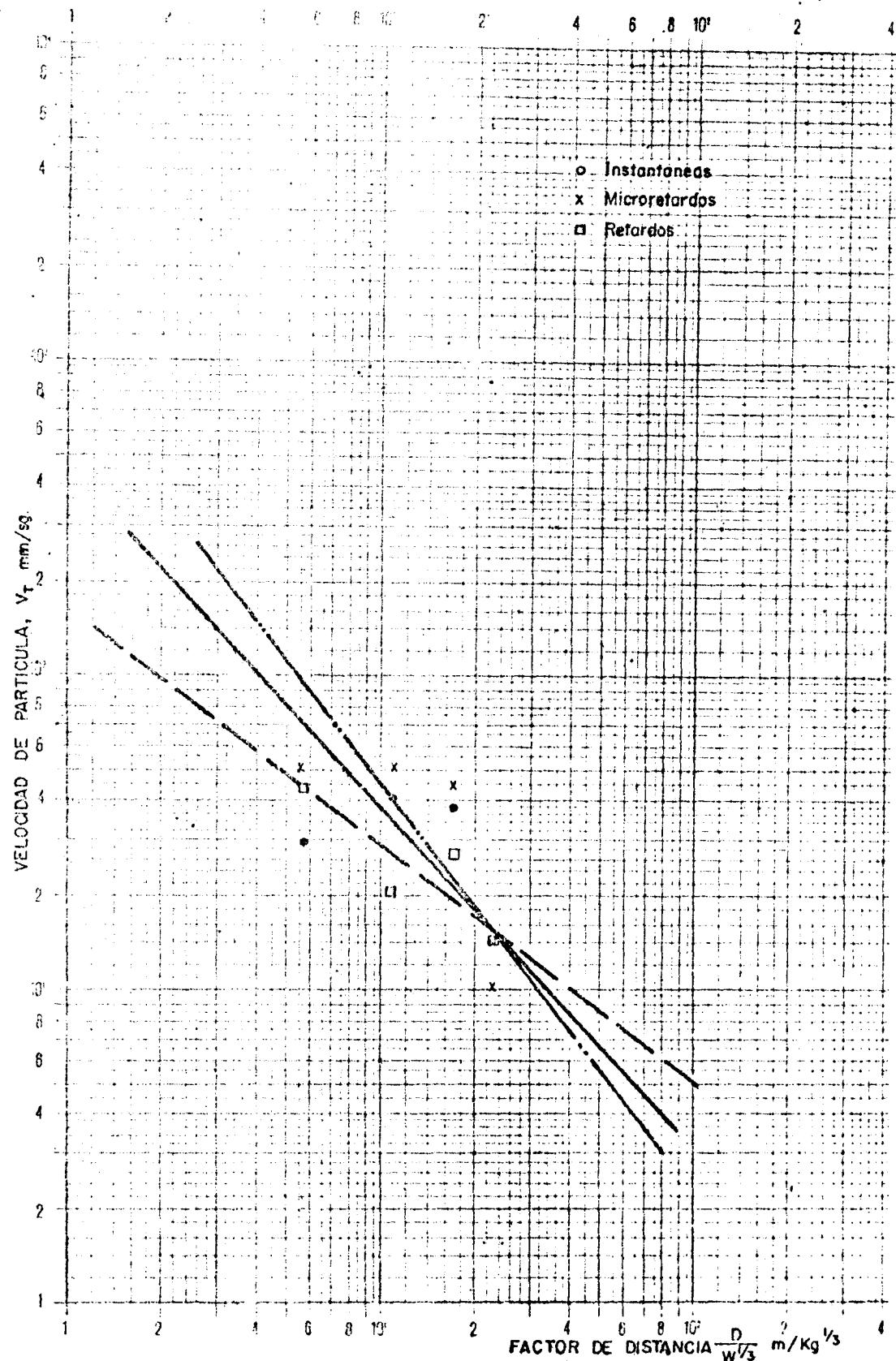


Fig.- 4.11

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente transversal
(Minas de Cerezo de Riotrón)

CUADRO N° 4.4.- VOLADURAS EN LAS CAMARAS: MEDIDAS CON LA INTERCALACION DE UN PRECORTE

FACTOR DE DISTANCIA F.D. (m/kg $^{1/2}$)	VALOR DE LAS COMPONENTES DE LA VELOCIDAD (mm/s)		
	v_L	v_V	v_T
* 2,66 (precorte)	112	105	101
3,75 (d.precorte)	74	105	39
* 4,63 (precorte)	101	-	-
5,62	10	5	10
11,23	16	15	10
16,85	15	18	10
23,57	9	3	33

* Medidas con intercalación de una fractura original del macizo rocoso.

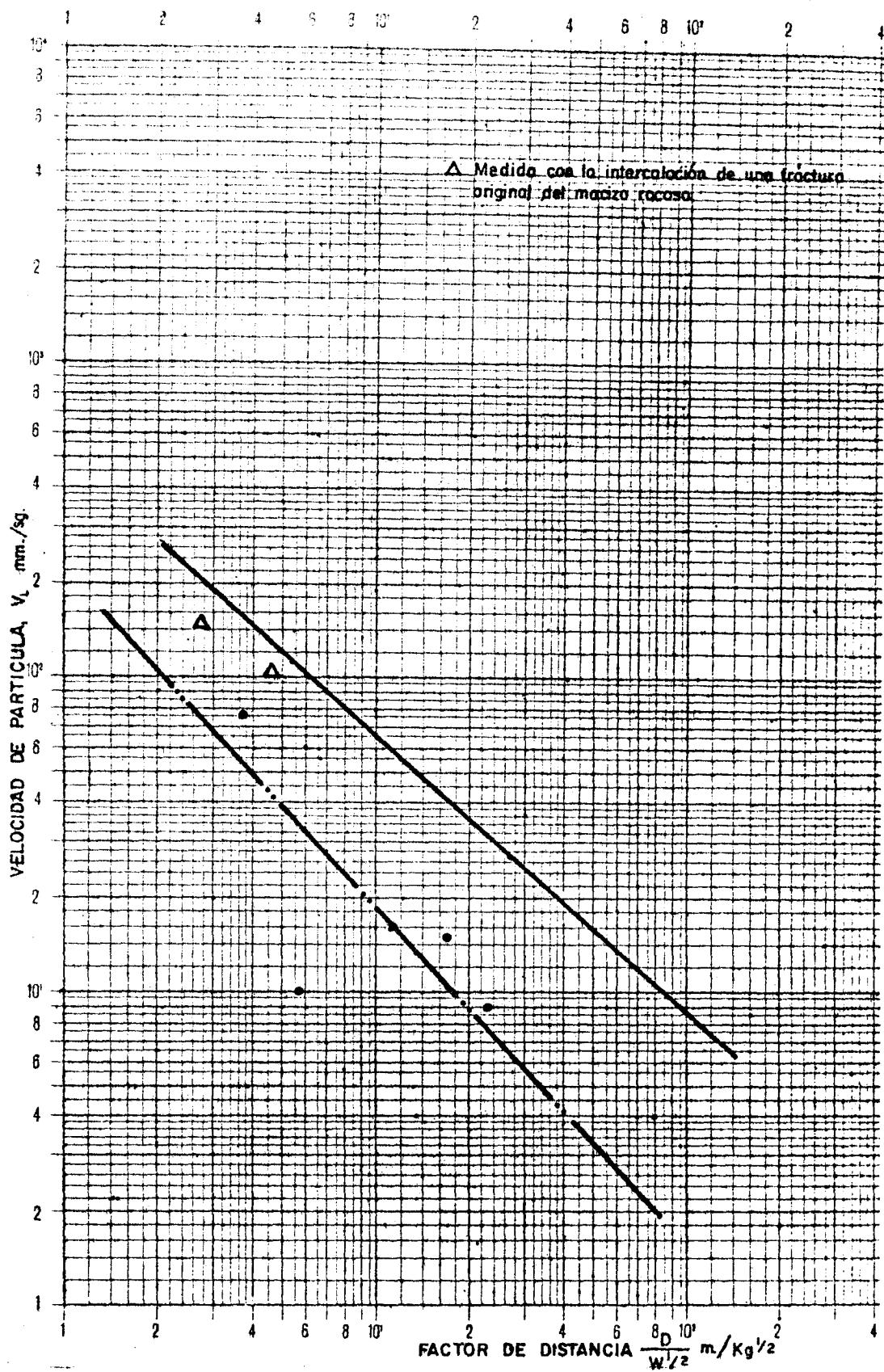


Fig.-4.12

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente longitudinal (Minas de Cerezo de Riotirón)

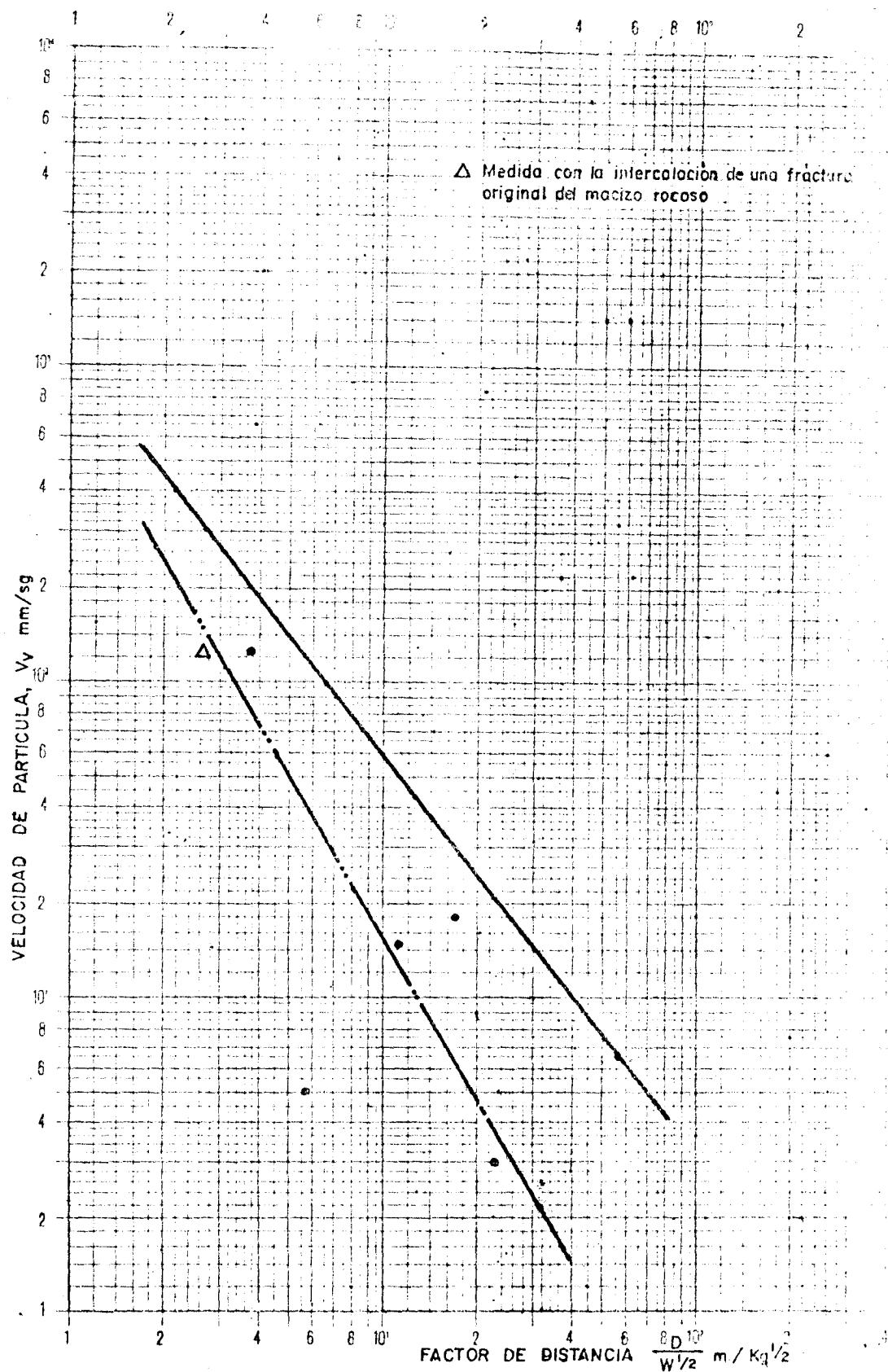


Fig.- 4.13

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente vertical
(Minas de Cerezo de Riotirón)

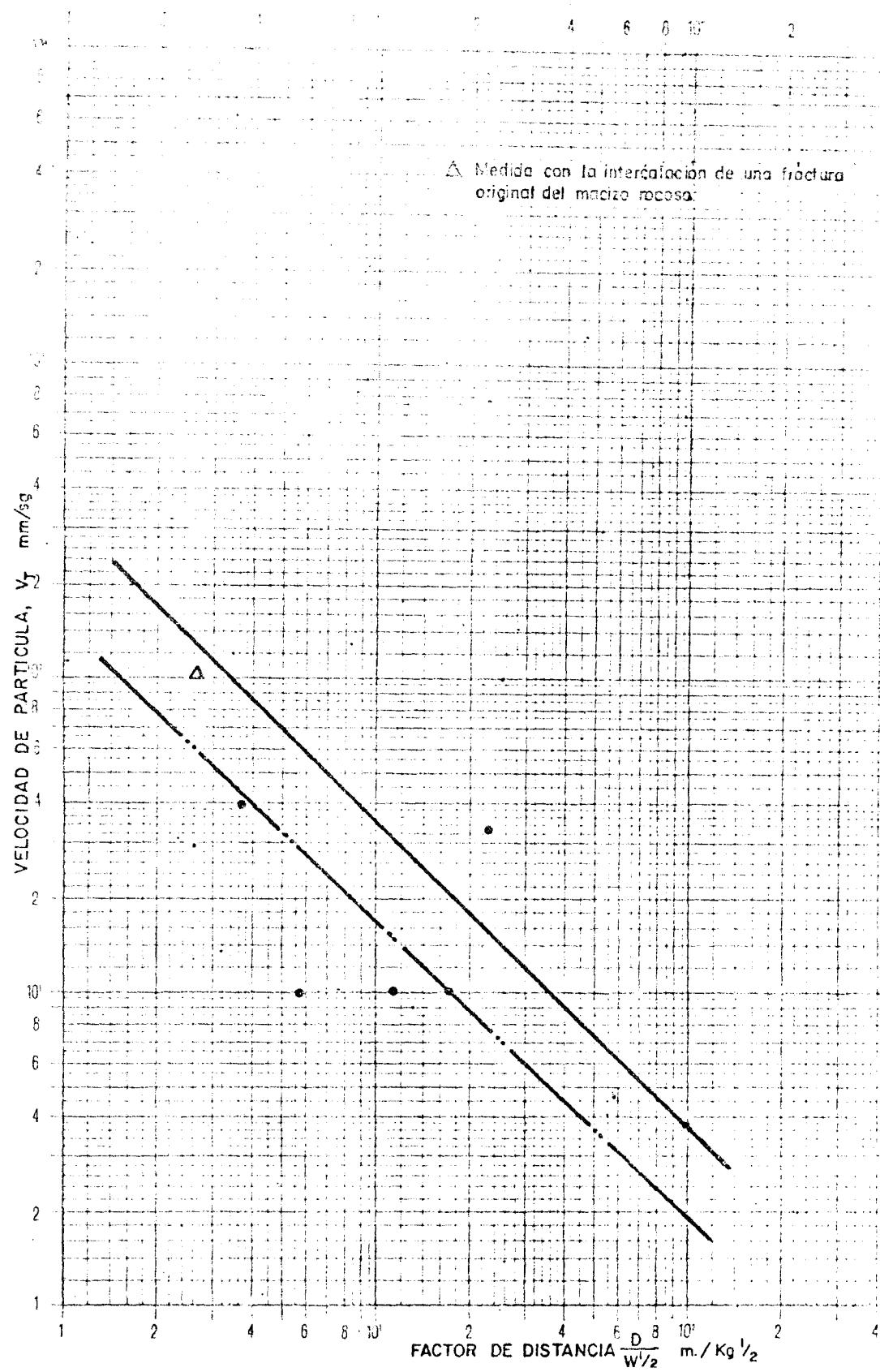


Fig.- 4.14

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente transversal
(Minas de Cerezo de Riotirón)

F.D.L.

(m/kg 1/2)

Componente longitudinal (v_L) : 3,3Componente vertical (v_v) : 3,3Componente transversal (v_T) : 2,3

Aunque el número de ensayos es escaso y los resultados obtenidos en algunos de ellos erráticos, podemos, no obstante, sacar de la observación de los mismos las siguientes conclusiones:

- De la contrastación de los resultados de los ensayos "A" y "B" se pone de manifiesto, que se reduce el nivel de la vibración cuando las ondas están obligadas a propagarse por el interior de la masa rocosa, antes de manifestarse o de dar lugar a las ondas superficiales. Además, puede observarse que dicha reducción será tanto mayor cuanto más capaz sea el material de absorber energía.
- La diferencia existente entre los resultados de los ensayos "A" y los (i) de los ensayos "C", realizados sobre el mismo tipo de material y dando valores superiores los últimos, puede atribuirse a que en los segundos se llevaran a cabo dentro de una zona de material sano comprendida entre dos "lisos", en tanto que, los primeros, se hicieron sin tener en cuenta tal consideración, con el fin de obtener un valor representativo de la situación real encontrada "in-situ", existiendo por tanto fracturas naturales o "lisos" entre la voladura y los puntos de medida y, consecuentemente, reducción del nivel de vibración según las conclu-

CUADRO N° 4.5. VOLADURAS EN LAS CAMARAS: MEDIDAS CON LA INTERCALACION DE UN DOBLE PRECORTE.

FACTOR DE DISTANCIA F.D. ($m/kg^{1/2}$)	VALOR DE LAS COMPONENTES DE LA VELOCIDAD (mm/s)		
	v_L	v_V	v_T
5,62	20	27	24
11,23	17	7	10
16,85	14	5	15
23,57	30	5	12

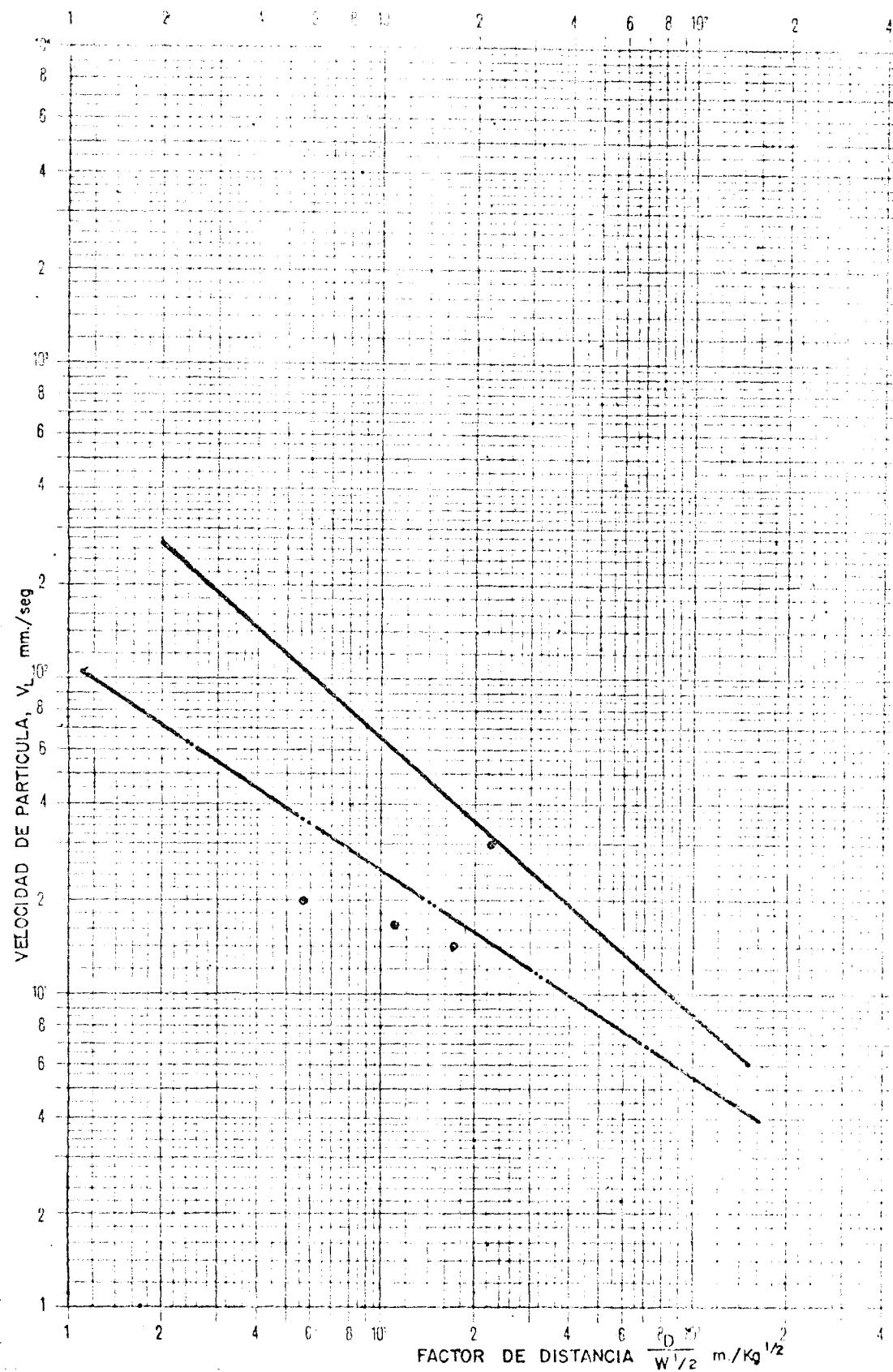


Fig- 4.15

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente longitudinal
(Minas de Cerezo de Riotrón)

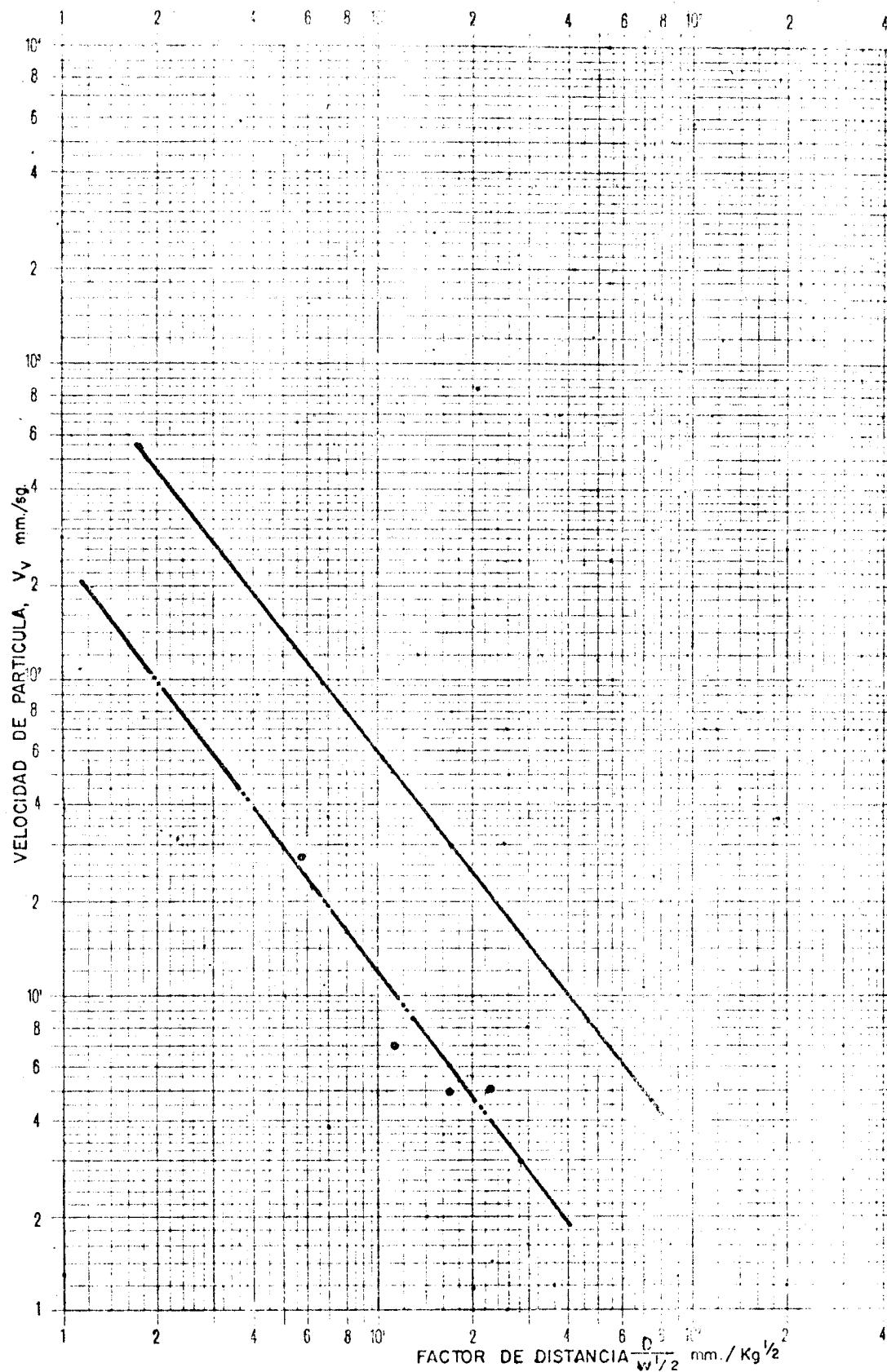


Fig.-4.16

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente vertical
(Minas de Cerezo de Riotirón)

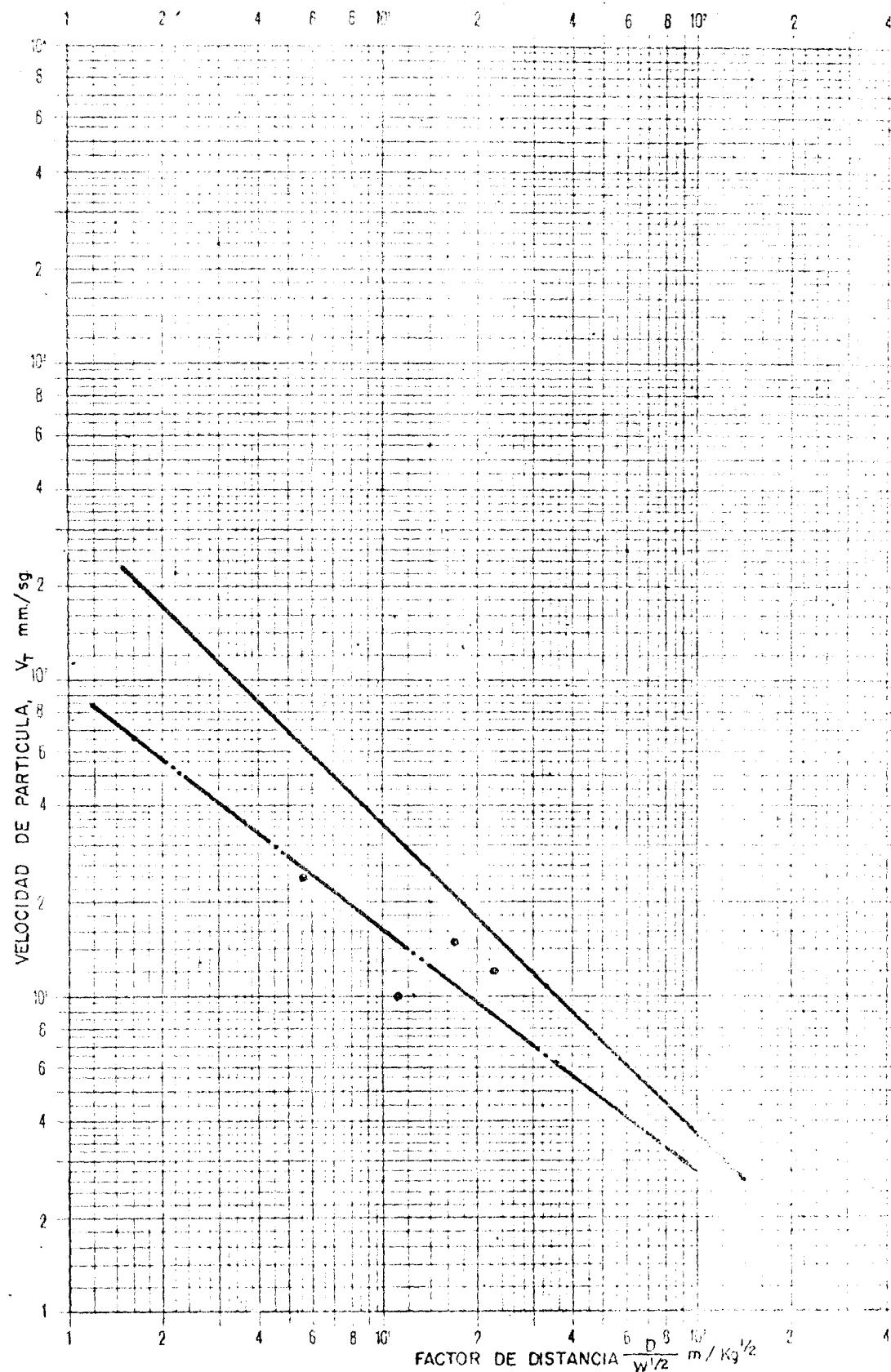


Fig.- 4.17

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente transversal
(Minas de Cerezo de Riotirón)

siones de los ensayos "C": (ii) y (iii)

- También ha podido observarse que en tanto que en los ensayos "A" y "B" el mayor factor de distancia corresponde a la componente transversal, en el caso de las resultados (i) de los ensayos "C" corresponde a la componente longitudinal. La única explicación posible a esta diferencia es la probable influencia ejercida por la zanja sobre cada una de las componentes medidas.
- La influencia ejercida por el tipo de iniciación - de tonación instantánea de una carga determinada, o, bien la misma carga detonada instantáneamente por intervalo de retardo con microrretardos o retardos- es prácticamente nula, observándose que no existe diferencia entre los ensayos realizados con detonadores instantáneos y los realizados con microrretardos, mientras que los realizados con retardos proporcionan valores del F.D.L. ligeramente superiores, excepto en el caso de la componente transversal, aunque estos últimos resultados han sido bastante erráticos.
- Resulta evidente, que los ensayos "C" -(ii).., que la intercalación de un precorte entre la voladura y el punto de medida reduce el nivel de la vibración. Asimismo, parece indicarse que la intercalación de una fractura natural reduce también dicho nivel, pero, dada la naturaleza de estas fracturas - fracturas de abertura prácticamente nulas- en mucho menor grado. - Ello hace suponer que el grado de reducción dependerá fundamentalmente de la naturaleza de esas fracturas : abiertas, cerradas, rellenas de otros materiales, naturaleza de éste, etc.

- Asimismo, la intercalación de un doble precorte- como era de esperar - reduce aún más el nivel de vibración, pero no en la medida que un precorte lo hace con respecto al nivel normal.
- Tanto en el caso de intercalación de un precorte como en el de intercalación de un doble precorte, las componentes más afectadas resultan ser la longitudinal y transversal.
- A la vista de los F.D.L. derivados de los ensayos "A" y "C"- (i) realizados, puede establecerse, como factor de distancia límite más desfavorable, un F.D.L.=10 m/kg $^{1/2}$ para la zona en estudio.

Finalmente, se tuvo la oportunidad de comprobar si con el F.D.L. establecido, podrían producirse daños, por una voladura de 12.000 kg. detonada en diez retardos de 1.200 kg de carga instantánea cada uno, sobre diversas estructuras situadas entre 400 y 450 m. de la voladura.

Con dicho F.D.L., y para 1.200 kg de carga instantánea, la distancia límite a la que deberían estar situadas las estructuras para que la posibilidad de daños sobre las mismas fuese mínima, sería:

$$D = 10 \text{ m/kg}^{1/2} \cdot \sqrt{1.200 \text{ kg}} \simeq 350 \text{ m.}$$

Así pues, las estructuras, según los parámetros definidos y el criterio considerado, se encontraban fuera de la zona potencial de daños. La voladura se efectuó y, observadas las estructuras aludidas, no pudo apreciarse ningún indicio

de daños sobre las mismas. Debemos decir, no obstante, que las condiciones naturales existentes jugaban de parte de los criterios técnicos, ya que entre las estructuras y la voladura se encontraban intercaladas tres cámaras de la explotación lo que, con toda seguridad, contribuyó a reducir el nivel de vibración generado por dicha voladura.

Otras medidas.— Se realizaron un par de medidas aisladas, una, del nivel de vibración producido por una voladura efectuada en una cantera de caliza en Arganda, la otra, del producido por la voladura efectuada para la demolición de un edificio de dos plantas en Móstoles. Las características de las mismas se expresan en el cuadro 4.6. Del mismo, puede apreciarse que en el segundo caso, demolición de Móstoles, aparecen dos factores de distancia; ello responde a que se han considerado dos distancias desde el punto de medida a la voladura: centro de la planta del edificio y contorno externo, más próximo a los geófonos.

La cantera de Arganda es una explotación de caliza la custre del Pontiense que muestra una disposición horizontal y una fracturación irregularmente distribuida. El talud era vertical y con un recubrimiento de arcillas rojas y tierra de la bor de escasa potencia. Los geófonos se colocaron en la plaza de la cantera. En la Fig. 4.18 se expone un esquema de la situación del ensayo en la cantera de Arganda y en la Fig 4.19, la representación gráfica de los resultados de dicho ensayo, en el que únicamente se midió la componente vertical. De dicha figura, y para el criterio que hemos adoptado, se deduce un F.D.L de $1,4 \text{ m/kg}^{1/2}$, valor extremadamente bajo, y del que resulta difícil dar una interpretación por las mismas limitaciones del ensayo.

CUADRO N° 4.6.- OTRAS MEDIDAS

FACTOR DE DISTANCIA F.D. (m/kg ^{1/2})	VALOR DE LAS COMPONENTES DE LA VELOCIDAD (mm/s)		
	V _L	V _V	V _T
Cantera de Dragados (Arganda)			
2,04	-	34	-
3,06	-	-	-
4,08	-	14	-
5,10	-	14	-
Demolición (Móstoles)			
14,1 (4,1)	-	14	40
16 (8)	-	6	20

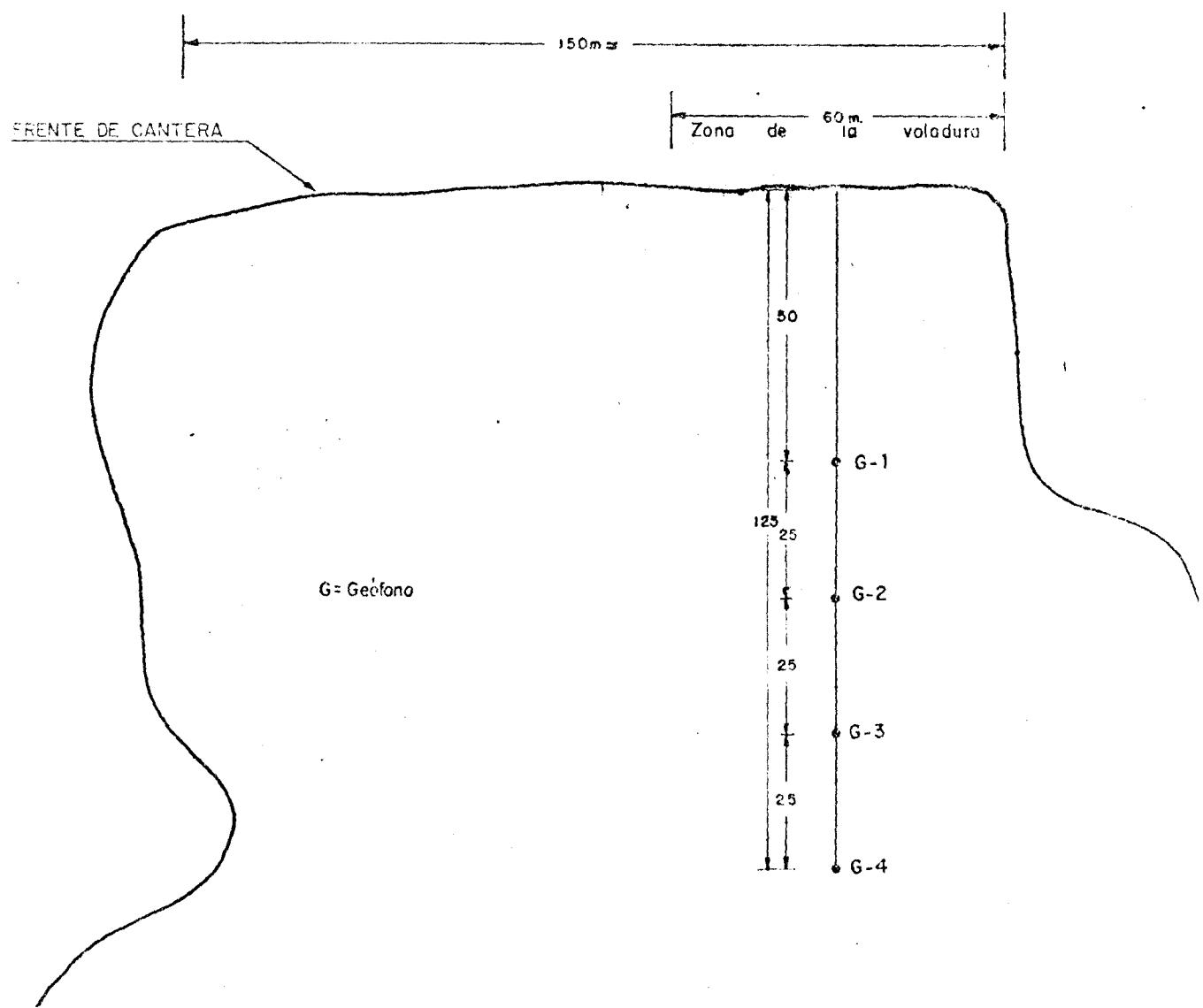


Fig.-4.18

Plano de situación de los geófonos. (Cantera de Dragados: Argando)

ESCALA: 1:1250

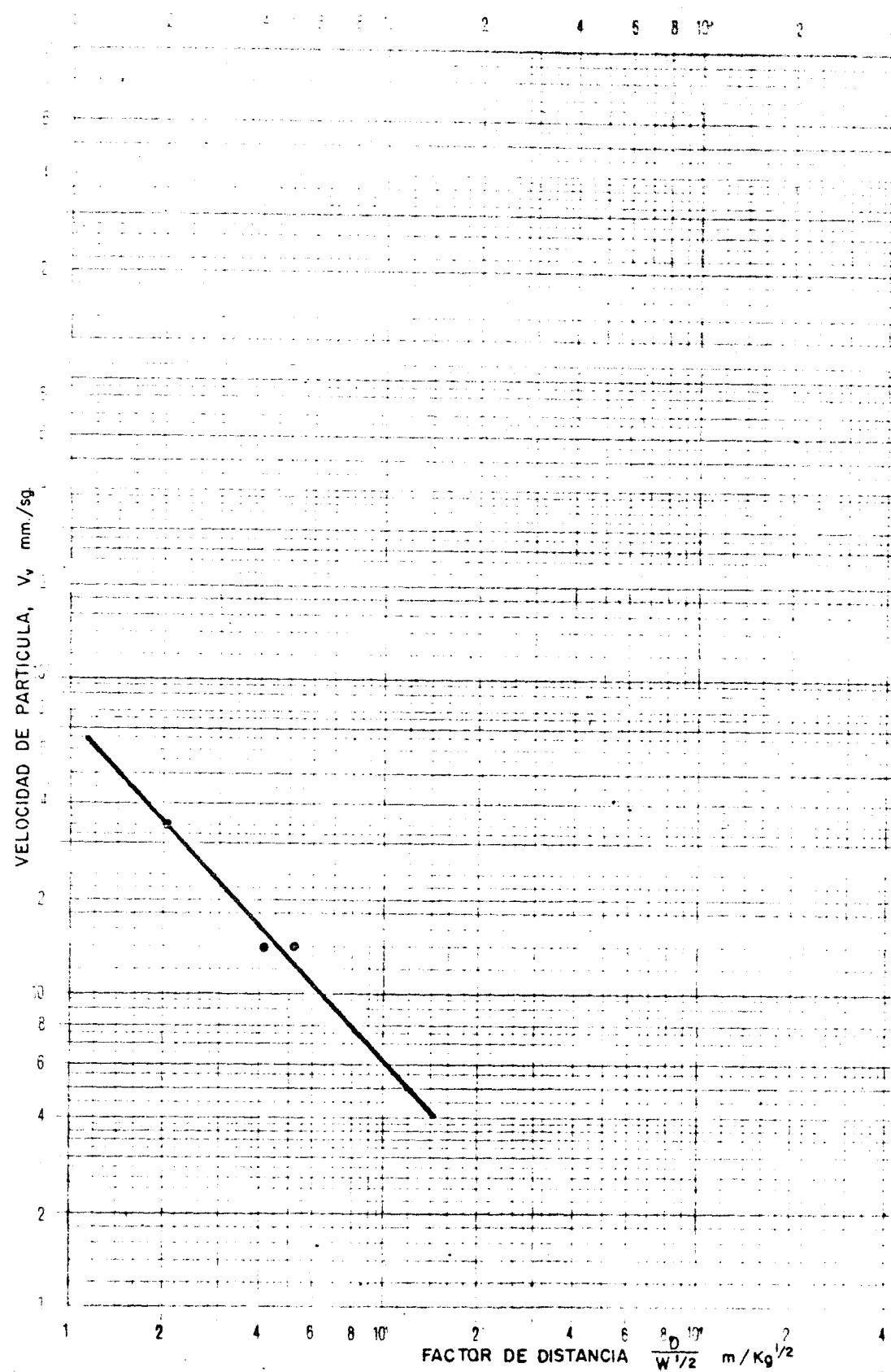


Fig. - 4.19

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente vertical
(Cantera de Dragados: Arganda)

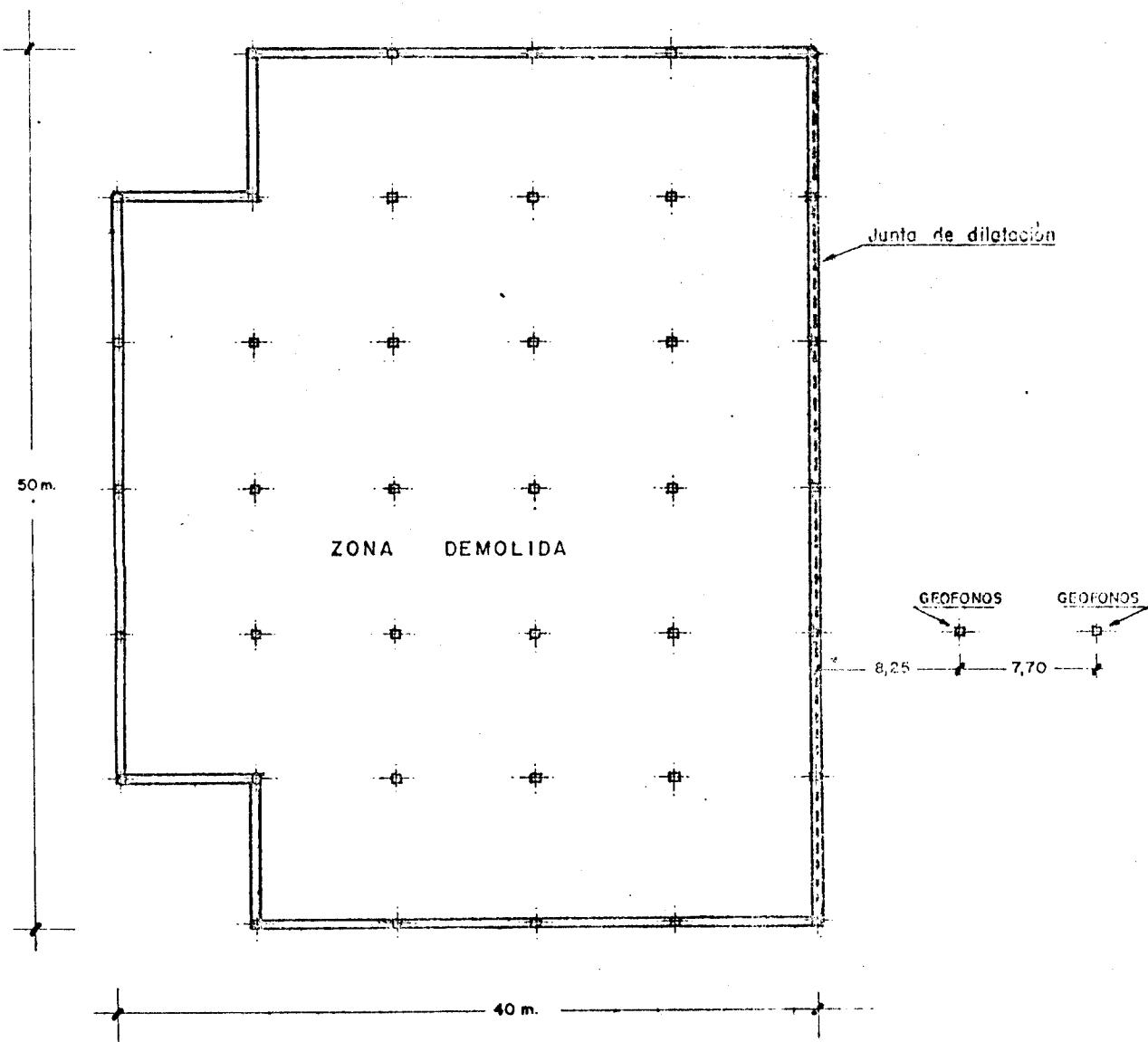


Fig.-4.20

Piano de situación de los geofonos. (Demolición de Móstoles)

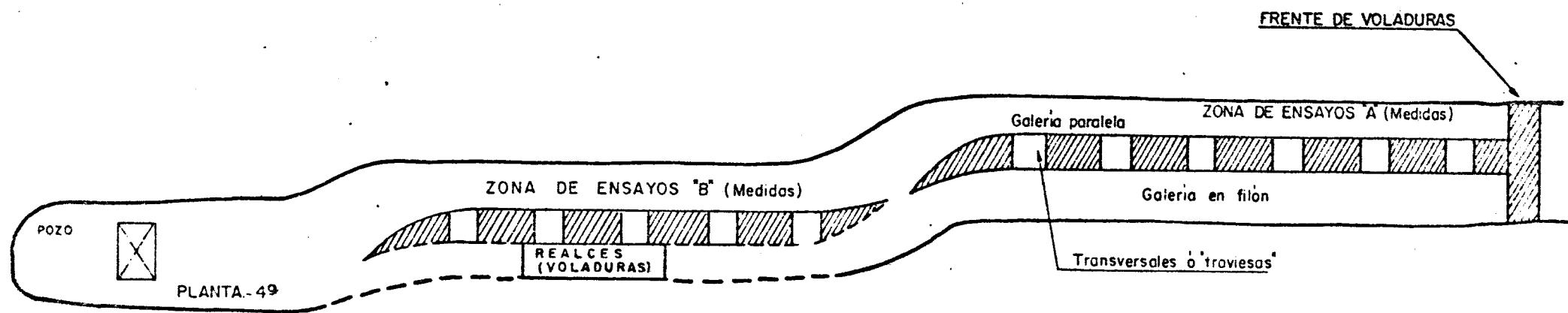
En cuanto a la medida realizada en la demolición de un edificio en Móstoles, edificio de dos plantas, con un total - de 33 pilares de 35 x 40 cm. de dimensiones, los geófonos se situaron en dos pilares próximos a la zona demolida. En la fig. 1.20 se da una idea aproximada de dicha situación. Se dispone de pocos elementos de juicio para poder exponer conclusión alguna. No obstante, parece presumible que, dado que las cargas detonadas instantáneamente, en estos casos, son muy pequeñas, no parece probable que existan problemas de vibraciones, aunque ésto dependerá, naturalmente, de la distancia a la que estén situados otros edificios y de la naturaleza del terreno sobre los que estén cimentados.

3.4.- MEDIDA DE LOS NIVELES DE VIBRACION Y PRODUCIDOS POR VOLADURAS EN EXCAVACIONES SUBTERRANEAS.

Estos ensayos se realizaron, todos ellos, en el Pozo Esmeralda de Minas de Linares (ENADIMSA) y que está enclavado - en el granito. La fig. 4.21. muestra un croquis de la zona en la que se realizaron los ensayos. Estos se han dividido en dos grupos.

- A.- Voladuras en la galería: medidas en la misma
- B.- Voladuras en los realces: medias en la galería.

Las características de estos ensayos vienen agrupados - en los cuadros 4.7 y 4.8 y en los que se ha considerado dos casos para el factor de distancia, $\frac{D}{W^{1/2}}$ $\delta \frac{D}{W^{1/3}}$, según lo establecido en el análisis teórico. Las rectas que definirían las ecuaciones de propagación, en ambas situaciones, quedan representadas en las Figs. 4.22 - 4.27 y en las que a partir de las mismas pueden derivarse los siguientes F.D.L.:



Croquis de situación de las zonas de ensayos.- (Minas de Linares)

Factor de distancia $\frac{D}{W^{1/2}}$ (Figs. 4.22 - 4.24)

F.D.L
(m/kg $1/2$)

V. Galería V. Realce

Componente longitudinal (V_L):	7,5	2
Componente vertical (V_V):	7	1,1
Componente transversal (V_T):	6,2	1,2

Factor de distancia $\frac{D}{W^{1/3}}$ (Figs. 4.25 - 4.27)

F.D.L
(m/kg $1/3$)

V. Galería V. Realce

Componente longitudinal (V_L):	12,5	2,4
Componente vertical (V_V):	11	1,4
Componente transversal (V_T):	6,2	2,6

De dichos resultados podemos obtener las siguientes conclusiones:

- Igualmente a como sucede en el caso de las voladuras a cielo abierto, el nivel de vibración se reduce cuando las ondas son obligadas a propagarse por el interior de la masa rocosa antes de manifestarse o dar lugar a las ondas superficiales. Esto, puesto de manifiesto al comparar los resultados de voladuras en la galería y voladuras en los realces.
- En ninguno de los casos considerados, pudo apreciarse

CUADRO N° 4.7.- VOLADURAS EN GALERIA: MEDIDAS EN LA MISMA

FACTOR DE DISTANCIA F.D.		VALOR DE LAS COMPONENTES DE LA VELOCIDAD (mm/sg)		
(m/kg $^{1/2}$)	(m/kg $^{1/3}$)	v_L	v_V	L_T
6,32	9,58	95	90	55
9,21	12,31	25	-	-
11,41	17,42	-	10	10
16,75	22,39	12,5	4	-
29,31	39,18	0	-	-

CUADRO N° 4.8.- VOLADURAS EN LOS REALCES: MEDIDAS EN LA GALERIA

FACTOR DE DISTANCIA F.D.		VALOR DE LAS COMPONENTES DE LA VELOCIDAD (mm/sg)		
(m/kg $^{1/2}$)	(m/kg $^{1/3}$)	v_L	v_V	L_T
1,8	2,2	80	-	-
2,3	2,8	40	-	-
3,33	3,97	20	10	-
3,35	4,0	9	-	-
4,0	4,7	-	8	-
4,14	4,93	-	-	9
5,1	6,0	-	4	-
8,03	8,64	1	3	2
8,83	9,50	-	-	4
12,41	14,79	-	-	16
38,42	48,01	0	-	-

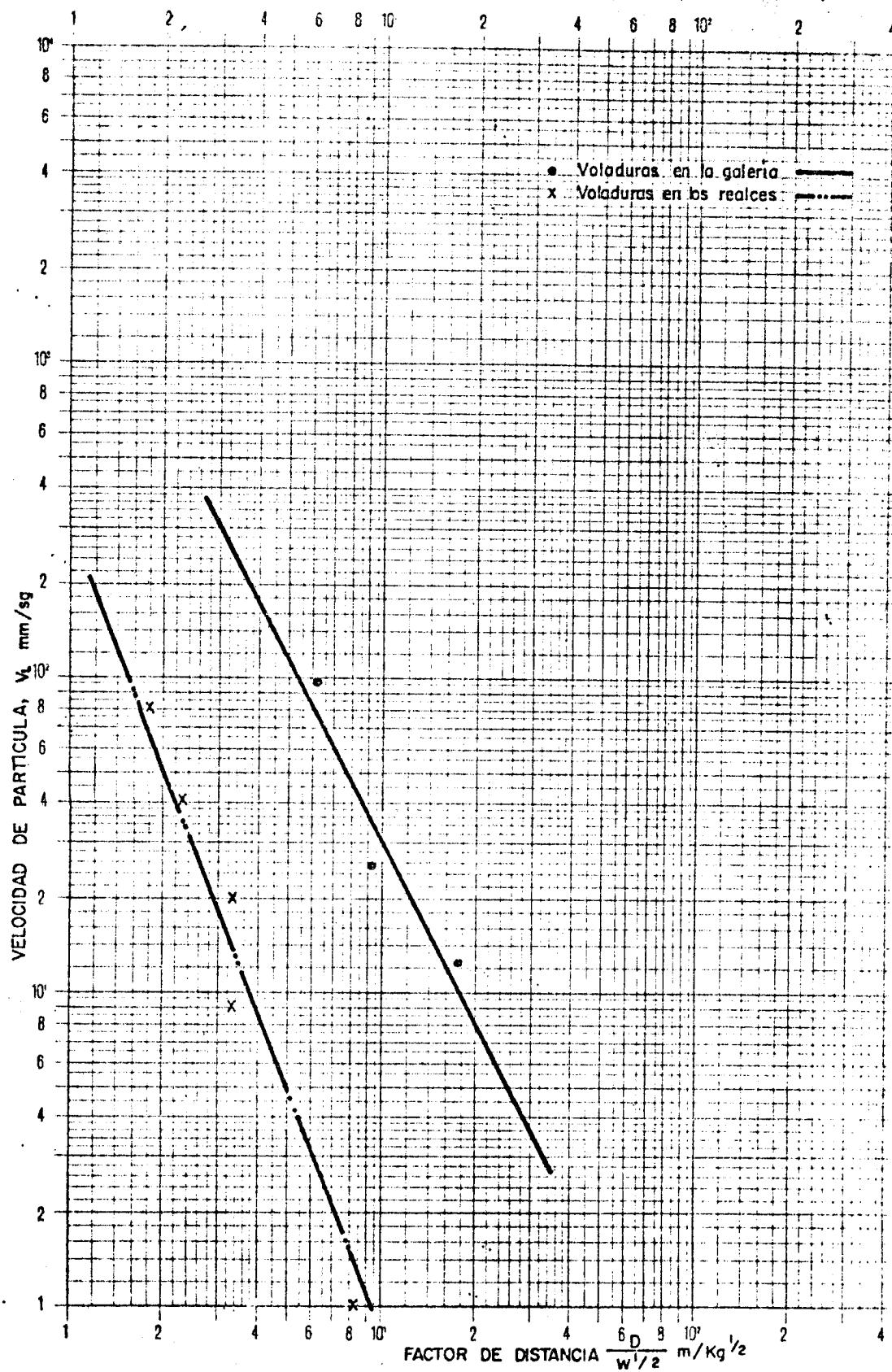


Fig.- 4.22

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente longitudinal (Minas de Linares)

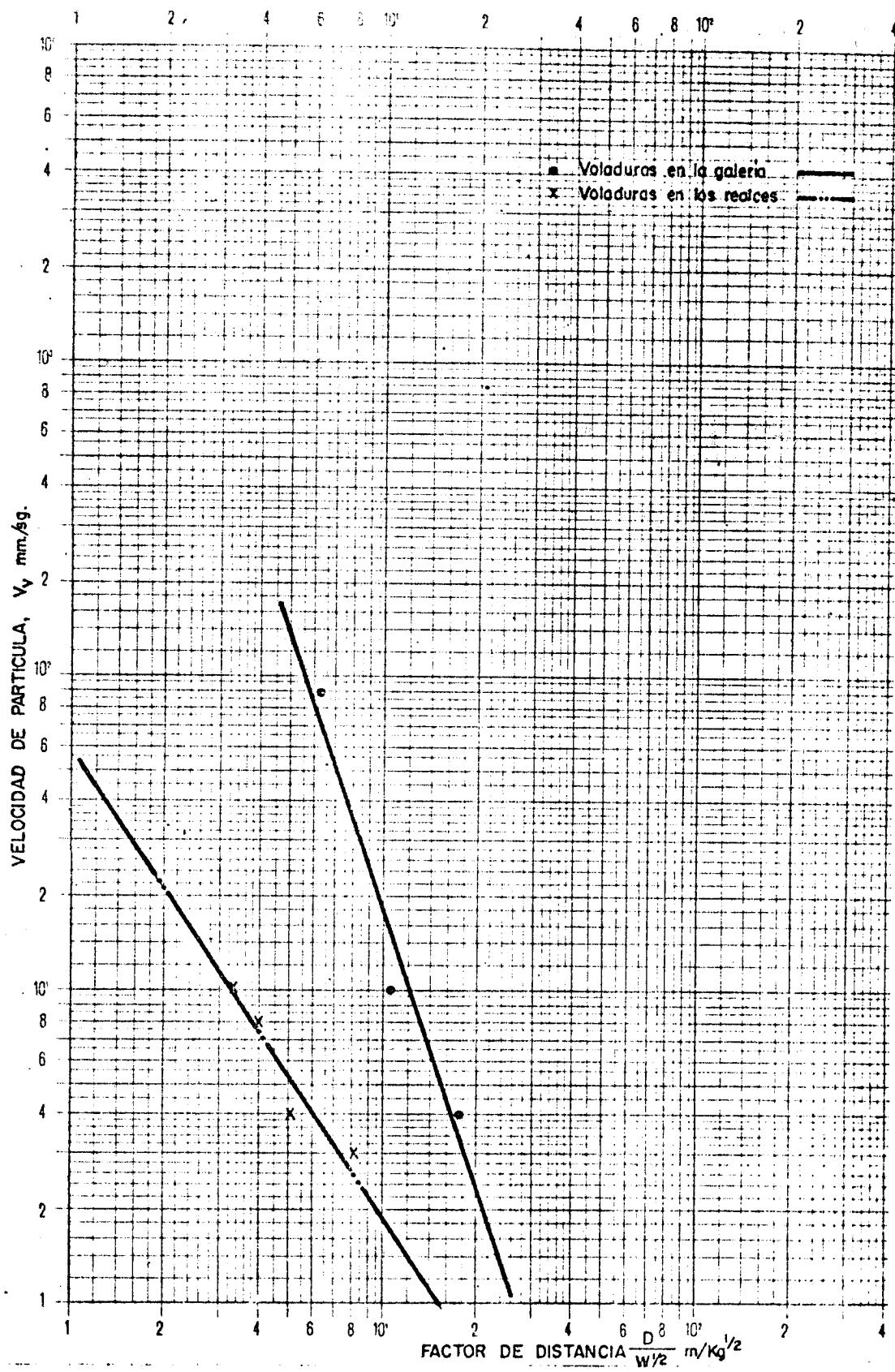


Fig.- 4.23

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente vertical (Minas de Linares)

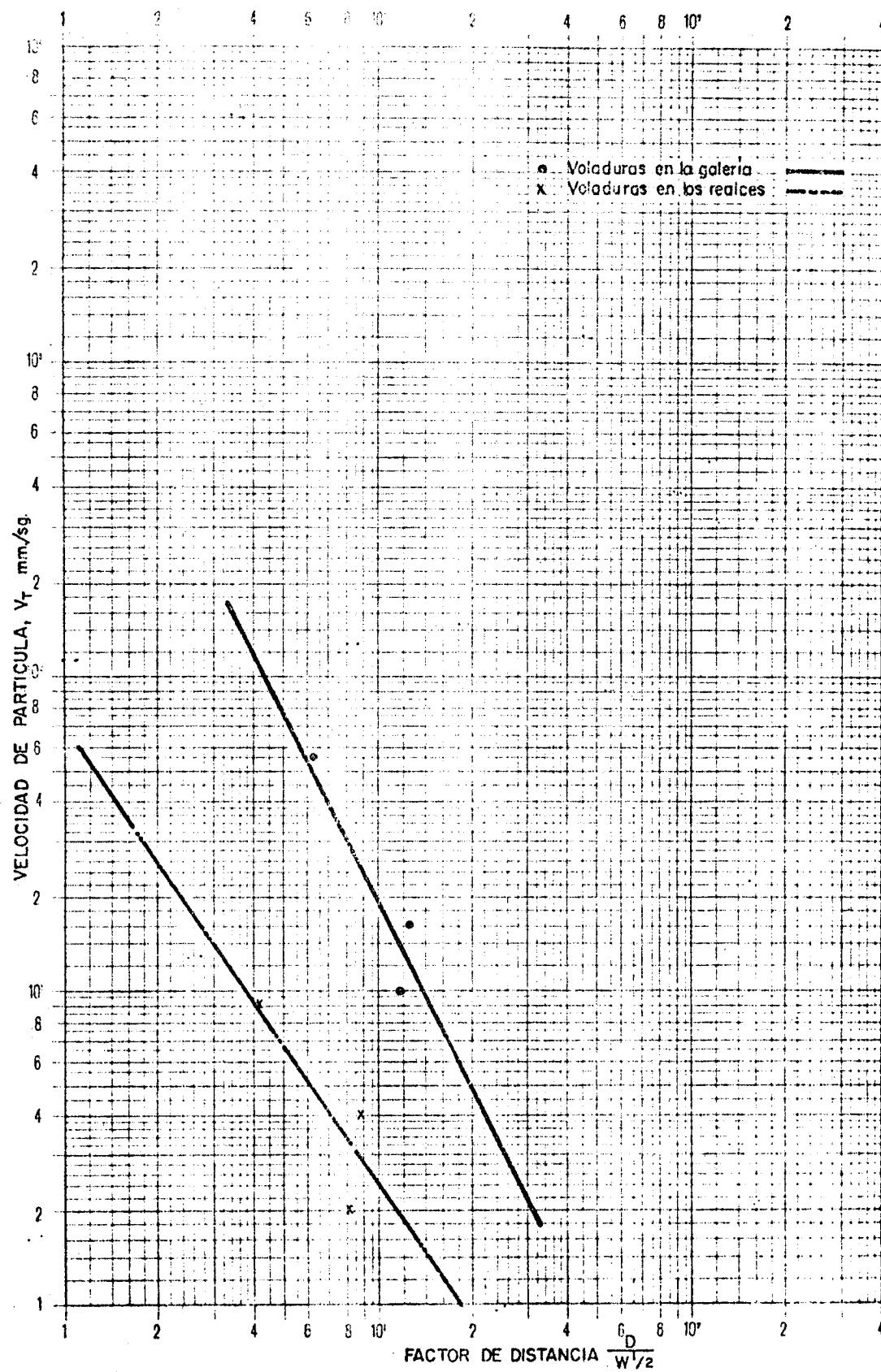


Fig.- 4.24

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente transversal
(Minas de Linares)

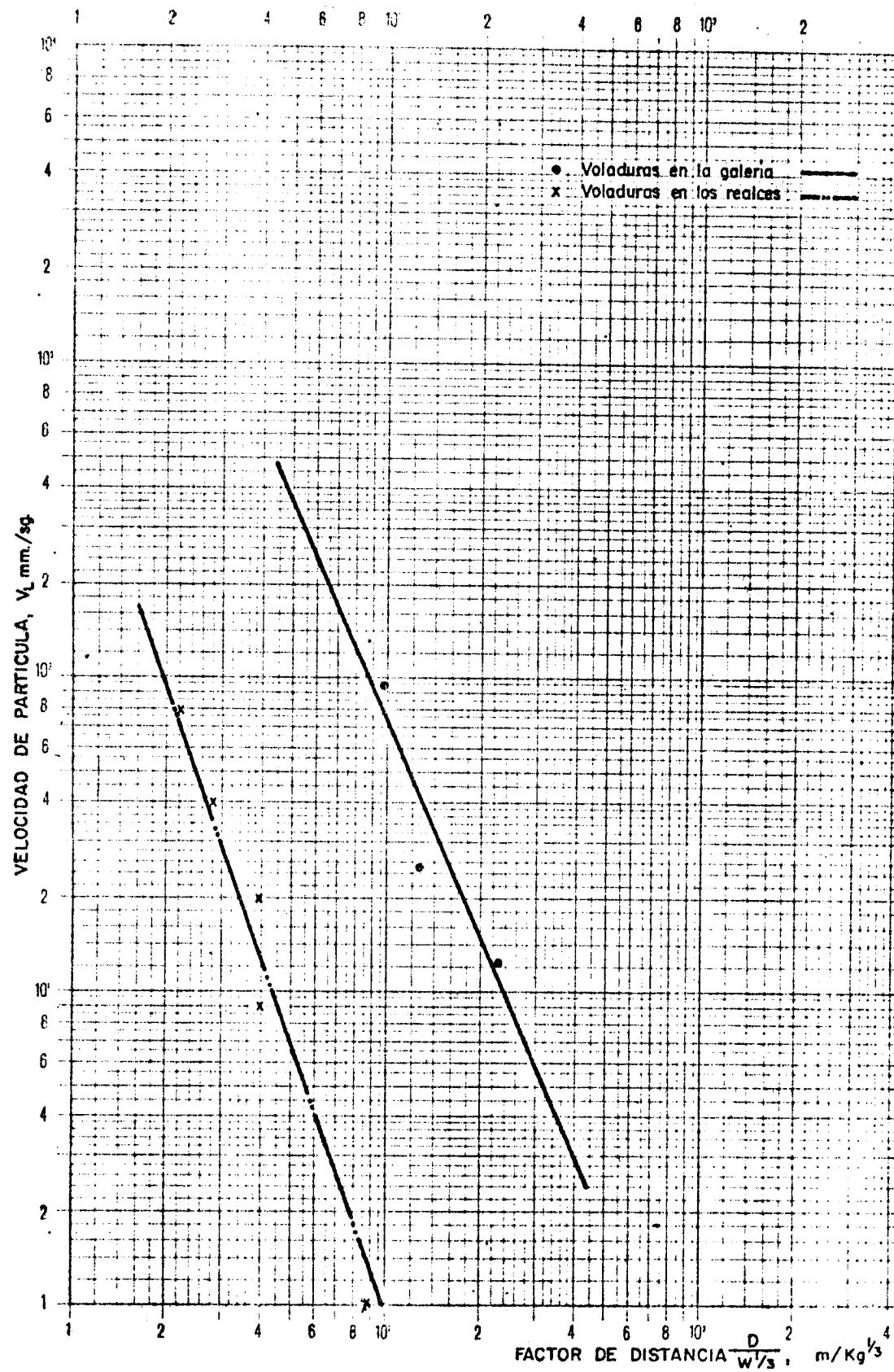


Fig.- 4.25

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente longitudinal (Minas de Linares)

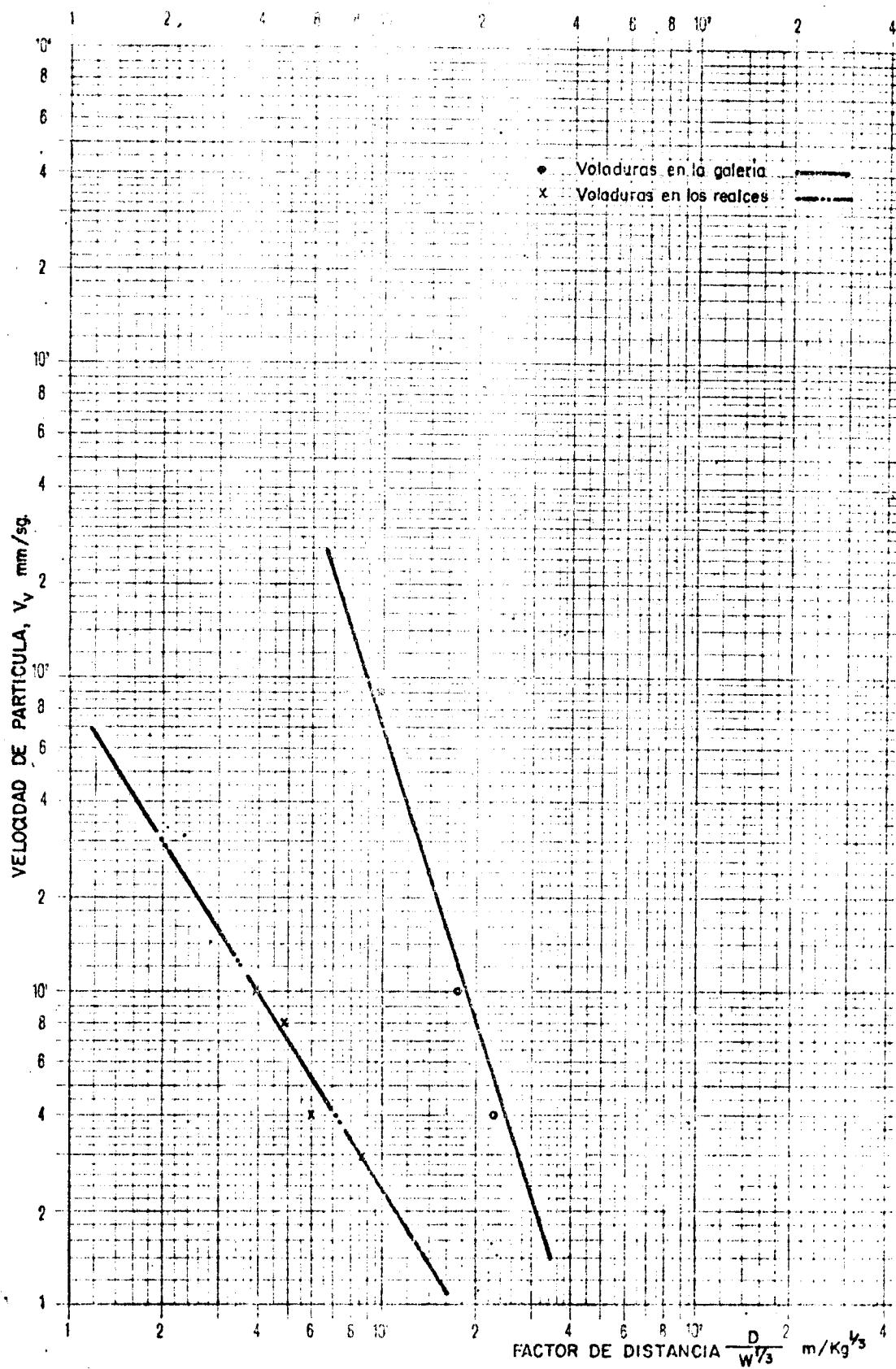


Fig.-4.26

Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente vertical
(Minas de Linares)

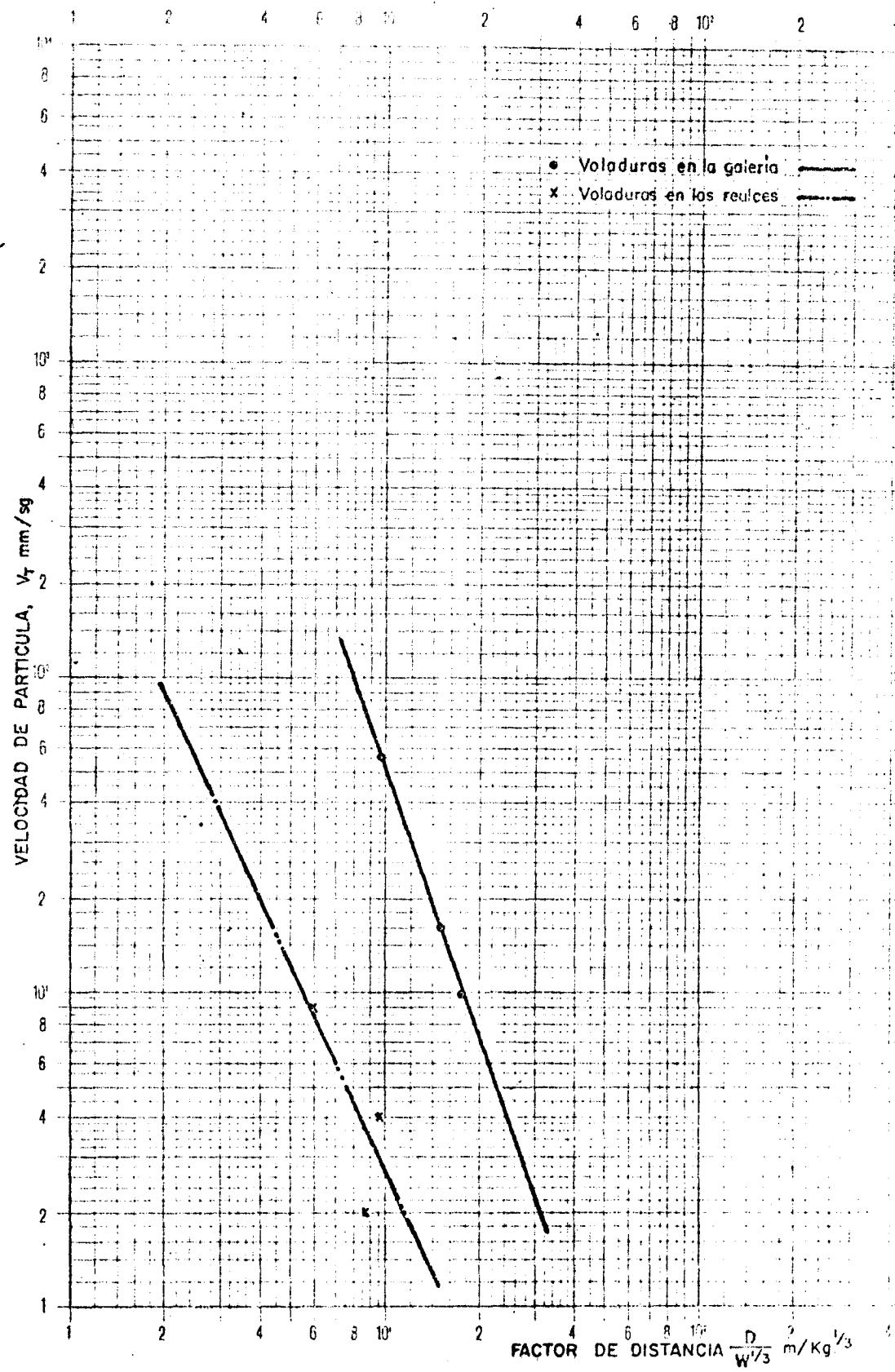


Fig.- 4.27
Velocidad de partícula en función del factor de distancia: Componente transversal
(Minas de Linares)

desprendimientos de bloques de los hastiales o del techo de la galería, a pesar de encontrarse, en algunos casos, condiciones sumamente favorables para su observación.

- Eso pone de manifiesto que, en la zona en estudio, con el límite de seguridad establecido, tanto en criterio basado en $\frac{D}{W^{1/2}}$ o en $\frac{D}{W^{1/3}}$ aún cuando el último proporciona F.D.L. superiores, resultan conservadores.

3.5.- CONCLUSIONES

Hacemos a continuación una exposición de las conclusiones más descollantes obtenidas en la campaña de medidas efectuadas:

- El nivel de la vibración generada por una voladura se reduce cuando las ondas están obligadas a propagarse por el interior de la masa rocosa antes de manifestarse o dar lugar a las ondas superficiales. Tal reducción dependerá de la distancia y de la naturaleza del material por el que se propagan.
- Influencia prácticamente nula del efecto ejercido por el tipo de iniciación.
- Reducción del nivel de vibración por la intercalación de una fractura entre el punto de medida y la voladura. Si bien el grado de reducción dependerá de la naturaleza de la misma.
- En el caso de voladuras en excavaciones subterráneas resulta sumamente difícil establecer un criterio de daños, tanto en lo que respecta a la estabilidad de

la estructura en sí, como a los elementos que existan en la misma para reforzar dicha estabilidad; soportes bulones, etc. No obstante, estos últimos, podrían ser analizados más fácilmente en tanto que, la primera, de penderá del comportamiento o respuesta del conjunto - estructura-medio, al estar sometido al efecto de sollicitaciones dinámicas y, por tanto, de análisis sumamente complejo como para poder establecer un criterio de daños standard.

4.- CAMPAÑA DE PRECORTE

4.1.- ASPECTOS GENERALES DE LA CAMPAÑA

Sin duda ha sido ésta la parte que mayores dificultades ha entrañado en el presente trabajo. Ello, como consecuencia por un lado, de la escasa información encontrada sobre el problema y, particularmente, porque la información que al respecto existe aporta soluciones excesivamente teóricas que requieren de una instrumentación de la que no se ha podido disponer. Por otro, porque la materialización de los objetivos del proyecto está sumamente condicionada por el factor tiempo, en el caso en cuestión relativamente escaso con el grave riesgo de no poder llegarse a concretar resultados. Fué necesario, por tanto, hacer uso de una buen dosis de realismo a la hora de diseñar la programación.

Desechada la posibilidad de poder disponer de una instrumentación que nos permitiese conocer los parámetros que entran en juego en las soluciones aportadas por las investigaciones más serias expuestas ya en el capítulo III, se decidió atacar el problema bajo una óptica fundamentalmente apoyada - en ensayos de campo, al fin de conocer la influencia de aquellos factores que más directamente pueden actuar sobre el diseño de un buen precorte, a la vez que intentar establecer una metodología sencilla que nos permita el diseño de un precorte, sin tener que vencer grandes dificultades.

Para ello, fue necesario la ejecución de 302 m² de precorte a cielo abierto y de 215 m² de precorte en galería. Todos ellos, realizados en granito del distrito minero de linares.

En principio, se pensó en hacer precortes subterráneos tanto en el granito -pozo Esmeralda- como en la pizarra -pozo Uno- de Minas de Linares, pero, finalmente, se consideró oportuno centrarse en un sólo tipo de material.

Asimismo, con el fin de chequear la fórmula aportada - por Paine, Holmes y Clark (ver capítulo III), con los resultados de campo, era necesario conocer los parámetros resistentes del material. En dicho análisis se han considerado también algunos precortes realizados en la Mina de Cerezo de Río Tiérón, que amablemente nos cedió su director técnico con el fin de elaborar dicho estudio.

El tipo de explosivo empleado en todos los casos ha sido Goma 2 E-C, de 26 mm. de diámetro y longitud, en general, de 20 cm, cordón detonante normal y cordón detonante de seguridad reforzada.

4.2.- CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS MATERIALES

Era necesario disponer de muestras para su posterior ensayo en el laboratorio. Así, en el caso de Minas de Linares, se llevaron a cabo tres sondeos con un total de 101 m.l. sondados. En el anejo nº 5 se exponen los detalles de esta campaña. En el caso del material de la Mina de Cerezo de Río Tiérón se tomaron bloques - 6, en total - de 40 cm. de arista - aproximadamente, que posteriormente fueron sondeados en el laboratorio para la obtención de muestras.

Los ensayos de laboratorio se realizaron en el laboratorio de Geotecnia del IGME y fueron los siguientes:

- Determinación de la densidad aparente
- Resistencia estática a la compresión simple
- Resistencia estática a la tracción
- Determinación de las constantes elásticas
- Ensayos triaxiales

En el anejo nº 6 se incluyen estos resultados de laboratorio, que una vez analizados hemos considerado como valores representativos los expresados en el cuadro 4.9. No obstante, debe advertirse, por causas intrínsecas derivadas de la propia naturaleza de los ensayos y dificultades inherentes, que los valores determinados para las constantes elásticas - así como los determinados a partir de los ensayos triaxiales, merecen ser tomados con cierta cautela, ya que la información derivada de los mismos implica una espinosa interpretación.

4.3.- PRECORTE A CIELO ABIERTO

En la realización de esta parte de la campaña se ha considerado adecuado seguir algunas de las directrices señaladas por Leighton, que aunque son muy sencillas en su concepción, pueden representar, sin embargo, un enorme interés práctico. Así, se analizó en primer lugar la influencia del grado de confinamiento en la formación de fracturas y, en segundo término, determinación del espaciamiento óptimo para los grados de confinamientos más adecuados. En todos los casos la longitud de los barrenos fue de 7 m, la carga fijada fue de 200 gr/m.l., retacado de 2 m, espaciamiento entre cartuchos de 40 cm. y cartuchos de Goma 2 E-C de 26 x 200 mm.

CUADRO 4:9.- CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS MATERIALES.

Material	Explotación	Densidad aparente gr/cm ³	Resistencia a la comp. simple, σ_c kg/cm ²	Resistencia a la tracción, σ_t kg/cm ²	ctes. elásticas		Ensayo Triaxiales	
					$E_t \cdot 10^5$ kg/cm ²	ν	Cohesión, c kg/cm ²	ϕ°
Pizarra	Linares	2,7 (10)	970 (8)	60 (8)	7,5 (5)	0,26 (5)	130 (15)	50° (15)
Granito	"	2,6 (10)	1400 (14)	50 (14)	6 (5)	0,30 (5)	160 (15)	60° (15)
Glauberita	Cerezo de Río Tirón	---	260 (5)	20 (5)	1,4 (5)	--	--	--

Cts. Elásticas: E_t módulo tangente 40-50% carga de rotura.

() = n° de muestras ensayadas.

Influencia del grado de confinamiento

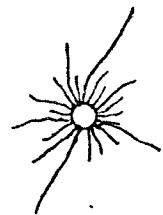
Para el análisis del efecto ejercido por este parámetro -relación $\frac{d \text{ barreno}}{d \text{ cartucho}}$ -, se tomaron los diámetros de barrenos siguientes: 101, 86, 76, 66, 56, 46 y 37 mm respectivamente. Así pues, con el diámetro de cartucho de 26 mm, se obtuvieron los grados de confinamiento siguientes: 3,6, 3,3, 2,9, 2,5, 2,1, 1,7 y 1,4.

De los ensayos realizados -2 en cada caso- pudo apreciarse que la mejor formación de fracturas estuvo asociada - con los grados de confinamiento de 2,5, 2,1, 1,7 y 1,4, en tanto que la fracturación más deficiente correspondió a 3,3 y 3,6. En la fig. 4.28 se expresa esquemáticamente, de un modo gráfico estos resultados.

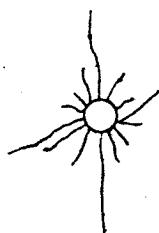
Determinación del espaciamiento óptimo

El siguiente paso fue determinar el espaciamiento óptimo que correspondería a los grados de confinamiento más favorables, determinados en el apartado anterior.

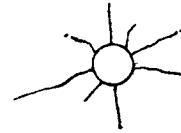
A este fin se hicieron una serie de pruebas una, para cada caso- compuestas de 10 barrenos y a espaciamientos - entre barrenos de 20, 40, 40, 40, 50, 50, 50, 60 y 60 cm respectivamente. De los resultados de esos ensayos se determinó que el espaciamiento óptimo resultó ser de 50 cm en los - casos de 2,9 y 2,5 de grado de confinamiento, en tanto que en los otros casos fue inferior. En la fig. 4.29 se da una representación esquemática de esos resultados.



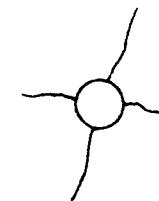
G.C. = 1,4



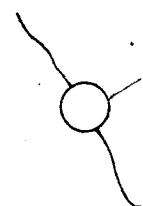
G.C. = 1,7



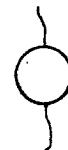
G.C. = 2,1



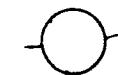
G.C. = 2,5



G.C. = 2,9



G.C. = 3,3



G.C. = 3,6

G.C. = Grado de Confinamiento

Fig. 4.28.- Representación esquemática de la influencia del grado de confinamiento en la formación de fracturas alrededor de un barreno.

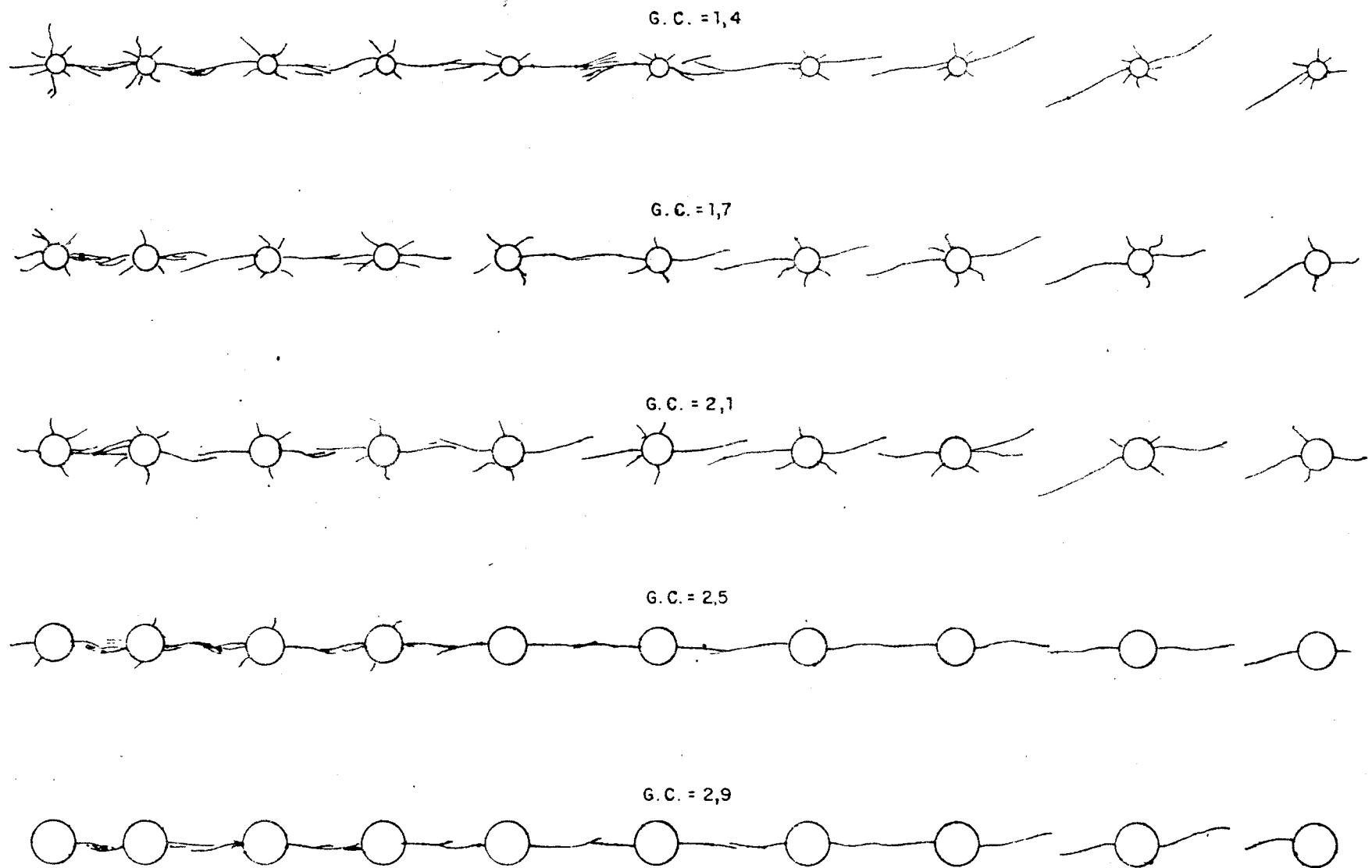


Fig. 4.29.- Representación de los ensayos para la determinación del espaciamiento óptimo

Posteriormente se comprobó dichos resultados mediante un par de ensayos, asimismo de 10 barrenos espaciados a 50 cm y con grado de confinamiento de 2,9 y 2,5. De estos ensayos se comprobó que con el grado de confinamiento de 2,9 se obtenía un precorte más satisfactorio.

En todos los ensayos se comprobó la efectividad del precorte mediante el empleo de una mangera de aire comprimido, observándose que efectivamente todos los barrenos soplaban.

4.4.- PRECORTE SUBTERRANEO

Todos los ensayos efectuados se realizaron en la galería paralela y en los transversales de la 4^a planta (120 de profundidad) del Pozo Esmeralda -Minas de Linares-. Dado que las dimensiones de la galería -2x2,5 m- son muy reducidas, se decidió para mayor facilidad en el trabajo, barrenar con diámetro de 37 mm, ya que este es el que se corresponde a los martillos perforadores con que se trabaja en la mina. La longitud de los barrenos fue de 1,60 y 2 m.

Los ensayos realizados se dividieron en los siguientes grupos:

- A.- Determinación del espaciamiento óptimo para las mismas condiciones de carga y grado de confinamiento que las empleadas en el precorte a cielo abierto.
- B.- Influencia del estado tensional.
- C.- Pruebas especiales
- D.- Determinación de la carga para la obtención del mismo espaciamiento que en el precorte a cielo abierto.

A.- Determinación del espaciamiento óptimo

Para obtener las mismas condiciones de carga - 200 gr/m.l - y grado de confinamiento - 2,9 - que en el precorte a cielo abierto, se empleó cordón detonante de seguridad reforzada, ya que el normal, en una serie de pruebas previas, dió muchos fallos, además de necesitarse más cantidad del mismo para obtener dicha carga y, por tanto, hacer más difícil la obtención del grado de confinamiento requerido.

Se hicieron dos pruebas, cada una de ellas de 5 barrenos alineados según la dirección horizontal. En la primera se emplearon espaciamientos de 20, 30, 40 y 50 cm. respectivamente, observándose que el espaciamiento óptimo estaba entre 20 y 30 (Fig. 4.30), en la segunda se tomó un espaciamiento constante de 25 cm- y se comprobó que para dicho espaciamiento se obtenía un precorte satisfactorio.

B.- Influencia del estado tensional

Una vez definido el espaciamiento óptimo se pretendía - conocer la influencia del estado tensional, de acuerdo a lo expuesto en el análisis teórico, sobre la formación del plano de fractura. Para ello se hizo un precorte en la dirección - vertical, con el mismo espaciamiento y grado de confinamiento que para la dirección horizontal. En principio, se pensó, supuesto un estado tensional de la masa rocosa en el que la tensión principal máxima coincidiera con la dirección vertical, que en dicha situación habría un exceso de fracturación. Sin embargo, ninguna diferencia apreciable pudo observarse con respecto al ensayo realizado en la dirección horizontal (Fig. 4.31).

Como comprobación se efectuó un precorte de la sección total de la galería, ratificándose el resultado anterior. Sin

embargo, pudo observarse que el despegue del material, a través de toda la línea de precorte, resultaba difícil. Esto último condujo a una serie de ensayos incluidos en el apartado de pruebas especiales.

Los resultados obtenidos respecto a la influencia del estado tensional llevó a suponer que:

- La dirección de la tensión principal máxima no coincidía con la dirección vertical.
- Dicha dirección debía ser tal que los ángulos formados con la dirección horizontal y la vertical tendrían que ser muy similares, de forma tal que el efecto desfavorable ejercido por aquella surtiera efectos muy parecidos sobre ambas direcciones: ello implicaría que tal dirección vendría a bisectar el ángulo de 90° formado por la horizontal y vertical.

Estas observaciones dieron lugar a que se realizase un ensayo de precorte, de las mismas características que los anteriores, pero en el que los barrenos estaban alineados formando un ángulo de 45° aproximadamente con la dirección vertical y horizontal del frente de la excavación (Fig 4.32), con el fin de conocer si dicho estado tensional era el pensado.

Dicho ensayo tampoco manifestó diferencia alguna con respecto a los realizados anteriormente. La única explicación posible a estos resultados, es que el estado tensional existente fuese hidrostático. No obstante, resulta un tanto arriesgado defender tal aserto sin disponer de estudios más exhaustivos - mediante el empleo de una instrumentación adecuada - del estado tensional existente y, asimismo, de la influencia de la naturaleza estructural de la zona en el estado tensional resultante.

C.- Pruebas especiales

Bajo un punto de vista práctico se realizaron una serie de pruebas con el fin de favorecer el despegue del material a lo largo de la línea de precorte, sin duda dificultado por la acción ejercida por el estado tensional característico de toda excavación subterránea.

Para ello se realizaron las pruebas siguientes:

(i).- Voladura con una previa pega del precorte y posteriormente la pega principal.

a.- Precorte con algunos barrenos del mismo detonados retardadamente con la pega principal (Fig. 4.33.)

b.- Pega principal con algunos barrenos situados muy próximos a la línea del precorte (Fig. 4.34.)

(ii).- Voladura del precorte independizada completamente de la voladura de la pega principal, formando parte de esta última algún que otro barreno del precorte anterior, cargado muy ligeramente.

Asimismo se estudió la influencia de dejar "barrenos guía" - barrenos sin cargar- entre dos barrenos cargados.

Respecto a los primeros - ensayos para favorecer el despegue - los resultados más favorables fueron los de (ii), aunque no existió gran diferencia y, bajo un punto de vista práctico, parece obvio que los ensayos "a" de (i) son los más idóneos aunque para ello sea necesario un consumo superior de

Fig. 4.30

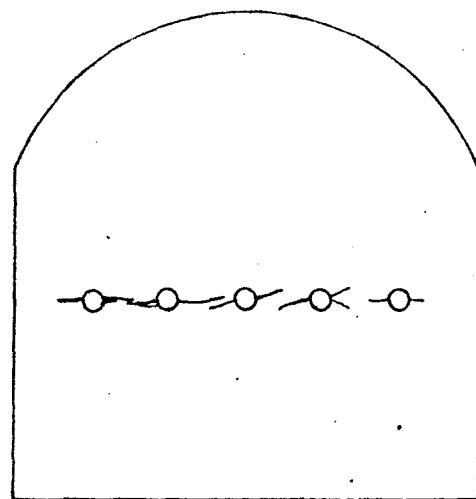


Fig. 4.31

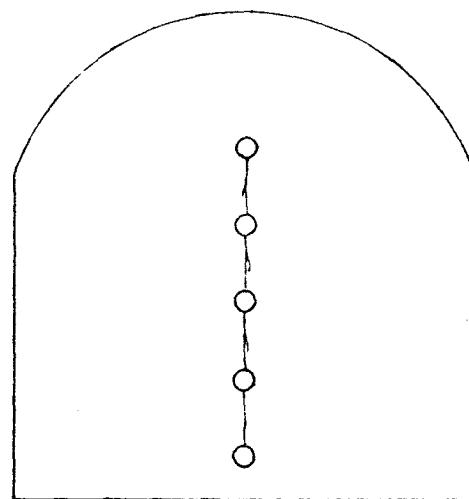


Fig. 4.32

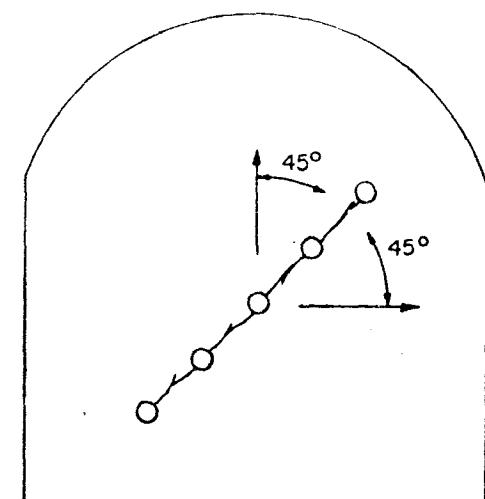
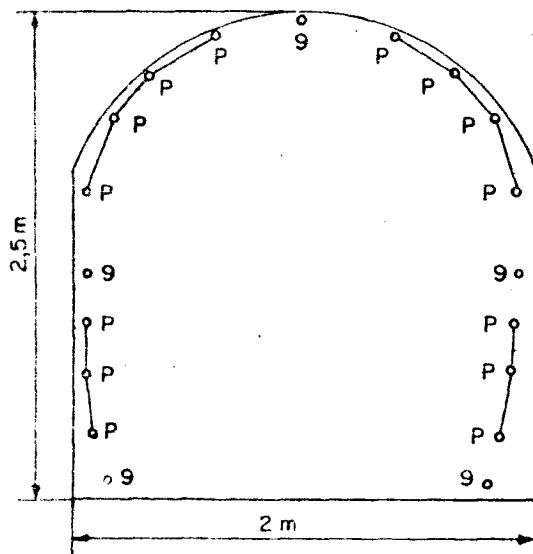
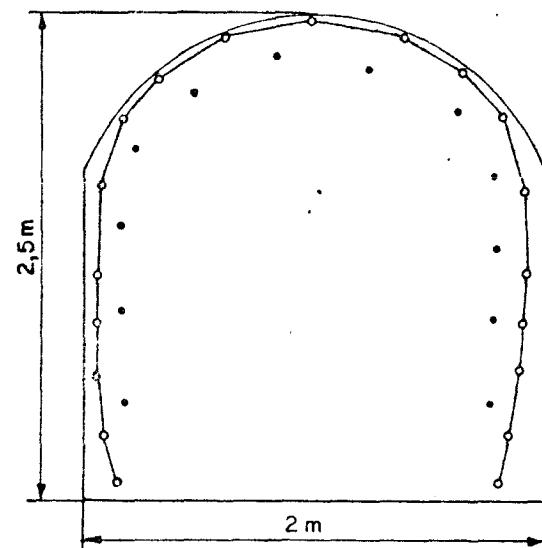


Fig. 4.33



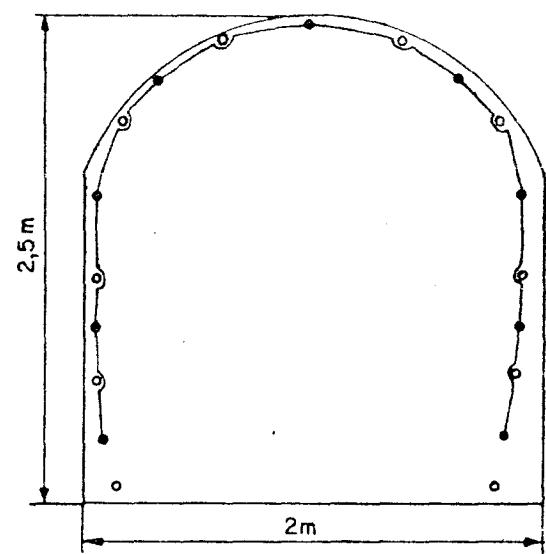
○ P - Barrenos de precorte
○ 9 - Barrenos de la pega principal
(último tiro)

Fig. 4.34



○ - Barrenos de precorte
● - Barrenos de la pega principal
(último tiro)

Fig. 4.35



● Barrenos cargados
○ Barrenos sin cargas

tonadores, ya que el empleo de cordón detonante como iniciador de todo el precorte puede crear dificultades en los barrenos - adyacentes que no son del precorte.

Por otro lado, en los ensayos realizados -3 en total- dejando barrenos guía, con la misma carga y espaciamiento de 45, 35 y 25 cm, entre los barrenos cargados, se obtuvo que, en el primer caso, la formación de la fractura fué deficiente, en tanto que el segundo y tercero se formó claramente, pero en to dos los casos esa fractura fué irregular dejando pequeños bulbos o salientes en los puntos en que los barrenos no estaban - cargados (fig. 4.35.).

D.- Determinación de la carga para la obtención del mismo espaciamiento que el precorte a cielo abierto.

Finalmente se llevaron a cabo una serie de ensayos con - el fin de determinar la carga necesaria para obtener un espaciamiento entre barrenos de 50 cm.

Los resultados de estos ensayos proporcionaron una carga de 600 gr/m.l., necesaria para tener dicho espaciamiento.

4.5.- ANALISIS CUANTITATIVO

Exponemos en este apartado un análisis cuantitativo, en el que se trata de contrastar los resultados experimentales - con los derivados por la aplicación de las formulas aportadas por Paine, Holmes y Clark (ver capítulo III), y que reproducimos a continuación:

$$P_b = \frac{P_D \cdot V_e}{2 V_c} < \sigma_c \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$T = E = - \gamma F_b \cdot \sqrt{\frac{r}{R}} \cdot e^{-\frac{\alpha R}{c}} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

En dicho análisis vamos a considerar, además de los resultados experimentales de los precortes a cielo abierto realizados en el granito -Mina de Linares-, los obtenidos en la glauberita -Mina de Cerezo de Río Tirón-, aunque en estos últimos debido a la escasez de parámetros conocidos de los mismos, se necesitará hacer varios supuestos.

Las características de dichos precortes quedan resumidos a continuación:

	<u>Granito</u> (Linares)	<u>Glauberita</u> (Cerezo)
- Diametro del barreno, $2r$ mm.	76	86
- Longitud del barreno, L m.	7	8,50
- Espaciamiento, $2R$ m.	0,50	1,50
- Diametro del cartucho, $2c$ mm.	26	26
- Longitud del cartucho, l cm.	20	20
- Separación entre cartuchos, h_1 cm	40	15
- Carga, W gr/ml	200	400
- Retacado, Sm.	2	2
- Tipo de explosivo	Goma 2E-C	Goma 2E-C

Asimismo, las características mecánicas necesarias en dicho análisis son las siguientes (ver cuadro 4.9)

	<u>Granito</u> (Linares)	<u>Glauberita</u> (Cerezo)
Resistencia estática a la compresión simple σ_c kg/cm ²	1.400	260
Resistencia estática a la tracción, σ_t Kg/cm ²	50	20
Módulo de Poisson, ν	0,3	0,2
Coeficiente de absorción, α	---	---

Respecto a los coeficientes de absorción -parámetro α - se ha considerado el valor dado por Duvall - $\alpha = 0,03$ - (Ref. 2) para el granito, en tanto que para la glauberita no ha podido encontrarse información al respecto. No obstante, y a partir de la información cualitativa consultada (Ref. 3), sabemos que dicha absorción es superior que a la del caso anterior; por tanto, si suponemos el mismo coeficiente que para el granito estamos en la situación más favorable, y que, como veremos en el análisis, los resultados que obtendremos serán suficientes para nuestros propósitos. Asimismo, respecto a la glauberita, se ha tomado un módulo de Poisson $\nu = 0,2$, según los valores indicados por Nicholls y Hooker (Ref. 3) para rocas salinas de naturaleza similar a la tratada.

Por otra parte, también ha sido necesario determinar la presión de detonación - P_D - del explosivo empleado, para lo que se ha aplicado la fórmula de Brown (Ref. 1) que exponemos a continuación

$$P_D = 2,16 \cdot 10^{-4} \quad \rho g \quad v_D^2 \quad \frac{0,45}{1 + 0,0128 \quad \rho g}$$

en donde :

P_D = presión de detonación, p.s.i. ($lb/pulg^2$)

ρ_g = Weight density del explosivo, lb/ft^3 (lb/pie^3)

v_D = velocidad de detonación, ft/sg (pie/sg)

expresión que transformada al sistema métrico resulta ser la siguiente:

$$P_D = 9,6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho \cdot v_D^2 \quad \frac{0,45}{1 + 0,784 \rho}$$

en donde:

P_D = presión de detonación, kg/cm^2

ρ = densidad del explosivo, gr/cm^3

v_D = velocidad de detonación, m/sg

Para el explosivo empleado -goma 2E-C, de $\rho=1,4 \text{ gr/cm}^3$ y $v_D = 5.200 \text{ m/sg}$ - la presión de detonación resultante es $P_D \simeq 78.000 \text{ Kg/cm}^2$.

Definidos todos los parámetros básicos que integran las ecuaciones (1) y (2), se obtienen los siguientes resultados:

	<u>Granito</u>	<u>Glauberita</u>
$v_C = \pi r^2 h = \pi r^2 (h_1 + 1) =$	$2.721,9 \text{ cm}^3$	1.940 cm^3
$v_E = \pi c^2 l$	$< 49 \text{ "}$	$6,5 \text{ cm}^3$
l	$< 10 \text{ cm}$	$1,5 \text{ cm}$
$e = \frac{\alpha R}{c}$	$= 0,565$	$0,170$
$\sqrt{\frac{r}{R}}$	$= 0,389$	$0,224$
$T = -\gamma P_b \cdot \sqrt{\frac{r}{R}} \cdot e =$	103 kg/cm^2	2 kg/cm^2

De estos resultados puede observarse claramente que, en ambas situaciones, la longitud necesaria del cartucho explosivo es inferior a la tomada en los ensayos experimentales ($l = 20$ cm), existiendo una diferencia considerable entre el valor teórico y el real, especialmente del precorte en la glauberita. Esto pone de manifiesto que, según el resultado teórico, se producirá un exceso de facturación alrededor del barreno, hecho que no sucedió en la situación real.

Asimismo, de dicho análisis, puede observarse que mientras que en el caso del granito el esfuerzo traccional generado T , es superior a la resistencia a la tracción del mismo - ($\sigma_T = 50$ kg/cm²), en el caso de la glauberita, aun en la situación favorable considerada, dista mucho de alcanzarse dicha resistencia ($\sigma_T = 20$ kg/cm²) y, por tanto, el espaciamiento establecido. Sin embargo, si consideramos la P_b generada en la situación real, obtenemos una $P_b = 8268$ lo que nos proporciona una $T = 63$ kg/cm², superior por tanto a la σ_T del material.

Dicho análisis, aparte de basarse en un comportamiento elástico y consideración errónea de la propagación cilíndrica, considera la resistencia estática del material en lugar de la dinámica y, como sabemos, ésta es muy superior a la anterior -del orden de 10-12 veces la estática-. Sin embargo, en dicho análisis no se considera el efecto ejercido por la presión del gas y, por consiguiente, el incremento de longitud sufrido por las fracturas como consecuencia de dicho efecto, lo que en cierto grado compensará las limitaciones del mismo. Por tanto, dicho análisis únicamente debe considerarse como una ligera aproximación a partir de la cual debemos movernos en los ensayos de campo.

4.6.- CONCLUSIONES

Exponemos en este apartado las conclusiones más significativas derivadas de esta campaña.

- Reducción del grado de fracturación alrededor del barreno al incrementarse el grado de confinamiento, en tanto que la longitud de las fracturas es más significativa para grados de confinamiento intermedios.
- La conclusión anterior puede explicarse si se tiene en cuenta los dos efectos ejercidos por la explosión: onda de esfuerzos y presión del gas. Así, mientras que para grados de confinamiento pequeños la onda de esfuerzos generada por la explosión (claramente superior -con toda seguridad- a la resistencia de la roca) origina un grado elevado de fracturación, con lo que la presión del gas tiene que actuar sobre un gran número de fracturas, al incrementarse, por el contrario, el grado de confinamiento, la fracturación se producirá en aquellos puntos alrededor del barreno más susceptibles a su formación, occasionando muy pocas fracturas, lo que da lugar a que tanto la acción ejercida por la presión del gas como por la onda de esfuerzos se concentre, lo que origina longitudes mayores de fracturas.
- Según estas conclusiones, el espaciamiento óptimo corresponderá para aquellos grados de confinamiento en los que la conjunción entre las acciones ejercidas por la onda de esfuerzos y la presión del gas sea la más idónea.
- Influencia del estado tensional "in situ" existente sobre la formación del precorte.
- Posibilidad de determinar las direcciones de las tensiones principales mediante ensayos de precorte.

- Necesidad de aplicación de técnicas adecuadas para producir el despegue del material, a lo largo de la línea de precorte, cuando nos encontramos bajo la influencia de un estado tensional desfavorable.
- Del análisis cuantitativo expuesto se deduce claramente que únicamente debe considerarse como una aproximación a la solución del problema, aproximación a partir de la que debemos movernos en los ensayos de campo.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Brown, R.F.: Determination of Basic Performance Properties of Blasting Explosives. Ch. in 1st Symp. on Rock Mech., Col. Sch. of Mines Quart., vol. 51, n° 3, July 1956, pp. 171-188.

- 2.- Duvall, W.I., et al.: Propagation of Peak Strain and Strain Energy in explosion-Generated Strain Pulses in Rock. Quart. of The Col. Sch. of Mines, vol. 54, n° 3, July 1959.

- 3.- Nicholls, H.R. and Hooker, V.E.: Comparative Studies of Explosives in Salt. U.S. Bureau of Mines R I 6041, 1962, 46 p.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

Hacemos exposición en este capítulo de una serie de conclusiones. -las más relevantes- entresacadas de las obtenidas a lo largo de esta investigación, así como un conjunto de recomendaciones, de carácter práctico para los problemas tratados, que consideramos pueden ser de extrema utilidad en futuros proyectos y trabajos de investigación.

Vibraciones

- Las frecuencias de las vibraciones producidas por voladuras oscila, en general, de 3-50 c.p.s. para las voladuras de excavaciones a cielo abierto y, de 10-500 c.p.s., para las voladuras en excavaciones subterráneas. Resulta necesario advertir que dicho rango corresponde a los registros de la velocidad de partícula, ya que si el parámetro medido es la aceleración los valores de la frecuencia son mucho mayores.
- Definido el parámetro a medir, según el criterio elegido, y conocido el rango de frecuencias que se va a producir, debe elegirse un equipo de registro en consonancia con esas características. Para ello será necesario tener muy en cuenta la frecuencia de resonancia y rango, de las más mas, que pueda registrar.
- Previamente a la ejecución de una campaña vibrográfa resulta conveniente examinar la zona de estudio y fijar los F.D. que se quieren medir, así como definir para lo

da la campaña cuál va a ser la componente longitudinal, la vertical y la transversal.

- En la ejecución de toda campaña vibrografa debe prestar se especial atención al anclaje de los geófonos, ya que un mal anclaje de los mismos puede arruinar toda la cam paña.
- Asimismo deben medirse, en cada punto, las tres componentes o, en su caso, las que claramente puedan afectar más desfavorablemente a la estructura.
- Para un análisis que nos proporcione cierto grado de re presentatividad de las características de las leyes de propagación de la zona, consideramos que, como mínimo, deben tomarse 8 medidas para cada componente.
- En un análisis general de la zona, las medidas deben to marse de un modo aleatorio en su orientación con respec to a la voladura. Por el contrario, si existe una orientación preferente dichas medidas han de tomarse según di cha dirección.
- El nivel de la vibración generada por una voladura es - independiente de la carga total, y únicamente depende - de la carga instantánea detonada.
- Se ha comprobado que la influencia ejercida por el tipo de iniciación de esa máxima carga instantánea es practi camente nula para los tipos de detonadores actualmente existentes en nuestro país. Únicamente debe merecer es-pecial atención cuando el intervalo de tiempo entre ti-ros sea más corto de lo normal, lo cual puede dar lugar a superposición de ondas.
- Se ha constatado la reducción del nivel de vibración - por la intercalación de una fractura entre la voladura

y el punto de medida, si bien dicha reducción depende rá de la naturaleza de la misma.

- Cuando se emplea la técnica de precorte para originar dicha fractura, debe tenerse muy en cuenta no detonar una carga instantánea superior a la que posteriormente se va a detonar en la voladura principal.
- Apreciación de una reducción del nivel de vibración - cuando las ondas se ven obligadas a propagarse por el interior de la masa rocosa o suelo, antes de manifestarse o dar lugar a las ondas superficiales. Dicha reducción dependerá de la distancia y de la capacidad - del material para absorber energía.
- Tanto en las voladuras dadas, de cargas normales, en excavaciones a cielo abierto como en las subterráneas, la estabilidad de las estructuras conformadas en la mis-ma corteza terrestre (taludes, tuneles, etc) no parece que puedan ser afectadas por los efectos ejercidos por la voladura. Sin embargo, si debe merecer especial atención los efectos producidos por acciones repetiti-vas y, naturalmente, cuando se produzca la detona-ción de una carga fuera de lo normal.
- Finalmente, en cuanto a los criterios de daños, aunque existen aportaciones nuevas que aconsejan disminuir - el nivel de vibración permisible, consideramos que, en general, los límites establecidos por el U.S. Bureau of Mines, $V \leq 50,8 \text{ mm/sg}$, para las estructuras superfi-ciales, y por la ASCE, $V \leq 125 \text{ mm/sg}$, para excavacio-nes subterráneas son bastante adecuados a falta de una consideración más particularizada del problema.

00211

Precorte

Se recomienda:

- De acuerdo con las exigencias de un precorte técnicamente correcto, evitando, sobre todo, el exceso de fracturación, debe determinarse el grado de confinamiento más idóneo.
- Determinar el espaciamiento óptimo para dicho grado de confinamiento.
- Considerar la existencia de un estado tensional, "in situ", fundamentalmente en excavaciones subterráneas, y la orientación del precorte respecto a las direcciones principales de tensiones.
- Aplicar técnicas adecuadas para favorecer el despegue - del material a lo largo de la línea de precorte, cuando exista un estado tensional desfavorable.
- Realizar un análisis cuantitativo, previo a toda ejecución de los ensayos, con el fin de obtener una aproximación a la solución real, y a partir de la cual hemos de movernos en la ejecución de los ensayos.
- Investigar las posibilidades de determinación de las direcciones de las tensiones principales máximas.