

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

**DETERMINACION DE PARAMETROS
ELASTICOS DE LAS ROCAS ENCAJANTES DE
EXPLOTACIONES CARBONIFERAS PARTIENDO
DE MEDIDAS DE LA VELOCIDAD SISMICA
EN LABORATORIO**

MEMORIA



INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

704

00704

El presente estudio ha sido realizado por
GEOMECANICA, S.A., en régimen de contrata
ción por la División de Geología aplicada
a la Ingeniería, del INSTITUTO GEOLOGICO
Y MINERO DE ESPAÑA.

1 9 8 2

DETERMINACION DE PARAMETROS ELASTICOS DE LAS ROCAS
ENCAJANTES DE EXPLOTACIONES CARBONIFERAS PARTIENDO
DE MEDIDAS DE LA VELOCIDAD SISMICA EN LABORATORIO

M E M O R I A

DETERMINACION DE PARAMETROS ELASTICOS DE LAS ROCAS ENCAJANTES DE
EXPLOTACIONES CARBONIFERAS PARTIENDO DE MEDIDAS DE LA VELOCIDAD
SISMICA EN LABORATORIO

- M E M O R I A -

1.- INTRODUCCION

2.- SELECCION Y CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS

2.1.- Muestras de pizarra

2.2.- Muestras de arenisca media a fina

2.3.- Muestras de arenisca de grano muy fino

3.- METODOLOGIA EMPLEADA

3.1.- Ensayos dinámicos de laboratorio

3.1.1.- Equipo utilizado

3.1.2.- Confeccionado de las probetas

3.1.3.- Pegado de las cabezas

3.1.4.- Determinación de los tiempos de recorrido

3.1.4.1.- Ondas de compresión

3.1.4.2.- Ondas de corte

3.2.- Tiempo de paso a través de las cabezas

3.3.- Cálculo de las constantes elásticas

4.- ENSAYOS DE VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LAS ONDAS ELASTICAS

4.1.- Calibrado de las cabezas

4.2.- Aplicaciones técnicas a partir de la velocidad de propagación

4.3.- Cálculo de las velocidades de propagación en probetas

4.3.1.- Velocidad en las pizarras

4.3.2.- Velocidad en las areniscas de grano medio a fino

4.3.3.- Velocidad en las areniscas de grano muy fino

5.- CALCULO DE LAS CONSTANTES ELASTICAS DINAMICAS

5.1.- Constantes elásticas en las pizarras

5.2.- Constantes elásticas en las areniscas de grano medio a fino

5.3.- Constantes elásticas en las areniscas de grano muy fino

6.- CONCLUSIONES

7.- BIBLIOGRAFIA

- A N E J O S -

ANEJO I.- DESCRIPCION DE LAS PROBETAS ENSAYADAS

ANEJO II.- FOTOGRAFIAS DE LAS LLEGADAS DE ONDAS "P" Y "S"

ANEJO III.- RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE PROPAGACION DE ONDAS ELASTICAS EN
LABORATORIO

DETERMINACION DE PARAMETROS ELASTICOS DE LAS ROCAS ENCAJANTES DE
EXPLOTACIONES CARBONIFERAS PARTIENDO DE MEDIDAS DE LA VELOCIDAD
SISMICA EN LABORATORIO

1.- INTRODUCCION

El Instituto Geológico y Minero de España, como centro investigador de los temas relacionados con la minería, y ante el importante papel que ha de desempeñar la minería del carbón en nuestro país, marcado recientemente por las directrices del Plan Energético Nacional, ha acometido el trabajo de efectuar la determinación de los parámetros elásticos de las fundamentales rocas encajantes que se presentan en las explotaciones carboníferas.

La determinación de parámetros elásticos por medio de medidas de velocidad sísmica de propagación en laboratorio, es un método sencillo en base a su carácter no destructivo y a la facilidad con la que se obtienen los resultados.

El conocimiento de las constantes elásticas de los materiales rocosos es esencial para abordar una caracterización de los

macizos rocosos, es decir su estado de alteración y fracturación, en base a las velocidades de propagación sísmica en los diferentes macizos; con las consiguientes aplicaciones que, en el caso de las explotaciones carboníferas, valen para efectuar de forma rentable y segura la explotación de las reservas de carbón.

Como paso previo a la exposición de los resultados obtenidos en este proyecto, se ha comentado de forma simplificada pero completa, la descripción, fundamento y funcionamiento de los equipos utilizados para la realización de los ensayos.

Así mismo se han expuesto las normas a las que se ha ajustado la confección de probetas, dada la importancia de poder contrastar los valores obtenidos en estudios realizados sobre otro tipo de probetas.

2.- SELECCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS

Las muestras utilizadas para llevar a cabo los ensayos de este trabajo se han tomado en la Cuenca Carbonífera Asturiana, paquetes Sotón y M^a Luisa, de los pozos de Samuño, Sotón y M^a Luisa, dado el amplio desarrollo que presentan los materiales carboníferos de la misma.

La elección de la Cuenca Central Carbónífera se ha realizado en base a su importancia productiva y a su representatividad dentro del carbónífero en nuestro país.

Dentro de las rocas encajantes, que están presentes en dichas explotaciones carboníferas, se han seleccionado pizarras y areniscas por ser los tipos más comunes que habitualmente se presentan como hastiales de las explotaciones.

Se han tomado muestras de tamaño bloque, en la cantidad suficiente, de los dos tipos de muestras seleccionadas, que permiten obtener un número de probetas suficiente para realizar los ensayos.

Es de resaltar igualmente el hecho de que en la selección de bloques se han tomado aquellos que no presentan diaclasas o discontinuidades, es decir, aquellos que presentan características de roca sana. Dado que la diferencia entre los ensayos en roca sana, a escala

de laboratorio, y los ensayos en un macizo rocoso, más o menos discontinuo, nos permiten deducir el grado de discontinuidades que presenta tal macizo.

2.1.- MUESTRAS DE PIZARRA

Dentro del amplio abanico de rocas que son conocidas como pizarras en la minería del carbón, las pizarras aquí seleccionadas corresponden al tipo de pizarra gris ligeramente limolítica, con aspecto de masivo a gruesamente estratificado. Además es de destacar que todo este tipo de muestras no presenta caracteres de esquistosidad.

La densidad media de las muestras ha sido calculada a partir de su determinación en cada una de las probetas ensayadas. Resultando un valor medio de 2.73 gr/cm^3 para este tipo de pizarras.

2.2.- MUESTRAS DE ARENISCA MEDIA A FINA

La selección de las muestras de este tipo corresponde a una arenisca de grano medio a fino, de tipo cuarcítico, que posee una característica textura en mosaico con los granos bien soldados entre si y con presencia de un cemento ligeramente carbonatado.

Estas areniscas presentan un aspecto masivo, y una densidad media calculada, a partir de los valores de cada una de las probetas ensayadas, de $2,69 \text{ gr/cm}^3$.

2.3.- MUESTRAS DE ARENISCA DE GRANO MUY FINO

Estas areniscas poligénicas de grano muy fino, de tipo cuarcítico, presentan algunos intraclastos carbonosos, son de aspecto masivo, y tienen una densidad media, calculada a partir de las muestras ensayadas, de $2,65 \text{ gr/cm}^3$.

3.- METODOLOGIA EMPLEADA

Para llegar a la determinación de las constantes elásticas de una forma dinámica, se ha efectuado un estudio previo de la transmisión, en el espacio y tiempo, de las ondas que se producen en un foco o hipocentro, y se transmiten en el interior de las muestras siguiendo las leyes del movimiento ondulatorio.

La realización de ese estudio ha permitido obtener las velocidades de propagación de las ondas primarias, de compresión u ondas P y de las ondas secundarias, de cizallamiento, u ondas S. Para lo cual se han confeccionado unas probetas, debidamente normalizadas, y con longitudes diferentes, sobre las que se han determinado las velocidades de propagación de los dos tipos de ondas ya mencionados.

Una vez conocidas esas velocidades, se han calculado los valores del coeficiente de Poisson y del módulo de elasticidad que presentan los distintos tipos de roca ensayados.

3.1.- ENSAYOS DINAMICOS DE LABORATORIO

Estos ensayos van encaminados a determinar las velocidades de propagación de las ondas P y S, en los materiales objeto de estudio, generadas por un cristal piezoeléctrico que golpea sobre una probeta.

Las ondas P son las que circulan a mayor velocidad por el interior de las probetas, y producen en el material compresiones y dilataciones en el sentido de avance.

Las ondas S, de menor velocidad que las P, producen en las partículas del material un movimiento transversal perpendicular a la dirección de avance de las ondas.

3.1.1.- Equipo utilizado

Se ha utilizado un equipo TERRAMETRICS que consta de:

- Generador de impulsos
- Cabeza inductora y receptora
- Osciloscopio de registro

En la figura nº 1 se representa un esquema del equipo utilizado en los ensayos de laboratorio.

El generador de impulsos utilizado proporciona una señal en forma de pico con una frecuencia dentro de la

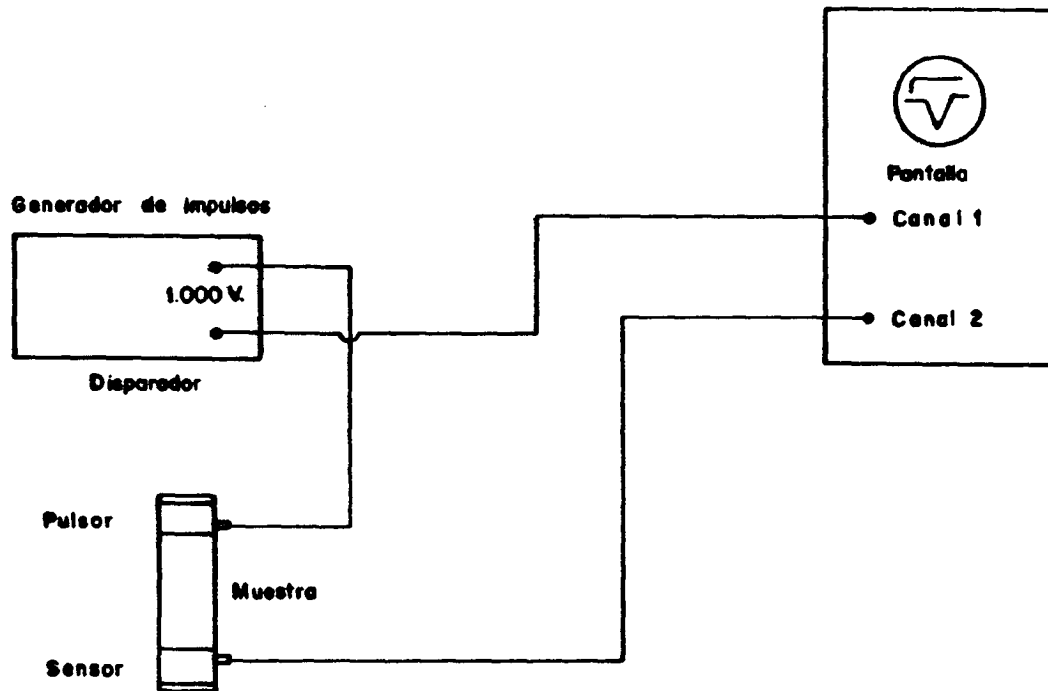


FIG. Nº 1.- EQUIPO PARA ENSAYO DE TRANSMISION DE IMPULSOS ELASTICOS.

banda de 30 a 120 ciclos por segundo y una tensión de 1000 voltios.

La frecuencia preferentemente usada en el ensayo es de 60 ciclos por segundo, ya que así se consigue una señal de salida de la probeta muy estable.

Las cabezas inductora y receptora son idénticas y están constituidas por un chasis metálico de aleación al magnesio, en el que está alojado un cristal piezo-eléctrico que, debido a las propiedades que presenta su red cristalina, responde con un cambio de forma ante una excitación eléctrica, y por lo tanto transforma el impulso del generador en un impulso de presión sobre la probeta.

En la figura nº 2 se representa un corte esquemático de una de las cabezas activas utilizadas en este tipo de ensayos.

Como la red cristalina de un cristal piezo-eléctrico se comporta de una forma reversible, ante un cambio de su forma genera una señal eléctrica y viceversa, las cabezas que se acoplan a las probetas siguen el mismo comportamiento, de manera que cualquiera de ellas puede utilizarse

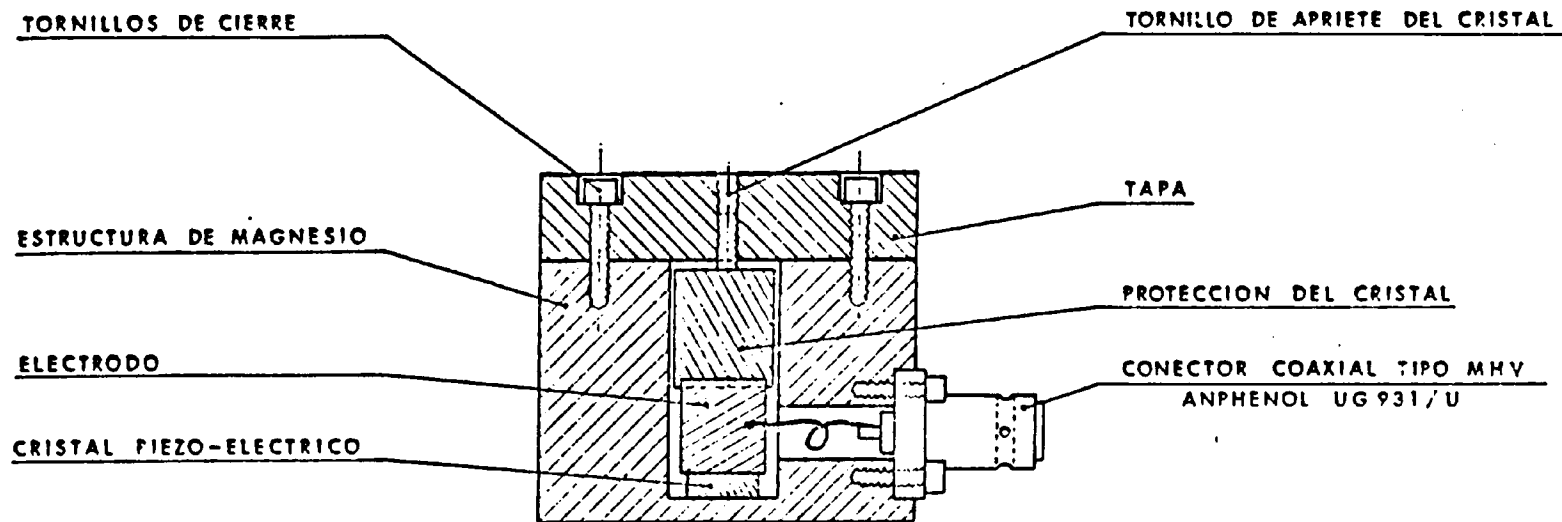


Fig. Nº 2 CABEZAS ACTIVAS PARA EL ENSAYO DE TRANSMISION
DE IMPULSOS ELASTICOS

como inductora de impulsos de presión sobre la probeta, o de receptora de impulsos transformándolos en una señal eléctrica que pasa al osciloscopio.

En el caso de las cabezas empleadas para generar ondas P (cabezas tipo P) la frecuencia de resonancia es de 600 KHz., mientras que las cabezas S tienen una frecuencia propia de 800 KHz.

Para la realización de todos los ensayos de este proyecto se han utilizado sólo cabezas S, ya que estas cabezas además de generar fundamentalmente ondas S, que permiten detectar su tiempo de llegada a la cabeza sensora, generan ondas P que, a pesar de su menor importancia, son fácilmente detectadas por ser las de primera llegada.

El osciloscopio utilizado dispone de dos canales, uno para el sincronismo con el generador de impulsos y otro para recibir impulsos de la probeta. Su escala de amplitud vertical opera con una sensibilidad tan pequeña como 0,02 voltios/cm y la velocidad de barrido puede llegar a 10μ seg/cm.

También existe la posibilidad de obtener medidas de las velocidades de propagación en probetas sometidas

a esfuerzos variables, para lo cual se colocan las cabezas y la probeta entre los platos de una prensa. Con ello se pretende reproducir las condiciones en que se encontraría la muestra "in situ", es decir, sometida a la presión que producen los materiales colindantes.

3.1.2.- Confeccionado de las probetas

La probeta a utilizar en el ensayo debe tener las caras planas con rugosidades menores de $\pm 0,001$ pulgada y el paralelismo de las bases debe estar acotado entre el valor de $\pm 0,005$ pulgadas por cada pulgada de longitud de la probeta.

De ahí que la obtención de las probetas a partir de las muestras seleccionadas, por perforación de testigos en las mismas, es seguida de un corte por sierra de los testigos, y un posterior pulimentado de sus bases con polvo de esmeril como abrasivo.

El contenido de humedad de las muestras afecta notablemente a la velocidad de propagación, por lo que hay que poner un especial cuidado en conservar las muestras

con su humedad natural. Por otra parte, las muestras pueden ser ensayadas también en estado seco y de saturación para obtener el rango de variación de las velocidades de propagación en función del contenido de humedad.

La relación entre la distancia a recorrer por los impulsos y la dimensión lateral, esbeltez, no debe exceder de 5 si se desea obtener un medio libre de obstáculos para la propagación.

Por otro lado, la dimensión lateral de las muestras debe ser como mínimo diez veces la longitud de la onda de compresión. También la longitud de onda de los impulsos debe ser como mínimo el doble del diámetro medio de los cristales de los minerales existentes en la roca.

La figura nº 3 muestra gráficamente estas limitaciones. Para cualquier valor particular de V_p/f , los valores admisibles del diámetro de las muestras deben estar por encima de la línea diagonal, mientras que los valores admisibles del diámetro de los cristales deben estar por debajo de esta línea.

En nuestro caso se han confeccionado un total de 20 probetas cilíndricas, descritas previamente a la reali

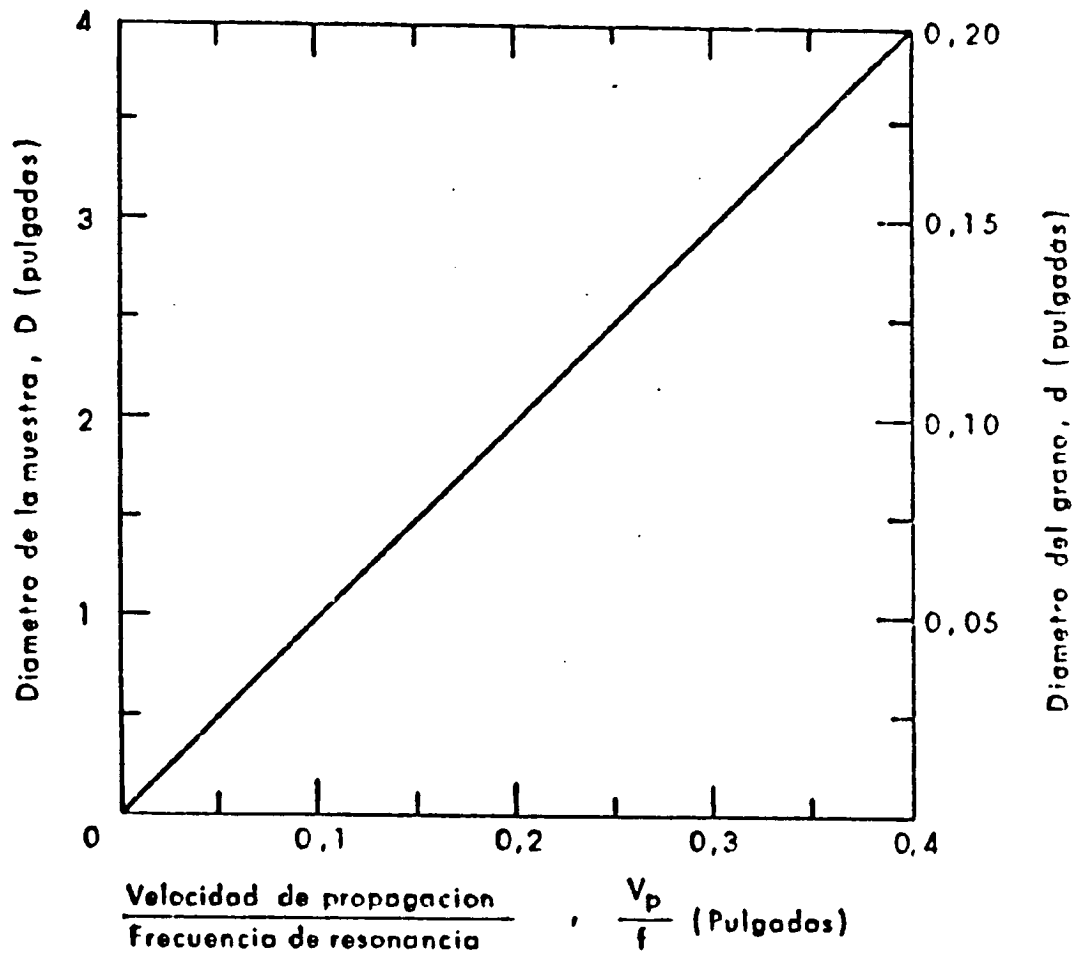


Fig. N° 3 LIMITACIONES DE DIMENSIONES EN EL ENSAYO DE PROPAGACION DE IMPULSOS ELASTICOS

zación de los ensayos tal como aparece en el Anejo nº 1, repartidas de la forma siguiente: 5 probetas de pizarra, 10 de arenisca de grano medio a fino, y 5 de arenisca de grano muy fino. Estando todas ellas sujetas a la norma tiva citada anteriormente.

3.1.3.- Pegado de las cabezas

El pegado de las cabezas sobre los extremos correspondientes de las probetas, se lleva a cabo por medio de pequeñas dosis de fenil salicilato. Este producto tiene la propiedad de que al calentarlo a una temperatura superior a 80°C se transforma a su estado líquido. Una vez distribuida una pequeña cantidad de fenil salicilato sobre la base pulimentada de la probeta o bien sobre la cabeza activa, se unen ambas partes no siendo necesario presionar fuertemente ambos elementos. El pegamento solidifica a los pocos segundos obteniendo una unión excelente.

Después del ensayo, la unión se destruye mediante un golpe seco sobre la probeta por medio de un martillo de madera.

3.1.4.- Determinación del tiempo de recorrido

El tiempo de recorrido de las ondas longitudinales y transversales, para una determinada probeta, depende de la longitud de esta, y de sus características físicas: densidad, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson. Que son resultado de la naturaleza de la misma y del estado físico en que se encuentra (grado de compacidad, índice de fracturación, etc...).

Para poder determinar el tiempo de recorrido de los impulsos a través de la probeta es necesario que el osciloscopio reciba en un canal una señal sincrónica con los impulsos suministrados a la probeta. De esta forma se tiene una referencia inicial de la generación de impulsos, dato este que es necesario para conocer el origen de tiempos.

3.1.4.1.- Ondas de compresión

Este tipo de ondas puede ser generado por cabezas del tipo P o del tipo S.

La llegada de las primeras ondas de compresión se determina muy fácilmente, ya que se caracteriza por una desviación de la línea recta que representa, en la pantalla del osciloscopio, la señal que pasa por la probeta (figura nº 4). Generalmente la polaridad es tal, que la primera desviación se realiza hacia la parte inferior de la pantalla. Con el fin de facilitar las medidas en la pantalla del osciloscopio, se debe ajustar siempre la amplitud vertical de la pantalla, de tal forma que los picos existentes sean lo más agudos posibles.

Debido a la inercia del sistema, el osciloscopio puede no detectar una pequeña fracción del tiempo inicial, del orden de $1\mu s$, pero esto no tiene importancia ya que este tiempo se incluye en la corrección del tiempo de paso del impulso por las dos cabezas activas.

3.1.4.2.- Ondas de corte

Para generar este tipo de ondas se utilizan cabezas del tipo S, que como se vió anteriormente también generan ondas P.

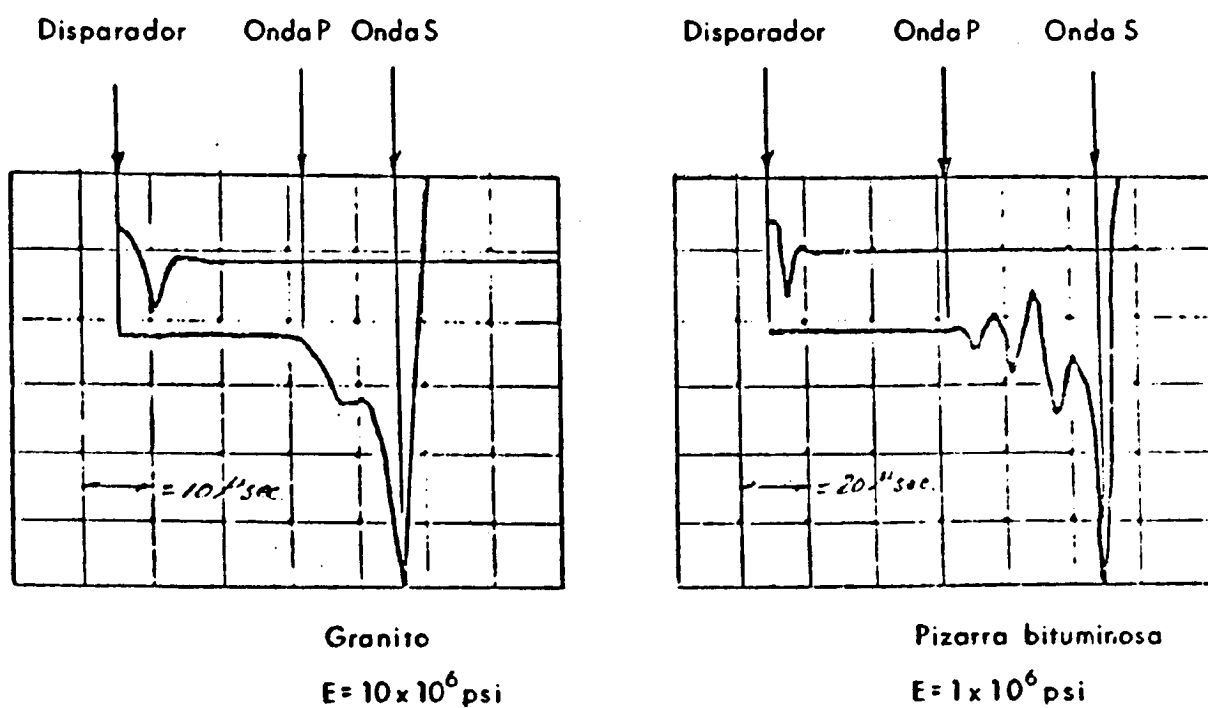


Fig. N° 4 TIPOS DE ONDAS OBTENIDAS EN EL ENSAYO DE PROPAGACION DE IMPULSOS ELASTICOS

La velocidad de propagación de las ondas P es siempre mayor que la de las S. De ahí que la primera llegada de las ondas de corte no es fácilmente detectada, ya que el cristal piezoeléctrico genera invariablemente ondas P que llegan antes que las ondas S. La señal que producen estas ondas P es idéntica a la descrita en el apartado anterior por esto las cabezas que generan ondas S pueden utilizarse también para medir ondas P, aunque la llegada de las ondas P esté algo más atenuada.

Poco después de la llegada de las ondas P a la cabeza detectora, llega la onda S, lo cual es acusado en el registro osciloscópico porque la señal produce una traza ascendente de gran amplitud, figura nº 4.

Dado que la onda S llega después de la onda P, no pueden utilizarse medidores electrónicos de tiempo para medir la llegada de las ondas S. El tiempo de recorrido de las ondas S se obtiene fácilmente midiendo desde el principio de la señal del osciloscopio hasta el principio de la traza ascendente de gran intensidad, hacia la parte superior del osciloscopio, que usualmente se iniciará en un punto de valle de la señal.

Algunas propiedades de las rocas, tales como: laminaciones, planos de estratificación, foliaciones, poros ..., producen variaciones en la forma de la onda que se recibe en el osciloscopio, que deben estudiarse en cada caso particular.

La orientación entre si de las cabezas activas también puede producir variaciones en la forma de las ondas, debido a que con los impulsos de corte se generan ondas transversales orientadas en una dirección particular. Naturalmente el cristal sensible está orientado dentro de la cabeza de tal forma, que la dirección de vibración de las ondas S que llegan, coincida con el eje de vibración del cristal, para que los impulsos mecánicos puedan convertirse en señales eléctricas sin pérdida de energía. para determinar la orientación más favorable es necesario realizar ensayos con diversas posiciones hasta obtener la situación más favorable.

3.2.- TIEMPO DE PASO A TRAVES DE LAS CABEZAS

Para obtener el tiempo real de paso a través de la probeta, es necesario efectuar una corrección debida al tiempo de recorrido de los impulsos por las cabezas activas. Es decir, este tiempo deberá restarse del tiempo total determinado en la pantalla del osciloscopio.

La determinación del tiempo de paso por las cabezas puede hacerse siguiendo dos procedimientos.

En primer lugar pueden pegarse directamente las dos cabezas entre si y registrar el tiempo de paso a través de las mismas.

Un segundo procedimiento, de mayor precisión consiste en medir el tiempo de recorrido de varias probetas con distintas longitudes. Efectuando a continuación una correlación lineal de los valores del tiempo de paso sobre las longitudes de las probetas. El tiempo de paso por las cabezas, obtenido por extrapolación, será el correspondiente a una distancia nula.

3.3.- CALCULO DE LAS CONSTANTES ELECTRICAS

Para el cálculo de las constantes elásticas se admite la hipótesis de que las probetas se comportan con las características de un material isótropo. Si esto no se cumple, lógicamente, pueden cometerse errores en la determinación de los parámetros elásticos.

A partir de las velocidades de propagación de las ondas P, V_p , de las ondas S, V_s y de la densidad de los respectivos materiales ensayados se han calculado las constantes elásticas: módulo de cizallamiento, coeficiente de Poisson y módulo de elasticidad, por medio de las fórmulas siguientes:

- Módulo de cizallamiento: $G_d = \rho V_s^2$

- Coeficiente de Poisson: $\nu_d = \frac{(V_p^2 - 2 V_s^2)}{2 (V_p^2 - V_s^2)}$

- Módulo de elasticidad: $E_d = 2G (1 + \nu_d)$

4.- ENSAYOS DE VELOCIDAD DE PROPAGACION

Estos ensayos representan el primer paso para poder efectuar el cálculo de las constantes elásticas por medio de las fórmulas dadas en el apartado 3.3.

La determinación de las velocidades de propagación requiere efectuar medidas del tiempo de paso de las ondas elásticas a través de las probetas de ensayo, para lo cual es necesario conocer previamente el tiempo de paso a través de las cabezas, adosadas a las mencionadas probetas, como se ha citado anteriormente.

4.1.- CALIBRADO DE LAS CABEZAS

El retardo debido al tiempo de paso a través de las cabezas se determina bien por el pegado de las cabezas entre si, o en base a las medidas de los valores de los tiempos de propagación en ensayos con probetas de longitudes diferentes. Estos valores han permitido efectuar una correlación, del tipo lineal, de los tiempos de paso sobre las longitudes de las probetas, u por extrapolación para una longitud nula de probeta, nos ha permitido establecer el tiempo de paso a través de las cabezas activas adosadas a las probetas.

La calibración de las cabezas P y S ha sido establecida de la forma siguiente:

- CALIBRADO DE LAS CABEZAS TIPO "P"

La correlación efectuada con los valores que se adjuntan en la tabla nº I nos ha llevado a una correlación lineal de ecuación $Y = 4,291 + 5,103 X$, y con un coeficiente de correlación $r = 0,997$. (Figura nº 5).

El valor correspondiente a una longitud nula de probeta ($X = 0$), ha resultado ser $Y = 4,291 \cdot 10^{-6}$ segundos, que a efectos prácticos se ha tomado como $Y = 4,29 \cdot 10^{-6}$ segundos.

TABLA Nº I

LONGITUD DE LA PROBETA EN CM. (X)	TIEMPO DE PASO EN 10^{-6} seg. (Y)
5,86	33
5,01	31
4,98	30
3,47	22
1,63	14
1,57	12
0,95	8,6
0,68	8,0

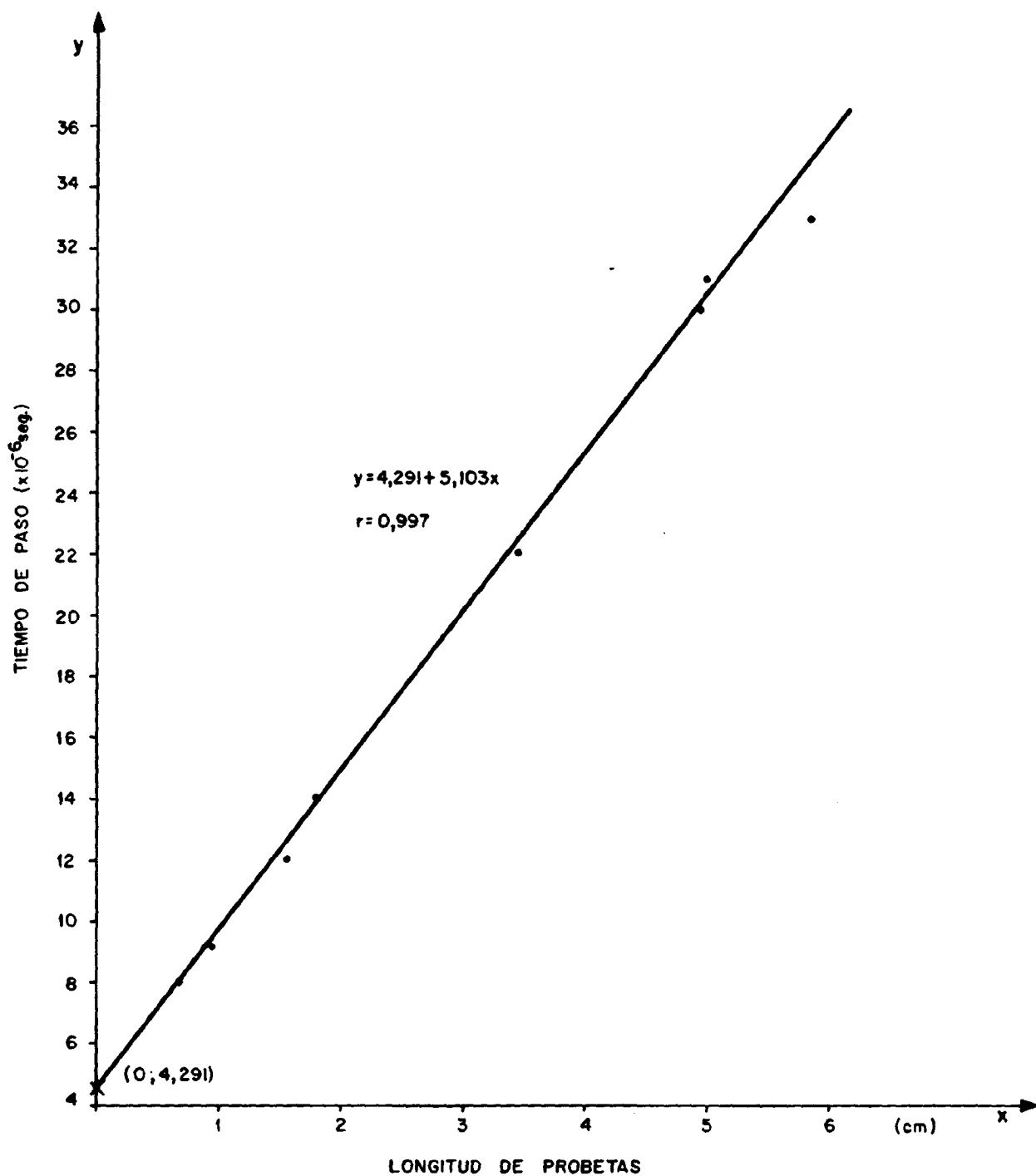


FIG. Nº 5.- REGRESION DE LOS VALORES DEL TIEMPO DE PASO, SOBRE LAS LONGITUDES DE LAS PROBETAS CON CABEZAS TIPO "P."

- CALIBRADO DE LAS CABEZAS TIPO "S"

La correlación efectuada con los valores que se adjuntan en la tabla nº II nos ha llevado a una correlación lineal de ecuación $Y = 5,31 + 5,11 X$, con un coeficiente de correlación $r = 0,998$ (figura nº 6).

Para una longitud nula de probeta ($X = 0$), el tiempo de paso a través de las cabezas activas es de $Y = 5,31 \cdot 10^{-6}$ seg.

TABLA Nº II

LONGITUD DE LA PROBETA EN CM. (X)	TIEMPO DE PASO EN 10^{-6} seg. (Y)
5,86	35
5,01	31
4,98	31
3,47	24
1,83	14
1,57	13
0,95	10,5
0,68	8,8

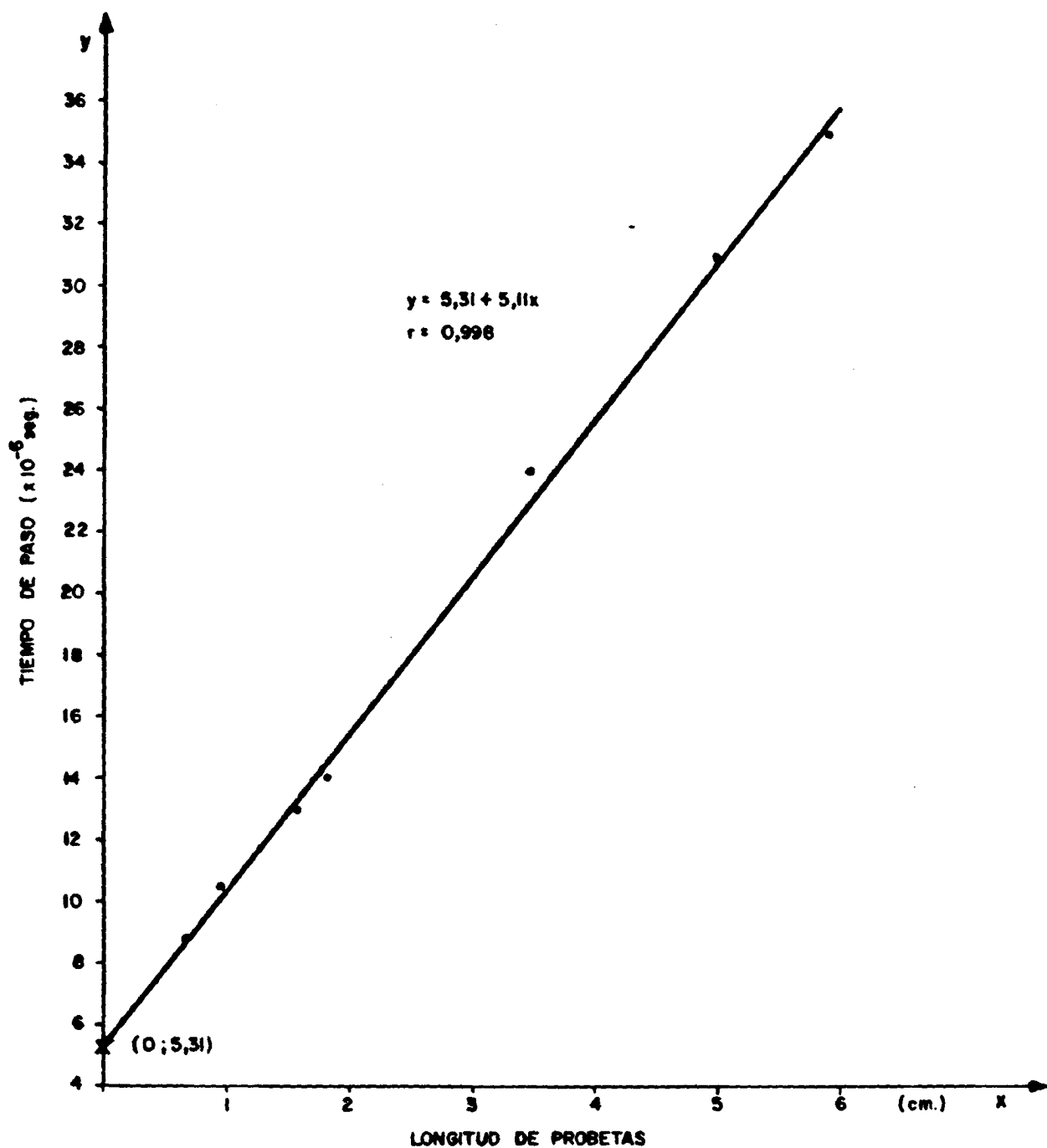


FIG. N° 6.- REGRESION DE LOS VALORES DEL TIEMPO DE PASO, SOBRE LAS LONGITUDES DE LAS PROBETAS CON CABEZAS TIPO "S"

4.2.- APLICACIONES TECNICAS A PARTIR DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACION

Dentro de este apartado se recogen las posibilidades de cuantificación de las discontinuidades en las rocas y en los macizos rocosos a partir de los valores de velocidad de propagación.

Los ensayos de velocidad sísmica de propagación sobre las probetas instrumentadas, son determinaciones a escala muy reducida en comparación al comportamiento a la escala de los macizos rocosos. De ahí que estos últimos valores sean, en general, inferiores a los determinados en laboratorio, debido a la presencia de discontinuidades dentro del macizo.

Las velocidades de propagación en este tipo de ensayos puede ser comparada con una velocidad teórica, calculada según la proporción y velocidad de propagación de los monocristales presentes en cada muestra, es decir sin tener en cuenta la presencia de discontinuidades. Trabajos de este tipo han sido realizados en la URSS por Aleksandrov, que ha definido un índice de calidad de las muestras según la expresión:

$$IQ(\%) = 100 \frac{V_{PE}}{V_{PC}} \quad \text{donde,}$$

V_{PE} es la velocidad de propagación de las ondas "P" en la muestra ensayada.

V_{PC} es la velocidad de las ondas "P" calculada según la composición mineralógica de la muestra ensayada.

Este índice varía de 0 a 100, correspondiendo el 100% a una roca ideal perfecta.

De esta forma se consigue detectar y cuantificar las discontinuidades que presenta la muestra o testigo de roca.

Se ha comprobado experimentalmente que las variaciones de la velocidad de propagación de las ondas, en función de la presencia de discontinuidades, no son las mismas cuando se trata de poros que cuando se trata de fisuras.

La figura nº 7 muestra las variaciones de esta velocidad, V_{PE} , en función de la porosidad total de las rocas (n), que incluye tanto la debida a fisuras como la de los poros.

Sobre esa figura se aprecia que cada familia de rocas posee una ley particular de regresión de V_{PE} sobre n :

a) Según el tipo de discontinuidades

- poros para las areniscas y calizas no deformadas, y fisuras para las rocas eruptivas inalteradas.

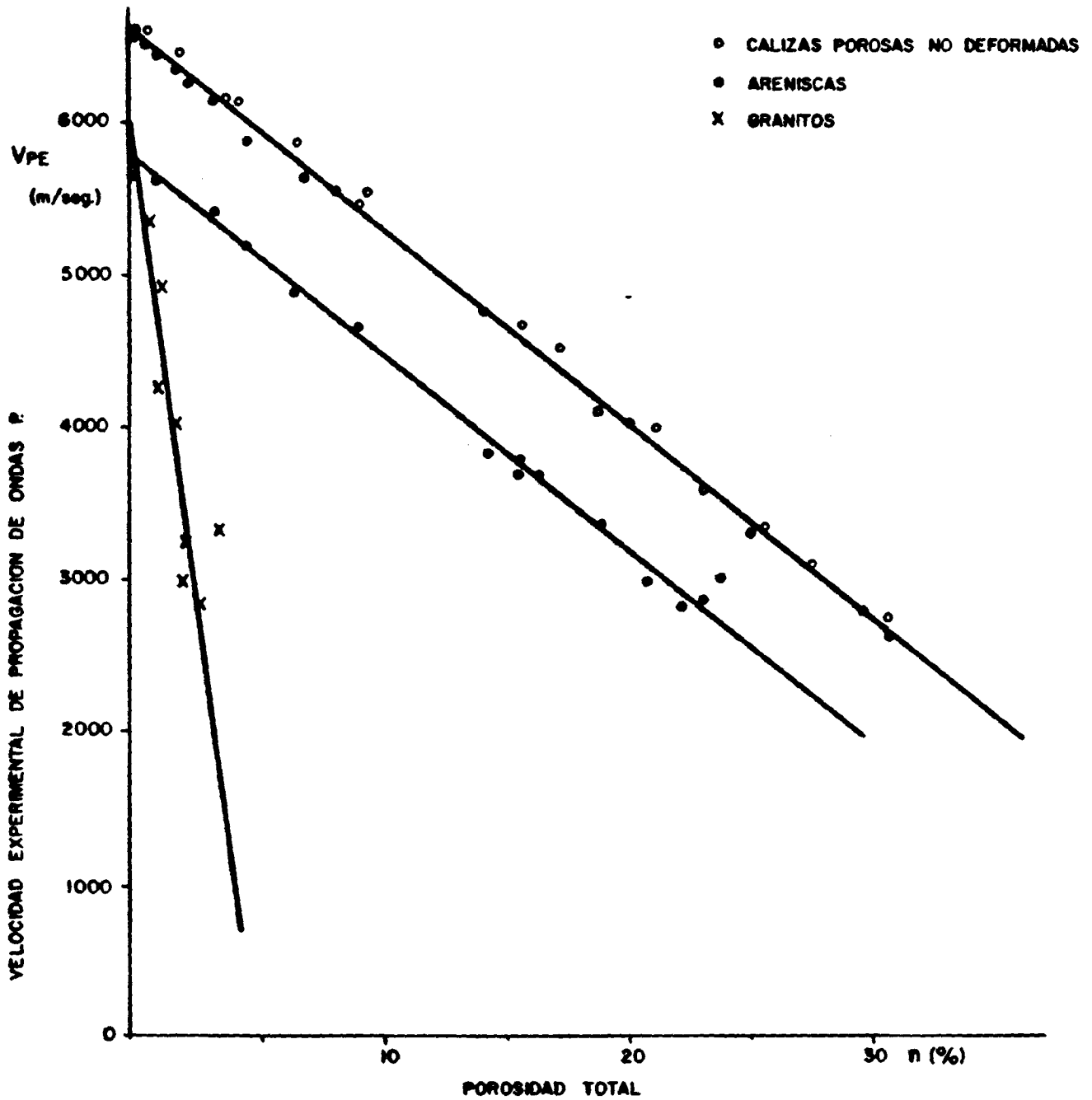


FIG. N° 7.- RELACIONES ENTRE LA POROSIDAD TOTAL Y LA VELOCIDAD DE LAS ONDAS P EN LAS ROCAS POROSAS (areniscas y calizas), Y EN LAS ROCAS FISURADAS (granitos).

b) Según su naturaleza mineralógica

- las velocidades límites son diferentes para las rocas próximas a su estado perfecto ($n = 0$).

Una simplificación del diagrama de la figura nº 7 se obtiene al situar en ordenadas el índice de calidad IQ antes definido, en lugar del valor de las velocidades ensayadas (V_{PE}). Así se consigue que todas las rocas en estado perfecto tomen el mismo valor de $IQ = 100\%$, cualquiera que sea su naturaleza mineralógica. (Figura nº 8).

En esta última figura se comprueba que todos los puntos representativos de las rocas se sitúan en el plano índice de calidad-porosidad, en el interior de un dominio limitado: a la izquierda, por la ley de regresión del índice de calidad en función de la porosidad para medios fisurados, y a la derecha, por la ley para medios porosos.

En el interior de este dominio se ha comprobado que los efectos de los poros y de las fisuras eran acumulativos. De esta forma una arenisca porosa, fisurada experimentalmente por calentamiento, se desplaza de un modo prácticamente paralelo a la ley de los medios fisurados, así como un granito poco

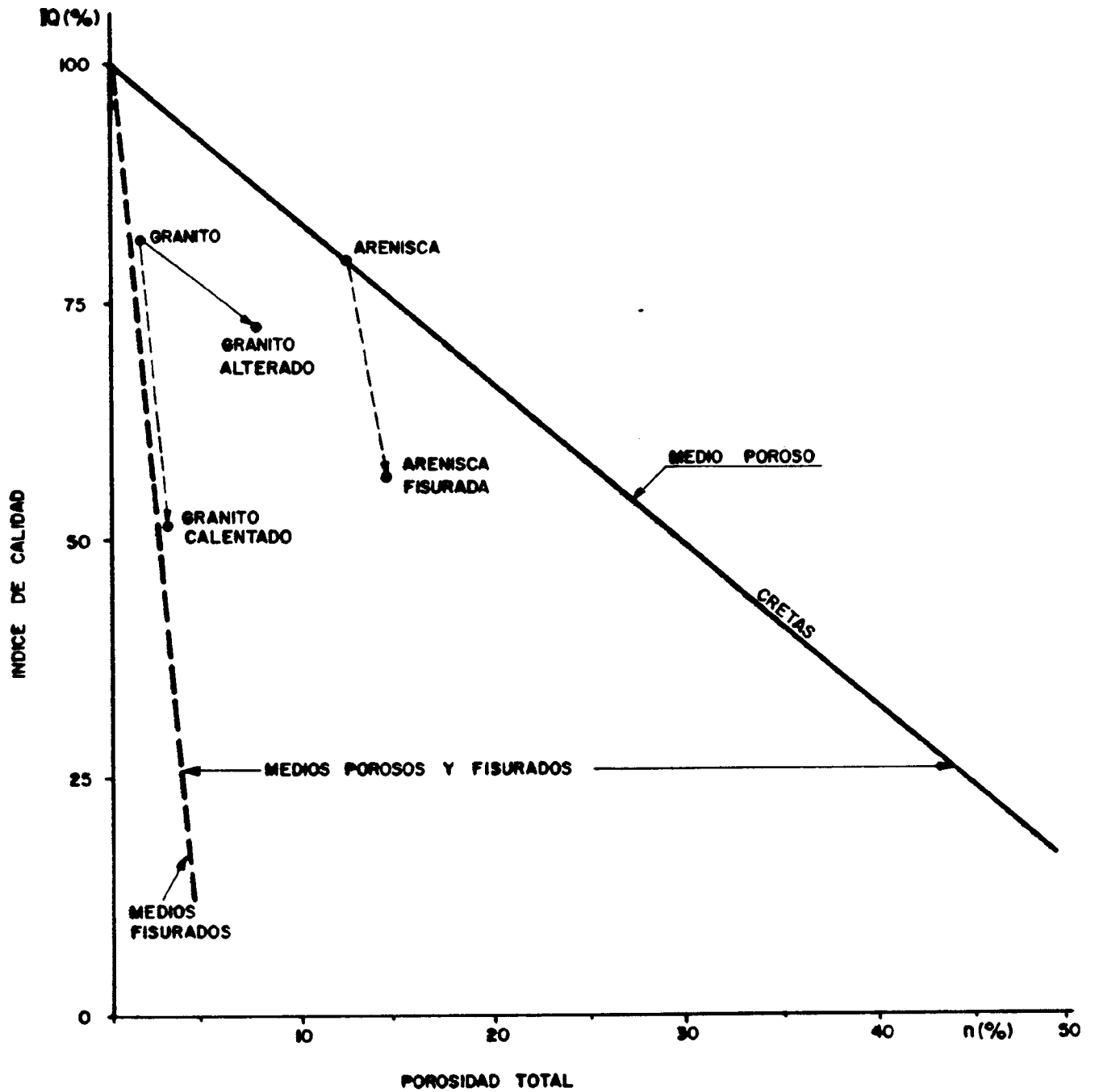


FIG. Nº 8.- DESCRIPCION DE LA POROSIDAD CON AYUDA DEL INDICE DE CALIDAD.

fisurado, cuya fisuración se aumenta por calentamiento, se desplaza de la misma forma; mientras que por el contrario, cuando se pasa de facies sana a facies alterada, de un mismo granito, el desplazamiento es paralelo a la ley de los medios porosos.

El diagrama de la figura nº 8 se convierte así en un ábaco sobre el cual, a partir de los valores del índice IQ y de la porosidad total n, se pueden determinar los valores respectivos de la fisuración n_f y de los poros n_p (figura nº 9).

Es de señalar también, que la presencia de agua en los poros no modifica prácticamente el valor de la velocidad de propagación en los ensayos (v_{PE}); en cambio la presencia de agua en las microfisuras entraña un aumento de la velocidad de propagación ($v_{PEW} > v_{PE}$) proporcionalmente al volúmen de las fisuras n_f , probablemente por el papel de las tensiones superficiales en las fisuras más estrechas. Esto, por supuesto, no se observa más que en el caso de rocas de porosidad abierta, y sólo pone en evidencia las fisuras de escasa abertura.

En el ábaco de la figura nº 10 se expresa, según el tipo de las discontinuidades presentes en la roca, la variación relativa de los valores del índice de calidad en estado saturado IQ_w en función del índice de calidad en estado seco IQ.

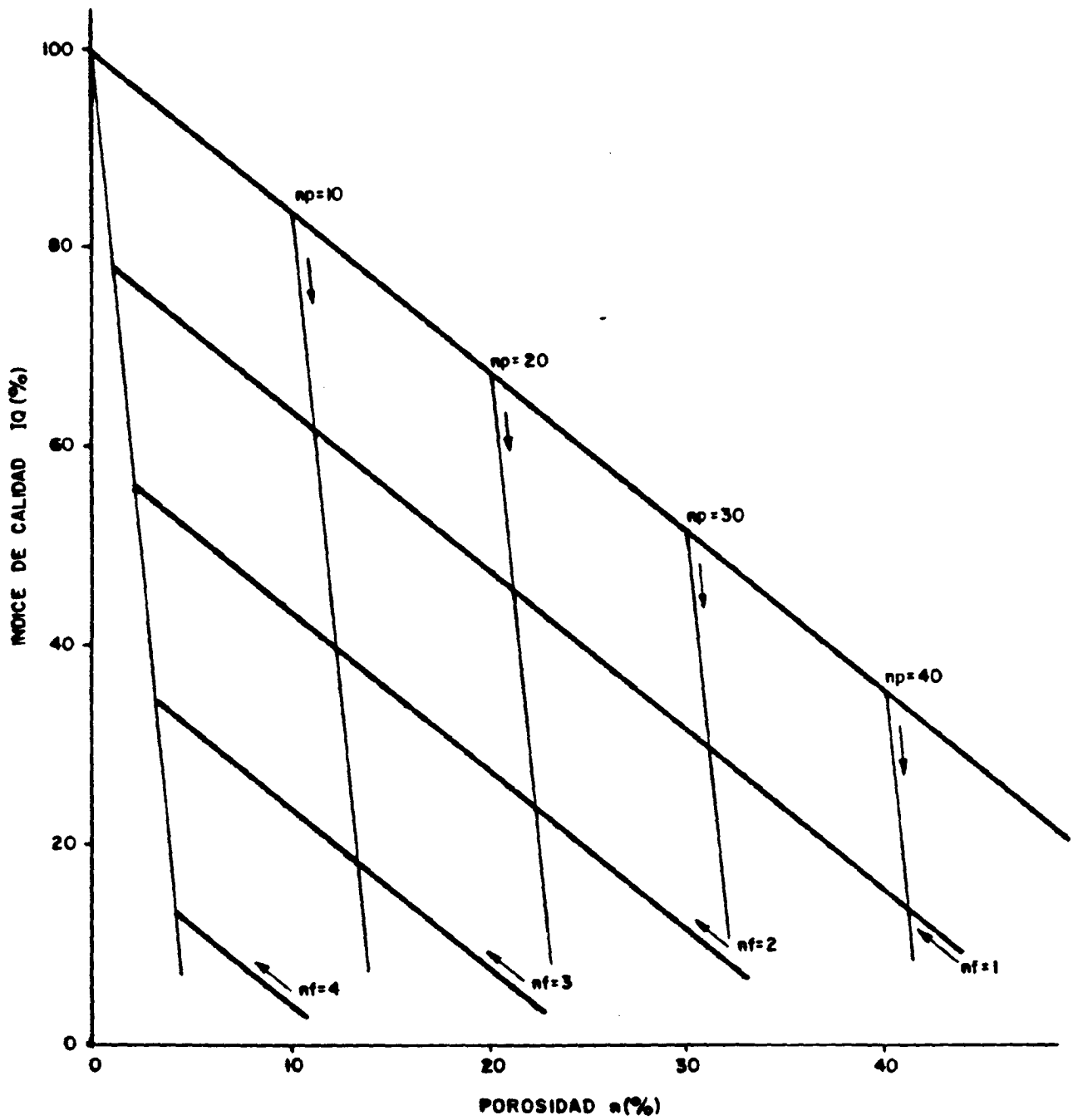


FIG. N° 9.- ABACO PARA LA DETERMINACION DEL VOLUMEN DE POROS n_p Y DE LA SUMA DE ABERTURAS DE FISURAS, n_f , A PARTIR DE LOS VALORES DE IQ Y DE n .

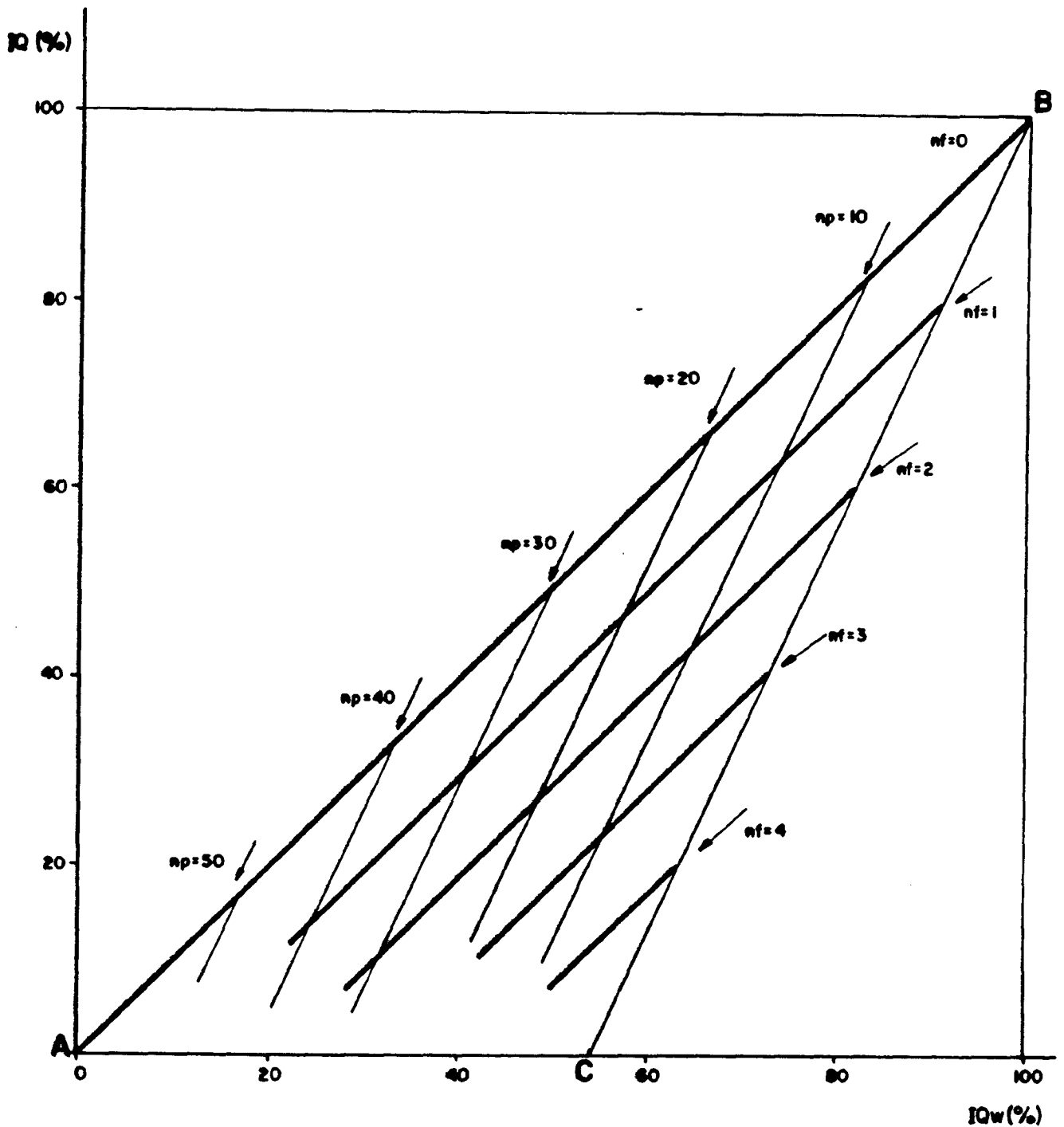


FIG. Nº 10.- ABACO PARA LA DETERMINACION DEL VOLUMEN DE POROS n_p , Y DEL DE FISURAS n_f , A PARTIR DE LOS VALORES DEL INDICE DE CALIDAD DE LA ROCA EN ESTADO SECO I_Q , Y EN ESTADO SATURADO, I_{Qw} .

Sobre esta última figura se observa que los valores de IQ e IQ_w son iguales para los medios porosos; estando los puntos representativos de estas rocas sobre la bisectriz AB , más o menos alejados del origen A según la importancia de su volumen de poros.

En los medios fisurados el valor de IQ_w es mayor que IQ , permaneciendo invariable la diferencia $IQ_w - IQ$ para una fisuración, nf , constante.

Cuando se fisura una roca, intacta o porosa, su punto representativo se desplaza sobre el diagrama a partir de un punto de la bisectriz AB , hacia abajo, paralelamente a la recta BC (ley de medios fisurados).

4.3.- CALCULO DE LAS VELOCIDADES DE PROPAGACION EN PROBETAS

A partir de los tiempos de llegada de las ondas P y S , tal como queda reflejado en las fotografías del Anejo II, y de las longitudes que presentan las respectivas probetas ensayadas, se han calculado las velocidades de propagación, cuyos valores quedan reflejados en el Anejo III.

Los resultados presentes se han clasificado en tres grupos distintos, de acuerdo con las diferencias litológicas que se observan en las probetas ensayadas, dada la patente, y a la vez fácil, diferenciación de visu entre estos materiales.

4.3.1.- Velocidad en las pizarras

Se han ensayado cinco probetas de pizarra, reseñadas dentro del Anejo III, sobre los que se han calculado las velocidades de transmisión de impulsos elásticos correspondientes a las ondas P y a las ondas S.

Del conjunto de valores obtenidos para las ondas longitudinales (V_P) se ha obtenido el valor medio de $\bar{V}_P = 4,447$ m/seg, con un coeficiente de variación del 27.72%.

De la misma forma, el valor medio de las velocidades de propagación de las ondas S ha sido de 1619 m/seg, con un coeficiente de variación del 56,49%

Estos valores de velocidad presentan un alto coeficiente de variación sobre todo para la velocidad de propa

gación de ondas S, sin duda debido a la influencia del valor que presenta la muestra M.10 por las características de su elevado buzamiento en la estratificación.

Los valores aquí obtenidos caen dentro de los reseñados por la bibliografía consultada para las rocas sanas de este tipo.

4.3.2.- Velocidad en las areniscas de grano medio a fino

Se han ensayado diez probetas de este tipo, reseñadas en el Anejo III, sobre las que se calcularon las velocidades de transmisión de impulsos elásticos correspondientes a las ondas de tipo P y de tipo S.

La velocidad media de propagación de las ondas longitudinales, obtenida a partir del conjunto de valores de velocidad (V_p), ha sido de $\bar{V}_p = 5190$ m/seg, con un coeficiente de variación de 5,25%.

De la misma forma, el valor medio de las velocidades de propagación de las ondas S ha sido de 2964 m/seg, con un coeficiente de variación del 10,54%.

Del análisis de estos valores se desprende que, debido al moderado valor de los coeficientes de variación, los resultados son suficientemente representativos de la velocidad de propagación en este tipo de rocas cuando se presentan en estado sano. Estos valores también están en concordancia con los mencionados en la bibliografía consultada.

4.3.3.- Velocidad en las areniscas de grano muy fino

En el Anejo III se adjuntan los cuadros de los cinco ensayos, de propagación de impulsos elásticos tipo P y S, en las probetas de este tipo de material.

El valor medio obtenido para la velocidad de propagación de las ondas longitudinales (\bar{V}_P) ha sido de 5.162 m/seg, con un coeficiente de variación del 11,28%.

En el caso de las ondas transversales el valor medio de su velocidad de propagación ha resultado ser de $\bar{V}_S = 2.586$ m/seg, con un coeficiente de variación del 11,60%.

Del moderado valor que presentan los coeficientes de variación se desprende que los valores medios de las velocidades de propagación son suficientemente representativos para este tipo de rocas cuando se encuentran en estado sano. Es de señalar también que las velocidades obtenidas están en consonancia con las reseñadas en la bibliografía consultada.

5.- CALCULO DE LAS CONSTANTES ELASTICAS DINAMICAS

El cálculo de las constantes elásticas a partir de los valores de la velocidad de propagación de las ondas P y S se ha efectuado por aplicación de las fórmulas ya expuestas en el apartado 3.3, que son siempre aplicables bajo la hipótesis de comportamiento elástico de los materiales.

Esta cómoda obtención de las constantes elásticas de una forma no destructiva va orientada a un mejor conocimiento de los macizos encajantes de las capas de carbón, disminuyendo, por lo tanto, el grado de ignorancia en beneficio de la seguridad en las labores mineras.

5.1.- CONSTANTES ELASTICAS EN LAS PIZARRAS

Para las velocidades medias calculadas de $\bar{V}_P = 4447$ m/seg y $\bar{V}_S = 1619$ m/seg, el coeficiente de Poisson dado por la expresión

$$\nu_d = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} \quad \text{resulta ser:}$$

$$\nu_d = \frac{(4447)^2 - 2(1619)^2}{2(4447^2 - 1619^2)} = 0,42$$

A partir del valor de ν_d y de la densidad $\rho = 2,73 \text{ gr/cm}^3$, para este tipo de muestras se han calculado los valores de los módulos de cizallamiento y de elasticidad según las expresiones siguientes:

$$G_d = \rho V_S^2 = \frac{2,73 \cdot 10^3 \frac{\text{Kp}}{\text{m}^3} \cdot 1619^2 \left(\frac{\text{m}}{\text{seg}}\right)^2}{9,80 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}} = 730180564 \frac{\text{Kp}}{\text{m}^2} = 73018 \frac{\text{Kp}}{\text{cm}^2}$$

$$E_d = 2G_d (1 + \nu_d) = 2 \cdot 73018 \frac{\text{Kp}}{\text{cm}^2} (1 + 0,42) = 207.371 \frac{\text{Kp}}{\text{cm}^2}$$

5.2.- CONSTANTES ELASTICAS EN LAS ARENISCAS DE GRANO MEDIO A FINO

En este caso el coeficiente de Poisson obtenido para los valores de $\bar{V}_p = 5190 \text{ m/seg}$ y $\bar{V}_s = 2964 \text{ m/seg}$ ha sido:

$$\nu_d = \frac{V_P^2 - 2 V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} = \frac{5190^2 - 2 \cdot 2964^2}{2(5190^2 - 2964^2)} = 0,26$$

De igual forma que en el caso anterior y para una densidad media $\rho = 2,69 \text{ gr/cm}^3$ se han obtenido los siguientes valores de módulo de cizallamiento y del módulo de elasticidad.

$$G_d = \rho v_s^2 = \frac{2,69 \cdot 10^3 \frac{\text{Kp}}{\text{m}^3} \cdot 2964^2 \left(\frac{\text{m}}{\text{seg}}\right)}{9,80 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}} = 2411474106 \frac{\text{Kp}}{\text{m}^2} = 241147 \frac{\text{Kp}}{\text{cm}^2}$$

$$E_d = 2 G_d (1 + \nu_d) = 2 \cdot 241147 (1 + 0,26) = 607.690 \frac{\text{Kp}}{\text{cm}^2}$$

5.3.- CONSTANTES ELASTICAS EN LAS ARENISCAS DE GRANO MUY FINO

El coeficiente de Poisson obtenido para los valores de $\bar{v}_p = 5162 \text{ m/seg}$ y $\bar{v}_s = 2586 \text{ m/seg}$ ha resultado ser:

$$\nu_d = \frac{v_p^2 - 2 v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} = \frac{(5162)^2 - 2 (2586)^2}{2 (5162^2 - 2586^2)} = 0,33$$

Los valores de los módulos de cizallamiento y de elasticidad, para una densidad media $\rho = 2,65 \text{ gr/cm}^3$, se han calculado de la forma siguiente:

$$G_d = \rho v_s^2 = \frac{2,65 \cdot 10^3 \frac{\text{Kp}}{\text{m}^3} \cdot 2586^2 \left(\frac{\text{m}}{\text{seg}}\right)^2}{9,80 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}} = 1808326469 \frac{\text{Kp}}{\text{m}^2} = 180832 \frac{\text{Kp}}{\text{cm}^2}$$

$$E_d = 2 G_d (1 + \nu_d) = 2 \cdot 180832 (1 + 0,33) = 481013 \frac{\text{Kp}}{\text{cm}^2}$$

Estos resultados ofrecen un valor medio de las constantes elásticas, para las clases de rocas descritas, en consonancia con las generalmente reseñadas en la bibliografía, con un intervalo de variación mucho más limitado que el que se da en las publicaciones generales.

6. - CONCLUSIONES

El primer paso para la realización de este trabajo ha consistido en la toma de muestras en la Cuenca Central Carbonífera asturiana, pozos de M^a Luisa, Samuño y Sotón, dado el amplio desarrollo que presentan los materiales carboníferos en la misma.

La elección de la mencionada Cuenca Central se ha realizado en base a su importancia productiva y a su representatividad dentro del carbonífero en nuestro país.

Dentro de las rocas encajantes, que están presentes en las explotaciones carboníferas, se han seleccionado pizarras y areniscas por ser los tipos más comunes que habitualmente se presentan como hastiales de las explotaciones.

A partir de las muestras seleccionadas se ha confeccionado un total de 20 probetas cilíndricas, previamente descritas de cara a su posterior comportamiento, sobre las que se han realizado ensayos de velocidad de propagación de ondas elásticas en el laboratorio de mecánica de Rocas del Instituto Geológico y Minero de España.

Los resultados presentes se han clasificado en tres grupos distintos, de acuerdo con las diferencias litológicas que se observan en las probetas ensayadas, dada la patente, y a la vez fácil, diferenciación visual entre estos materiales.

La determinación de las velocidades medias de propagación de las ondas longitudinales y de cizallamiento en estos tres grupos de rocas ha sido:

	Pizarras	Areniscas grano medio-fino	Areniscas grano muy fino
\bar{V}_P (m/seg)	4447	5190	5162
\bar{V}_S (m/seg)	1619	2964	2586

A la vista de estos valores es de resaltar el mayor retraso que presentan las ondas S respecto a las P en las rocas menos cristalinas.

En base a las velocidades de propagación las constantes elásticas calculadas han sido:

	Pizarras	Areniscas grano medio-fino	Areniscas grano muy fino
Coéf. Poisson ν_d	0,42	0,26	0,33
Mod. Cizallam. Gd (Kp/cm ²)	73.018	241.147	180.832
Mod. Elastici. Ed (Kp/cm ²)	207.371	607.690	481.013

Los resultados obtenidos ofrecen un valor medio de las constantes elásticas en las rocas ensayadas que presentan un aspecto sano.

Esta cómoda y rápida obtención, por ensayos dinámicos, no destructivos, de los parámetros elásticos de las rocas va orientada a un mejor conocimiento de los macizos encajantes de las capas de carbón disminuyendo por lo tanto el grado de ignorancia en beneficio de la seguridad en las labores mineras.

BIBLIOGRAFIA

- ALEKSANDROV et al.

Calcul des constantes élastiques des roches d'après leur composition mineralogique. ZV Akad. Nank. SSSR, Serija Geol. N° 2. URSS.
Traduction LCPC N67-T 90.

- AVELINE, M. et al.

Résultats expérimentaux sur les relations entre la microfissuration et la vitesse de propagation des ultrasons dans les granites du Sidobre. Sc. de la Terre, tome IX. N° 4. p. 439-448 (1962-1963).

- FOURMAINTRAUX, D. et C. TOURENQ.

Propagation des ondes et continuités des roches, Symposium International de la S.I.M.R. sur la fisuration des roches.
Nancy, Octobre 1971.

- HAMON, P et P. MORLIER

Quelques propriétés relatives aux célérités d'ondes élastiques dans les solides poreux saturés, Revue de l'I.F.P. XXIV. N° 7-8
p. 879 - 892 (1969).

- KRONER

Calculs des constances d'elasticité des polycristaux à partir des constances des monocristaux, Z. Phys. Bd. 151 (1958)

- MERKULOVA

Mesure de la vitesse des ultra-sons dans certaines roches, Fizika Zemli, URSS. N° 5 (1965) (Trad. L.C.P.C. 66-T.80)

- MORLIER

Relation quantitative entre la fissuration et la célérité des ondes.
Revue de l'Industrie Minérale. NO. Sp. Mai 1968.

- SEED, H.B., ODRISS, I.M.

Soil moduli and damping factors for dynamic reponse analyses.