

**CIEMAT
DIRECCION DE TECNOLOGIA
DIVISION DE TECNICAS GEOLOGICAS**

**CARACTERIZACION DE MATERIALES DE
RELLENO Y SELLADO PARA
ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS
RADIOACTIVOS: BENTONITAS
ESPAÑOLAS**

**Por: P. Rivas, M.V. Villar, R. Campos, M.
Pelayo, P.L. Martín, P. Gomez, M.J.
Turrero, A.I. Hernández, J.S. Cozar y E.
Mingarro.**

Madrid. Abril 1.991

INDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCION

I. CARACTERIZACION PRELIMINAR Y SELECCION DE DOS ARCILLAS (YACIMIENTOS)

I.1. MUESTRAS ESTUDIADAS Y PREPARACION

I.2. PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS

I.2.1. Densidad

I.2.2. Límites de Atterberg e índice de plasticidad

I.2.3. Superficie específica

I.2.4. Compactabilidad

I.2.4.1. Compactación proctor

I.2.4.2. Compactación uniaxial

I.2.5. Selección de dos arcillas

II. CARACTERIZACION DE LAS DOS ARCILLAS PRESELECCIONADAS

II.1. MATERIALES UTILIZADOS

II.2. PREPARACION Y MANTENIMIENTO DE LOS MATERIALES

II.3. COMPACTABILIDAD

II.3.1. Compactación dinámica

II.3.1.1. Compactación por golpeo: Sistema manual

II.3.1.2. Compactación por golpeo: Sistema semiautomatico

II.3.2. Compactación estática

II.3.3. Influencia de la granulometria en la compactabilidad

II.3.4. Influencia de la proporción de arena de cuarzo en la densidad de las briquetas

II.3.5. Expansión de las briquetas en la descompresión y desmolde

II.3.6. Otras modalidades de compactación y puesta "in situ"

II.4. RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE

II.5. HINCHAMIENTO LIBRE Y PRESION DE HINCHAMIENTO

II.6. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA

II.6.1. Influencia de la temperatura en la conductividad hidráulica de la arcilla

II.7. CONDUCTIVIDAD TERMICA

II.7.1. Influencia de la densidad en la conductividad térmica de

los compactados de arcilla

- II.7.2. Influencia de la humedad en la conductividad térmica de los compactados de arcilla
- II.7.3. Influencia de la proporción de arena de cuarzo en la conductividad termica de los compactados
- II.7.4. Análisis de los efectos conjugados de la densidad, humedad y proporción de cuarzo sobre la conductividad térmica de los compactados

III. ANALISIS DE LA MODIFICACION POR TRATAMIENTO TERMICO DE LAS PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS

- III.1. REHIDRATACION EN LAS CONDICIONES DEL LABORATORIO DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A TRATAMIENTO TERMICO
- III.2. MODIFICACIONES TEXTURALES Y MICROESTRUCTURALES DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A TRATAMIENTO TERMICO
 - III.2.1. Transformaciones mineralogicas
 - III.2.2. Deshidratación de la montmorillonita y saponita sometidas a tratamiento térmico
 - III.2.3. Modificación de las propiedades: "Densidad, area superficial y textura de las arcillas sometidas a tratamiento térmico"
 - III.2.4. Parámetros de plasticidad de las arcillas sometidas a tratamiento térmico
 - III.2.5. Parámetros de hinchamiento de las arcillas sometidas a tratamiento térmico
 - III.2.6. Conductividad hidráulica de las arcillas sometidas a tratamiento térmico
 - III.2.7. Resistencia a compresión simple de las arcillas sometidas a tratamiento térmico
 - III.2.8. Temperatura límite

IV. CONSOLIDACION DE LAS ARCILLA: ENSAYOS EDOMETRICOS

V. RESISTENCIA DE LAS ARCILLAS AL ESFUERZO CORTANTE: ENSAYOS TRIAXIALES

- V.1. ENSAYO TRIAXIAL DRENADO

V.2. ENSAYO TRIAXIAL NO DRENADO, CON MEDIDA DE PRESIONES INTERS
TICIALES

VI. ANALISIS DE LA DIFUSIVIDAD DE SOLUCIONES EN LA MONTMORILLO-
NITA

VI.1. COEFICIENTES DE DISTRIBUCION DE ^{137}Cs y ^{60}Co

VI.2. ENSAYOS DE DIFUSION

VII. ISOTERMAS DE ADSORCION-DESORCION

VIII. CONCLUSIONES

IX. REFERENCIAS

INTRODUCCION

Entre las formaciones geológicas consideradas para alojar almacenamientos de residuos radiactivos de alta actividad se encuentran las rocas graníticas (rocas cristalinas) como una de las alternativas. Los almacenamientos en este tipo de rocas requieren la utilización de materiales específicos para el sellado del campo próximo del canister y el relleno de la obra de infraestructura minera realizada para el estudio de idoneidad del emplazamiento y construcción del almacenamiento.

La finalidad última de los materiales de relleno y sellado es contribuir a impedir o minimizar, durante miles de años, la incorporación de radionucleidos al medioambiente. Esta finalidad requiere que dichos materiales satisfagan diferentes funciones: sellado del habitáculo, amortiguación de esfuerzos, minimización de flujos de agua, transmisión de calor, creación de un ambiente físico-químico que minimice la corrosión del canister y la solubilidad de los radionucleidos almacenados y, en último término, retención de dichos radionucleidos.

La experiencia e investigación internacional de estos últimos años demuestra que los materiales bentoníticos satisfacen, en gran medida, los requerimientos indicados, una vez compactados a alta densidad.

La existencia en España de yacimientos bentoníticos de alta riqueza ha motivado los estudios de caracterización y selección que como objetivo de este proyecto, que se realiza bajo contrato con ENRESA.

Las zonas bentoníticas estudiadas corresponden a Cabo de Gata en Almería y a la Cuenca de Madrid. A partir de 13 muestras representativas de distintos yacimientos se ha realizado la preselección de las arcillas correspondientes a los yacimientos de la Serrata de Níjar (Almería) y del Cerro del Aguila-Cerro del

Monte (Toledo).

En este informe se recogen los trabajos realizados en el CIEMAT, hasta la fecha, sobre las propiedades físicas y comportamiento hidráulico y mecánico de estos materiales, se incluyen, por tanto, los resultados presentados en el informe preliminar de Enero de 1.990.

I. CARACTERIZACION PRELIMINAR Y SELECCION DE DOS ARCILLAS (YACIMIENTOS).

La caracterización preliminar y selección de dos arcillas se ha realizado en base a los parámetros de composición químico-mineralógica, plasticidad, superficie específica, compactabilidad y conductividad térmica, determinados sobre un total de 13 muestras correspondientes a distintos yacimientos de Cabo de Gata (Almería) y de la Cuenca de Madrid.

I.1. MUESTRAS ESTUDIADAS Y PREPARACION

Las referencias y procedencias de las muestras analizadas son las siguientes:

MCA-A	.....	Cerro del Aguila-Cuenca de Madrid.					
MCA-B	.....	"	"	"	"	"	"
MCA-C	.....	"	"	"	"	"	"
MSB-A	.....	Santa Bárbara	-	"	"	"	
MSB-B	.....	"	"	"	"	"	
MY-A	.....	Yuncos	-	"	"	"	
MY-B	.....	"	-	"	"	"	
E-5	.....	Morrón de Mateo (Escullos)-Almería.					
E-6	.....	"	"	"	"	"	
S-1	.....	Frente de Archidona (Serrata de Nijar)-Almería.					
S-2	.....	Frente de Archidona (Serrata de Nijar)-Almería.					
T-3	.....	Trancos Verdes-Almería.					
T-4	.....	"	"	"	"	"	

Las muestras recibidas de cantera, aproximadamente 200Kg por muestras, fueron ligeramente desecadas a unos 60°C durante 48 horas y molturadas a tamaño inferior a 2 mm. El total de muestra fué cuarteada en alícuotas de unos 25 Kg y distribuida a los laboratorios de CEA y CIEMAT.

Los contenidos en agua de las muestras después del proceso de preparación se indican en la Tabla I. Su determinación se ha realizado por desecación en estufa a 110°C durante 24 y 48h. La desecación se completa, prácticamente, en 24h como se deduce de los resultados. La humedad de las muestras variaba entre el 8,7% (S-2) y el 43,6% (MSB-B), lo que aconsejó desecar a 110°C para realizar los ensayos con humedades equivalentes.

Las distribuciones granulométricas obtenidas de la molienda se expresan en la Tabla II, en las Figs.1 y 2 se han representado los correspondientes usos granulométricos para las muestras de la Cuenca de Madrid y de Cabo de Gata-Almería. Con estas granulométrías se han realizado todos los ensayos de laboratorio.

I.2. PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS

I.2.1. Densidad

Se han determinado mediante pignómetro de He, sobre alícuotas de muestra total de unos 17 g, desecada bajo vacío durante 48 h a 105°C. Debido a la penetrabilidad del He, el volumen obtenido permite calcular la densidad teórica de la muestra.

El método de cálculo se basa en la aplicación de la ecuación de equilibrio de masas de gases:

$$V_s = V_c - V_e / [(P_1/P_2) - 1]$$

donde:

V_s = Volumen de la muestra.

V_c = Volumen de la celda de medida.

V_e = Volumen de expansión.

P_1 = Presión en la celda de medida.

P_2 = Presión de expansión.

El error esperado es del orden de 0,2%.

Los valores obtenidos se expresan en la Tabla III. La mayor parte de estos valores están comprendidos entre 2,3 y 2,5 g.cm⁻³ y sólo las dos muestras de Santa Bárbara (Cuenca de Madrid) presentan valores superiores, 2,77 g.cm⁻³ (MSB-A) y 2,74 g.cm⁻³ (MSB-B). Dado el interés de este parámetro, se realizarán nuevas determinaciones modificando la metodología.

1.2.2. Límites de Atterberg e índice de plasticidad

Sólo se han determinado los límites líquido y plástico. El límite líquido se ha obtenido mediante la cuchara de Casagrande aplicando la metodología descrita en la norma del Laboratorio Nacional del Transporte NLT 105/72. Para cada muestra se han obtenido entre 3 y 5 puntos, considerándose, como valor de dicho límite, la humedad de la muestra correspondiente a los 25 golpes.

El límite plástico se ha determinado de acuerdo con la metodología descrita en la norma NLT 106/72. Su valor se define por el de la humedad de la muestra en el momento de ruptura de los cilindros (3 mm ϕ) manufacturados.

El índice de plasticidad viene dado por la diferencia entre los dos límites antes indicados ($I_p = W_2 - W_p$) y define el rango de comportamiento plástico del material ensayado.

Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla III. Los valores más altos de plasticidad corresponden a las muestras de los yacimientos del Cerro del Aguila (Cuenca de Madrid) y de la Serrata de Nijar (Almería).

En el primero de ellos, Cerro del Aguila, el horizonte con mayor plasticidad es el representado por la muestra MCA-A en la que el índice de plasticidad alcanza un valor de 164,1% h. En el yacimiento de la Serrata el índice de plasticidad de la mues-

tra S-2, 155,9% h, es practicamente el doble que el de la muestra del mismo yacimiento S-1.

En la Fig.3 se han representado los resultados en el diagrama de plasticidad de Casagrande. En general las muestras tienden a ajustarse a la línea empírica, $A:Ip = 0,73 (W_L - 20)$, de clasificación de suelos. En este diagrama se ha representado el resultado de las dos determinaciones de límite líquido y plástico realizadas sobre cada una de las muestras. Dadas las características del ensayo, se considera que la dispersión de resultados no es excesiva y pueden considerarse aceptables los valores medios adoptados (Tabla III).

I.2.3. Superficie específica

El deficit de carga superficial de las especies minerales permite determinar la superficie activa de dichas especies en función de la cantidad de sustancia, de tamaño molecular conocido, superficialmente retenida.

La superficie específica se ha determinado con azul de metileno, según la metodología del test de la gota sobre papel de filtro. Para el cálculo de la superficie se ha considerado un área de $130 \text{ }^{\circ}2$ para la molécula de azul de metileno y un peso molecular de 319 g.

Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla IV. El rango de valores para las muestras de la Cuenca de Madrid está comprendido entre 150 y $385 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ los valores más altos corresponden a los distintos horizontes del yacimiento del Cerro del Aguila. En los yacimientos de Cabo de Gata (Almería) la mayor superficie corresponde del yacimiento de Serrata de Nijar ($Se > 515 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$)

I.2.4. Compactabilidad

I.2.4.1. Compactación proctor

Para tener una estimación rápida de la aptitud a la compactación de la totalidad de las arcillas estudiadas, se ha realizado el ensayo proctor normal según la metodología descrita en la norma NLT-107/76 en la modalidad de miniproctor: molde Harvard, maza de 0,5 Kg, altura de caída 20 cm, energía de compactación aproximada de $0,07 \text{ J/cm}^3$.

Los resultados se expresan en la Fig.4 para las arcillas de la Cuenca de Madrid y en la Fig.5 para las de Cabo de Gata (Almería).

En las arcillas de la Cuenca de Madrid se establece una diferencia neta entre las correspondientes al yacimiento de Santa Bárbara y el resto (Yuncos y Cerro del Aguila) en cuanto a la densidad seca conseguida. En las primeras el valor de densidad seca es inferior a 1 g.cm^{-3} para todas las humedades ensayadas, mientras que en el resto es siempre superior a 1. Las densidades secas más altas se consiguen con las muestras MCA-C del Cerro del Aguila y MY-B de Yuncos, aunque siempre inferiores a $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$.

La aptitud a la compactación establece también diferencias netas entre las arcillas de los tres yacimientos de Cabo de Gata. La mayor densidad seca se obtiene con las arcillas de la Serrata, alcanzandose valores próximos a $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ para humedades inferiores al 8%. Las densidades obtenidas son inferiores, en todo el rango de humedades ensayadas, para la arcilla de Escullos y se obtienen los valores mínimos con las correspondientes al yacimiento de los Trancos Verdes.

Ninguna de las trece muestras tiene una curva de compactación típica en la que quede bien definida la humedad óptima. La influencia de la humedad no es muy marcada y la tendencia general

es de aumento de densidad al disminuir la humedad.

La energía de compactación aplicada es insuficiente para la obtención de altas densidades.

I.2.4.2. Compactación uniaxial

Se ha realizado sobre las trece muestras en condiciones de humedad análoga, próxima al 10%, y mediante la aplicación de una carga constante de 1051 Kg cm^{-2} . Los resultados se expresan en la Tabla V y, en general, son congruentes con los obtenidos por compactación proctor. Entre las arcillas de Cabo de Gata se diferencian claramente las correspondientes a los tres yacimientos, alcanzándose densidades secas superiores a 2 g.cm^{-3} con las de Serrata de Nijar. Entre las de la Cuenca de Madrid las diferencias no son tan notables pero también se obtienen los valores más altos con las arcillas del Cerro del Aguila, especialmente con la muestra MCA-C ($1,99 \text{ g.cm}^{-3}$).

I.2.5. Selección de dos arcillas

Se han seleccionado las arcillas representadas por las muestras MCA-C (Cerro del Aguila-Cuenca de Madrid) y S-2 (Serrata de Nijar-Almería) como arcillas candidatas sobre las que se continúan las actividades de caracterización y selección de una arcilla, contempladas en el proyecto.

La selección se ha realizado en función de los valores de los parámetros anteriormente indicados, conductividad térmica y composición químico-mineralógica. Estos primeros valores de conductividad térmica obtenidos en el CEA y la composición químico-mineralógica realizada por CSIC, UAM y CIEMAT, están recogidos en informes específicos.

Los parámetros más significativos de las dos arcillas seleccionadas son los siguientes:

	Se	W_L	I_p	ρ	λ
	($m^2 g^{-1}$)	(%h)	(%h)	($g cm^{-3}$)	(w/m. °k)
MCA-C	336	188	118	1,99	1,07(15,5% W)
S-2	516	213	156	2,06	1,21(15,8% W)

II. CARACTERIZACION DE LAS DOS ARCILLAS PRESELECCIONADAS

Como se ha indicado en el Apartado I, se han seleccionado las arcillas S-2 que corresponde a la montmorillonita del yacimiento de la Serrata de Nijar (Almería) y la MCA-C que corresponde a la saponita del Cerro del Aguila-Cerro del Monte en la Cuenca de Madrid.

Sobre las dos arcillas seleccionadas se han cuantificado las propiedades básicas requeridas como materiales de barrera y se ha analizado la repercusión, en dichas propiedades, del uso de arena de cuarzo como aditivo y de los efectos inducidos por tratamiento térmico.

II.1. MATERIALES UTILIZADOS

Se está trabajando con una muestra de unos 5000 Kg de cada una de las dos arcillas seleccionadas, montmorillonita de la Serrata y Saponita de Cerro del Monte. Estas muestras corresponden a una extracción de los yacimientos respectivos que fué solicitada debido al consumo de material esperado en la realización de los ensayos de laboratorio y especialmente en el proceso de fabricación industrial de bloques a realizar en Francia y en España.

Como aditivo se está utilizando la arena de cuarzo utilizado por los franceses en la fabricación de bloques de alta densidad, del que se nos ha remitido una muestra de 200 Kg.

II.2. PREPARACION Y MANTENIMIENTO DE LOS MATERIALES

Las muestras de arcilla se han desecado a 60°C hasta humedad del 10%. El producto seco se ha molturado a tamaño inferior a 5 mm y se ha homogeneizado y cuarteado en alícuotas de unos 200 Kg que se han mantenido almacenadas para aprovisionamiento. La distribución granulométrica de este molturado se expresa en la

Tabla VI.

A partir de alícuotas de 200 Kg se ha obtenido, por molturación a tamaño inferior a 2 mm, el producto utilizado en los ensayos de laboratorio cuya distribución granulométrica está expresada en la Tabla II.

Una de las alícuotas de 200 Kg (tamaño máximo < 5 mm) de cada una de las dos arcillas preseleccionadas ha sido fraccionada en seis rangos de tamaños ($5 \text{ mm} > t > 2,36$; $2,36 > t > 1,17$; $1,17 > t > 0,59$; $0,59 > t > 0,21$; $0,21 > t > 0,15$; $0,15 > t$) a partir de los cuales se han compuesto siete distribuciones granulométricas que se han utilizado para analizar la influencia del tamaño y distribución granular de los molturados en la compactabilidad y resistencia de los bloques compactados. Estas distribuciones granulométricas se expresan en la Tabla VII y sus curvas acumuladas en la Fig.6.

Los molturados de arcilla que se utilizan en los distintos ensayos se mantienen en recipientes abiertos para su estabilización en las condiciones de temperatura y humedad relativa del laboratorio. Estos parámetros se registran a diario y cada dos o tres días se determina la humedad de las arcillas. Esto permite conocer de forma, prácticamente, continua el grado de humedad, imprescindible para el cálculo de pesos en la programación de los ensayos diarios. De otra parte, se considera que la estabilización en estas condiciones es más real y más próxima a las condiciones en que se encontrarán las arcillas cuando tengan que utilizarse en un proceso de industrialización.

En las Figs.7 y 8 se ha representado la humedad de la montmorillonita y saponita respectivamente, en función de la temperatura y humedad relativa del aire en el laboratorio, durante el período comprendido entre Diciembre de 1.989 y Septiembre de 1.990.

Se considera de interés destacar la estabilidad en humedad de ambas arcillas para condiciones ampliamente variables de los parámetros de temperatura y humedad y para un periodo que, practicamente, cubre el ciclo estacional de un año. La humedad de la montmorillonita de Serrata se ha mantenido entre, aproximadamente, el 10,5 y 12% y la de la saponita entre el 9,5 y el 11 para valores de temperatura comprendidos entre 18 y 32 °C y de humedad relativa del aire entre el 45 y 69%.

De la arena de cuarzo francesa, utilizada como aditivo, se ha realizado el análisis granulométrico a partir de una alícuota de 1 Kg aproximadamente, que se expresa en la Tabla VIII. Corresponde a una arena gruesa, bien seleccionada, en la que el 84,7% está comprendido entre 2 y 0,5 mm, con una proporción de grava del 9,4%, siendo el tamaño máximo del orden de 5 mm. Este cuarzo está siendo utilizado tal cual se ha recibido, aunque, en principio, se considera excesivamente grueso para obtener mezclas homogéneas con la arcilla, por la dificultad de impedir una cierta granoselección durante el relleno de moldes.

II.3. COMPACTABILIDAD

Dado que el modelo de barrera que en principio se ha contemplado es el de bloques compactados a alta densidad, parece lógico insistir, como criterio de selección, en la aptitud a la compactación de las dos arcillas preseleccionadas e intentar acotar, en lo posible, los parámetros de control del proceso industrial de fabricación de bloques.

Se han utilizado como métodos estandar la compactación uniaxial y la compactación por golpeo ya que este último método, aplicado "in situ", podría ser como alternativa a la utilización de bloques previamente compactados.

II.3.1. Compactación dinámica

II.3.1.1. Compactación por golpeo: Sistema manual

La compactación dinámica por golpeo se ha realizado de forma manual y mediante la utilización de una compactadora automática.

En el primer caso, compactación manual se ha realizado tres ensayos Proctor según la metodología seguida en la fase de precaracterización de las arcillas, indicada en el Apartado I.2.4.1., aunque modificando alguno de los parámetros para conseguir mayores energías.

Las características de estos ensayos han sido las siguientes:

	PROCTOR NORMAL	PROCTOR MODIFICADO	PROCTOR ESPECIAL
Nº de capas	5	5	5
Nº de golpes	12	20	40
Peso maza(Kg)	0,5	1,5	1,5
Altura de caída(m)	0,2	0,2	0,4
Volumen probeta(cm ³)	87	87	87
Energía(julios/cm ³)	0,7	3,4	13,5

Los resultados de este ensayo se presentan en curvas de densidad seca Vs humedad de las Figs.9 y 10. Para las energías de compactación aplicadas no se ha encontrado una buena definición de la humedad óptima. Las curvas obtenidas son muy abiertas y la diferencia de densidad seca entre puntos relativamente pequeña. Los valores máximos de densidad seca obtenidos son: 1,44 y 1,11 g/cm³ para la montmorillonita y saponita respectivamente con la energía del proctor normal; 1,59 y 1,24 g/cm³ con la energía del

proctor modificado y $1,67$ y $1,35 \text{ g/cm}^3$ con la energía del proctor especial ($1,4 \text{ julios/cm}^3$). El tipo de curvas resultantes no permiten definir con seguridad la humedad óptima. De otra parte, parece claro que sin embargo, que los valores de energía aplicadas son insuficientes, especialmente en el caso de la saponita cuya densidad seca final es siempre inferior a la de la montmorillonita.

II.3.1.2. Compactación por golpeo: Sistema semiautomático

En estos ensayos se ha utilizado una compactadora semiautomática que permite la programación del número de golpes por capa. Las variables de control de la energía de compactación han sido: peso de la maza, altura de caída, número de golpes y número de capas. Las dimensiones de las briquetas se han pretendido mantener constantes: $11,4 \text{ cm}^2$ de superficie y $7,63 \text{ cm}$ de altura.

Con este sistema de compactación se han conseguido mayores energías que con el sistema manual y se ha evitado, de otra parte, la incidencia de la mayor o menor pericia del operador.

Dentro de este sistema de compactación por golpeo se han aplicado dos modalidades: Compactación por capas y compactación en capa única. En la primera modalidad, que es la que habitualmente se aplica en Mecánica del suelo, la compactación se ha realizado en 5 capas y el número de golpes programado se distribuye de forma homogénea en toda la superficie de la briketa por la rotación continua de la maza que golpea directamente sobre la arcilla. En esta modalidad se encuentra a veces el problema de rotura de la briketa por la superficie entre capas, especialmente cuando la densidad es alta y es difícil la preparación, por recuperación, de dicha superficie.

Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla IX y se han representado en la Fig.11. Las curvas de densidades secas versus energías de compactación tiene una tendencia análoga en

las dos arcillas preseleccionadas y muestran la diferente compactabilidad de dichas arcillas. La densidad seca de la montmorillonita es siempre, al menos, un 10% superior a la de la saponita. El rango de densidades secas alcanzadas con la montmorillonita esta comprendido entre 1,65 y 1,86 g/cm³ para energías de compactación entre 5,8 y 93,1 julios/cm³, en el caso de la saponita las densidades están comprendidos entre 1,41 y 1,66 g/cm³ para las mismas energías. La ruptura de pendiente de ambas curvas se produce hacia los 40 julios/cm³ para densidades próximas a 1,8 y 1,6 g/cm³ para la montmorillonita y saponita respectivamente.

En la modalidad de compactación en capa única, se ha utilizado el sistema de golpeo tipo Marshall, con el fin de hacer más uniforme la aplicación de la energía en toda la superficie y evitar, en lo posible, la proyección de material fuera del molde. Con la compactación en capa única se ha querido evitar la rotura de la briqueta por la superficie entre capas y al mismo tiempo hacer más comparables los resultados con los de compresión uniaxial en los que también se compacta en capa única.

Con este ensayo se ha pretendido, también, definir la humedad óptima en función de la energía de compactación, esto es, las curvas proctor para las energías aplicadas. Los resultados se expresan en la Tabla X y en las Figs.12 y 13 se han representado las curvas de densidades secas versus humedades, en las que se define con claridad la humedad óptima de compactación para las energías aplicadas.

En el caso de la saponita de Cerro del Monte (MCA-C) la humedad óptima es del 21% para los niveles de energía de 42 y 88 julios/cm³, con una zona de incrementos mínimos de densidad entre el 15 y 26% de humedad.

En la montmorillonita de la Serrata la humedad óptima está entre el 11 y 15% para la energía de 42 julios/cm³ y entre el 11 y 12% para 88 julios/cm³. Esta humedad última coincide, prac-

ticamente con la de estabilización en las condiciones de temperatura y humedad relativa del laboratorio (Apartado II.2. Fig.7). Es de interés este dato puesto que, manteniendo la montmorillonita en unas condiciones ambientales no extremas, se mantendrá con una humedad próxima a la óptima.

Las curvas de densidad seca versus humedad de la saponita para este tipo de compactación y para los niveles de energía indicados (42 y 88 julios/cm³) son relativamente simétricas y equidistantes, esto es, un incremento del 52% en la energía aplicada produce un incremento medio de densidad del 6,4% ($\sigma_{n-1} = 0,89$). En el caso de la montmorillonita, las curvas de densidad seca versus humedad están más sesgadas hacia la rama seca y los incrementos de densidad seca, al aumentar la energía aplicada en un 52%, decrecen de forma continua hasta hacerse nulos para humedades del orden del 30 %. De acuerdo con dichas curvas la zona óptima se sitúa entre el 11 y 12 % de humedad, tanto por las densidades que se alcanzan como por el rendimiento de la energía aplicada. A partir de, aproximadamente, el 15 % de humedad no sólo decrece la densidad sino que también lo hace el rendimiento de la energía de compactación.

II.3.2. Compactación estática

En el análisis de la compactabilidad de las dos arcillas preseleccionadas mediante prensado uniaxial, se ha utilizado una prensa de 50 Tm de capacidad y se han fabricado briquetas estándar de 11,51 cm² de superficie y 7,7 cm de altura, en la modalidad de capa única.

Se ha investigado, por una parte, la humedad óptima para las presiones de 200, 600 y 1.000 Kg/cm² y, por otra, la variación de la densidad seca en función de la presión aplicada para valores de humedad constante. En la Tabla XI y Figs.14 a 17 se expresan los resultados obtenidos.

La humedad óptima de la saponita de Cerro del Monte (Fig.14) varía desde el 24,8% para la presión de 200 Kg/cm², 19,4% para 600 Kg/cm², hasta el 14,9% para 1000 Kg/cm². En el dominio de presiones entre 600 y 1000 Kg/cm² el rendimiento de la presión aplicada decrece con el aumento de humedad, hasta hacerse prácticamente nulo para humedades entre el 24 y 25%. La densidad seca máxima alcanzada con esta arcilla para la presión de 1000 Kg/cm² ha sido de 1,73 g/cm³ con humedad de 14,9%.

En la montmorillonita de la Serrata las humedades óptimas (Fig.15) varían desde el 18,1% para 200 Kg/cm² de presión hasta el 7,9% para presiones iguales o superiores a los 600 Kg/cm². Humedades iguales o superiores al $\approx 14\%$ minimizan y llegan a anular el rendimiento de los incrementos de presión aplicado. La densidad seca máxima alcanzada con la montmorillonita ha sido de 2,02 g/cm³ para la presión de 1000 Kg/cm² y humedad del 7,9%.

Las curvas de densidad seca frente a presiones, de las Figs.16 y 17, son congruentes y muestran resultados complementarios con los descritos anteriormente. Para presiones inferiores a los 400 Kg/cm² la posibilidad de optimizar la densidad seca final, en función de la humedad, es mínima, especialmente, en la montmorillonita. A partir de los 600 Kg/cm² el efecto de humedad es más relevante y tienden a definirse las humedades óptimas en concordancia con las antes indicadas.

Con la montmorillonita de la Serrata se requiere un rango de presiones comprendido entre 665 y 1000 Kg/cm² para alcanzar densidades secas finales entre 1,9 y 2,0 g/cm³, con humedades inferiores al 15%. En cambio, con la saponita de Cerro del Monte es, prácticamente, imposible conseguir la densidad de 2,0 g/cm³ y en el rango de presiones, con posibilidad razonable de aplicación, entre 600 y 1000 Kg/cm² la densidad seca final de esta arcilla estaría comprendida entre 1,73 y 1,83 g/cm³, para humedades en el entorno del 15%. De otra parte, el factor más negativo de la arcilla saponítica de Cerro del Monte es la rotura de las bri-

quetas, por laminación según planos normales al eje de compactación, durante la descompresión y desmolde.

II.3.3. Influencia de la granulometría en la compactabilidad

Como se indica en el Apartado II.2 todos los ensayos de compactabilidad, cuyos resultados se han descrito en los Apartados II.3.1. y II.3.2., se han realizado con arcilla molturada a tamaño inferior a 2 mm y distribución granulométrica representada en las Figs.1 y 2. La molturación a este tamaño es un proceso muy estandarizado que no debe representar ningún problema específico al realizarse industrialmente.

Se ha ensayado, sin embargo, la posibilidad de utilizar otro tipo de granulometría que pudiera mejorar la compactabilidad y/o redujera la producción de finos y, por tanto, el ambiente pulvígeno en los recintos de trabajo.

Las granulometrías utilizadas están expresadas en la Tabla VII y Fig.6. Se han compuesto a partir de los molturados estandar de la Tabla VI. Las distintas composiciones granulométricas se han enumerado desde el 1 al 7 y su ordenación numérica se corresponde con el aumento del contenido en tamaños gruesos ($t > 2,36$ mm) desde el 1,5% hasta el 54% y por la disminución del contenido en tamaño $< 0,15$ mm desde el 91,5% hasta el 8,97%.

En la compactación se han utilizado las técnicas de golpeo, en compactadora semiautomática, y de prensado uniaxial. Los resultados se han expresado en las Tablas XII y XIII y Figs.18 y 19. De estos resultados no parece deducirse una tendencia que implique influencia de la granulometría del molturado en la densidad seca de las briquetas, mantenidos constantes los parámetros de energía y humedad, la densidad seca final permanece practicamente constante.

En la compactación por golpeo, con 140 jul/cm^3 , de las

siete composiciones granulométricas preparadas, se obtiene para la montmorillonita una densidad seca media de $1,78 \text{ g/cm}^3$ con una dispersión de $\sigma = 0,02$ y para la saponita el valor medio de densidad es de $1,42$ y $\sigma = 0,02$.

En compactación por prensado uniaxial los resultados muestran, también, un comportamiento similar de las distintas composiciones granulométricas. Con una presión de 781 Kg/cm^2 , el valor medio de la densidad seca final es de $1,87 \text{ g/cm}^3$ con una $\sigma = 0,006$ para la montmorillonita y de $1,59 \text{ g/cm}^3$ con $\sigma = 0,05$ para la saponita. Al aumentar la presión hasta 1300 Kg/cm^2 los valores medios de densidad seca y su dispersión son, $\rho_a = 1,96$, $\sigma = 0,011$ y $\rho_a = 1,72$, $\sigma = 0,02$, para la montmorillonita y saponita respectivamente.

Se puede interpretar que el efecto de compactabilidad esperado en función de la composición granulométrica es prácticamente nulo en este tipo de materiales, debido a la baja consistencia de los gránulos generados por molturación y que, en último término, el parámetro de tamaño que condiciona la compactabilidad es el tamaño natural del material arcilloso y muy especialmente la morfología de sus componentes minerales, como parece quedar definido por el contraste en la compactabilidad de las dos arcillas preseleccionadas (montmorillonita y saponita)

II.3.4. Influencia de la proporción de arena de cuarzo en la densidad de las briquetas

Los ensayos se han realizado sobre mezclas de arcilla/-cuarzo, con incrementos del 5% de cuarzo hasta un total del 25%. Los resultados están representados en las Figs.20 y 21.

Como cabría esperar la adición de cuarzo produce incrementos de la densidad seca de las briquetas. Estos incrementos son, prácticamente, lineales para las presiones de 600 y 1000 Kg/cm^2 . Para 200 Kg/cm^2 describen una curva que tiende a ser asintótica a partir del 15% de cuarzo.

Analizada esta tendencia para un rango de mezclas más amplio (0-50%) y para la presión de 1000 Kg/cm^2 , se encuentra que la ruptura de pendiente se produce hacia el 40% de arena de cuarzo en la mezcla (Fig.22).

La densidad seca de la arcilla en las mezclas decrece en función de la proporción de cuarzo (Fig.22) al compactar a densidad de la briqueta o presión de compactación constantes. Esta densidad es calculada bajo la hipótesis de que el volumen ocupado por la arena de cuarzo es función de su peso específico.

Los rangos de densidades secas de las briquetas para las presiones de 600 y 1000 Kg/cm^2 y proporciones de cuarzo hasta el 25% son respectivamente: para la montmorillonita de $1,86$ y $1,99$ y $1,95$ a $2,08 \text{ g/cm}^3$ y para la saponita de $1,56$ a $1,75$ y de $1,68$ a $1,86 \text{ g/cm}^3$.

La adición de cuarzo da contextura aparente a las briquetas, pero se ha observado, a veces, una cierta granoselección en su estructura debida probablemente a la diferencia de tamaño y densidad entre los gránulos de cuarzo y de arcilla. Este efecto debe producirse durante el proceso de mezcla y alimentación de los moldes y tendrá que ser evitado.

En los apartados siguientes se analizará la incidencia del cuarzo en las propiedades básicas de los compactados.

II.3.5. Expansión de las briquetas en la descompresión y desmolde

Con el fin de obtener datos que permitan estimar las dimensiones y tolerancias entre bloques para la fabricación industrial y montaje del cilindro-barrera, se ha determinado la expansión de las briquetas en la descompresión y desmolde.

Las determinaciones se han realizado sobre cinco briquetas de cada una de las dos arcillas preseleccionadas. Como dimen-

siones de referencia se han tomado la altura y diametro de la briqueta al finalizar su fabricación y con la carga final mantenida. Al descomprimir y desmoldar se han ido tomando medidas periódicas, manteniendo las briquetas en las condiciones de temperatura y humedad relativa del laboratorio.

Los resultados obtenidos para las condiciones de peso de arcilla y presión de compactación (1000Kg/cm^2) constantes, son los siguientes:

La expansión media en altura (dirección paralela a la compresión) es, para la montmorillonita, de $\Delta h = 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ mm/mm}$ ($n=42$, $\sigma = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ mm/mm}$ y para la saponita de $\Delta h = 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ mm/mm}$ ($n = 43$, $\sigma = 2,8 \cdot 10^{-3}$).

La expansión media en diámetro (dirección normal a la compresión es, para la montmorillonita, de $\Delta \phi = 9,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm/mm}$ ($n = 43$, $\sigma = 3,3 \cdot 10^{-3}$) y para la saponita de $\Delta \phi = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ mm/mm}$ ($n = 43$, $\sigma = 3,8 \cdot 10^{-3}$).

La mayor expansión corresponde a los valores del incremento de altura de la saponita debido a la aparición de microfisuras normales a la dirección de compresión.

El análisis de expandibilidad de las briquetas se ha realizado también para valores de volumen y densidad constantes. Los valores medios de expansión, tanto en altura como en diámetro, son los siguientes:

MONTMORILLONITA

ρ_d	Δh mm/mm	σ	$\Delta \phi$ mm/mm	σ	n
1.8	$1.24 \cdot 10^{-2}$	$4.38 \cdot 10^{-3}$	$1.10 \cdot 10^{-2}$	$2.59 \cdot 10^{-3}$	38
2.0	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$1.90 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$2.10 \cdot 10^{-3}$	33

SAPONITA

1.6	$4.28 \cdot 10^{-2}$	$4.99 \cdot 10^{-3}$	$1.78 \cdot 10^{-2}$	$2.83 \cdot 10^{-3}$	31
1.8	$4.58 \cdot 10^{-2}$	$7.40 \cdot 10^{-3}$	$1.69 \cdot 10^{-2}$	$2.83 \cdot 10^{-3}$	24

Como cabría esperar, la mayor expandibilidad corresponde a la saponita, cuya expansión en altura y diámetro es, respectivamente, 3,6 y 1,5 veces la de la montmorillonita.

Este comportamiento corresponde a los parámetros de fabricación (humedad de la arcilla, densidad seca programada y presión aplicada) y a las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa del aire del laboratorio, sin regulación específica de dichos parámetros, por lo que se considera extrapolable a las condiciones probables de fabricación industrial de los bloques.

La expansión tiende a ser nula a partir de los tres o cuatro días desde la fabricación.

II.3.6. Otras modalidades de compactación y puesta "in situ"

Desde el inicio del proyecto y durante su desarrollo tanto CIEMAT como ENRESA han contemplado la compactación "in situ" como alternativa a la utilización de bloques de alta densidad. En este sentido se han realizado los ensayos de compactación por golpeo, cuyos resultados han sido recogidos en el Apartado II.3.1.2. En la actualidad la compactación por golpeo se está realizando sobre moldes de 3000cm^3 con el fin de tener una mayor aproximación y mejor extrapolación de los resultados a la escala real. Los resultados, que se darán en próximos informes, son sa-

tisfactorias en cuanto a las densidades obtenidas, sin embargo la metodología parece, en principio, excesivamente brusca.

De otra parte y en consonancia con las nuevas alternativas de puesta "in situ" que comenzarán a estudiarse en el proyecto Bacchus 2, se están realizando ensayos de compactación hidráulica y de autocompactación por retracción.

Con la compactación hidráulica se han obtenido, hasta el momento, densidades secas de $1,74 \text{ g/cm}^3$ con la montmorillonita de Serrata. En los ensayos se ha utilizado un gato hidráulico manual y la compactación se ha realizado por capas y aplicando cargas sucesivas de precompactación y compactación. El método es menos brusco que la compactación por golpeo y se considera que puede ser aplicado a la compactación "in situ".

Se han iniciado los ensayos de autocompactación por retracción de acuerdo con la idea de obtener granulados de alta densidad para el llenado del habitáculo de la barrera y que, con una ligera compactación "in situ", permitan obtener una densidad seca aceptable ($\rho_a \geq 1,6 \text{ g/cm}^3$) y homogénea, como consecuencia de la capacidad de hidratación-hinchamiento y sellado de la arcilla.

La metodología empleada es muy simple y corresponde, básicamente, a la utilizada en la determinación del límite de retracción. A partir de la arcilla amasada a la humedad del límite líquido se han preparado las pastillas y bolas que se han dejado desecar lentamente para evitar, en lo posible, la producción de grietas. Una vez terminado el proceso de secado se han medido las densidades secas por inmersión en mercurio.

Los resultados indican que la densidad media alcanzada por la montmorillonita es de $1,95 \text{ g/cm}^3$ con una $\sigma = 0,07$ y para 25 ensayos. En el caso de la saponita la densidad media ha sido de $1,68 \text{ g/cm}^3$ con una $\sigma = 0,06$ y número de ensayos 34. La diferencia entre ambas arcillas es la constatada en la mayor parte de

los ensayos realizados.

Este método no parece, en principio, difícil de industrializar a partir de extrusionados a distintos tamaños y proceso de desecación suave y progresivo.

Se continuarán estos estudios preliminares en laboratorio con el fin de analizar la evolución de la densidad y su homogeneidad, al someter a hidratación el preparado granular de arcilla en un volumen limitado.

II.4. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

La resistencia a compresión simple se ha determinado como parámetro de valoración de la calidad mecánica de los bloques compactados, por considerarse más objetiva que la simple inspección visual de la integridad de dichos bloques. De otra parte, con este ensayo sencillo se obtiene una estimación de la resistencia al corte y comportamiento mecánico de los bloques hasta su emplazamiento.

El ensayo de resistencia a compresión simple se define como no consolidado, no drenado y no confinado. Por tanto, la consolidación y humedad de la probeta ensayada corresponden a los valores de fabricación de dicha probeta y el confinamiento se debe exclusivamente a la presión atmosférica ($\sigma_3 \approx 0$), si no se considera como significativo el confinamiento efectivo interno debido a los efectos de capilaridad del agua de fabricación.

La resistencia a la compresión se identifica como q_u y la resistencia al esfuerzo de corte sin drenar como $S_u = c = q_u/2$ considerado el ángulo de rozamiento interno $\phi = 0$.

El ensayo se ha realizado sobre probetas cilíndricas de 38 mm de diámetros y 76 mm de altura de forma que la relación

altura/diámetro se encuentra entre los límites $2 < L/d < 3$ para asegurar que el plano de falla no intercepte los cabezales de carga. La velocidad de carga se ha ajustado al 2% de deformación por minuto.

En estos ensayos se ha analizado la incidencia, en la resistencia mecánica de las briquetas: del sistema de compactación, humedad y densidad seca de fabricación, granulometría del molturado y proporción de cuarzo.

Los resultados están expresados en las Tablas XIV a XVIII.

La resistencia a compresión simple crece de forma exponencial en función de la densidad seca de la briketa. Las curvas de densidades secas versus resistencias son de la forma general $y = e^{xb-a}$, en el rango de valores experimentales. Esta forma general de las curvas se mantiene tanto para la compactación dinámica (Fig.23), como para la compactación estática (Fig.24).

La tendencia de comportamiento de los dos tipos de arcilla es similar, pero el exponente de la curva ($xb-a$) es mayor en el caso de la saponita. Esto es, para un mismo valor de densidad seca la resistencia de la briketa de saponita es mayor que la de montmorillonita.

Analizadas las funciones que describen los incrementos de resistencia de la saponita respecto de la montmorillonita (distancia entre sus curvas), para los dos métodos de compactación, se encuentra que dichas funciones son:

$$\Delta q_u = e^{3.49\rho_d - 2.7} \text{ para la compactación por golpeo y}$$

$$\Delta q_u = e^{3.44\rho_d - 2.76} \text{ para la compactación por prensado uniaxial.}$$

Esto es, en el dominio de experimentación, la resistencia de la saponita es mayor que la de la montmorillonita y la dife-

rencia se incrementa al aumentar la densidad seca. En los dos métodos de compactación se mantiene la misma tendencia (Fig.25).

De acuerdo con las curvas de resistencia a compresión simple frente a densidad seca de la arcilla; los valores de resistencia a densidad $1,70 \text{ g/cm}^3$, serían del orden de 25 Kg/cm^2 para la montmorillonita y de 50 Kg/cm^2 para la saponita.

Realizado el análisis de la influencia de la humedad en la resistencia a compresión de las briquetas de arcillas, se ha encontrado que se obtiene una mayor resistencia para humedades próximas al 20%. En las Figs.26 y 27 se han representado las curvas de resistencias versus densidades secas para las humedades de $\approx 3.5, 10, 20$ y 25% . Todas las curvas tiende a la forma antes indicada y se mantienen los Δ qu de la saponita respecto a la montmorillonita para las diferentes humedades experimentadas.

La incidencia de la granulometría del granulado de arcilla en la resistencia a compresión de las briquetas ha sido analizada sobre las siete composiciones granulométricas referidas en el Apartado II.2 y cuyas distribuciones están representados en la Fig.6. Las briquetas se han obtenido por compactacion en las modalidades de golpeo y prensado uniaxial, manteniendo como constantes la energía y presión. Los resultados se han expresado en las Tablas XVI y XVII y Fig.28.

De estos resultados se desprende que el aumento del tamaño de grano del granulado produce una disminución considerable de la resistencia a compresión. El mismo fenómeno se detecta para los dos niveles de energía y presión ensayados y para las dos modalidades de compactación. El descenso medio de la resistencia, entre granulometría extremas, es del orden del 50% en la montmorillonita y del 70% en la saponita. Se interpreta que los contactos entre gránulos representan una multitud de superficies potenciales de falla que debilitan considerablemente la resistencia de los bloques, estas superficies serían tanto más activas cuanto

mayor fuera el tamaño del granulo.

La adición de arena de cuarzo, con la distribución de tamaño indicada en la Tabla VIII, también influye negativamente en la resistencia a compresión de las briquetas. Los resultados de estos ensayos se han expresado en la Tabla XVIII. En las curvas de resistencia versus proporción de cuarzo, la zona de máxima pendiente ($-\Delta q_u$) se sitúa entre el 0 y 10% de cuarzo, a partir de este punto tiende a hacerse asintótica y lineal. La influencia negativa de la adición de arena de cuarzo es más significativa a menor densidad del compactado y su efecto es más notorio en la saponita que en la montmorillonita (Fig.29).

El descenso total de la resistencia a compresión de la saponita para proporciones de cuarzo entre el 0 y 25% es del 56% para densidad de $1,77 \text{ g/cm}^3$ y del 75% para densidad de $1,54 \text{ g/cm}^3$. De este descenso total el 82 y 73%, respectivamente, se produce para proporciones de cuarzo entre el 0 y 10%.

En el caso de la montmorillonita, la resistencia a compresión desciende un 61% para la densidad de $1,81 \text{ g/cm}^3$ y un 75% la densidad de $1,6 \text{ g/cm}^3$, en el rango de proporciones de cuarzo entre el 0 y 25%. La pérdida de resistencia producida por la adición de hasta un 10% de cuarzo representa, para las densidades indicadas, un 49 y 44% del total, respectivamente.

Parece poder indicarse que la adición de cuarzo solo mejorará aparentemente la contextura de las piezas fabricadas.

II.5. HINCHAMIENTO LIBRE Y PRESION DE HINCHAMIENTO

La capacidad de hinchamiento es una de las propiedades básicas de los materiales de barrera debido a la función requerida de aislamiento del canister (sellado de las zonas de interfase roca-barrera-canister y de la red microfisural del campo próximo de la roca almacén).

La determinación del hinchamiento libre o potencial de las dos arcillas preseleccionadas (montmorillonita y saponita) se ha realizado con un ensayo muy simple, que consiste en la medida del incremento de volumen de la arcilla bajo condiciones de saturación en un medio acuoso de sedimentación. Se ha partido de alícuotas de arcilla con la humedad de estabilización (10-11%) en las condiciones de laboratorio y se ha obtenido como valor de expansión potencial de la saponita el 165% y de la montmorillonita el 172%.

La presión de hinchamiento se ha determinado, en los equipos estandar de ensayos edométrico, por adiciones sucesivas de cargas estáticas hasta deformación nula. Se ha seguido la normativa tradicional en este tipo de ensayos, salvo en lo referente a las dimensiones de la briqueta que han tenido que reducirse hasta 9,87 y 3,23 cm² de sección, manteniendo la altura en 12 mm, debido a la alta presión de hinchamiento de estas arcillas y la limitación en la capacidad de carga de los equipos indicados.

Los valores de presión de hinchamiento en función de la densidad seca de la arcilla en los compactados de arcilla y mezclas de arcilla-arena de cuarzo se expresan en las Tablas XIX y XX. Analizada la relación entre los parámetros densidad seca de la arcilla y proporción de arena de cuarzo se encuentra que, para el rango de densidades experimentadas, la presión de hinchamiento describe las curvas de las Figs.30 y 31, que se ajustarían, prácticamente, a las expresiones:

$$\begin{aligned} p.\text{hinch} &= e^{(6,7\rho_a - 6,10)} \pm 0,41 && \text{para la saponita y} \\ p.\text{hinch} &= e^{(5,7\rho_a - 5,41)} \pm 0,23 && \text{para la montmorillonita} \end{aligned}$$

Realizado el ajuste a partir de las regresiones lineales correspondientes ($\ln p.\text{hinch} = (a + b\rho_d) \pm \varepsilon$) se encuentra como valor de r^2 para el saponita 0,89 y para la montmorillonita 0,96.

Como se desprende de las expresiones anteriores la presión de hinchamiento de la saponita es sensiblemente superior a la de la montmorillonita para densidades secas iguales. La diferencia entre ambas expresiones, o incrementos de presión de hinchamiento de la saponita respecto de la montmorillonita, sigue una expresión análoga:

$$p.\text{hinch.sap.} = p.\text{hinch.mont.} + e^{(7,31\rho_d - 7,64)} \pm 0,03$$

En las mezclas de arcilla-arena de cuarzo la presión de hinchamiento decrece con el aumento de la proporción de arena de cuarzo para densidad de la mezcla constante.

Analizados los parámetros que pudieran determinar la presión de hinchamiento en las mezclas de arcilla/arena de cuarzo, se encuentra que sus valores tienden ajustarse a las curvas definidas (Fig.30 y 31). Esto es, el parámetro regulador parece ser la densidad seca de la arcilla en la mezcla. El cuarzo se comporta como componente inerte respecto a la presión de hinchamiento pero su proporción condiciona la densidad de la arcilla en la mezcla, como se indicó en el Apartado II.3.4.

Si se consideran los 10 Mpa como límite teórico de la presión de hinchamiento final de la arcilla en el emplazamiento, las densidades secas finales mínimas, deberían ser del orden $1,75 \text{ g/cm}^3$ para la montmorillonita y de $1,59 \text{ g/cm}^3$ para la saponita. Si se estima en un 5% la pérdida de densidad de la barrera de arcilla por hinchamiento y relleno de vacíos, una vez instalada, la densidad seca mínima de la arcilla en la fabricación de los bloques debería ser de $1,84 \text{ g/cm}^3$ para la saponita y de $1,67 \text{ g/cm}^3$ para la montmorillonita. Estas densidades podrían obtenerse, en ambas arcillas, por prensado uniaxial a 600 Kg/cm^2 y para humedades de la arcilla entre el 5 y 15% en la montmorillonita y entre el 15 y 20% en la saponita.

Si se opta por utilizar arena de cuarzo como aditivo, la

densidad mínima de los bloques de montmorillonita debería ser del orden de $1,89 \text{ g/cm}^3$ y la de los bloques de saponita de $1,78 \text{ g/cm}^3$ para una dosificación del 10% de arena de cuarzo. Densidades que pueden ser obtenidas por prensados a 600 Kg/cm^2 .

Si se estimara en el 10% el descenso permisible de la densidad de la barrera, una vez instalada, se requerirían como densidades de los bloques: 2 g/cm^3 para la montmorillonita y 1,8 para la saponita, que admitirían una dosis de arena de cuarzo del 10%. En este caso, la compactación requeriría la aplicación de los 1000 Kg/cm^2 .

II.6. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA

La barrera próxima de arcilla tiene como finalidad garantizar la estanqueidad del recinto del canister, de forma que se minimice la acción agresiva de las aguas intersticiales de la roca almacén y se ralentice su flujo, al menos, hasta el límite de la transferencia difusiva. Es imprescindible, por tanto, conseguir que la barrera de arcilla mantenga, en el tiempo, una conductividad hidráulica igual o inferior a los 10^{-11} m/s .

Dadas las características de hinchamiento de los materiales estudiados, las medidas de conductividad hidráulica se han realizado en celdas de acero diseñadas de forma que permanezcan constantes la superficie y altura de la probeta durante el ensayo.

Las probetas, de $19,63 \text{ cm}^2$ de sección y 2,5 cm de altura, se han obtenido por prensado uniaxial en el anillo porta-muestras de la celda de medida. Este procedimiento, favorecido por el hinchamiento de la arcilla durante la saturación, impide el flujo de agua por el exterior de la probeta.

Previamente a la medida de caudales se ha procedido a la saturación bajo presión, entre 6 y 10 bares, por ambos extremos

de la probeta. Se ha considerado como criterio de saturación el flujo de sorción nulo, controlado mediante cambiadores de volumen de 10^{-3} ml de sensibilidad. La saturación bajo presión tiene como finalidad la disolución, en el agua, del aire ocluido en la arcilla.

La inyección de agua se ha realizado bajo presión entre 7 y 68 bares y los gradientes hidráulicos han estado comprendidos entre 10^2 y 10^4 , en función de la densidad y presión de hinchamiento de la arcilla.

El cálculo de K se ha realizado, para condiciones de caudal constante, a partir de la expresión $K = QL/thA$ donde Q = caudal, L = altura de la probeta, t = tiempo de medida, h = carga hidráulica ($h_1 - h_2$) y A = sección de la probeta.

Los resultados de conductividad hidráulica de la montmorillonita y saponita y de sus mezclas con arena de cuarzo se expresan en la Tabla XXI.

La conductividad hidráulica de la montmorillonita en el rango de densidades secas de la arcilla entre 1,45 y 2,00 g/cm³, se ajusta a la relación lineal de expresión $Lg K = -9,41 - 1,97 \rho_a$, con error estandar (e) = 0,105 y coeficiente de correlación (r) = -0,93. En este rango de densidades, la conductividad hidráulica de las mezclas de arcilla/arena de cuarzo, hasta una proporción de arena de cuarzo de al menos el 20 %, está también regulada por la densidad seca de la arcilla en la mezcla como se deduce de la Fig.32. La arena de cuarzo actúa como componente inerte que no modifica la conductividad hidráulica esperada de la arcilla.

Para densidades secas de la arcilla inferiores a 1,45 g/cm³ se mantiene la relación lineal entre conductividad hidráulica y densidad de la arcilla seca, pero se produce un incremento significativo en la pendiente de la recta. El ajuste entre las

densidades 1,40 y 1,20 g/cm³ tiene por expresión $Lg K = -0,061 - 8,48 \rho_a$ con $e = 0,19$ y $r = -0,96$ (Fig.31).

En el intervalo de densidades antes indicado, la conductividad hidráulica de las mezclas de arcilla/arena de cuarzo continua siendo regulada por la densidad de la arcilla seca en la mezcla, de acuerdo con la expresión $Lg K = -8,23 - 13,09 \rho_a$ con $e = 0,08$ y $r = -0,99$. En este caso, sin embargo, la arena de cuarzo, en proporciones entre el 30 y 50% y en contraposición a lo indicado para densidades de la arcilla mayores de 1,45 g/cm³, introduce un incremento de dos órdenes de magnitud, aproximadamente, en la conductividad hidráulica de la mezcla respecto del valor medido en arcilla sola, compactada a la misma densidad de la arcilla en la mezcla.

En la saponita de Cerro del Monte se mantiene la tendencia de relación lineal entre la conductividad hidráulica y la densidad de la arcilla seca, descrita para la montmorillonita de Serrata (Fig.32). A densidades secas de la saponita iguales o mayores a 1,30 g/cm³ la conductividad hidráulica de la arcilla sola y de las mezclas arcilla/arena de cuarzo viene dada por la expresión $Lg K = -8,81 - 2,50 \rho_a$ con $e = 0,14$ y $r = -0,96$, incluso para proporciones de arena de cuarzo hasta del 50%.

Para densidades de la arcilla seca iguales o inferiores a 1,20 g/cm³ se mantiene la relación lineal entre conductividad hidráulica y densidad de la arcilla seca y también se produce, como en el caso de la montmorillonita, un incremento de la pendiente de la recta de regresión $lg K = -4,97 - 5,50 \rho_a$; $e = 0,14$ y $r = -0,97$. En estas densidades, la adición de arena de cuarzo en proporción superior al 50% produce un incremento considerable de la conductividad hidráulica de la mezcla respecto a la arcilla sola con densidad seca equivalente.

En este análisis vuelven a ponerse de manifiesto diferencias entre las dos variedades de arcilla estudiadas. La conducti-

vidad hidráulica de la saponita de Cerro del Monte es ligeramente inferior a la de la montmorillonita de Serrata y el cambio de pendiente entre las rectas de regresión, conductividad hidráulica vs densidad de la arcilla seca, se produce para densidades próximas a $1,25 \text{ g/cm}^3$ en el caso de la saponita y a $1,45 \text{ g/cm}^3$ en el de la montmorillonita.

De otra parte, la proporción de arena de cuarzo que admite la saponita sin incrementar la conductividad hidráulica de las mezclas respecto a la de la arcilla sola, con densidad equivalente a la de la arcilla en las mezclas, alcanza hasta el 50% frente al 20% en la montmorillonita.

La diferencia de comportamiento entre ambas arcillas puede deberse a que: la montmorillonita de Serrata contiene mayor proporción de componente "inertes" (minerales no arcillosos y fragmentos de roca) y a la diferencia mineroestructural de las láminas de la esmectita que en la saponita tienden a estar constituidas por agregados de fibras y cuya respuesta hidráulico-mecánica no conocemos aún.

Los dos aspectos indicados podrían explicar el desfase en, aproximadamente, $0,2 \text{ g/cm}^3$ ($\rho_{MAC} < \rho_{S-2}$) en las densidades alcanzadas por los compactados de ambas arcilla para la misma presión de compactación y la equiparación de los valores de los parámetros hidráulico-mecánicos, si se tiene en cuenta el desfase de densidad indicado.

De otra parte, se interpreta que el cambio de pendiente en la recta de regresión de conductividad hidráulica vs densidad de la arcilla seca en el dominio de densidades $\rho_a < 1,45$ para la montmorillonita y $\rho_a < 1,25$ para la saponita, puede deberse a una modificación, importante, de la estructuración e interconectividad entre los canalículos que determinan la porosidad eficaz de la arcilla al reducirse la densidad. Esto provocaría, además, que la adición de arena de cuarzo, en proporción superior al 30% a la

montmorillonita y al 50% en la saponita, en el rango de densidades indicado, permitiera la existencia de una mayor porosidad eficaz y por tanto mayor conductividad hidráulica respecto a la de la arcilla sola, debido a los contactos entre granos de cuarzo (en la montmorillonita: granos de cuarzo + fragmentos de roca) que no habrían sido recubiertos por la arcilla.

Bajo el punto de vista de la valoración como arcillas candidatas para la fabricación de la barrera a la migración, se considera que las dos arcillas satisfacen el criterio general de baja conductividad hidráulica de sus compactados ($K \approx 10^{-11}$ m/s) hasta densidades de la arcilla del orden de 1,30 y 1,15 g/cm³ para la montmorillonita y saponita respectivamente. Serían admisibles, de otra parte, proporciones de arena de cuarzo hasta del 50% para densidad de la arcilla igual o mayor de 1,30 g/cm³ en el caso de la saponita y de un 20% para densidad mayor de 1,45 g/cm³ en la montmorillonita.

II.6.1. Influencia de la temperatura en la conductividad hidráulica de la arcilla

Dado que en las condiciones reales del almacenamiento la posible transferencia de agua se realizará bajo condiciones de temperatura diferentes debido a la existencia de un foco térmico, constituido por el residuo y a la disipación progresiva del calor hacia la roca almacén, se ha considerado de interés analizar la influencia de la temperatura en la conductividad hidráulica de las arcillas, en el intervalo de 20 a 150°C.

Las medidas se han realizado en condiciones isotérmicas. El dispositivo de medida (briqueta, célula y conducciones hasta la salida a los cambiadores de volumen), se ha mantenido en estufa con homogeneización térmica por aire, durante todo el ensayo. Las temperaturas se han variado por incrementos de 25°C y las conductividades se han calculado para condiciones de temperatura y caudal constantes. Las presiones de inyección, entre 10 y 68

bares, y de salida, entre 6 y 8 bares garantizan que el agua ha permanecido siempre por debajo de su punto de ebullición.

Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla XXII. El análisis de estos resultados indica que el incremento de la temperatura a que se realiza el ensayo produce un incremento, prácticamente lineal en el dominio de experimentación, de la conductividad hidráulica de las dos arcillas estudiadas (Fig.33 y 34).

En las briquetas de montmorillonita, con densidad de la arcilla seca de $1,59 \text{ g/cm}^3$, la relación entre la temperatura del ensayo y la conductividad hidráulica viene dada por la expresión:

$\text{LogK}_T = -12,75 + 7,40 \text{ E-}3T$ ($e = 0,09$; $r = 0,98$) y en la saponita ($\rho_a = 1,588$)

$\text{LogK}_T = -12,68 + 8,53 \text{ E-}3T$ ($e = 0,11$; $r = 0,97$). El efecto térmico es similar en ambas arcillas como parecen indicarlo las regresiones expresadas.

En las briquetas obtenidas con mezclas de arcilla/10% de arena de cuarzo el efecto de la temperatura sobre la conductividad hidráulica es el indicado antes, aunque las pendientes de las rectas de regresión son mayores (Fig.35 y 36). En el caso de la montmorillonita con el 10% de arena de cuarzo y con densidad de la arcilla seca en la mezcla de $1,774 \text{ g/cm}^3$ la expresión de la regresión es $\text{LogK}_T = -13,36 + 0,01 T$ ($e = 0,14$; $r = 0,98$) y para la saponita, con la misma proporción de arena de cuarzo y $\rho_a = 1,717$, $\text{LogK} = -13,45 + 1,2 \text{ E-}2T$ ($e = 0,06$; $r = 0,99$).

La validez de las regresiones antes expresadas se restringe, lógicamente, al dominio de experimentación, resaltándose que no se han realizado ensayos por debajo de los 20°C .

Entre las causas que pueden determinar la modificación de la conductividad hidráulica en función de la temperatura, cabe pensar en las propiedades del agua, especialmente en la viscosi-

dad, que varía considerablemente en el rango de las temperaturas y presiones de experimentación y en el peso específico cuyas modificaciones pueden considerarse menos significativas. En función de estas propiedades y considerando que el resto de parámetros no se modifica, se establece teóricamente la relación $K_T, K_T = v_T, / v_T$ en la que K_T, K_T , y v_T, v_T , son las conductividades hidráulicas y viscosidades cinemáticas a las temperaturas T y T' .

De acuerdo con la relación antes expresada y considerando los valores de viscosidad absoluta del agua a las temperaturas de experimentación, se han calculado las conductividades hidráulicas tomando como referencia la conductividad hidráulica medida a 20°C y se han analizado las regresiones entre la conductividad hidráulica medida y la calculada. Las regresiones obtenidas son las siguientes:

Montmorillonita ($\rho_a = 1,593 \text{ g/cm}^3$)

$$\text{LogK}_{\text{medida}} = 3,16 + 1,26 \text{ LogK}_{\text{calculada}} (e = 0,14; r = 0,94)$$

Montmorillonita + 10% arena de cuarzo ($\rho_a = 1,717 \text{ g/cm}^3$)

$$\text{LogK}_{\text{medida}} = 14,54 + 2,12 \text{ LogK}_{\text{calculada}} (e = 0,23; r = 0,94)$$

Saponita ($\rho_a = 1,588 \text{ g/cm}^3$)

$$\text{LogK}_{\text{medida}} = 6,69 + 1,53 \text{ LogK}_{\text{calculada}} (e = 0,07; r = 0,99)$$

Saponita + 10% arena de cuarzo ($\rho_a = 1,774 \text{ g/cm}^3$)

$$\text{LogK}_{\text{medida}} = 11,14 + 1,85 \text{ LogK}_{\text{calculada}} (e = 0,14; r = 0,97)$$

Como parece deducirse del análisis realizado, el incremento de temperatura desde 20 a 150°C provocaría un aumento de la permeabilidad de la arcilla próximo a un orden de magnitud. En las mezclas de arcilla-arena de cuarzo el aumento es mayor y se apróxima a las dos órdenes de magnitud. De cualquier forma, la magnitud de la conductividad hidráulica a 150°C y para las densidades de la arcilla experimentadas permanece inferior a la teóricamente requerida para la barrera.

De otra parte, el aumento de conductividad hidráulica con la temperatura es explicable en gran medida por la disminución de la viscosidad cinemática del agua. Deben existir otros factores que expliquen las desviaciones entre los valores teóricos y medidos cuyo efecto es más acentuado en las mezclas con arena de cuarzo. Cabría pensar que dichos factores están relacionados con la heterogeneidad de comportamiento térmico de los componentes del sistema. Definir dichos factores y cuantificar sus efectos requerirían un estudio más profundo del fenómeno.

II.7. CONDUCTIVIDAD TERMICA

La barrera de ingeniería no debe constituir barrera térmica si no que deberá favorecer la disipación del calor generado por el residuo hacia la roca almacén. La conductividad térmica es, por tanto, otra de las propiedades que deben ser estudiadas en los materiales que pudieran constituir dicha barrera.

La determinación de la conductividad térmica se ha realizado por la técnica del hilo caliente, aplicado mediante el equipo de medida Kemtherm QTM-D3 (Quick thermal conductivity meter).

La técnica se basa en la medida de la variación de temperatura en el material problema, en contacto con un hilo conductor al que se le suministra una determinada potencia calorífica por unidad de longitud [$Q(W/cm)$] entre tiempos t_1 y t_2 . De forma que puede establecerse la expresión:

$$\lambda_T = K \frac{I^2 \ln(t_2/t_1)}{v_2 - v_1} - H$$

en la que K y H son constantes que incluyen la resistencia del hilo calefactor, potencia termoelectrónica del termopar y conductividad térmica del material de referencia de la sonda de medida, I = intensidad de la corriente que circula por el hilo, v_2 y v_1 =

tensión en los bornes del termopar y $t_1 - t_2 =$ tiempos de medida.

Las medidas se han realizado sobre briquetas cilíndricas de arcilla compactada de $44,89 \text{ cm}^2$ de superficie y 25 mm de espesor, obtenidas por prensado uniaxial. La programación de ensayos se ha realizado de forma que los resultados nos permitieran analizar la incidencia de los parámetros característicos de la briketa en la conductividad térmica de la misma. Estos parámetros han sido: densidad de la briketa seca, densidad de la arcilla seca en la briketa, humedad de la arcilla, humedad de la mezcla arcilla-arena de cuarzo y proporción de arena de cuarzo.

Los resultados se han expresado en las Tablas XXIII a XXVII.

En el análisis de resultados no se entra en la discusión teórica de los mecanismos de transmisión de calor pues exigiría una dimensión distinta en el estudio de la microestructura de los compactados y de la estructura cristalina de los componentes minerales. El problema se ha enfocado bajo un punto de vista práctico, determinándose las relaciones existentes entre la conductividad térmica de los compactados de arcilla y los parámetros, ya indicados, que los caracterizan y cuyas modificaciones en el emplazamiento regularán la difusividad térmica a través de la barrera.

II.7.1. Influencia de la densidad en la conductividad térmica de los compactados

Al analizar los resultados (Tabla XXIII) se ha encontrado que existe una relación directa entre la densidad y conductividad térmicas del compactado y que el parámetro de densidad que mejor se correlaciona es la densidad de la arcilla seca.

En las Figs.38 y 43 se han representados los valores de conductividad térmica (λ_T) para la montmorillonita y saponita,

respectivamente, en función de la densidad de la arcilla seca. Si estos valores se agrupan por humedades próximas de la arcilla, se observa que, en el dominio de experimentación, existe una relación prácticamente lineal entre los parámetros de conductividad térmica y densidad de la arcilla seca, relación lineal que se mantiene para las distintas humedades.

Analizadas las regresiones lineales, se obtienen las expresiones siguientes:

MONTMORILLONITA

· SAPONITA

1) Humedad de la arcilla (H_a)=11,6% 1) $H_a = 10\%$

$$\lambda_T = -1,51 + 1,40 \rho_a (e=0,02, r=0,99)$$

2) $H_a = 14,9\%$

$$\lambda_T = -0,99 + 1,18 \rho_a (e=0,04, r=0,99)$$

3) $H_a = 19,1\%$

$$\lambda_T = -1,20 + 1,4 \rho_a (e=0,04, r=0,99)$$

4) $H_a = 24,4\%$

$$\lambda_T = -0,66 + 1,19 \rho_a (e=0,06, r=0,91)$$

5) $H_a = 29,8\%$

$$\lambda_T = -1,72 + 2,01 \rho_a (e=0,007, r=0,99)$$

2) $H_a = 13,8\%$

$$\lambda_T = -0,52 + 0,84 \rho_a (e=5,6 \text{ E-}4, r=1,0)$$

3) $H_a = 17,8\%$

$$\lambda_T = -0,56 + 0,94 \rho_a (e=0,03, r=0,98)$$

4) $H_a = 23,8\%$

$$\lambda_T = -0,24 + 0,83 \rho_a (e=9,06, r=0,99)$$

La estructuración de los datos es indicativa de la incidencia de la humedad del compactado en la conductividad térmica, pero este efecto será analizado posteriormente.

Aunque las regresiones antes expresados estén poco definidas por bajo número de puntos y tengan un sentido físico restringido al dominio de experimentación, parecen indicativas del comportamiento de los variables analizadas y de la consistencia de los resultados. De otra parte permiten inferir que la conductividad térmica de los compactados de montmorillonita incrementa del orden de un 144% con la densidad y que este incremento es del 87% en la saponita. Así mismo parece claro que, para la misma densidad, la conductividad térmica de la montmorillonita es mayor que la de la saponita.

La dispersión de los valores del coeficiente de regresión se considera admisible dada la suma de errores posibles en el proceso experimental (fabricación de briquetas, determinación de densidad y humedad, homogeneidad en la distribución de componentes de la muestra y error del equipo de medida).

II.7.2. Influencia de la humedad en la conductividad térmica de los compactados de arcilla

En el estudio de la relación entre la conductividad térmica y la humedad de los compactados se han realizado experiencias específicas cubriendo el rango de humedades comprendido entre la humedad de la arcilla en las condiciones del laboratorio y la humedad de saturación, de acuerdo con la densidad del compactado.

Del análisis de estos resultados, Tabla XXIV, se deduce que puede establecerse una relación lineal entre la conductividad térmica y la humedad del compactado de arcilla. Las rectas de regresión ajustadas se han representado en las Figs.39 y 44 y tienen por expresión: 6) $\lambda_{Tmont} = 0,162 + 0,029 Ha (e=0,004, r=0,99)$ y 5) $\lambda_{Tsapo} = 0,067 + 0,031 Ha (e=0,04, r=0,99)$.

De este análisis puede inferirse que la humedad de la arcilla incrementa su conductividad térmica pero estos incrementos, del orden del 3% para ambas arcillas, son muy inferiores a los producidos por la densidad. De otra parte, el efecto de la humedad sobre la conductividad es muy parecido para las dos arcillas estudiadas, pero la conductividad de la montmorillonita es superior a la de la saponita en casi todo el rango de humedades experimentadas.

De otra parte si se analiza la incidencia de la humedad en la conductividad térmica para una densidad dada, a partir de la serie de rectas definidas al estudiar la influencia de la densidad (Apartado II.7.1.), se encuentra que las regresiones ajus-

tadas definen rectas subparalelas a las antes indicadas, lo que parece indicar una cierta consistencia de los resultados.

II.7.3. Influencia de la proporción de arena de cuarzo en la conductividad térmica de los compactados.

Los resultados de los ensayos realizados con distintas proporciones de cuarzo y manteniendo practicamente constantes la densidad y humedad de la arcilla, se expresan en la Tabla XXV.

En las Figs.40 y 45 se han representado los valores medios de las medidas realizadas sobre distintas briquetas fabricadas con diferentes proporciones de cuarzo.

Realizado el análisis de estos resultados se encuentra que existe también una relación directa entre el contenido en arena de cuarzo y la conductividad térmica del compactado, como sucede con respecto a la densidad y humedad, pero la incidencia de la proporción de cuarzo es muy inferior a la de los parámetros antes mencionados. Las expresiones de las rectas de regresión ajustadas son las siguientes:

- 7) $\lambda_{Tmont} = 0,49 + 6,2E-3Q\%$ ($e=0,04$, $r=0,89$), para $\rho_a=1,36g/cm^3$ y $Ha=13,2\%$
- 8) $\lambda_{Tmont} = 0,68 + 8,4E-3Q\%$ ($e=0,04$, $r=0,93$), para $\rho_a=1,57g/cm^3$ y $Ha=13,3\%$
- 6) $\lambda_{Tsapon} = 0,45 + 3,6E-3Q\%$ ($e=0,01$, $r=0,97$), para $\rho_a=1,33g/cm^3$ y $Ha=11,1\%$
- 7) $\lambda_{Tsapon} = 0,60 + 6,2E-3Q\%$ ($e=6,2E-3$, $r=0,99$), para $\rho_a=1,54g/cm^3$ y $Ha=12\%$

De estas regresiones parece deducirse que el incremento de conductividad térmica conseguido en los compactos de arcilla con la adición de cuarzo no alcanza el 1% en ninguna de las dos arcillas y que este incremento es ligeramente superior en la montmorillonita. En ambas arcillas las rectas definidas para las

dos densidades ensayadas son paracticamente paralelas como cabría esperar, dada la incidencia de la densidad de la arcilla seca.

II.7.4. Análisis de los efectos conjugados de la densidad de la arcilla seca, humedad y proporción de arena de cuarzo sobre la conductividad térmica de los compactados.

Este análisis se ha abordado experimentalmente, dejando como variable dos o tres de los parámetros estudiados, y mediante el análisis de regresión múltiple para la totalidad de resultados, de las tres variables independientes consideradas.

Los resultados experimentales se expresan en las Tablas XXV y XXVI. Si se mantiene constante la humedad de la arcilla y variables la densidad de la arcilla y proporción de cuarzo, la variable que regula la conductividad térmica es la densidad de la arcilla seca, como parece desprenderse de los valores representados en las Figs.41 y 46, a los que se han ajustado las rectas cuyas ecuaciones de regresión son los siguientes:

$$9) \lambda_{T_{mont}} = -1,29 + 1,50 \rho_a \quad (e=0,095, r=0,90)$$

$$8) \lambda_{T_{sapo}} = -1,19 + 1,43 \rho_a \quad (e=0,06, r=0,95)$$

Las proporciones de cuarzo no llegan a definir subpoblaciones y su incidencia parece quedar reducida a modificar el valor de los coeficientes de regresión.

En las Figs.42 y 47 se han representado los valores de conductividad térmica frente a los de humedad de la arcilla, al mantener constante la humedad de la mezcla arcilla-arena de cuarzo y dejar variables la densidad y humedad de la arcilla y la proporción de cuarzo. La variable densidad de la arcilla seca define dos subpoblaciones en las que λ_T y humedad se correlacionan directa y linealmente. Aunque el número de puntos es pequeño, las regresiones más probables serían las siguientes:

- 10) $\lambda_{Tmont} = 0,01 + 4,9E-2Ha(e=0,03, r=0,95)$ para $\rho_a = 1,54 - 1,47g/cm^3$
y a. de cuarzo = 10-25%
- 11) $\lambda_{Tmont} = 0,84 + 2,8E-2Ha(e=0,016, r=0,99)$ para $\rho_a = 1,83 - 1,62g/cm^3$
y a. de cuarzo = 5-25%
- 8) $\lambda_{Tsapo} = -0,19 + 4,7E-2Ha(e=0,037, r=0,94)$ para $\rho_a = 1,40 - 1,49g/cm^3$
y a. de cuarzo = 5-25%
- 9) $\lambda_{Tsapo} = 0,14 + 5,4E-2Ha(e=0,032, r=0,96)$ para $\rho_a = 1,58 - 1,68g/cm^3$
y a. de cuarzo = 5-25%

Dadas las relaciones establecidas entre la conductividad térmica y las variables: densidad seca de la arcilla, humedad de la arcilla y proporción de arena de cuarzo, se ha intentado obtener la función de dependencia de la conductividad térmica respecto de las variables indicadas mediante el ajuste por regresión múltiple de la totalidad de los resultados experimentales. Las expresiones obtenidas son las siguientes:

$$\lambda_{Tmont} = -1,97 + 1,45(\pm 5,1E-2)\rho_a + 3,5E-2(\pm 1,5E-3)Ha + 6,7E-3(\pm 78,6E-4)Q$$

$$e = 5,6E-2, r = 0,98$$

$$\lambda_{Tmont} = -1,64 + 1,32(\pm 7,4E-2)\rho_a + 2,8E-2(\pm 1,8E-3)Ga + 5,5E-3(1,1E-3)Q$$

$$e = 6,9E-2, r = 0,97$$

El sentido de las expresiones anteriores parece claro. La densidad de la arcilla en los compactados es el parámetro de mayor incidencia unitaria en la conductividad térmica y como, de otra parte, su incremento favorece el resto de propiedades requeridas de la barrera de arcilla, es el parámetro que deberá ser considerado, prioritariamente, en el proceso de fabricación de la barrera.

La humedad de la arcilla, si bien incide positivamente en la conductividad térmica, tiene un efecto unitario inferior al de la densidad. De otra parte la posibilidad de actuar sobre este parámetro es más limitada puesto que la arcilla tiene ya una humedad de constitución y la humedad durante la existencia de la

barrera estará regulada por los flujos térmico e hidráulico impuestos por las condiciones de contorno. La humedad de la arcilla es, de cualquier forma, un parámetro importante en la optimización de la densidad de fabricación de la barrera y debe ser conocida su evolución, como soporte fundamental, en el análisis del comportamiento térmico, hidráulico, mecánico y geoquímico de dicha barrera.

La proporción de cuarzo tiene un efecto pequeño en la mejora de la conductividad térmica de los compactados de arcilla. Su uso debería limitarse a proporciones del orden del 10% de forma que no se produzca un efecto demasiado negativo sobre otras propiedades, en especial sobre la conductividad hidráulica.

A pesar de lo indicado antes, una valoración práctica de las regresiones múltiples definidas deberá considerar los valores absolutos de las tres variables: densidad de la arcilla seca, humedad y proporción de cuarzo, cuyas magnitudes de variación son muy distintas. En este sentido se ha realizado una estimación de las conductividades térmicas para el rango de densidades $1,6-1,8\text{g/cm}^3$ en que debería mantenerse el material de la barrera durante su funcionamiento como tal, para los estados previsibles: saturado, semisturado y seco y para las proporciones de 0 y 10% de cuarzo. El resultado de la estimación es el reflejado en la Tabla XXVIII.

Parece claro que la conducción óptima de calor se producirá en el estado de saturación y con mayor densidad de la arcilla seca. En estas condiciones la conductividad térmica de la montmorillonita es ligeramente superior a la de la saponita, mientras que para condiciones de semisaturación y sequedad conduciría mejor la saponita.

III. ANALISIS DE LA MODIFICACION POR TRATAMIENTO TERMICO DE LAS PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS

Dado que los materiales de la barrera estarán sometidos, durante largo tiempo, al flujo térmico generado por el residuo radiactivo y que, por tanto, podrían ser afectadas algunas de sus propiedades, se ha considerado de interés analizar las modificaciones de dichas propiedades en función de la temperatura de tratamiento de las arcillas.

En este informe se consideran fundamentalmente las modificaciones texturales y microestructurales de la montmoillonita de Serrata y saponita de Cerro del Monte, así como la repercusión en sus propiedades físico-mecánicas. No se insiste, por tanto, en las trasformaciones mineralógicas posibles pues han sido objeto de estudios específicos sobre alteración "hidrotermal".

Para este análisis se han tratado alícuotas de unos 10Kg de las dos arcillas, antes indicadas, que han sido mantenidas durante 10 días a temperaturas de 100, 175, 200, 250 y 300°C, en la atmosfera generada por el vapor de agua procedente de la propia arcilla. Con posterioridad y hasta la realización de los diferentes ensayos se han mantenido en estufa a 60°C.

III.1 REHIDRATACION EN LAS CONDICIONES AMBIENTALES DEL LABORATORIO DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A TRATAMIENTO TERMICO

La experiencia se ha realizado con el fin de analizar la capacidad de rehidratación de las arcillas tratadas a distintas temperaturas, en las condiciones ambientales de laboratorio (humedad relativa del aire y temperatura), puesto que, se ha considerado que la capacidad de rehidratación debe estar relacionada con la integridad estructural de la arcilla.

El ensayo se ha desarrollado durante 120 días a partir de una de las alicuotas tratadas a distintas temperaturas y te-

niendo como referencia las arcillas no tratadas. Todas ellas se han mantenido en las mismas condiciones del laboratorio, cuyos valores diarios de humedad relativa del aire y temperatura se han representado en las Figs.48a y b. En este periodo la humedad relativa ha variado entre el 46 y 82% y la temperatura entre 13 y 32°C, lo que permite conocer el comportamiento de las arcillas en condiciones bastante extremas. Los datos de evolución con el tiempo de la humedad de las arcillas, no tratadas y tratadas a distintas temperaturas, se expresan en las Tablas XXIX y XXX y se han representado en las Figs.49a-f.

De estos resultados pueden extraerse algunas consideraciones de caracter práctico:

El calentamiento produce modificaciones importantes en la capacidad de rehidratación de las dos arcillas estudiadas, modificaciones que deben ser tenidas en cuenta al establecer las condiciones del proceso de preparación industrial de los materiales y, especialmente, al analizar sus funciones y comportamiento en las condiciones del almacenamiento. Los niveles medios de rehidratación alcanzados, tomando como referencia la arcilla "no tratada", para las distintas temperaturas de pretratamiento, se expresan en la Tabla XXXI. La rehidratación de la montmorillonita varía entre el 82% para los 100°C de pretratamiento y el 44% para 250°C, la rehidratación de la saponita es del 96 y 66%, respectivamente, para las temperaturas de pretratamiento indicadas.

El efecto térmico es ya significativo para el tratamiento a 100°C. A esta temperatura de tratamiento, la saponita ha recuperado la humedad de la arcilla "no tratada" a partir de los 57 días de ensayo, lo que no ha sucedido con la montmorillonita. En general la saponita se rehidrata mejor que la montmorillonita para las distintas temperaturas de pretratamiento.

La cinética de rehidratación de las dos arcillas es relativamente rápida, dada la rapidez de respuesta de la humedad de

la arcilla ante las variaciones de la humedad relativa del aire. La evolución en el tiempo de ambos parámetros describen curvas (Figs. 48-a y 49a-f) de tendencia análoga y existe correlación positiva, hasta un valor de 0,69, entre ellos.

El ensayo realizado, a pesar de ser extraordinariamente simple, tiene un rigor aceptable ya que el punto de coordenadas definido por la media de las humedades relativas del aire y de las humedades de la arcilla no tratada, pertenece, prácticamente, a la isoterma de adsorción determinada para actividades del agua bien definidas y en condiciones de equilibrio. Esto indicaría que las arcillas (producto industrializado con el que se está trabajando) tienden a mantener, como media, su humedad de equilibrio, que para el tiempo de experimentación estaría en el 12,15% ($\sigma = 1,4$) para la montmorillonita y en el 11,13% ($\sigma = 1,24$) para la saponita.

III.2. MODIFICACIONES TEXTURALES Y MICROESTRUCTURALES DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A TRATAMIENTO TERMICO.

El estudio de las modificaciones texturales y/o microestructurales de las arcillas producidas por efecto térmico se ha abordado a partir del análisis de las variaciones de algunas de sus propiedades específicas a las temperaturas de tratamiento.

III.2.1. Transformaciones mineralógicas

Realizado el análisis por difracción de RX (método del polvo y agregado no orientado de la muestra total) sobre los productos del tratamiento térmico, no se ha encontrado, como cabría esperar, ninguna transformación mineralógica. En las Figs. 50 y 51 se expresan los difractogramas ($\text{Cu K}\alpha$) de la montmorillonita y saponita, respectivamente, en los que se indican los espaciados en Å de las reflexiones más características y las temperaturas de pretratamiento (25, 100, 200 y 300°C).

La modificación estructural más significativa, que afecta tanto a la montmorillonita como a la saponita es el desplazamiento de la reflexión basal (001) por reducción del espaciado de 14,5 a 9,6 Å. En la montmorillonita el resto de las reflexiones permanecen, prácticamente, inalteradas. En la saponita se observan modificaciones importantes en el difractograma obtenido a partir de la alícuota tratada a 300°C, en las reflexiones a 3,34 y 3,24 Å. Estas modificaciones podrían atribuirse a una cierta heterogeneidad de la muestra, aunque no se ha detectado en otros ensayos.

Los resultados del análisis térmico diferencial tampoco indican transformaciones significativas producidas por el pretratamiento térmico. En la Fig.52 y 53 se representan los diagramas correspondientes a las alícuotas no tratada (25°C) y la sometida a 300°C. La montmorillonita (Fig.52) presenta los endotermicos correspondientes al agua adsorbida (63, 131°C) a muy baja temperatura y los dos endotérmicos característicos de la deshidroxilación a 642 y 860°C. El diagrama de la alícuota tratada a 300°C es practicamente el mismo y la única modificación que cabría resaltar es el aumento de la temperatura a que se producen los endotérmicos de baja temperatura de los cuales el de 131°C casi no se insinua.

La saponita (Fig.53) también mantiene sus peculiaridades a pesar del pretratamiento térmico. Se caracteriza por el endotérmico de perdida en agua adsorbida a 112°C y la inversión endoexotérmica a 817 y 840°C. Este tipo de inversión y la temperatura a que se produce es también típica de la sepiolita, de la que existe una cierta proporción en la arcilla estudiada. Con el pretratamiento térmico solo se ha producido un desplazamiento de unos 34°C, hacía temperaturas más altas, de los tres picos característicos.

III.2.2. Deshidratación de la montmorillonita y saponita al ser sometidas a tratamiento térmico.

La deshidratación producida en las arcillas durante el pretratamiento térmico se ha estudiado mediante análisis termogravimétrico, tomándose como referencias las alícuotas de las arcillas mantenidas en las condiciones de temperatura y humedad relativa del laboratorio.

En las Figs.54 y 55 se han representado las curvas termogravimétricas y en la Tabla XXXII se indican las pérdidas porcentuales de peso para los intervalos de temperatura de 31 a 300°C y 300 a 949°C.

En el estudio de la deshidratación de los dos tipos de arcillas se han tenido en cuenta las pérdidas de peso debidas a los carbonatos, cuyo contenido es del 0,08% en la montmorillonita y del 0,07% en la saponita. De otra parte, se ha distinguido de forma arbitraria, aunque comúnmente aceptada, entre el agua pérdida a $T \leq 300^{\circ}\text{C}$ como interlamilar, fundamentalmente adsorbida, y la pérdida a $T > 300^{\circ}\text{C}$ como agua de hidróxilación, constitutiva de la "estructura".

De acuerdo con los resultados del análisis termogravimétrico y el criterio antes indicado, la distribución del agua en las dos arcillas sería la siguiente: En la montmorillonita el 69% de su agua sería agua interlamilar (adsorbida) y el resto (31%) corresponden al agua "estructural" de hidróxidación. En el caso de la saponita se mantienen proporciones muy parecidas, el 70% sería agua adsorbida y 30% agua "estructural".

Las pérdidas porcentuales, en peso, de los dos tipos de agua producidas durante el pretratamiento térmico se expresan en la Tabla XXXIII. Estos resultados parecen indicar que la pérdida del agua "interlamilar" o adsorbida no se ha completado en el pretratamiento, hasta 300°C, durante 10 días y aplicado a una

cantidad de arcilla del orden de los 10 Kg. Esta pérdida supone en la montmorillonita el 78% y en la saponita el 71%, lo que indica que la reducción estructural en la dirección C que da lugar a la desaparición del espaciado de 14A en ambas arcillas, se habría producido sin la pérdida total de este tipo de agua pues dicha reducción estructural se detecta incluso en los difractogramas de las alícuotas tratadas a 200°C (Fig.50 y 51).

Cabría pensar también que durante el pretratamiento a 300°C se hubiera producido la pérdida total del agua interlaminaar y que se hubieran rehidratado parcialmente las dos arcillas (22% la montmorillonita y 29% la saponita) durante su preparación para análisis, pero sin una repercusión estructural definitiva al no recuperar el espaciado de 14A. Esta hipótesis es congruente con los resultados del ensayo de rehidratación de las dos arcillas mantenidas durante 120 días en las condiciones del laboratorio, de los que se deducía mejor rehidratación de la saponita y una cinética rápida en el proceso.

La distinción de los dos tipos de agua por la temperatura a que se pierden (límite $\approx$ 300°C) es ciertamente arbitraria puesto que la pérdida de peso es practicamente continua como lo indica la pendiente de las curvas TG. Podría haberse tomado como temperatura de diferenciación la ruptura de pendiente del endotérmico de 640°C de la montmorillonita y del de 817°C de la saponita pero también sería arbitrario pues, de acuerdo en la bibliografía sobre el tema, la pérdida de agua de hidrólisis se produce gradualmente y la temperatura de comienzo depende de parámetros de composición y estructurales.

De los resultados termogravimétricos que estamos analizando parece deducirse que la pérdida de agua es continua y que el pretratamiento térmico ha provocado, en la montmorillonita, pérdida de agua "estructural", que ha supuesto un 14,5% en la alícuota pretratada a 300°C. En la saponita no se ha producido esta pérdida o es inapreciable, pues la cantidad de agua ($T >$

300°C) permanece prácticamente constante en las alicuotas pretratadas entre 100 y 300°C.

III.2.3. Modificación de las propiedades: densidad, area superficial y aspecto textural en las arcillas sometidas a tratamiento térmico

La densidad se ha determinado mediante pignómetro de helio como se indicaba en el Apartado I.2.1. En la determinación del área superficial se han aplicado las técnicas del azul de metileno, para el area superficial total (Apartado I.2.3.), y el BET para el area superficial externa. Esta última técnica se basa en la valoración del area ocupada por el nitrógeno adsorbido como monocapa en la superficie externa de las distintas especies minerales.

En las Tablas XXXIV a XXXVI se expresan los valores de los parámetros, antes indicados, para los dos tipos de arcillas y las diferentes temperaturas de tratamiento.

En el análisis de las modificaciones producidas durante el pretratamiento térmico, se han tomado como términos de referencia los valores de densidad y área superficial externa de las alicuotas pretratadas a 100°C, ya que, habitualmente, dichos parámetros se determinan sobre muestra desecada a 100°C.

La densidad "aparente" de la montmorillonita crece, con la temperatura de pretratamiento, desde 2,68 g/cm³ a 100°C hasta 2,83 g/cm³ a 300°C, lo que representa un incremento del 5,6%. En la saponita se produce el efecto contrario, la densidad "aparente" decrece desde 2,64 g/cm³ a 100°C hasta 2,50 g/cm³ a 300°C, lo que representa una disminución del 5,3%. El mayor incremento se produce entre los 175 y 200°C en ambas arcillas.

El aumento de la densidad "aparente" en la montmorillonita debe implicar disminución del volumen del sólido, que se

produciría por condensación estructural en congruencia con la reducción del espaciado basal de 14A detectada por difracción de RX. La disminución estimada de volumen, entre los 100 y 300°C de pretratamiento, es del 9,7%. De ella, el 5,6% se debería al agua perdida y el 4,1% a la condensación estructural provocada. Esta estimación se ha realizado tomando como referencia la densidad seca a 949°C (es constante) de las alicuotas pretratadas a 100, 200 y 300°C, calculada a partir de la densidad y de la perdida de agua determinada por gravimetría. En la estimación del volumen ocupado por el agua perdida, se ha considerado como densidad del agua 0,97 g/cm³.

En el caso de la saponita, como ya se ha indicado, la densidad "aparente" decrece con la temperatura de pretratamiento. Esto quiere decir que se habría producido un aumento "aparente" del 5,9% en el volumen del solido, de acuerdo con el razonamiento aplicado para la montmorillonita. En el comportamiento de la saponita parecería existir contradicción puesto que: la disminución de densidad supone aumento de volumen y la pérdida de agua y reducción del espaciado basal implica disminución de volumen. La hipótesis que podría conciliar esta contradicción se basa en la suposición de que el tratamiento térmico produciría el sellado de las estructuras tubiformes dominantes en la saponita, lo que induciría a medir incrementos aparentes de volumen al no poder penetrar el helio (gas utilizado en la medida) en las estructuras selladas. Un comportamiento similar fue ya detectado en los trabajos realizados con arcillas illíticas de estructura tubiforme.

De los valores de área superficial, expresados en la Tabla XXXV, se deduce que el pretratamiento térmico ha provocado la modificación diferenciada de dicho parámetro en los dos tipos de arcilla estudiados (montmorillonita y saponita). En la montmorillonita, la superficie total (método del azul de metileno AM disminuye 221,7 m²/g al ser tratada entre 25 y 300°C, por el contrario la superficie externa (BET) aumenta 23,1 m²/g en el intervalo

de 100 a 300°C. Esto quiere decir que, en este último intervalo, la superficie interna habría disminuido en 178,9 m²/g.

En la saponita no se produce el aumento de superficie externa detectado en la montmorillonita. La disminución de superficie total (AM) es de 122,6 m²/g entre los 25 y 300°C y la de superficie externa (BET) de 33,8 m²/g entre 100 y 300°C, en este intervalo de temperatura la disminución de superficie interna será, por tanto, de 74,7 m²/g.

Parece evidente la importancia del efecto térmico sobre el área superficial de los dos tipos de arcilla, cuya valoración global representaría una disminución de la superficie total del orden del 46% para la montmorillonita y del 36% para la saponita.

La observación mediante microscopio electrónico de barrido, de la arcilla no tratada y de la sometida a 300°C durante diez días, pone de manifiesto las modificaciones texturales que se reflejan en las Figs. 56 y 57 (fotomicrografías 1 a la 6). El aspecto más destacable en la montmorillonita es el desgajamiento ocelar de las láminas Fig. 56 (fotomicrografías 2 y 3). Podría interpretarse que esta modificación textural ha repercutido en el incremento de la superficie externa (BET) y que la condensación estructural por pérdida de agua y disminución del espaciado basal explicaría la disminución de superficie interna y el aumento de densidad "aparente".

En la saponita se detecta una textura fibroso-tabular claramente observable a 20.000 aumentos, Fig. 57 (fotomicrografía 6), que puede quedar enmascarada por formas laminares en observaciones realizadas con aumentos menores a los indicados. El contraste textural por efecto térmico parece evidente como puede verse en la fotomicrografía antes indicada y justificaría, junto a la reducción del espaciado basal de 14Å, la disminución de superficie interna y externa detectada. De otra parte, como ya se ha indicado, el sellado en los extremos de parte de las formas

tabulares podría inducir a la medida, por exceso, del volumen del sólido y por tanto a la disminución de la densidad "aparente".

Se considera que la textura fibroso-tabular de la arcilla saponítica es la causa fundamental de las diferencias de comportamiento respecto de la montmorillonita, en especial de las diferencias de compactabilidad, densidad e integridad de los bloques.

III.2.4. Parámetros de plasticidad de las arcillas sometidas a tratamiento térmico.

La incidencia del tratamiento térmico sobre la plasticidad de los dos tipos de arcilla estudiados se ha analizado sobre la modificación de los valores de los límites líquido y plástico determinados según la metodología indicada en el Apartado I.2.2.

Los resultados se expresan en la Tabla XXXVI y Figs.58 y 59. El parámetro más afectado es el límite líquido que evoluciona de forma análoga en los dos arcillas, montmorillonita y saponita. Entre los 25 y 175°C, la variación del límite líquido es poco significativa y entre los 175 y 300°C disminuye de forma prácticamente lineal con la temperatura. En la montmorillonita la disminución se extiende entre el 260% (175°C) y el 193% (300°C) y en la saponita entre 165% (175°C) y el 89% (300°C).

El efecto térmico es ligeramente más significativo en la saponita que en la montmorillonita como indican las pendientes de las rectas definidas entre los 175 y 300°C, cuyas expresiones son:

$$L.Liq_{Mont} = 358 - 0,55 T^{\circ}C \quad (r = - 0,99)$$

$$L.Liq_{Sapo} = 272 - 0,61 T^{\circ}C \quad (r = - 0,99)$$

El límite plástico tiende también a disminuir con la temperatura de tratamiento, pero la dispersión y pequeña diferencia entre los valores de este parámetro no permite establecer con

claridad la ley de variación.

De acuerdo con los resultados parece poder indicarse que los dos tipos de arcilla pierden plasticidad al ser tratados térmicamente y que la pérdida es más significativa en la saponita.

III.2.5. Parámetros de hinchamiento de las arcillas sometidas a tratamiento térmico

Se han considerado como parámetros de hinchamiento la expansión potencial y presión de hinchamiento, cuya determinación se ha realizado de acuerdo con la metodología descrita en el Apartado II.5. En el análisis de la modificación inducida por tratamiento térmico, se han considerado como términos de referencia los valores, de dichos parámetros, en las arcillas no tratadas.

Los resultados de expansión potencial en sedimentación se expresan en la Tabla XXXVII y Fig.60. En las dos arcillas el comportamiento es cualitativamente análogo, pero cuantitativamente distinto.

El máximo de expansión potencial se obtiene en las alícuotas tratadas a 100°C y su valor es del 284% en la montmorillonita y del 200% en la saponita, para temperaturas superiores estos parámetros decrecen de forma continua y lineal entre los 175 y 300°C hasta valores del 184% en la montmorillonita y del 66% en la saponita.

En el intervalo de temperatura de 175 a 300°C el coeficiente de correlación entre la expansión potencial y la temperatura de tratamiento es -0,99 para las dos arcillas y las regresiones lineales que podrían establecerse tienen las expresiones:

$$\text{Exp.pot. Mont.} = 402 - 0,725 T(^{\circ}\text{C})$$

$$\text{Exp.pot. Sapo.} = 337 - 0,925 T(^{\circ}\text{C})$$

Las regresiones anteriores parecen indicar, por el valor de la pendiente, mayor incidencia de la temperatura de tratamiento sobre la saponita. De otra parte, la posible pérdida de capacidad de adsorción de agua y, por tanto, de expansión potencial debida al efecto térmico, no explicaría el comportamiento de las dos arcillas entre 25 y 100°C, ni el valor de expansión potencial de la montmorillonita a 300°C (184%), ligeramente superior al de dicha arcilla a 25°C (172%).

Los resultados de presión de hinchamiento se expresan en la Tabla XXXVIII y Figs.61 y 62. Como se desprende de estos resultados, la presión de hinchamiento decrece con la temperatura de tratamiento. En la montmorillonita decae desde 64 a 34 Kg/cm² para densidad 1,6 g/cm³ y desde 170 a 146 Kg/cm² para densidad de 1,8 g/cm³, en el rango de temperatura de 25 a 300°C. En la saponita el descenso de la presión de hinchamiento, en el rango de temperatura antes indicado, es del 51% para la densidad de 1,6 g/cm³ y del 48% para 1,8 g/cm³. Parece, de nuevo, que la repercusión del tratamiento térmico es más significativa en la saponita.

Con el fin de comprobar si el tratamiento térmico tiene efectos duraderos, se ha medido la presión de hinchamiento sobre la alicuota mantenida durante 121, para rehidratación, en las condiciones del laboratorio. En los resultados que se expresan en la Tabla XXXIX y Fig.63 se comprueba que la reducción de la presión de hinchamiento se mantiene, al menos, durante el tiempo de experimentación y supone un 44% en la montmorillonita entre 25 y 250°C y el 44% en la saponita entre 25 y 300°C. Lo que indicaría que solo se habría producido una ligera recuperación de presión de hinchamiento durante la rehidratación en la saponita.

III.2.6. Conductividad hidráulica de las arcillas sometidas a tratamiento térmico

La determinación de la conductividad hidráulica se ha realizado según la metodología descrita en el Apartado II.6 y se

han tomado como referencia los valores de conductividad de álicuotas no tratadas.

Los resultados se expresan en la Tabla XL. En la montmorillonita con densidad $1,6 \text{ g/cm}^3$ la conductividad hidráulica en la álicuota no tratada es de $1,1 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$ y en la tratada a 300°C de $1,4 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$. Las modificaciones de la conductividad, dentro del rango experimental de temperaturas de tratamiento, no permiten establecer una variación significativa de este parámetro. Para densidad $1,8 \text{ g/cm}^3$ si se observa un aumento de la conductividad entre $5,3 \cdot 10^{-14} \text{ m/s}$ en la álicuota no tratada y $1,0 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$ en la tratada a 250°C .

La repercusión del tratamiento térmico parece más evidente en la saponita con densidad $1,6 \text{ g/cm}^3$. En la álicuota no tratada 25°C y en la tratada a 100°C la conductividad hidráulica es la misma, pero a partir de los 100°C decrece continuamente (Fig.65), de forma que el coeficiente de correlación lineal entre las dos variables es 0,97, y la regresión tendría por expresión:

$$\lg K = -13,52 + 5,2 \cdot 10^{-3} (\pm 6,1 \cdot 10^{-4}) T.$$

De cualquier forma, en ninguna de las dos arcillas la repercusión del tratamiento térmico supone en descenso de la conductividad hidráulica por debajo de los valores aceptables.

III.2.7. Resistencia a compresión simple de las arcillas sometidas a tratamiento térmico

Los ensayos de resistencia se han realizado según la metodología descrita en el Apartado II.4.

De acuerdo con los resultados obtenidos, que se expresan las Tablas XLI y XLII, puede indicarse que la resistencia a compresión simple de los compactados de arcilla tiende a decrecer en función de la temperatura de tratamiento (Fig.66). En la montmo-

rillonita compactada a densidad $1,6 \text{ g/cm}^3$ los valores de resistencia a 25 y 300°C son, respectivamente, de $12,9$ y $8,5 \text{ Kg/cm}^2$ y de $55,6$ y $30,3 \text{ Kg/cm}^2$ para densidad $1,8 \text{ g/cm}^3$.

En la saponita también se observa la tendencia a decrecer en función de la temperatura de tratamiento (Fig.67), especialmente en las probetas con densidad $1,8 \text{ g/cm}^3$ cuya resistencia decrece desde 107 Kg/cm^2 , en la arcilla no tratada, a 78 Kg/cm^2 en la tratada a 300°C .

A pesar de los errores admisibles en el proceso de fabricación y rotura, puede establecerse un nivel aceptable de asociación entre las variables de resistencia y temperatura de tratamiento. Los coeficientes de correlación lineal entre dichas variables para los compactados de densidad seca $1,8 \text{ g/cm}^3$, alcanzan valores de $-0,94$ en la montmorillonita y $-0,95$ en la saponita y las expresiones de las regresiones serían las siguientes:

$$RCS_{\text{Mont.1,8}} = 5,47 - (0,09 \pm 0,016)T^\circ\text{C y}$$

$$RCS_{\text{Sapo.1,8}} = 108,2 - (0,094 \pm 0,018)T^\circ\text{C}$$

La resistencia mecánica de los compactados de arcilla y su modificación en función de la temperatura deberán ser tenidas en cuenta en la fabricación de la placa base de la barrera de arcilla, soporte del contenedor.

III.2.8. Temperatura límite

Parece evidente que el flujo térmico va a repercutir, en general negativamente, en las propiedades físico-mecánicas requeridas de los materiales arcillosos utilizados en la construcción de las barreras artificiales contra la migración de radionúcleidos en los almacenamientos de residuos radiactivos.

Aunque no se han detectado transformaciones mineralógicas propiamente dichas, la deshidratación inducida por efecto

térmico, provoca modificaciones significativas en propiedades intrínsecas a las especies minerales dominantes en los materiales arcillosos tratados: reducción del espaciado basal a 14A de las esmectitas, disminución del área superficial total, desgajamiento de láminas en la montmorillonita y condensación textural en la arcilla saponítica.

Los valores de las propiedades físico-mecánicas analizadas son también indicativos de las modificaciones inducidas por tratamiento térmico. Disminuyen considerablemente: la plasticidad, presión de hinchamiento y resistencia a compresión de los compactados de los dos tipos de arcilla y aumenta la conductividad hidráulica.

De forma general parece poder afirmarse que la repercusión relativa del tratamiento térmico es más acusada en la arcilla saponítica y que las modificaciones inducidas se han mantenido durante el tiempo de experimentación.

Se destaca que la parte de los efectos térmicos indicados se detectan ya en el pretratamiento a 100°C durante 10 días, y aunque los valores de las propiedades analizadas permanecen en límites aceptables, se considera que la temperatura en el entorno inmediato del contenedor no debería sobrepasar los 100°C, dado el efecto adicional previsible de un tiempo largo de exposición.

IV. CONSOLIDACION DE LAS ARCILLAS: ENSAYOS EDOMETRICOS

Los materiales que constituyen la barrera de ingeniería estarán sometidas "in situ" a las cargas debidas a la presión litostática, peso de la columna de arcilla y peso del contenedor, es de esperar, por tanto, que puedan producirse procesos de consolidación cuya magnitud debe ser estimada.

Si un material fino (arcilla-limo) es sometido a un esfuerzo de compresión debido a cualquier tipo de carga, la estructura de dicho material experimenta una deformación. Esta deformación elasto-plástica da como resultado la reducción del índice de poros debido a la expulsión de los fluidos alojados. Dada la baja permeabilidad de estos materiales, la deformación indicada es un proceso lento y dependiente del tiempo.

En el análisis de los resultados puede aplicarse la teoría de la consolidación de Therzaghi, que aplica como base el concepto de presiones efectivas. De acuerdo con esta teoría los incrementos de carga aplicados son soportados inicialmente por el agua intersticial, produciéndose un $\Delta u = \Delta \sigma$ y permaneciendo la presión efectiva sin modificación $\Delta \sigma' = 0$, para $t = 0$ y $U = 0\%$ (tiempo y grado de consolidación), hasta la disipación del incremento de presión intersticial ($t = t_{100}$ y $U = 100\%$) en que el incremento de carga sería soportado por las partículas del sólido, de forma que al final de cada escalón de carga se cumpliría que la presión efectiva $\sigma'_i = \sigma'_{i-1} + \Delta \sigma - \Delta u = \sigma'_{i-1} + \Delta \sigma$.

Las determinaciones se han realizado según la metodología del ensayo edométrico: Las arcillas han sido compactadas, hasta la densidad requerida, en los anillos metálicos de ensayo que les ha servido de confinamiento en su contorno cilíndrico. La situación de piedras porosas en los dos extremos de la probeta ha permitido la saturación y expulsión de fluidos en las fases de carga. La consolidación se ha obtenido mediante la aplicación periódica de incrementos de carga. Los intervalos de tiempo de

aplicación de las cargas han estado condicionados por la definición de la consolidación secundaria para cada uno de los escalones establecidos. Al finalizar el proceso de carga, el ensayo se ha completado con ciclos de descarga.

Durante todo el proceso se han medido las deformaciones de la probeta de arcilla.

Se han analizado los dos tipos de materiales arcillosos (montmorillonicos y saponiticos) precompactados a densidades secas iniciales comprendidas entre 1,4 y 1,6 g/cm³.

El análisis de las curvas edométricas y de consolidación, representadas en las Figs.68 a 79, se ha realizado de acuerdo con el procedimiento empírico desarrollado por Casagrande.

El comportamiento en consolidación de ambas arcillas se ha expresado por los parámetros siguientes:

$$\text{Indice de compresión: } C_c = \frac{\Delta e}{\log (p_o + \Delta p) - \log p^o}$$

$$\text{Indice de descompresión: } C_s = \frac{\Delta e}{\log p_2 - \log p_1}$$

$$\text{Coeficiente de compresibilidad: } Q_v = \frac{\Delta e}{\Delta p}$$

$$\text{Coeficiente de compresibilidad volumétrica: } mv = \frac{av}{1 + e_o}$$

$$\text{Coeficiente de consolidación: } C_v = \frac{T_{50} H^2}{t_{50}}$$

donde Δe corresponde a la modificación del índice de poros durante la compresión y/o descompresión, p_i representa las presiones correspondientes al intervalo de índice de poros analizado, T_{50} es el factor tiempo para el 50% de consolidación, que de acuerdo con la relación teórica entre $U\%$ y T alcanzaría el valor de $T_{50} = 0,196$, H es la altura de probeta por superficie drenante una vez alcanzado el 50% de consolidación para cada uno de los escalones de carga y t_{50} es el tiempo real en que se alcanza dicho 50% de consolidación.

En la Tabla XLIII se expresan los parámetros edométricos de la montmorillonita (densidades secas iniciales 1,41 y 1,60 g/cm³) y de la saponita (densidades secas iniciales 1,50 y 1,60 g/cm³) y en las Tablas XLIV y XLV se indican los valores del coeficiente de consolidación y de permeabilidad calculada para los distintos escalones de carga en que se ha producido la consolidación. El valor de K corresponde al coeficiente de permeabilidad que gobierna el flujo de agua durante el intervalo de compresión. El cálculo de K se ha realizado a partir de la expresión $C_v = K/m_v \gamma_w$ que le relaciona con el coeficiente de consolidación (C_v) y con el coeficiente de compresibilidad volumétrica (m_v).

Las curvas edométricas de los dos tipos de arcilla analizadas muestran los intervalos de carga consumidos en compensar la presión de hinchamiento (asentamiento nulo) de los compactados de arcilla. En la montmorillonita con densidad seca inicial de 1,41 y 1,60 g/cm³ se inician los asentamientos en los intervalos de carga de 9,72 a 20,0 y de 20 a 40 Kg/cm² respectivamente. En la saponita el inicio del asentamiento requiere cargas superiores, para densidades secas de 1,50 y 1,60 g/cm³ el asentamiento se inicia en los escalones de 40-70 y de 100-200 Kg/cm² respectivamente.

Estos resultados son congruentes con la diferencia en presión de hinchamiento, de ambas arcillas y con las determinaciones realizadas de dicho parámetro, cuyos valores frente a la densidad seca de la arcilla están expresados en las Figs.30 y 31.

Las dos arcillas tienen un comportamiento elasto-plástico con relación entre los índices de compresión y descompresión: $C_c/C_s > 1$. La recuperación, por descompresión, del índice de poros es parcial, siendo ligeramente superior en la montmorillonita que en la saponita y en cada una de las arcillas la recuperación es mayor a mayor densidad.

Los valores de los coeficientes a_v y m_v son indicativos de la mayor compresibilidad de la montmorillonita, sin embargo, dada la capacidad de hinchamiento de estos materiales y por tanto, la carga necesaria para el inicio del asentamiento, parece poco probable que este pueda producirse "in situ" en cualquiera de las dos arcillas con densidad del orden de $1,6 \text{ g/cm}^3$.

La consolidación en los dos tipos de arcilla es muy lenta como cabría esperar de sus coeficientes de permeabilidad, cuyos valores calculados están comprendidos entre $4,7 \cdot 10^{-12}$ y $7,1 \cdot 10^{-14} \text{ m/s}$, magnitudes equivalentes a las medidas en las determinaciones específicas de la conductividad hidráulica (Apartado II.6).

V. RESISTENCIA DE LAS ARCILLAS AL ESFUERZO CORTANTE. ENSAYOS TRIAXIALES

El estudio del comportamiento de esmectitas compactadas ante esfuerzos cortantes no es un problema fácil debido a algunas de las propiedades de dichos materiales, especialmente su baja permeabilidad, alta presión de hinchamiento y alto hinchamiento potencial.

Los parámetros de rotura se han determinado mediante la realización de ensayos triaxiales drenados y no drenados con medida de presiones intersticiales, con el fin de poder determinar las presiones efectivas ($\sigma' = \sigma - u$) que en último término definen el estado y propiedades del material ensayado.

Para la realización de los ensayos se han utilizado células triaxiales de media ($P < 100 \text{ Kg/cm}^2$) y alta presión ($100 < P < 700 \text{ Kg/cm}^2$). En esta última ha sido necesaria la sustitución del circuito de drenaje estandar por un circuito de cobre que pudiera soportar la presión de cámara sin introducir modificación alguna en el flujo de drenaje.

Las probetas de arcilla ensayadas hasta ahora se han compactado a densidades secas de $1,6 \text{ g/cm}^3$ la de montmorillonita y $1,4 \text{ g/cm}^3$ las de saponita, con la humedad de estabilización de ambas en las condiciones ambientales del laboratorio. Son por tanto probetas no saturadas que han sido sometidas a saturación, por ambos extremos, con presión de cola de 10 Kg/cm^2 y confinante de 25 Kg/cm^2 , con el fin de facilitar la saturación y minimizar el hinchamiento. Se han mantenido en saturación hasta flujo prácticamente nulo, controlado mediante cambiador de volumen de 10^{-3} ml de sensibilidad.

Una vez saturadas las probetas se han mantenido en consolidación, hasta el "equilibrio", bajo la presión confinante (σ_3) programada para la rotura. En el caso de la montmorillonita

(1,6 g/cm³) estas presiones han estado comprendidas entre 60 y 400 Kg/cm² y en el de la saponita (1,4 g/cm³) entre 40 y 100 Kg/cm².

El control de la consolidación se ha realizado sobre las curvas de volumen de agua drenado frente al tiempo ($\sqrt{t}$) hasta caudal prácticamente nulo. A partir de estas curvas se ha determinado el tiempo de rotura y con ensayos previos se ha estimado el porcentaje de deformación, parámetros que han permitido definir la velocidad de aplicación del desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) para deformación constante. En las Figs.80 y 81 se han representado las curvas de cambio de volumen para cada una de las arcillas.

V.1. ENSAYO TRIAXIAL DRENADO

La medida de presiones efectivas en el ensayo triaxial drenado exige, logicamente, la disipación de las presiones intersticiales en la muestra. Con este fin se ha favorecido el drenaje por ambos extremos de la probeta mediante la utilización de las tiras de drenaje recomendadas por Henker y Gilbert y cuya efectividad ha sido discutida por Bishop y Gibson.

El caudal de drenado se ha medido mediante cambiador de volumen de 10^{-3} de sensibilidad, la carga mediante celulas de carga de 1000 y 2000 Kg y la deformación mediante captadores de desplazamiento de 10^{-3} mm. Los tres parámetros han sido registrados de forma continua durante el ensayo.

En el ensayo, realizado a deformación controlada, la velocidad de aplicación del desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) ha sido de 0,0012 mm/min en la montmorillonita y 0,001 mm/min en la saponita.

En las Figs.82 y 83 se han representado las curvas de esfuerzos y cambio de volumen frente a la deformación. En la montmorillonita la rotura se ha producido para deformaciones comprendidas entre el 7 y 14% con valores del desviador de 16,9 y

26,6 Kg/cm² y en la saponita la deformación ha estado entre el 9 y 12% y el desviador entre 31 y 42 Kg/cm².

Se ha realizado la evaluación tensional en rotura según la teoría de Mobz-Coulomb que establece para la resistencia al esfuerzo de corte viene dada por la expresión: $T = c + \sigma_n \tan \phi$. Practicamente corresponde a la ecuación de una recta tangente a los círculos de Mohr de tensiones en condiciones de falla.

En las Figs.84 y 85 se han representado los círculos de Mohr de las dos arcillas cuyas envolventes indicarían que los parámetros de resistencia son los siguientes:

Montmorillonita (1,6 g/cm³)

Angulo de rozamiento interno $\phi = 7^\circ$

Cohesión $c = 1 \text{ Kg/cm}^2$

Saponita (1,4 g/cm³)

Angulo de rozamiento interno $\phi = 7^\circ$

Cohesión $c = 7,5 \text{ Kg/cm}^2$

V.2. ENSAYO TRIAXIAL NO DRENADO CON MEDIDA DE PRESIONES INTERSTICIALES

Las presiones intersticiales se han medido en el extremo de las probetas mediante captador de presión intersticial de capacidad y sensibilidad adecuada a los valores esperados en función de las presiones de ensayo. Para conseguir equilibrar las presiones intersticiales entre el centro y extremos de las probetas y acelerar el equilibrio se han utilizado tiras de drenaje como en el ensayo drenado.

Con el fin de evitar los posibles errores introducidos por la presencia de aire en los conductos, que provocaría un

cierto drenaje en la probeta al comprimirse, se ha aplicado al sistema una contrapresión de 10 Kg/cm^2 que permite disolver todo el aire existente.

La velocidad de aplicación del desviador ha sido de $0,012 \text{ mm/min}$ en la montmorillonita y $0,011 \text{ mm/min}$ en la saponita, de acuerdo con las curvas de cambio de volumen- $\sqrt{t}$.

Las curvas de esfuerzos y presiones intersticiales frente a la deformación se han representado en las Figs.86 a 88. De la montmorillonita se han roto dos series de probetas, una de ellas con presiones de confinamiento entre 60 y 100 Kg/cm^2 y otra con confinamiento entre 200 y 300 Kg/cm^2 . En la primera de ellas la deformación en rotura está entre el 9 y 12% para valores de desviador entre $15,4$ y $29,2 \text{ Kg/cm}^2$, en la segunda serie la deformación en rotura esté entre el 8 y 11% para valores del desviador entre 24 y 66 Kg/cm^2 .

De la saponita se han roto cuatro probetas, Fig.88, bajo presiones de confinamiento entre 40 y 100 Kg/cm^2 , produciéndose la rotura a deformaciones comprendidas entre el 7 y 10% para valores del desviador entre 18 y $33,5 \text{ Kg/cm}^2$.

En la evaluación de las tensiones en rotura se ha aplicado, como en los ensayos drenados, el criterio de Mohr-Coulomb y se ha considerado la expresión de Terzaghi, $\sigma' = \sigma - u$, para la determinación de las presiones efectivas. En las Figs.89 a 91 se han representado los círculos de Mohr correspondientes a los distintas series de ensayos. Del análisis de los envolventes de falla puede deducirse que los parámetros de resistencia al corte de las dos arcillas serían:

Montmorillonita (presión de confinamiento entre 60 y 100 Kg/cm^2)

Angulo de rozamiento interno $\phi = 8,5^\circ$

Cohesión $c = 1,5 \text{ Kg/cm}^2$

Montmorillonita (presión de confinamiento entre 200 y 300 Kg/cm²)

Angulo de rozamiento interno $\phi = 5^\circ$

Cohesión $c = 2 \text{ Kg/cm}^2$

Saponita (presión de confinamiento entre 40-100 Kg/cm²)

Angulo de rozamiento interno $\phi = 7^\circ$

Cohesión $c = 5 \text{ Kg/cm}^2$

VI. ANALISIS DE LA DIFUSIVIDAD DE SOLUCIONES EN LA MONTMORILLONITA COMPACTADA

El análisis de las propiedades de retención de las arcillas, como barrera a la migración de radionucleidos, se ha abordado mediante la determinación de los coeficientes de distribución y difusión de los radionúcleidos ^{137}Cs y ^{60}Co . Estas determinaciones solo se han realizado sobre la montmorillonita de la Serrata.

VI.1. COEFICIENTES DE DISTRIBUCION DEL ^{137}Cs y ^{60}Co

La capacidad de retención de radionúcleidos es otra importante característica de la barrera que debe ser considerada. Para estimar esta capacidad se han determinado los coeficiente de distribución del ^{137}Cs y ^{60}Co .

Se ha seguido la metodología del batch, en condiciones óxicas y con el agua granítica de El Berrocal. El tiempo de contacto sólido-solución ha sido de 14 días y la separación de fases se ha realizado por centrifugación a unas 30.000 g.

La concentración en el sólido se ha determinado por diferencia de actividades entre las soluciones inicial y final. Para el cálculo del coeficiente de distribución se ha utilizado la expresión:

$$K_d = \frac{A_i - A_f/P}{A_f/V}$$

donde A_i y A_f son las actividades inicial y final, P es el peso del sólido y V es el volumen de solución.

El tiempo de equilibrio en el proceso de sorción del ^{137}Cs se alcanza hacia los 14 días como parece deducirse de la estabilización y magnitud ($\approx 4000 \text{ ml/g}$) de los valores alcanzado

por el coeficiente de reparto. El gradiente máximo de sorción se produce para tiempos de reacción entre 10 y 110 horas. Para el ^{60}Co no ha quedado bien definido el tiempo de equilibrio al no haberse alcanzado la estabilización del proceso durante las 700 horas de experimentación, aunque se produce una disminución del gradiente después de los 14 días de reacción.

El valor del coeficiente de reparto del ^{137}Cs en la montmorillonita es de 4249 ml/g ($\sigma = 360$) y el del ^{60}Co de 713 ml/g ($\sigma = 51$). Analizada la influencia del pH en la capacidad de retención de la arcilla, se observa que el coeficiente de reparto de ambos radionúcleidos tiende a crecer para pHs neutros o ligeramente alcalinos. El valor medio de las determinaciones realizadas a pH 4,9 es de 3369 ml/g para el ^{137}Cs y 702 ml/g para el ^{60}Co , mientras que a pHs 7,9 y 9 es de 4165 y 4161 ml/g, respectivamente, para el ^{137}Cs y de 713 y 774 ml/g para el ^{60}Co .

VI.2. ENSAYOS DE DIFUSION

Para avanzar en el conocimiento de la arcilla como material de barrera, se han realizado ensayos de difusión que nos dan más información sobre los aspectos dinámicos del proceso y al mismo tiempo se aproximan más a las condiciones reales que podrían esperarse en el almacenamiento donde el gradiente de concentración debería ser el único parámetro o al menos, el más importante que contrale la migración.

La metodología utilizada en este ensayo ha sido la siguiente:

- El ensayo se ha realizado en probetas cilíndricas de arcilla, con densidad de $1,8 \text{ g/cm}^3$ y humedad de saturación. Las dimensiones de las probetas han sido de 3,81 cm de diámetro y 7,63 cm de altura.
- Los trazadores radiactivos fueron introducidos en los blo-

ques durante la compactación, situando un papel de filtro impregnado con la solución y seco hacia la mitad de la probeta. La concentración de ^{137}Cs ha sido de 10^{-8}M y la de ^{60}Co de 10^{-9}M .

- Las columnas han sido confinadas con un encamisado de latex, excepto en sus dos extremos que fueron aislados mediante piedras porosas. Esto ha permitido el intercambio de humedad con la atmosfera saturada en agua en la que se han mantenido durante los 217 días que ha durado el ensayo.

- El análisis de los contenidos de los radionúcleidos en el sólido se ha realizado sobre secciones transversales, de la probeta, de espesor medio de 1,5 mm. Se ha realizado el recuento de actividad gamma en los rangos de energías características del ^{137}Cs (632 Kev) y ^{60}Co (1333 Kev).

Los resultados experimentales se expresan en las Figs.92 y 93 en los que se han representado los valores de la razón de concentraciones (C/Co) frente a la longitud de la columna y su curva acumulada.

El análisis de estos resultados se ha realizado bajo la hipótesis de que la movilización de los radionúcleidos se ha producido exclusivamente por un proceso de difusión en el medio poroso estudiado y que este mecanismo habría sido regulado básicamente por: la difusión iónica en la fase acuosa, fenómenos de sorción y movilización en la superficie del sólido e interrelación de poros en el medio. En cualquier caso se ha medido la difusividad aparente, que en el caso de difusión en una dimensión podría expresarse por la ecuación:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{d}{dx} \left(D_a \frac{dc}{dx} \right)$$

En las condiciones de la experimentación realizada, con

un término fuente planar, normal a la dirección de difusión y considerando la probeta como un cilindro infinito, la ecuación anterior podría tener la siguiente solución:

$$\frac{C}{M} = \frac{0,5}{(MDat)^{-0,5}} x e^{-\frac{x^2}{4Dat}}$$

donde: C = concentración en (moles/m³), M = cantidad total de la sustancia que difunde añadida por unidad de area (moles/m²), x = distancia desde la fuente (m), Da = difusividad aparente (m²/s), t = tiempo (s).

Tomando logaritmos, puede obtenerse la expresión siguiente: $\log C = A - B \log x^2$, en la que las constantes A y B son :

$$A = \log M \left[\frac{0,5}{(MDat)^{-0,5}} \right] \text{ y } B = \frac{0,43}{(4Dat)}$$

En consecuencia el coeficiente de difusividad aparente podría obtenerse a partir de la regresión lineal entre $\log C$ y $\log x^2$. Los resultados de este análisis se han representado en las Figs.94 y 95.

El coeficiente de difusividad aparente (Da) del ¹³⁷Cs en las probetas de montmorillonita es de 1,6E-13 m²/s y el del ⁶⁰Co es de 2,2E-13 m²/s.

VII. ISOTERMAS DE ADSORCION-DESORCION

La confección de isothermas de adsorción contribuye al conocimiento y caracterización del estado de hidratación de las esmectitas bajo diferentes condiciones.

El procedimiento consiste en observar la evolución de la humedad de una muestra hasta su estabilización en una atmósfera de actividad de agua conocida. Teóricamente esta humedad registrada engloba al agua fijada por enlaces de hidrógeno, es decir: agua de adsorción, agua retenida por efecto capilar u osmótico, agua de disolución, agua encerrada en las redes cristalinas y agua de cristalización. Está excluida por lo tanto el agua fijada químicamente por enlaces covalentes (Multon et al., 1981).

Para conseguir diferentes actividades de agua se utilizan disoluciones sobresaturadas de sales introducidas en desecadores de vacío. De esta manera en cada desecador se crea una atmósfera con una humedad relativa (H.R.), producto del equilibrio del sistema "sol-vapor de agua), que está íntimamente relacionada con la actividad del agua (A_w) en la disolución. Esta humedad relativa de la atmósfera en equilibrio con la fase condensada (H.R.E.) se puede identificar con la actividad del agua en la disolución con un error menor al 0,2% mediante:

$$A_w = \frac{\% \text{ H.R.E.}}{100}$$

El estado de partida de la arcilla pasa la experiencia de absorción es el de humedad igual a 0%, para lo que se secó la muestra a 100° durante 24h con objeto de eliminar todo el agua unida mediante enlaces de hidrógeno anteriormente citada. Pasa la desorción se confeccionó una pasta con humedad igual al límite líquido (180% para S-2 y 135% para MCA-C). La evolución de la humedad se comprueba mediante pesadas periódicas y comparación con

los pesos iniciales. Todos los desecadores se introducen en un ^{atmósfera} ~~onmonio~~ de temperatura regulada a 25°C.

Los resultados de las humedades alcanzadas y los tiempos de estabilización se encuentran en la Tabla I.

La representación de estos resultados en un diagrama % humedad de la muestra ^{vs} ~~vs~~ A_w admite el ajuste de una curva del modelo G.A.B. (Guggenheim-Anderson-De Boes). Se trata de una ecuación de tres parámetros con coeficientes de significado físico, utilizable para actividades del agua superiores a 0,9. (Bizot, 1983):

$$\frac{A_w}{W} = \alpha A_w^2 + \beta A_w + \gamma, \text{ con}$$

$$\alpha = \frac{K}{W_m} [1/C - 1]$$

$$\beta = \frac{1}{W_m} [1 - 2/C]$$

$$\gamma = \frac{1}{W_m \cdot C \cdot K}$$

donde W es la humedad de la muestra, A_w la actividad del agua, W_m es la humedad correspondiente a la saturación de todas las posiciones primarias de adsorción por una molécula de agua, C es la constante de Guggenheim y K es un factor que consiga las propiedades de las moléculas multicapa con respecto al líquido libre.

Los puntos obtenidos y las curvas ajustadas están representados en la Fig. 4⁷⁶ (montmorillonita) y 2⁹⁴ (saponita). Los pará-

metros obtenidos para las curvas de adsorción son:

MONTMORILLONITA	SAPONITA
$W_m = 8,33$	$W_m = 8,03$
$C = 11,74$	$C = 26,16$
$K = 0,76$	$K = 0,76$

Los coeficientes de correlación de ambas curvas son $r^2 = 0,96$. Por lo tanto, con humedades de la arcilla inferiores al 8% (lo que sucede en el equilibrio para H.R. inferiores al 25% para MCA-C y al 30% para S-2) no están cubiertas todas las posiciones primarias de adsorción, por lo que a H.R. algo mayores, por ejemplo las ambientales, tendrán gran avidez por el agua si su humedad no sobrepasa el (8%) $\Rightarrow$ *Succión*

En las Figs. ^{90 91} 1 y 2 se representan también los puntos correspondientes a la humedad de la arcilla a la temperatura y H.R. del laboratorio tras estabilización durante diferentes periodos de tiempo. (dic 89-sep 90 y sep 90 a ene 91).

Otro de los intereses prácticos de la curva de adsorción consiste en la determinación a partir de ella de un punto crítico C que corresponde a la A_w a partir de la cual el agua contenida en la muestra cambia su comportamiento, pudiéndose dividir en dos fracciones de características diferentes (GUILBOT & LINDENBERG, 1960).

Este punto C, que se encuentra al final de la sección lineal de la curva, corresponde al 12% de humedad ($A_w \approx 0,53$) tanto para la montmorillonita como para la saponita. A partir de él, y para cada A_w (o H.R.), el agua contenida en la muestra se divide en agua por encima o por debajo de la línea extrapolada, lo que corresponde respectivamente al porcentaje de agua fuertemente fijada y al de agua con propiedades disolventes capaz de servir de medio de difusión.

A partir de la curva de adsorción de la Fig. 1⁹⁶ se obtiene que en condiciones ambientales, con un 80% máximo de H.R. (0,8 de A_w), la montmorillonita tiene en el equilibrio un 20% de humedad, del que el 17% es agua fuertemente adsorbida y el 3% restante es el agua "móvil". Para la saponita (Fig. 2)⁹⁷ los porcentajes son del 16,6% de agua fija y 3,7% de agua móvil.

VIII. CONCLUSIONES

- Se seleccionan las esmectitas (S-2) montmorillonítica de Serrata (Almería) y (MCA-C) saponítica de Cerro del Monte-Cerro del Aguila (Toledo), como arcillas candidatas para la fabricación de barreras a la migración. La selección de estas arcillas y por tanto de los yacimientos a que pertenecen se ha basado en su mejor compactabilidad y mayor plásticidad y área superficial, respecto a las estudiadas de Santa Bárbara y Yuncos (Toledo), Escullos y Troncos Verdes (Almería).
 - Las dos arcillas tienden a estabilizarse en humedades del orden del 12% ante condiciones ambientales normales (25° C, 60% humedad relativa).
 - La compactabilidad de la saponita es inferior a la de la montmorillonita. Para las mismas condiciones de compactación la densidad de la saponita es del orden de $0,2 \text{ g/cm}^3$ inferior a la de la montmorillonita. De otra parte, los bloques de alta densidad ($\rho > 1,8 \text{ g/cm}^3$) de saponita tienden a presentar fisuración normal a la presión de compactación.
 - Es posible obtener compactados de alta densidad tanto por prensado uniaxial como por compactación dinámica, entendiendo por alta densidad aquellos valores para los que los compactados de arcilla satisfacen las propiedades requeridas a la barrera contra la migración. Esto se cumple para densidades secas finales de la arcilla iguales o superiores a $1,6 \text{ g/cm}^3$.
 - En compactación dinámica, por capas, pueden obtenerse densidades superiores a $1,6 \text{ g/cm}^3$ a partir de energías del orden de los 14 julios/cm³ para la montmorillonita y de los 45 julios/cm³ para la saponita.
- En compactación por prensado uniaxial, con presiones entre los 600 y 1000 kg/cm² pueden obtenerse densidades secas entre 1,8 y 2,0 g/cm³ con la montmorillonita y entre 1,60 y 1,73

g/cm^3 con la saponita. Las humedades óptimas, para estos niveles de energía, están en el entorno del 10% y 15% respectivamente para montmorillonita y saponita.

Otros métodos de compactación y puesta "in situ" pueden ser de interés y están siendo investigados: compactación hidráulica y granulación a alta densidad.

- La expansión esperada en la descompresión y desmolde de los bloques es del orden de 1,3 y 4,5% en la montmorillonita y saponita respectivamente.
- La granulometría del molturado de arcilla no incide, prácticamente, en la densidad de los compactados, pero la resistencia a compresión de las probetas decrece con el aumento de tamaño del granulado.
- No parece tener interés alguno la utilización de arena de cuarzo como aditivo.
- Las propiedades de los compactados de arcilla o de las mezclas de arcilla-arena de cuarzo (resistencia a compresión simple, presión de hinchamiento, conductividad hidráulica y conductividad térmica) están básicamente reguladas por la densidad seca de la arcilla en dichos compactados. El cuarzo actúa, en general, como componente inerte.

La resistencia a compresión, la presión de hinchamiento y la conductividad hidráulica en función de la densidad seca de la arcilla siguen funciones logarítmicas en el dominio de experimentación. La conductividad térmica sigue una función lineal normal.

Los valores que dichas propiedades alcanzan pueden satisfacer los requerimientos de los materiales de barrera contra la migración.

- La temperatura ambiental modifica la conductividad hidráulica de los compactados de arcilla en tanto, en cuanto se modifica la viscosidad cinemática del agua, lo que puede representar el incremento de un orden de magnitud de la conductividad hidráulica a 150°C. A pesar de ello la conductividad hidráulica de las dos arcillas permanecen en el orden de 10^{-12} m/s para densidades de 1,6 g/cm³.
- El tratamiento térmico incide negativamente en el conjunto de propiedades analizadas en las arcillas, sus efectos han permanecido durante 121 días de experimentación y son más significativos en la saponita. Se recomienda por tanto como límite de temperatura los 100°C.
- En función de la densidad de puesta "in situ" de la barrera de arcilla y de las condiciones en el entorno, no parece previsible que se vayan a producir asentamientos. De cualquier forma estas sesiones poco importantes y favorecerían las propiedades de conductividad hidráulica y térmica, si los efectos conjugados de hidratación-dsecación no dan lugar a agrietamientos por asentamientos diferenciales y, sobre todo, por retracción. Estos estudios deberán realizarse en el proyecto futuro.
- Los coeficientes de reparto y difusión de ¹³⁷Cs y ⁶⁰Co confieren a la montmorillonita de Serrata el carácter de material aceptable como barrera a la migración de radionúcleidos.
- Aunque las dos arcillas estudiadas tienen propiedades suficientes para ser utilizadas como material de barrera, es más recomendable por su mejor densificación y menor repercusión térmica la montmorillonita de Serrata.

IX. REFERENCIAS

ATABEK, R.; DARDAINE, M.; LAJUDIE, A.; PROUSE, P.; y BEZIAT, A.; Contrat CCE N° FI 1W/0031, rapport d'avancement: janvier-juillet. 1987.

ATABEK, R.; LAJUDIE, A.; DARDAINE, M.; BEZIAT, A.; LEHELLE, J.; PROUST, P.: Nearfield behaviour of clay barriers and their interaction with concrete. Contract CCE n° FI 1W/0031. Annual Progress Report. 1987.

BADILLO, J.; Mecánica de suelos. Universidad Nacional Autónoma de México. México 1970.

BARAHONA, E.: Arcillas de ladrillería de la provincia de Granada. Evolución de algunos ensayos de materias primas. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 1974.

BEZIAT, A. & DARDAINE, M.: Conductivité thermique d'osgiles compactées. Etude paramétrique. Rapport. Technique D.R.D.D. 100. CEA-FAR. 1986.

BEZIAT, A. & DARDAINE, M.: Conductivité thermique de mélanges compactées á base d'argile. Rapport Technique D.R.D.D. 122. CEA-FAR. 1987.

BISCAYE, P.E.; Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clays in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. Geol. Soc. Am. Bull. 76,803-832. 1965.

BILOT, H.: Using the G.A.B. Method to construct sorption isotherms. In: JOWITT, R. (Ed): Physical properties of food. Applied Science Publisher. 43-54. 1983.

BOLT, G.H.; BRUGGENWERT, M.G.M.; Soil Chemistry. A. Basic Elements. Elsevier Scientific Publishing Company. New York. 1978.

BÖRGESSON, L.; HÖKMARK, H. and KARNLAND, O.; Rheological properties of Sodium smectite clay. SKB Technical Report. Stockholm. December 1988.

BOWLES, J.E.; Propiedades geofísicas de los suelos. McGraw-Hill. 1982.

BROWN, G.; The X-Ray identification and crystal structures of clay minerals. Jarrold and Sons Ltd. London 1961.

DERLICH, S.; PARK, S.H.; BOISSON, J.Y.: Colmatage de fissures et de forages en formations géologiques fracturées (granites). Contract n° FI 1W/0058 F (CD). Decembre 1987.

ESCARIO, V. and DE JUSTO ALPAÑES, J.L.; Resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. Ed. Dassat S.A. Madrid 1970.

GRAHAM, J.; SAADAT, F.; GRAY, H.N.; DIXON, D.A. & EHANG, Q.Y.: Strength and volume change behaviour of a sand-bentonite mixtures. Con. Geotech. J. 26,292-305, 1989.

GRAY, M.N., CHEUNG, S.C.H. & DIXON, D.A.: Swelling pressures of compacted bentonite/sand mixtures. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 44,523-530. 1985.

GRIM, R.E.; Clay mineralogy. McGraw-Hill Book Company. New York 1968.

GUILBOT, A. & LINDENBERG, A.B.: Ecuin nom-solvante et ecun de sorption de la cellule de levure. Biochemica et Biophysica Acta, 39, 389-397, 1969.

KHARAKA, Y.K. & SMALLEY, W.C.: Flow of water and solutes through compacted days. The Am. Ass. Petrol. Apol. Bull. 60-6, 973-980, 1976.

KOSTER VAN GROOS, A.F.; Determination of Dehydration Temperatures of a Secondary Vug-Filling Mineral (Smectite clay). Using a Differential Thermal Analysis at Various Pressures. RHO-BW1-C-102. March 1982.

LAJUDIE, A.; DARDAINE, M.; ATABEK, R.: Nearfield behaviour of clay barriers and their interaction with concrete. Contract CCE n° FI 1W/0031. Annula Progress Report. 1986.

MACKENZIE, R.C.; Differential Thermal Analysis Vol.1. Fundamental Aspects. Acad. Press. London & New York 775 pp. 1970.

MEGIAS, A.G.; ORDOÑEZ, S.; CALVO, J.P.: Nuevas aportaciones al conocimiento geológico de la Cuenca de Madrid. Rev. Mat. Proc. Geol. 1983.

MINGARRO, E.; RIVAS, P.; DEL VILLAR, L.P.; DE LA CRUZ, B.; GOMEZ, P.; HERNANDEZ, A. and TURRERO, M.J.; Characterization of clay (Bentonite)/crushed granite mixtures to build barriers against the migration of radionuclides: Diffusion studies and physical properties. CIEMAT. División de Técnicas Geológicas. Annual Progress Report 1988 (Contract CCE FI 1W-0191-E(TT)). Madrid. January 1989.

MINGARRO, E.; RIVAS, P.; DEL VILLAR, L.P.; DE LA CRUZ, B.; GOMEZ, P.F.; HERNANDEZ, A.; TURRERO, M.J. and VILLAR, M.V.; Characterization of clay (Bentonite)/crushed granite mixtures to build barriers against the migration of radionuclides: Diffusion studies and physical properties. CIEMAT. División de Técnicas Geológicas. Annual Progress Report 1989 (Contract CCE FI 1W-0191-E(TT)). Madrid. February 1990.

MULTON, J.L.; BIZOT, H. & MARTIN, G.: Eau (teneurs, activité, adsorption, propriétés fonctionnelle, humidités relatives). In DEYMIE, B.; MULTON, J.L. & SIMON, D. (Coord): techniques d'analyse et de contrôle dans les industries

agroalimentaires. 4,1-60. Collec. Sciences et techniques agrodimentaires. Apria. 1981.

NOWAK, E.J.: The diffusion of Cs(I) and Sr(II) in liquid-saturated beds of backfill materials. Sandia Report SAND82-0750. Chemical Technology Division. Sandia National Laboratory. New Mexico. 1983.

OLSEN, H.W.: Hydraulic flow through saturated clays. 9th. National Conf. on clays and Clay Minerals, 131-161, 1960.

PUSCH, R. and BÖRGERSON, L.; Bentonite sealing of rock excavations. Braunschweig. May 1989.

PUSCH, R.; BÖRGERSON, L.; ERLSTRÖN, M.: Alteration of isolating properties of dense smectite clay in repository environment as exemplified by seven pre-aternary clays. SKB. Technical Report. December 1987.

PUSCH, R. and GRAY, M.; Sealing of radioactive waste repositories in crystalline rock. Braunschweig. May 1989.

REYES, E.; CABALLERO, E.; HUERTAS, F.; LINARES, J.; YUSTA, A.: Las bentonitas de la zona sur de Cabo de Gata (Almería). Geoquímica y Mineralogía. Acta Geológica Hispánica. V. 20 nº 314. 1985.

SCHULTZ, L.G.; Lithium and potassium absorption, deshydroxilation, temperature and structural water content of aluminous smectites. Clays and Clay Miner. 17,115-149. 1969.

SCHULTZ, L.G.; Mixed-layer clay in the Pierre Shale and equivalente roks. Northern Great Plains region. U.S.Geol. Survey. Prof. Paper 1064-a. 1978.

SCHULTZ, L.G.: Quantitative interpretation of

mineralogical composition from X-Ry and chemical data for the Pierre Shale. Geological Survey of USA. Professional Pper. 591-C, pp. C1-C31.

TARDY, V.; DUPLAY, J.; FRITZ, B.: Stability fields of smectites and illites as a function of temperature and chemical composition. SKB. Technical Report. April 1987.

TORSTENFELT, B.: Migration of the Fission Products Strontium, Technetium, Iodine and Cesium in Clay. Radiochimica Acta 39. pp. 97-104. Minich. 1986.

TORSTENFELT, B.: Migration of ther Actinides Thorium, Protactinium, Uranium, Neptunium, Plutonium and Americium in Clay. Radiochimica Acta 39. pp. 105-112. Munich. 1986.

WOOD, M.I.; ADEN, G.D.; LANE, D.L.; Evaluation of sodium bentonite and crushed basalt as waste package backfill materials. RHO-BW-ST-21P. October 1982.

TABLA I

HUMEDAD NATURAL (110 °C)

MUESTRA	24 HORAS	48 HORAS
MCA-A	16,76	16,79
MCA-B	11,84	11,84
MCA-C	22,68	22,68
MSB-A	41,26	41,23
MSB-B	43,61	43,61
My-A	13,48	13,48
My-B	16,00	16,00
S-1	13,30	13,39
S-2	8,69	8,69
T-3	24,08	24,08
T-4	20,95	20,95
E-5	20,81	20,81
E-6	15,28	15,28

TABLA II

GRANULOMETRIA DE MOLTURACION

MUESTRAS	PORCENTAJES DE TAMAÑOS (mm)					
	t>1	1>t>0,5	0,5>t>0,250	0,250>t>0,125	0,125>t>0,063	0,063>t
MCA-A	8,33	30,76	18,64	15,82	10,95	15,50
MCA-B	9,17	37,29	20,42	14,68	7,73	10,71
MCA-C	5,43	33,48	22,46	18,14	10,37	10,12
MSB-A	3,39	28,14	20,21	18,82	13,98	15,46
MSB-B	4,05	29,51	22,39	20,10	11,37	12,58
MY-A	8,30	36,68	18,76	15,04	9,16	12,06
MY-B	5,80	32,65	21,79	17,52	10,15	12,09
S-1	6,02	23,58	17,11	16,05	12,73	24,51
S-2	9,64	27,02	16,74	14,58	10,81	21,21
T-3	5,42	27,09	18,29	16,37	11,37	21,46
T-4	5,06	26,51	19,56	15,57	9,72	23,58
E-5	9,12	38,38	21,80	16,52	7,59	6,59
E-6	3,90	29,80	25,18	18,94	9,95	12,24

TABLA III**PESO ESPECIFICO Y LIMITES DE ATTERBERG**

MUESTRA	PESO ESPEC. g/cm ³	LIM.LIQ. % _h	LIM.PLAST. % _h	IND.PLASTIC. % _h
My-A	2,42	220,15	72,28	147,87
My-B	2,51	133,29	58,90	74,39
MCA-A	2,47	237,28	73,17	164,11
MCA-B	2,46	128,79	67,26	61,53
MCA-C	2,48	188,23	69,99	118,24
MSB-A	2,77	152,90	94,02	58,88
MSB-B	2,74	137,00	86,96	50,04
E-5	2,50	122,31	56,79	65,52
E-6	2,48	85,54	48,01	37,53
T-3	2,34	96,69	63,75	32,94
T-4	2,40	90,10	57,01	33,09
S-1	2,31	139,40	60,92	78,48
S-2	2,47	212,50	56,57	155,93

TABLA IV

RESULTADOS MEDIOS DE SUPERFICIE ESPECIFICA EN ARCILLAS

MUESTRA	AZUL DE METILENO (m ₂ /g)
My-A	304,27
My-B	211,56
MCA-A	316,16
MCA-B	384,99
MCA-C	336,42
MSB-A	223,21
MSB-B	150,06
E-5	341,23
E-6	332,02
T-3	198,39
T-4 bis	152,19
S-1 bis	553,34 ✓
S-2 bis	515,69 ✓

TABLA VCOMPACTACION UNIAXIAL (1051 Kg/cm^2) HUMEDAD $\approx 10\%$

MUESTRA	HUMEDAD FINAL %	ρ_b g/cm^3	ρ_d g/cm^3
MCA-A	10,31	2,03	1,84
MCA-B	9,71	2,18	1,98
MCA-C	10,13	2,19	1,99
MSB-A	7,72	2,06	1,91
MSB-B	11,02	2,10	1,89
My-A	9,89	2,02	1,84
My-B	9,51	2,15	1,96
S-1	9,39	2,21	2,02
S-2	9,88	2,26	2,06
T-3	10,31	2,12	1,92
T-4	10,36	2,12	1,92
E-5	10,46	2,24	2,03
E-6	9,76	2,16	1,97

TABLA VI

**DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DE LOS MOLTURADOS DE LA
MONTMORILLONITA (SERRATA) Y SAPONITA (CERRO DEL MONTE)**

RANGO DE TAMAÑOS (mm)	PORCENTAJES	
	MONTMORILLONITA	SAPONITA
5>t>3,33	26,87	24,20
2,36	14,45	15,57
1,65	14,82	21,64
1,17	7,56	10,10
0,83	6,17	6,68
0,59	8,89	9,55
0,42	2,57	2,08
0,21	9,09	6,65
0,15	5,60	2,08
t<0,15	3,95	1,45

TABLA VII

**DISTRIBUCIONES GRANULOMETRICAS COMPUESTAS A PARTIR DEL MOLTURADO
DE MONTMORILLONITA (S-2) Y SAPONITA (MCA-C)**

RANGO DE TAMAÑO (mm)	PORCENTAJES						
	1	2	3	4	5	6	7
5>t>2,36	1,50	3,03	6,00	9,09	25,03	37,03	54,00
1,17	1,50	3,03	5,03	9,09	8,00	10,00	13,03
0,59	1,50	3,03	6,00	4,85	6,00	8,97	8,97
0,21	2,50	6,06	8,00	10,30	8,00	11,04	11,03
0,15	1,50	3,03	4,00	4,85	4,00	6,97	4,00
0,15>t	91,50	81,82	70,97	61,82	48,97	25,99	8,97

TABLA VIII

DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DEL CUARZO "FRANCES" UTILIZADO COMO
ADITIVO

RANGO DE TAMAÑO (mm)	PORCENTAJE RETENIDO
t > 2,000	9,44
1,000	63,59
0,500	21,14
0,250	4,79
0,125	0,84
0,063	0,13
0,063 > t	0,08

TABLA IX

COMPACTACION SEMIAUTOMATICA POR GOLPEO EN CINCO CAPAS

ENERGIA julio/cm ³	MONTMORILLONITA DE SERRATA		SAPONITA DEL CERRO DEL MONTE	
	HUMEDAD %	DEN. SECA g/cm ³	HUMEDAD %	DEN. SECA g/cm ³
5,8	9,2	1,65	12,4	1,41
17,5	9,7	1,71	18,1	1,48
34,9	9,7	1,78	11,9	1,57
69,8	9,7	1,80	11,5	1,62
93,1	9,7	1,86	11,8	1,66

TABLA X

COMPACTACION POR GOLPEO EN CAPA UNICA

ENERGIA julio/cm ³	MONTMORILLONITA DE SERRATA		SAPONITA DEL CERRO DEL MONTE	
	HUMEDAD %	DEN.SECA g/cm ³	HUMEDAD %	DEN.SECA g/cm ³
42	3,3	1,64	3,0	1,27
	7,0	1,67	7,0	1,31
	11,6	1,74	10,2	1,31
	15,2	1,74	15,6	1,36
	20,1	1,70	21,1	1,38
	25,3	1,57	26,2	1,36
	30,0	1,48	31,3	1,31
	36,5	1,37	36,3	1,26
88	3,4	1,74	2,6	1,33
	7,4	1,77	6,6	1,39
	11,7	1,81	10,5	1,40
	16,4	1,77	15,5	1,45
	22,4	1,67	20,9	1,46
	28,0	1,54	25,9	1,45
	32,9	1,43	31,9	1,41
	39,0	1,31	35,0	1,35

TABLA XI

COMPACTACION POR PRENSADO UNIAXIAL EN CAPA UNICA

PRESIÓN kg/cm ²	MONTMORILLONITA DE SERRATA		SAPONITA DEL CERRO DEL MONTE	
	HUMEDAD %	DEN. SECA g/cm ³	HUMEDAD %	DEN. SECA g/cm ³
200	7,2	1,62	4,9	1,34
	13,9	1,67	9,9	1,33
	18,1	1,68	15,2	1,37
	22,8	1,65	20,0	1,43
	28,1	1,56	24,8	1,49
			29,3	1,46
600	2,0	1,81	7,8	1,54
	7,9	1,89	10,3	1,56
	13,2	1,86	15,3	1,63
	16,7	1,83	19,4	1,65
	21,7	1,72	24,2	1,58
	26,1	1,61		
1000	2,1	1,93	9,1	1,70
	7,9	2,02	10,2	1,68
	11,6	1,95	14,9	1,73
	15,8	1,87	19,1	1,70
	20,8	1,74	24,5	1,58
	26,4	1,61		

TABLA XII

INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRIA DE LOS MOLTURADOS EN LA
COMPACTABILIDAD DINAMICA DE LAS ARCILLAS

ENERGIA J/cm ³	GRANULOM. nº	MONTMORILLONITA DE SERRATA		SAPONITA DEL CERRO DEL MONTE	
		HUMEDAD %	DEN. SECA g/cm ³	HUMEDAD %	DEN. SECA g/cm ³
14,4	5			10,7	1,22
	7			10,8	1,22
28	5			10,7	1,31
	7			11,3	1,30
50	5	9,6	1,72		
	7	9,5	1,72		
76	1	10,3	1,74	10,4	1,35
	4	10,6	1,74	10,3	1,36
	7	10,9	1,75	9,2	1,36
96	5	10,5	1,79		
	7	9,9	1,78		
140	1	11,0	1,79	10,4	1,41
	2	11,9	1,76	9,3	1,41 (1,43)
	3	11,8	1,78	10,3	1,41
	4	11,1	1,75	9,4	1,41 (1,45)
	5	11,3	1,79	9,1	1,39
	6	10,2	1,78	10,0	1,44
	7	8,5	1,78	10,4	1,43 (1,44)

TABLA XIII

**INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRIA DE LOS MOLTURADOS EN LA
COMPACTABILIDAD UNIAxIAL DE LAS ARCILLAS**

PRESIÓN Kg/cm ²	GRANULOM. nº	MONTMORILLONITA DE SERRATA		SAPONITA DE CERRO DEL MONTE	
		HUMEDAD %	DEN.SECA g/cm ³	HUMEDAD %	DEN.SECA g/cm ³
781	1	11,2	1,86	9,7	1,62-1,63
	2	11,4	1,87	10,3	1,61-1,604
	3	11,1	1,87	9,8	1,67-1,640
	4	11,0	1,87	10,3	1,57-1,660
	5	10,9	1,87	9,8	1,63-1,632
	6	10,6	1,88	10,1	1,56-1,590
	7	10,7	1,87	10,5	1,51-1,570
1300	1	9,3	1,97	9,04	1,75-1,736
	2	8,5	1,95	10,55	1,71-1,725
	3	9,3	1,98	9,50	1,71-1,705
	4	8,9	1,97	9,02	1,76-1,719
	5	8,5	1,96	10,18	1,72-1,66
	6	8,2	1,95	9,86	1,71-1,678
	7	7,8	1,96	9,54	1,71-1,656

TABLA XIV

RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE EN FUNCION DE LA DENSIDAD
SECA DE LAS BRIQUETAS. COMPACTACION POR GOLPEO.

MONTMORILLONITA			SAPONITA		
HUMEDAD	DEN. SECA	R.C.S.	HUMEDAD	DEN. SECA	R.C.S.
%	g/cm ³	Kg/cm ³	%	g/cm ³	Kg/cm ³
9,2	1,65	17,8	12,4	1,41	8,1
9,7	1,71	26,0	18,1	1,48	13,1
9,8	1,73	31,0	12,7	1,50	14,5
9,7	1,74	31,9	12,6	1,52	19,2
9,7	1,78	28,5	11,9	1,57	26,0
9,7	1,80	47,0	11,5	1,62	27,0
10,4	1,69	25,0	13,0	1,48	11,5
10,5	1,74	36,2	13,1	1,55	20,3
10,0	1,78	34,2	12,6	1,57	24,7
10,0	1,79	43,5	12,7	1,56	21,8
9,9	1,84	56,5	12,6	1,62	33,5
9,7	1,86	55,0	11,8	1,66	46,0

R.C.S. Resistencia a compresión simple

TABLA XV

RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE EN FUNCION DE LA HUMEDAD
DE FABRICACION Y DENSIDAD SECA DE LAS BRIQUETAS. COMPACTACION
POR PRENSADO UNIAXIAL

MONTMORILLONITA				SAPONITA			
HUMEDAD	DEN. SECA	R.C.S.	DEF. EN ROT.	HUMEDAD	DEN. SECA	R.C.S.	DEF. EN ROT.
%	g/cm ³	Kg/cm ²	%	%	g/cm ³	Kg/cm ²	%
3,2	1,53	1,6	2	5,0	1,5	4,2	2
3,8	1,66	5,8	2	4,6	1,6	24,8	3
2,8	1,75	12,0	2	2,8	1,66	33,8	3
4,4	1,92	65,5	2	2,9	1,68	39,5	3
7,8	1,45	1,6	1	2,6	1,75	61,4	4
8,6	1,56	7,2	1	3,2	1,79	65,5	3
6,5	1,71	20,0	2	9,9	1,38	5,8	2
8,6	1,74	30,5	2	10,5	1,53	17,9	2
6,5	1,80	40,2	3	8,5	1,59	24,9	3
7,1	1,82	50,0	3	8,7	1,64	33,8	3
5,6	1,98	93,0	3	9,7	1,65	43,3	3
20,0	1,40	15,2	3	10,0	1,26	1,3	3
20,0	1,60	27,2	4	10,7	1,38	3,9	2
20,0	1,67	47,7	4	10,4	1,49	8,9	3
20,0	1,73	71,7	5	10,3	1,72	53,0	3
20,0	1,78	85,8	7	8,6	1,99	164,0	3
25,0	1,20	0,5	2	21,8	1,15	2,3	1
25,0	1,46	11,5	4	20,8	1,35	15,3	2
25,0	1,50	10,5	5	20,4	1,49	31,0	2
25,0	1,56	13,0	6	21,5	1,68	89,0	3
25,0	1,58	23,0	4	25,0	1,10	0,5	1
25,0	1,69	37,5	6	25,0	1,32	8,5	2
25,0	1,72	53,0	6	25,0	1,42	12,5	4
				25,0	1,46	20,5	3
				25,0	1,59	44,0	4
				25,0	1,72	66,5	5
				25,0	1,74	76,0	5

R.C.S. Resistencia a compresión simple

TABLA XVI

**INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRIA DE LOS MOLTURADOS EN LA RESISTENCIA A
COMPRESION SIMPLE DE LAS BRIQUETAS COMPACTADAS POR GOLPEO**

ENERGIA jul/cm ³	GRANULO- METRÍA*	MONTMORILLONITA			SAPONITA		
		HUMEDAD %	DEN. SECA g/cm ³	R.C.S. Kg/cm ²	HUMEDAD %	DEN. SECA g/cm ³	R.C.S. Kg/cm ²
7,6	1	10,3	1,74	36,7	10,4	1,35	8,6
	4	10,6	1,74	32,5	10,3	1,36	5,2
	7	10,9	1,75	19,0	9,2	1,36	2,6
140	1	11,0	1,79	59,0	10,4	1,41	7,8
	2	11,9	1,76	72,5	8,9	1,43	19,0
	3	11,8	1,78	48,0	10,3	1,41	2,4
	4	11,1	1,75	41,6	9,4	1,41	7,7
	5	11,3	1,79	31,0	9,1	1,39	11,3
	6	10,2	1,78	35,3	10,0	1,44	2,5
	7	8,5	1,78	32,5	10,4	1,43	2,4

* Tamaño de grano creciente desde 1 a 7

TABLA XVII

**INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRIA DE LOS MOLTURADOS EN LA RESISTENCIA
A COMPRESION SIMPLE DE LAS BRIQUETAS COMPACTADAS POR PRENSADO UNIAxIAL**

PRES. DE COMPACTAC. Kg/cm ²	GRANULO- METRÍA*	MONTMORILLONITA			SAPONITA		
		HUMEDAD %	DEN.SECA g/cm ³	R.C.S. Kg/cm ²	HUMEDAD %	DEN.SECA g/cm ³	R.C.S. Kg/cm ²
781	1	11,2	1,86	128,0	9,7	1,62	83,0
	2	11,4	1,87	132,0	10,3	1,61	95,0
	3	11,1	1,87	117,0	9,8	1,67	88,5
	4	11,0	1,87	100,0	10,3	1,57	65,0
	5	10,9	1,87	84,0	9,8	1,63	67,0
	6	10,6	1,88	70,0	10,1	1,56	43,5
	7	10,7	1,87	57,0	10,5	1,51	23,8
1300	1	9,3	1,97	128,0	9,0	1,75	156,0
	2	9,6	1,96	157,0	10,6	1,71	125,0
	3	9,3	1,98	128,0	9,5	1,71	126,0
	4	8,9	1,97	88,0	9,0	1,76	129,0
	5	8,5	1,96	81,2	10,2	1,72	108,0
	6	8,2	1,95	71,1	9,9	1,71	86,0
	7	7,8	1,96	62,1	9,5	1,71	63,5

* Tamaño de grano creciente de 1 a 7

TABLA XVIII

**INFLUENCIA DE LA ADICION DE CUARZO EN LA REISTENCIA A COMPRESION
SIMPLE DE LAS BRIQUETAS DE ARCILLA**

PROP.DE CUARZO %	MONTMORILLONITA			SAPONITA		
	DEN.SECA g/cm ³	HUMEDAD %	R.C.S. Kg/cm ²	DEN.SECA g/cm ³	HUMEDAD %	R.C.S. Kg/cm ²
0	1,60	11,0	15,0	1,57	9,9	48,0
5	1,61	11,7	14,0	1,52	10,1	27,5
10	1,60	10,9	10,0	1,49	12,8	21,8
15	1,60	9,9	7,0	1,53	9,0	19,7
20	1,61	9,6	5,2	1,56	8,5	15,3
25	1,61	8,8	3,7	1,55	7,9	12,0
0	1,83	10,1	55,6	1,78	10,5	147,0
5	1,81	9,7	40,5	1,75	9,2	98,0
10	1,81	10,1	38,7	1,75	9,2	80,0
15	1,81	9,6	31,7	1,76	8,3	78,6
20	1,81	9,0	25,7	1,77	7,9	67,2
25	1,81	9,1	21,9	1,79	7,5	64,0

R.C.S. Resistencia a compresión simple

TABLA XIX

PRESION DE HINCHAMIENTO DE LA MONTMORILLONITA Y SUS
MEZCLAS CON CUARZO

ARENA CUARZO %	DENS. SECA		PRESION Kg/cm ²
	DENS. SECA g/cm ³	ARCILLA g/cm ³	
0	1,4	1,40	17,0
0	1,6	1,60	43,7
0	1,6	1,60	49,3
0	1,6	1,60	48,6
0	1,8	1,80	140,6
0	1,8	1,80	95,3
0	2,0	2,0	>471,0
10	1,6	1,53	18,1
10	1,8	1,74	91,8
20	1,6	1,45	14,3
30	1,6	1,36	9,5
30	1,8	1,58	38,1
40	1,8	1,47	27,8

TABLA XX**PRESION DE HINCHAMIENTO DE LA SAPONITA Y SUS MEZCLAS CON CUARZO**

ARENA CUARZO %	DENS. SECA		PRESION Kg/cm ²
	DENS. SECA g/cm ³	ARCILLA g/cm ³	
0	1,2	1,20	6,0
0	1,2	1,20	6,4
0	1,3	1,30	27,8
0	1,4	1,40	12,2
0	1,4	1,40	12,1
0	1,4	1,40	39,6
0	1,4	1,40	14,9
0	1,4	1,40	34,2
0	1,6	1,60	110,3
0	1,6	1,60	121,4
0	1,6	1,60	161,3
0	1,68	1,68	198,6
0	1,8	1,80	337,9
10	1,55	1,53	89,3
10	1,8	1,74	229,6
20	1,6	1,45	50,7
20	1,8	1,66	139,9
20	1,8	1,66	150,0
30	1,6	1,36	32,2
30	1,8	1,58	123,7
40	1,8	1,47	50,0
40	1,8	1,47	71,9

TABLA XXI

CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DE LAS BRIQUETAS DE LAS ARCILLAS Y MEZCLAS
ARCILLA/ARENA DE CUARZO

MONTMORILLONITA				SAPONITA			
ARENA	DEN. SECA	DEN. SECA	K	PRO. ARENA	DEN. SECA	DEN. SECA	K
CUARZO	BRIQUETA	ARCILLA	m/s	DE CUARZO	BRIQUETA	ARCILLA	m/s
%	g/cm ³	g/cm ³		%	g/cm ³	g/cm ³	
0	1,21	1,21	$4,70 \cdot 10^{-11}$	0	1,05	1,05	$1,53 \cdot 10^{-11}$
0	1,25	1,25	$3,02 \cdot 10^{-11}$	0	1,15	1,15	$6,73 \cdot 10^{-12}$
0	1,28	1,28	$1,20 \cdot 10^{-11}$	0	1,20	1,20	$3,03 \cdot 10^{-12}$
0	1,30	1,30	$5,30 \cdot 10^{-12}$	0	1,28	1,28	$8,50 \cdot 10^{-13}$
0	1,31	1,31	$7,50 \cdot 10^{-12}$	0	1,29	1,29	$5,70 \cdot 10^{-13}$
0	1,40	1,40	$1,67 \cdot 10^{-12}$	0	1,30	1,30	$1,10 \cdot 10^{-12}$
0	1,59	1,59	$2,85 \cdot 10^{-13}$	0	1,41	1,41	$3,90 \cdot 10^{-13}$
0	1,60	1,60	$2,89 \cdot 10^{-13}$	0	1,59	1,59	$2,25 \cdot 10^{-13}$
0	1,62	1,62	$2,89 \cdot 10^{-13}$	0	1,60	1,60	$1,20 \cdot 10^{-13}$
0	1,80	1,82	$1,26 \cdot 10^{-13}$	0	1,62	1,62	$2,05 \cdot 10^{-13}$
0	2,00	2,00	$4,30 \cdot 10^{-14}$	0	1,78	1,78	$4,90 \cdot 10^{-14}$
5	1,81	1,78	$1,41 \cdot 10^{-13}$	0	2,00	2,00	$2,70 \cdot 10^{-14}$
10	1,26	1,19	$4,64 \cdot 10^{-11}$	10	1,61	1,54	$2,35 \cdot 10^{-13}$
10	1,62	1,55	$3,16 \cdot 10^{-13}$	10	1,78	1,71	$6,80 \cdot 10^{-14}$
10	1,77	1,71	$9,40 \cdot 10^{-14}$	10	1,80	1,74	$4,10 \cdot 10^{-14}$
10	1,80	1,74	$1,80 \cdot 10^{-13}$	10	1,80	1,74	$5,05 \cdot 10^{-14}$
10	1,80	1,74	$1,81 \cdot 10^{-13}$	20	1,60	1,45	$6,29 \cdot 10^{-13}$
15	1,80	1,70	$1,46 \cdot 10^{-13}$	30	1,62	1,39	$5,33 \cdot 10^{-13}$
20	4,35	1,20	$1,07 \cdot 10^{-10}$	40	1,62	1,29	$1,30 \cdot 10^{-12}$
20	1,62	1,47	$5,20 \cdot 10^{-13}$	50	1,73	1,28	$1,50 \cdot 10^{-11}$
20	1,80	1,66	$1,99 \cdot 10^{-13}$	50	1,75	1,30	$9,40 \cdot 10^{-13}$
20	1,89	1,77	$8,91 \cdot 10^{-14}$	50	1,81	1,36	$6,24 \cdot 10^{-13}$
30	1,60	1,37	$1,59 \cdot 10^{-10}$	60	1,60	0,99	$4,30 \cdot 10^{-8}$
40	1,60	1,26	$5,90 \cdot 10^{-9}$	60	1,80	1,20	$1,70 \cdot 10^{-9}$
50	1,70	1,24	$1,08 \cdot 10^{-8}$				
50	1,71	1,25	$7,10 \cdot 10^{-9}$				
50	1,80	1,35	$3,26 \cdot 10^{-10}$				
50	1,85	1,41	$7,61 \cdot 10^{-11}$				

TABLA XXII

CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DE BRIQUETAS DE ARCILLA Y MEZCLAS DE
ARCILLA/ARENA DE CUARZO EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

MONTMORILLONITA			SAPONITA		
DEN.ARCILLA	TEMP.°C	K	DEN.ARCILLA	TEMP.°C	K
g/cm ³		m/s	g/cm ³		m/s
1,59	20	$2,85 \cdot 10^{-13}$	1,59	20	$2,25 \cdot 10^{-13}$
	50	$4,20 \cdot 10^{-13}$		50	$7,20 \cdot 10^{-13}$
	75	$6,30 \cdot 10^{-13}$		75	$1,20 \cdot 10^{-12}$
	100	$7,10 \cdot 10^{-13}$		100	$1,40 \cdot 10^{-12}$
	125	$1,80 \cdot 10^{-12}$		125	$2,30 \cdot 10^{-12}$
	150	$2,50 \cdot 10^{-12}$		150	$3,60 \cdot 10^{-12}$
1,77	20	$9,40 \cdot 10^{-14}$	1,72	20	$6,80 \cdot 10^{-14}$
	50	$2,50 \cdot 10^{-13}$		50	$1,41 \cdot 10^{-13}$
	75	$2,90 \cdot 10^{-13}$		75	$2,50 \cdot 10^{-13}$
	100	$1,20 \cdot 10^{-12}$		100	$5,01 \cdot 10^{-13}$
	125	$2,80 \cdot 10^{-12}$		125	$1,30 \cdot 10^{-12}$

Las densidades de 1,77 y 1,72 corresponden a la densidad de la arcilla seca en la mezcla de arcilla/10%arena de cuarzo.

TABLA XXIII

CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA MONTMORILLONITA Y SAPONITA EN FUNCION
DE LA DENSIDAD Y HUMEDAD DE LA ARCILLA

MONTMORILLONITA			SAPONITA		
DEN.ARCILLA	HUMEDAD	CONDUCT.	DEN.ARCILLA	HUMEDAD	CONDUCT.
SECA(ρ_a)	ARCILLA(W)	TERMICA(λ)	SECA(ρ_a)	ARCILLA(W)	TERMICA(λ)
g/cm^3	%	W/m °K	g/cm^3	%	W/m °K
1,41	19,3	0,75	1,45	14,8	0,69
1,45	22,8	1,04	1,38	19,5	0,72
1,41	28,5	1,12	1,40	23,7	0,91
1,62	12,3	0,75	1,37	28,7	0,90
1,59	15,8	0,87	1,48	10,2	0,63
1,61	20,0	1,05	1,50	13,5	0,73
1,57	25,1	1,17	1,63	17,0	0,97
1,46	31,0	1,21	1,56	18,3	0,89
1,84	11,9	1,04	1,67	9,8	0,75
1,86	14,9	1,24	1,67	13,0	0,87
1,71	20,5	1,22	1,68	17,0	1,06
1,61	25,1	1,32	1,65	20,8	1,13
1,49	30,0	1,28	1,82	17,0	1,12
1,84	10,7	1,07	1,60	21,8	1,08
1,89	14,0	1,22			
1,82	16,4	1,31			
1,70	22,0	1,32			
1,56	26,9	1,24			

TABLA XXIV

CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA ARCILLA EN FUNCION DE LA HUMEDAD.
DENSIDAD DE LA ARCILLA PRACTICAMENTE CONSTANTE

MONTMORILLONITA				SAPONITA			
HUMEDAD	DEN.ARC.	SATURA.	CONDUCT.	HUMEDAD	DEN.ARC.	SATURA.	CONDUCT.
%	SECA	%	TERMICA	%	SECA	%	TERMICA
	g/cm ³		W/m °K		g/cm ³		W/m °K
12,2	1,38	3,51	0,52	10,5	1,30	26,8	0,44
14,4	1,38	41,1	0,58	15,0	1,31	38,8	0,52
18,9	1,41	56,0	0,75	22,2	1,33	59,7	0,73
23,7	1,38	67,7	0,82	26,9	1,37	76,0	0,86
28,4	1,37	80,1	0,94	31,1	1,37	88,2	1,08
33,1	1,38	94,8	1,16	35,3	1,34	96,1	1,19

TABLA XXV-A

CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LAS MEZCLAS DE ARCILLA-ARENA DE CUARZO.
DENSIDAD Y HUMEDAD DE LA ARCILLA PRACTICAMENTE CONSTANTES

ARENA CUARZO %	MONTMORILLONITA-ARENA DE CUARZO				CONDUCTIVIDAD TERMICA W/m °C
	DEN.MEZ. SECA ₃ g/cm ³	DEN.ARC. SECA ₃ g/cm ³	HUMEDAD MEZCLA %	HUMEDAD ARCILLA %	
0	1,36	1,36	13,1	13,1	0,521
0	1,36	1,36	13,1	13,1	0,489
0	1,36	1,36	13,1	13,1	0,488
0	1,33	1,33	13,3	13,3	0,518
0	1,33	1,33	13,3	13,3	0,520
0	1,39	1,39	13,3	13,3	0,542
0	1,39	1,39	13,3	13,3	0,530
5	1,39	1,36	12,6	13,3	0,540
5	1,39	1,36	12,6	13,3	0,516
5	1,39	1,36	12,5	13,1	0,536
5	1,39	1,36	12,5	13,1	0,531
5	1,43	1,39	12,6	13,3	0,536
5	1,43	1,39	12,6	13,3	0,530
10	1,41	1,34	11,9	13,3	0,542
10	1,41	1,34	11,9	13,3	0,535
15	1,44	1,34	11,32	13,3	0,518
15	1,44	1,34	11,32	13,3	0,516
15	1,46	1,34	11,1	13,1	0,601
15	1,46	1,34	11,1	13,1	0,582
15	1,46	1,34	11,1	13,1	0,580
20	1,45	1,30	10,6	13,3	0,554
20	1,45	1,30	10,6	13,3	0,544
20	1,53	1,38	10,5	13,1	0,576
20	1,53	1,38	10,5	13,1	0,555
20	1,53	1,38	10,5	13,1	0,558
25	1,57	1,38	9,9	13,3	0,663
25	1,57	1,38	9,9	13,3	0,661
25	1,57	1,38	9,9	13,1	0,621
25	1,57	1,38	9,9	13,1	0,618
25	1,57	1,38	9,9	13,1	0,618
30	1,56	1,32	9,3	13,3	0,746
30	1,56	1,32	9,3	13,3	0,732
30	1,63	1,40	9,3	13,3	0,717
30	1,63	1,40	9,3	13,3	0,713
0	1,54	1,54	13,1	13,3	0,666
5	1,61	1,58	12,4	13,3	0,738
10	1,64	1,57	11,8	13,3	0,792
15	1,70	1,60	11,1	13,3	0,833
20	1,69	1,55	10,3	13,3	0,781
25	1,74	1,55	9,8	13,3	0,918
30	1,80	1,58	9,1	13,3	0,942

TABLA XXV-B
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LAS MEZCLAS DE ARCILLA-ARENA DE CUARZO.
DENSIDAD Y HUMEDAD DE LA ARCILLA PRACTICAMENTE CONSTANTES

ARENA CUARZO	SAPONITA-ARENA DE CUARZO		HUMEDAD MEZCLA	HUMEDAD ARCILLA	CONDUCTIVIDAD TERMICA W/m °K
	DEN.MEZ. SECA ₃	DEN.ARC. SECA ₃			
%	g/cm ³	g/cm ³	%	%	
0	1,30	1,30	11,2	11,2	0,448
0	1,30	1,30	11,2	11,2	0,436
0	1,30	1,30	11,2	11,2	0,432
0	1,31	1,31	11,1	11,1	0,470
0	1,31	1,31	11,1	11,1	0,460
0	1,35	1,35	11,1	11,1	0,499
0	1,35	1,35	11,1	11,1	0,493
5	1,38	1,34	10,6	11,2	0,478
5	1,38	1,34	10,6	11,2	0,441
5	1,38	1,34	10,6	11,2	0,442
5	1,38	1,35	10,5	11,1	0,492
5	1,38	1,35	10,5	11,1	0,485
5	1,36	1,33	10,5	11,1	0,486
10	1,38	1,30	10,0	11,2	0,452
10	1,38	1,30	10,0	11,2	0,450
10	1,38	1,30	10,0	11,2	0,448
10	1,40	1,33	10,0	11,1	0,517
10	1,40	1,33	10,0	11,1	0,495
10	1,41	1,34	10,0	11,1	0,472
10	1,41	1,34	10,0	11,1	0,463
15	1,42	1,31	9,5	11,2	0,505
15	1,42	1,31	9,5	11,2	0,517
15	1,42	1,31	9,5	11,2	0,516
15	1,42	1,32	9,4	11,1	0,501
15	1,42	1,32	9,4	11,1	0,491
20	1,46	1,31	8,9	11,2	0,527
20	1,46	1,31	8,9	11,2	0,494
20	1,46	1,31	8,9	11,2	0,494
20	1,51	1,36	8,8	11,1	0,558
20	1,51	1,36	8,8	11,1	0,548
25	1,51	1,32	8,4	11,2	0,538
25	1,51	1,32	8,4	11,2	0,517
25	1,51	1,32	8,4	11,2	0,514
25	1,54	1,35	8,3	11,1	0,580
25	1,54	1,35	8,3	11,1	0,566
25	1,54	1,34	8,3	11,1	0,534
25	1,54	1,34	8,3	11,1	0,525
30	1,54	1,31	7,7	11,1	0,553
30	1,56	1,32	7,7	11,1	0,583
30	1,56	1,32	7,7	11,1	0,583
0	1,52	1,52	11,2	11,2	0,602
5	1,57	1,54	10,7	11,2	0,636
10	1,62	1,55	10,1	11,2	0,671
15	1,63	1,52	10,7	12,6	0,689
20	1,71	1,57	10,1	12,6	0,727
25	1,72	1,54	9,5	12,6	0,761
30	1,79	1,56	8,9	12,6	0,783

TABLA XXVI

CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LAS MEZCLAS DE ARCILLA-ARENA DE CUARZO.
HUMEDAD DE LA ARCILLA CONSTANTE, HUMEDAD DE LA MEZCLA VARIABLE

MONTMORILLONITA-ARENA DE CUARZO					
ARENA CUARZO %	DEN.MEZ. SECA g/cm ³	DEN.ARC. SECA g/cm ³	HUMEDAD MEZCLA %	HUMEDAD ARCILLA %	CONDUCTIVIDAD TERMICA W/m °K
5	1,61	1,58	18,1	19,0	0,96
10	1,60	1,53	17,2	19,1	0,87
15	1,54	1,43	16,8	19,8	0,88
20	1,57	1,42	15,2	19,1	0,91
25	1,60	1,41	14,6	19,6	0,79
5	1,76	1,73	18,9	19,9	1,24
10	1,76	1,70	17,6	19,9	1,30
15	1,81	1,71	16,3	19,2	1,35
20	1,78	1,64	15,8	19,8	1,16
25	1,75	1,57	14,9	19,9	1,21

SAPONITA-ARENA DE CUARZO					
5	1,51	1,48	18,3	19,3	0,90
10	1,55	1,48	17,3	19,3	0,87
15	1,53	1,42	16,4	19,3	0,77
20	1,54	1,39	15,0	18,7	0,82
25	1,50	1,31	14,7	20,4	0,76
5	1,70	1,67	17,8	18,8	1,16
10	1,67	1,60	17,2	19,1	1,10
15	1,78	1,68	15,3	18,1	1,20
25	1,75	1,57	15,0	20,1	1,05

TABLA XXVII

CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LAS MEZCLAS ARCILLA-ARENA DE CUARZO.
HUMEDAD DE LA ARCILLA VARIABLE, HUMEDAD DE LA MEZCLA CONSTANTE

MONTMORILLONITA-ARENA DE CUARZO					
ARENA CUARZO %	DEN.MEZ. SECA g/cm ³	DEN.ARC. SECA g/cm ³	HUMEDAD MEZCLA %	HUMEDAD MEZCLA %	CONDUCTIVIDAD TERMICA W/m °K
10	1,61	1,54	19,0	21,1	1,02
15	1,63	1,53	19,1	22,5	1,14
20	1,63	1,49	18,5	23,1	1,12
25	1,65	1,47	18,8	25,1	1,23
5	1,86	1,83	15,8	15,0	1,29
20	1,84	1,71	18,0	22,5	1,46
25	1,79	1,62	19,0	25,3	1,56

SAPONITA-ARENA DE CUARZO					
10	1,56	1,49	19,3	21,5	0,78
15	1,56	1,45	19,4	22,8	0,91
20	1,55	1,40	19,4	24,4	0,94
25	1,59	1,40	19,1	25,5	0,99
5	1,71	1,68	17,7	18,6	1,16
10	1,74	1,68	17,7	19,7	1,18
15	1,73	1,63	18,0	21,2	1,29
20	1,74	1,60	17,2	21,5	1,35
25	1,76	1,58	17,3	23,1	1,38

TABLA XXVIII

VALORES DE CONDUCTIVIDAD TERMICA CALCULADOS A PARTIR DE LAS
REGRESIONES MULTIPLES ESTABLECIDAS

DEN.ARCILLA $\rho_a(\text{g/cm}^3)$	ARCILLA SIN A.DE CUARZO			ARCILLA+10%		A.DE CUARZO	
	λ_T SATUR.100%	λ_T SATUR.50%	λ_T SECO	λ_T SATUR.100%	λ_T SATUR.50%	λ_T SECO	
MONTMORILLO.							
1,6	1,23	0,79	0,35	1,30	0,86	0,42	
1,8	1,28	0,96	0,64	1,34	1,03	0,71	
SAPONITA							
1,6	1,16	0,82	0,47	1,22	0,87	0,53	
1,8	1,23	0,99	0,74	1,29	1,04	0,79	

TABLA XXIX

**HUMEDADES DE LA MONTMORILONITA TRATADA A DISTINTAS TEMPERATURAS
EN LAS CONDICIONES AMBIENTALES DE LABORATORIO**

CONDIC. LABORATORIO		TEMPERATURA DE TRATAMIENTO				
HUMEDAD(%)	TEMP. °C	25°	100°	175°	200°	250°
62	26	12,57	8,50	8,23	4,26	3,60
59	25	12,81	10,50	8,22	5,25	4,20
57	28	12,19	10,20	8,20	5,38	4,30
65	25	12,80	10,60	8,23	6,08	4,96
50	25	11,88	10,34	7,69	6,00	4,68
65	26	12,55	10,03	7,63	5,90	4,60
65	24	12,90	10,35	8,13	6,06	5,29
69	20	13,16	10,09	8,18	6,59	5,06
68	21	13,46	10,93	9,08	6,95	5,80
73	24	13,62	11,61	9,22	7,65	6,42
63,5	21	13,42	10,92	8,74	7,29	5,82
75,5	18	13,66	11,41	9,16	7,58	6,53
69	19	13,65	11,42	9,54	5,54	6,09
66,5	20	10,95	8,86	7,46	6,35	5,39
66	17	11,05	8,81	7,75	6,54	5,36
66	17	11,15	8,90	7,39	6,24	5,20
62	18	10,89	8,92	7,23	5,95	4,92
64	17	10,13	8,26	6,76	5,73	4,57
61	17	10,66	8,56	7,06	6,15	5,01
61,5	19	11,67	9,05	7,26	6,04	4,89
61	16	7,05	5,68	5,05	3,71	3,15
72	17	13,40	10,90	9,40	8,50	6,31
71	17	13,30	10,70	9,10	8,20	6,25
69	20	12,42	10,65	9,50	7,93	6,23
65	18	12,55	11,35	9,76	8,00	6,30
65	19	12,57	10,74	9,31	7,80	6,20

TABLA XXX

**HUMEDADES DE LA SAPONITA TRATADA A DISTINTAS TEMPERATURAS EN
LAS CONDICIONES AMBIENTALES DE LABORATORIO**

CONDIC. LABORATORIO		TEMPERATURA DE TRATAMIENTO					
HUMEDAD(%)	TEMP. °C	25°	100°	175°	200°	250°	300°
62	26	12,49	9,39	9,30	6,74	5,80	4,73
59	25	11,90	10,35	10,25	7,88	6,00	5,50
57	28	11,57	10,23	10,15	8,30	6,75	5,60
65	25	12,39	11,27	10,87	8,33	6,90	5,92
50	25	11,63	9,87	9,06	8,23	6,71	5,07
65	26	11,19	9,86	9,40	8,08	6,40	5,44
65	24	12,07	10,83	9,90	8,94	7,22	5,66
69	20	11,61	10,78	10,38	10,41	6,78	5,95
68	21	12,27	11,48	11,11	10,03	7,91	6,61
73	24	13,32	12,39	11,90	11,08	8,50	7,09
63,5	21	12,10	11,22	10,37	9,97	7,74	6,07
75,5	18	10,18	11,66	10,76	8,27	10,21	6,49
69	19	11,66	11,88	10,84	10,24	8,18	6,36
66,5	20	10,37	10,31	9,58	9,15	7,64	5,80
76	17	10,20	10,40	9,81	9,43	7,67	5,99
66	17	10,44	10,76	9,72	9,35	7,32	5,58
62	18	9,98	9,83	8,60	8,16	6,69	5,00
64	17	9,20	9,20	8,16	7,35	6,33	4,61
61	17	9,83	9,67	9,00	8,53	6,99	5,17
61,5	19	9,67	9,54	8,44	8,08	6,59	4,91
61	16	7,43	7,05	6,13	5,65	4,67	4,05
72	17	11,80	12,20	10,90	10,60	8,70	6,40
71	17	11,50	11,90	10,70	10,00	8,20	6,00
69	20	11,67	11,60	11,64	10,50	9,21	6,80
66	19	11,11	11,90	10,68	10,00	8,16	6,00
65	18	11,21	11,96	11,53	10,50	8,40	6,20
65	19	11,21	11,42	10,24	9,80	7,83	5,80

TABLA XXXI

VALORES MEDIOS DE HUMEDADES (105°C-24horas) REHIDRATAACION RELATIVA
DE LAS ARCILLAS PRECALENTADAS Y MANTENIDAS EN LAS CONDICIONES DEL
LABORATORIO DURANTE 120 días

TEMP. DE PRETRATAMIENTO °C	MONTMORILLONITA		SAPONITA	
	HUMEDAD %	REHIDRATAACION RELATIVA %	HUMEDAD %	REHIDRATAACION RELATIVA %
NT(≈25)	12,2(σ1,4)	100	11,1(σ1,2)	100
100	10,0(σ1,3)	82	10,7(σ1,2)	96
175	8,2(σ1,1)	68	10,0(σ1,2)	87
200	6,5(σ1,2)	53	9,1(σ1,3)	81
250	5,3(σ0,9)	44	7,4(σ1,2)	66
300			5,7(0,7)	51

TABLA XXXII

PERDIDAS DE PESO DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A PRETRATAMIENTO TERMICO.
RESULTADOS DEL ANALISIS TERMOGRAVIMETRICO

TEMP.DE PRETRATAMIENTO °C	PERDIDAS DE PESO(%) DE LA MONTMORILLONITA		PERDIDAS DE PESO(%) DE LA SAPONITA	
	ENTRE	ENTRE	ENTRE	ENTRE
	31-300°C	300-949°C	31-300°C	300-949°C
25	12,16	5,68	11,11	4,58
100	8,00	5,00	7,08	4,67
200	4,16	4,91	5,97	4,66
300	2,66	4,89	3,19	4,88

TABLA XXXIII

**PERDIDAS PORCENTUALES DE AGUA DE LAS ARCILLAS PRODUCIDAS DURANTE EL
PRETRATAMIENTO TERMICO**

TEMP.DE PRETRAMIENTO °C	PERDIDAS(%EN PESO) DE AGUA INTERLAMINAR: $T \leq 300^{\circ}\text{C}$		PERDIDA(%EN PESO) DEL AGUA "ESTRUCTURAL": $T > 300^{\circ}\text{C}$	
	MONTMORILLONITA	SAPONITA	MONTMORILLONITA	SAPONITA
25	0,0	0,0	0,0	0,0
100	34,20	36,30	12,45	0,0
200	65,80	46,30	14,10	0,0
300	78,10	71,3	14,47	0,0

TABLA XXXIV

DENSIDAD DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A PRETRATAMIENTO TERMICO

TEMP.DE TRATAMIENTO(°C)	DENSIDAD (g/cm ³)	
	MONTMORILLONITA	SAPONITA
100	2,68	2,64
175	2,73	2,62
200	2,78	2,57
250	2,79	2,54
300	2,83	2,50

TABLA XXXV

AREA SUPERFICIAL DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A PRETRATAMIENTO TERMICO

TEMP.DE PRETRATAMIENTO °C	MONTMORILLONITA		SAPONITA	
	SUPERF.TOT.	SUPERF.EXTER.	SUPERF.TOT.	SUPERF.EXTER.
	A.M. (m ² /g)	BET (m ² /g)	A.M. (m ₂ /g)	BET (m ² /g)
25 (NT)	480,5	---	340,0	---
100	414,6	36,9	325,9	188,2
175	ND	45,3	ND	171,4
200	ND	54,6	ND	174,1
250	388,3	54,7	247,9	165,1
300	258,8	60,0	217,4	154,4

TABLA XXXVI

LIMITES DE ATTERBERG DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A TRATAMIENTO TERMICO

TEMP.TRATAM. °C	MONTMORILLONITA			SAPONITA		
	L.LIQUIDO	L.PLAST.	I.PLAST.	L.LIQUIDO	L.PLAST.	I.PLAST.
	%	%	%	%	%	%
25	257	38	219	178	64	114
	254	48	206	192	59	133
				179	57	122
100	255	56	199	191	74	117
175	260	47	213	165	68	97
	260	54	206			
200	246	54	192	150	72	78
	253	42	211			
250	217	53	164	117	64	53
300	193	47	146	89	59	30

TABLA XXXVII

EXPANSION POTENCIAL EN SEDIMENTACION DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A
TRATAMIENTO TERMICO

TEMP. TRATAM. °C	MONTMORILLONITA EXPANSION(%)	SAPONITA EXPANSION(%)
25	172	164
100	284	200
175	276	180
200	256	152
250	228	100
300	184	66

TABLA XXXVIII

PRESION DE HINCHAMIENTO DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A TRATAMIENTO
TERMICO

TEMP. TRATAM. °C	PRESION DE HINCHAMIENTO (Kg/cm ²)			
	MONTMORILLONITA		SAPONITA	
	DENS. SECA 1,6 g/cm ³	DENS. SECA 1,8 g/cm ³	DENS. SECA 1,6 g/cm ³	DENS. SECA 1,8 g/cm ³
25	64	170	110	381
100	39	149	91	---
175	63	144	92	339
200	55	146	92	---
250	37	156	79	304
300	34	146	54	197

TABLA XXXIX

PRESION DE HINCHAMIENTO DE LAS ARCILLAS TRATADAS TERMICAMENTE Y REHIDRATADAS DURANTE 121 DIAS EN LAS CONDICIONES DEL LABORATORIO

TEMP. TRATAM. °C	MONTMORILLONITA		SAPONITA	
	DENS. SECA g/cm ³	PRES. HINCHAM. Kg/cm ²	DENS. SECA g/cm ³	PRES. HINCHAM. Kg/cm ²
25	1,62	46,5	1,62	135,8
100	1,60	37,7	1,60	121,2
175	1,59	40,1	---	---
200	1,60	37,7	1,60	100,8
250	1,60	26,2	1,57	100,1
300			1,60	76,0

TABLA XL

CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A TRATAMIENTO TERMICO

TEMP. TRATAM. °C	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (m/s)		
	DENS. SECA	MONTMORILLONITA	SAPONITA
25	1,6	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$1,3 \cdot 10^{-13}$
	1,6	$1,13 \cdot 10^{-13}$	
100	1,6	$1,3 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^{-13}$
175	1,6	$1,0 \cdot 10^{-13}$	$2,3 \cdot 10^{-13}$
200	1,6	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$2,5 \cdot 10^{-13}$
	1,6	$1,3 \cdot 10^{-13}$	
250	1,6	$4,2 \cdot 10^{-13}$	$6,8 \cdot 10^{-13}$
300	1,6	$1,4 \cdot 10^{-13}$	$9,3 \cdot 10^{-13}$
			$1,5 \cdot 10^{-12}$
25	1,8	$5,3 \cdot 10^{-14}$	
100	1,8	$4,0 \cdot 10^{-14}$	
175	1,8	$8,7 \cdot 10^{-14}$	
250	1,8	$1,0 \cdot 10^{-13}$	

TABLA XLI

**RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE DE LA MONTMORILLONITA SOMETIDA A
TRATAMIENTO TERMICO**

TEMP. TRATAM.	DENS. SECA	HUMEDAD	RESIST. A C. SIMPLE	DEFORMACION
°C	g/cm ³	%	Kg/cm ²	%
25	1,60	11,2	12,9	2
100	1,59	12,2	14,9	2
175	1,60	10,0	11,6	2
200	1,60	10,3	12,8	2
250	1,61	9,6	10,3	2
300	1,61	9,9	8,5	2
25	1,83	10,1	55,6	2
100	1,78	11,0	43,5	2
175	1,79	10,2	34,0	2
200	1,79	10,3	38,7	2
250	1,79	10,2	31,3	2
300	1,80	10,0	30,3	2

TABLA XLII

**RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE DE LA SAPONITA SOMETIDA A
TRATAMIENTO TERMICO**

TEMP. TRATAM.	DENS. SECA	HUMEDAD	RESIST. A C. SIMPLE	DEFORMACION
°C	g/cm ³	%	Kg/cm ²	%
25	1,60	10,1	32	3
100	1,60	12,8	40	3
175	1,60	11,5	27	3
200	1,60	11,5	34	3
250	1,60	10,7	29	2
300	1,60	9,6	29	3
25	1,80	10,0	107	4
100	1,80	11,1	97	4
175	1,80	10,8	87	4
200	1,80	11,3	95	4
250	1,80	10,3	87	4
300	1,80	9,6	78	3

TABLA XLIII

PARAMETROS EDOMETRICOS

ARCILLA	DENS. SECA g/cm ³	C _c	C _s	a _v cm ² /g	m _v cm ² /g
MONTMO.	1,4	0,38	0,20	2,5.10 ⁻⁶	1,7.10 ⁻⁶
MONTMO.	1,6	0,38	0,33	2,3.10 ⁻⁶	1,4.10 ⁻⁶
SAPONITA	1,5	0,50	0,20	2,2.10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻⁶
SAPONITA	1,6	0,40	0,26	7,5.10 ⁻⁷	4,4.10 ⁻⁷

TABLA XLIV

**COEFICIENTES DE CONSOLIDACION Y PERMEABILIDAD DE LA MONTMORILLONITA
PARA DIFERENTES ESCALONES DE CARGA**

ESCALONES DE CARGA Kg/cm ²	DENS. SECA g/cm ³	C _d cm ² /s	K m/s
0,6	1,41	NC	---
0,6-1,2	1,41	NC	---
1,2-2,4	1,41	NC	---
2,4-4,8	1,41	NC	---
4,86-9,72	1,41	NC	---
9,72-20	1,41-1,46	2,74.10 ⁻⁴	4,7.10 ⁻¹²
20-40	1,46-1,52	1,0.10 ⁻⁵	1,7.10 ⁻¹³
40-70	1,52-1,60	7,0.10 ⁻⁶	1,2.10 ⁻¹³
70-100	1,60-1,66	7,6.10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻¹³
100-150	1,66-1,73	7,6.10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻¹³
150-200	1,73-1,79	7,7.10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻¹³
0,50	1,60	NC	---
0,5-1,0	1,60	NC	---
1,0-2,0	1,60	NC	---
2,0-4,0	1,60	NC	---
4,0-10,0	1,60	NC	---
10,0-20,0	1,60	NC	---
20,0-40,0	1,60-1,62	1,3.10 ⁻⁴	1,8.10 ⁻¹²
40,0-70,0	1,62-1,68	1,5.10 ⁻⁵	2,1.10 ⁻¹³
70,0-100,0	1,68-1,74	3,2.10 ⁻⁶	4,5.10 ⁻¹³

TABLA XLV

**COEFICIENTES DE CONSOLIDACION Y PERMEABILIDAD DE LA SAPONITA PARA
DIFERENTES ESCALONES DE CARGA**

ESCALONES DE CARGA Kg/cm ²	DENS. SECA g/cm ³	C _v cm ² /s	K m/s
0,6	1,50	NC	---
0,6-1,2	1,50	NC	---
1,2-2,4	1,50	NC	---
2,4-4,86	1,50	NC	---
4,86-9,72	1,50	NC	---
9,72-20,0	1,50	NC	---
20,0-40,0	1,50	NC	---
40,0-70,0	1,50-1,55	NC	---
70,0-100,0	1,55-1,62	1,1.10 ⁻⁵	1,4.10 ⁻¹³
100,0-150,0	1,62-1,71	7,4.10 ⁻⁶	9,6.10 ⁻¹⁴
0,5	1,60	NC	---
0,5-1,0	1,60	NC	---
1,0-2,0	1,60	NC	---
2,0-4,0	1,60	NC	---
4,0-8,0	1,60	NC	---
8,0-15,0	1,60	NC	---
15,0-30,0	1,60	NC	---
30,0-60,0	1,60	NC	---
60,0-100,0	1,60	NC	---
100,0-200,0	1,60-1,64	NC	---
200,0-300,0	1,64-1,71	1,96.10 ⁻⁵	8,6.10 ⁻¹⁴
300,0-400,0	1,71-1,77	1,60.10 ⁻⁵	7,1.10 ⁻¹⁴

TABLA XLVI

PARAMETROS DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCION-DESORCION DE AGUA

DISOL.	Aw	ADSORCION				DESORCION			
		SAPONITA		MONTMORILLONITA		SAPONITA		MONTMORILLONIT.	
		%HUMED.	ESTAB.*	%HUMED.	ESTAB.*	%HUMED.	ESTAB.*	%HUMED.	ESTAB
NaOH	0,07	6,51	63	5,16	59	9,68	31	12,82	37
LiCl	0,111	4,16	35	2,61	56	8,73	22	12,92	40
K ₂ CO ₃	0,428	11,17	34	10,49	66	13,54	35	18,98	43
Mg(NO ₃) ₂	0,529	14,77	63	14,14	64	22,89	55	18,31	50
NaCl	0,753	17,45	70	18,01	43	21,20	93	20,03	109
KBr	0,807	19,06	71	19,50	73	24,83	70	22,55	60
KCl	0,843	20,42	78	20,23	43	24,44	38	24,26	91
Na ₂ SO ₄	0,86	27,38	59	27,14	66	32,59	70	31,74	99
BaCl ₂	0,902	23,14	84	22,98	103	27,43	55	26,82	60
K ₂ SO ₄	0,973	31,55	187	31,98	115	38,22	99	38,84	175

* Días de estabilización

FIG. 1

HUSO GRANULOMETRICO DE MOLTURACION
ARCILLAS DE LA CUENCA DE MADRID

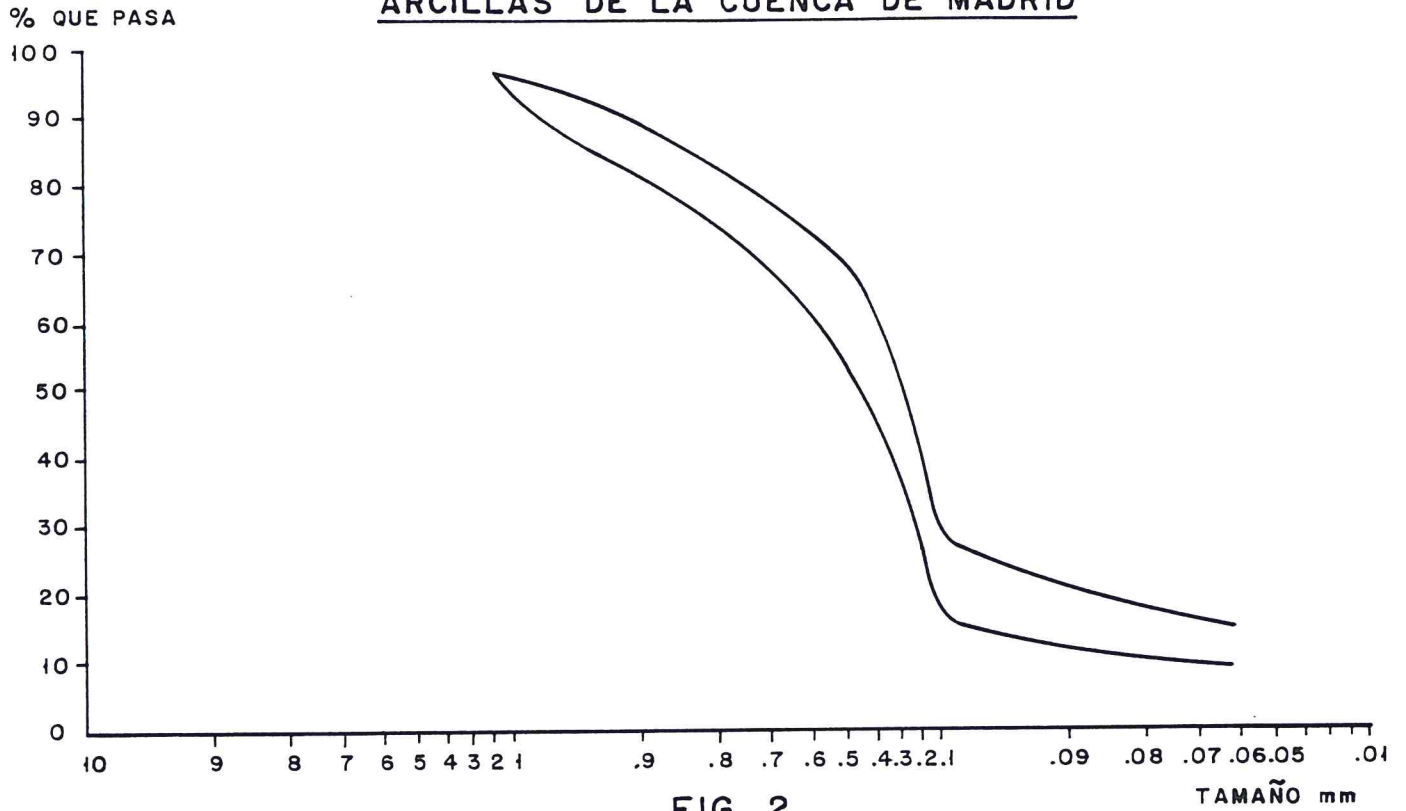


FIG. 2

HUSO GRANULOMETRICO DE MOLTURACION
ARCILLAS DE CABO DE GATA - ALMERIA

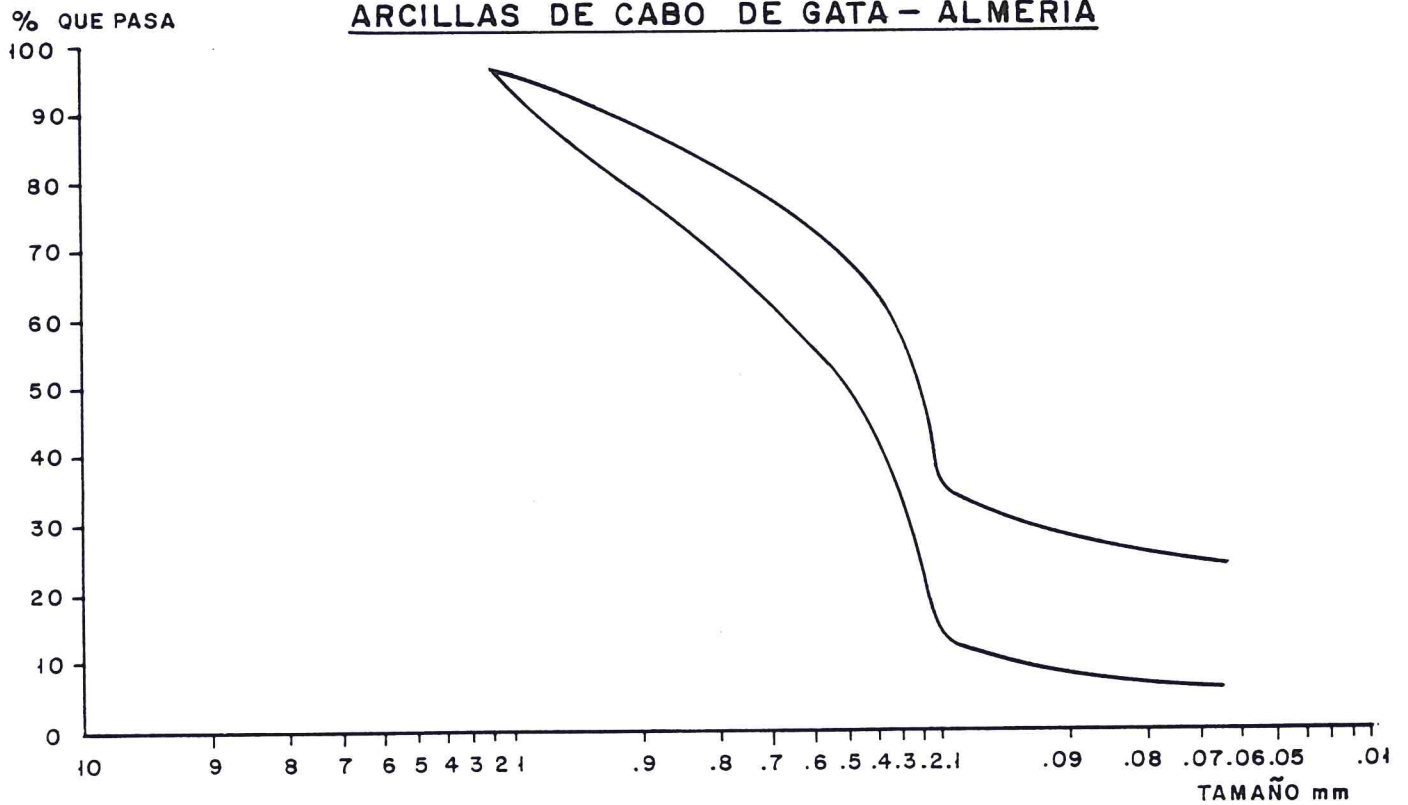
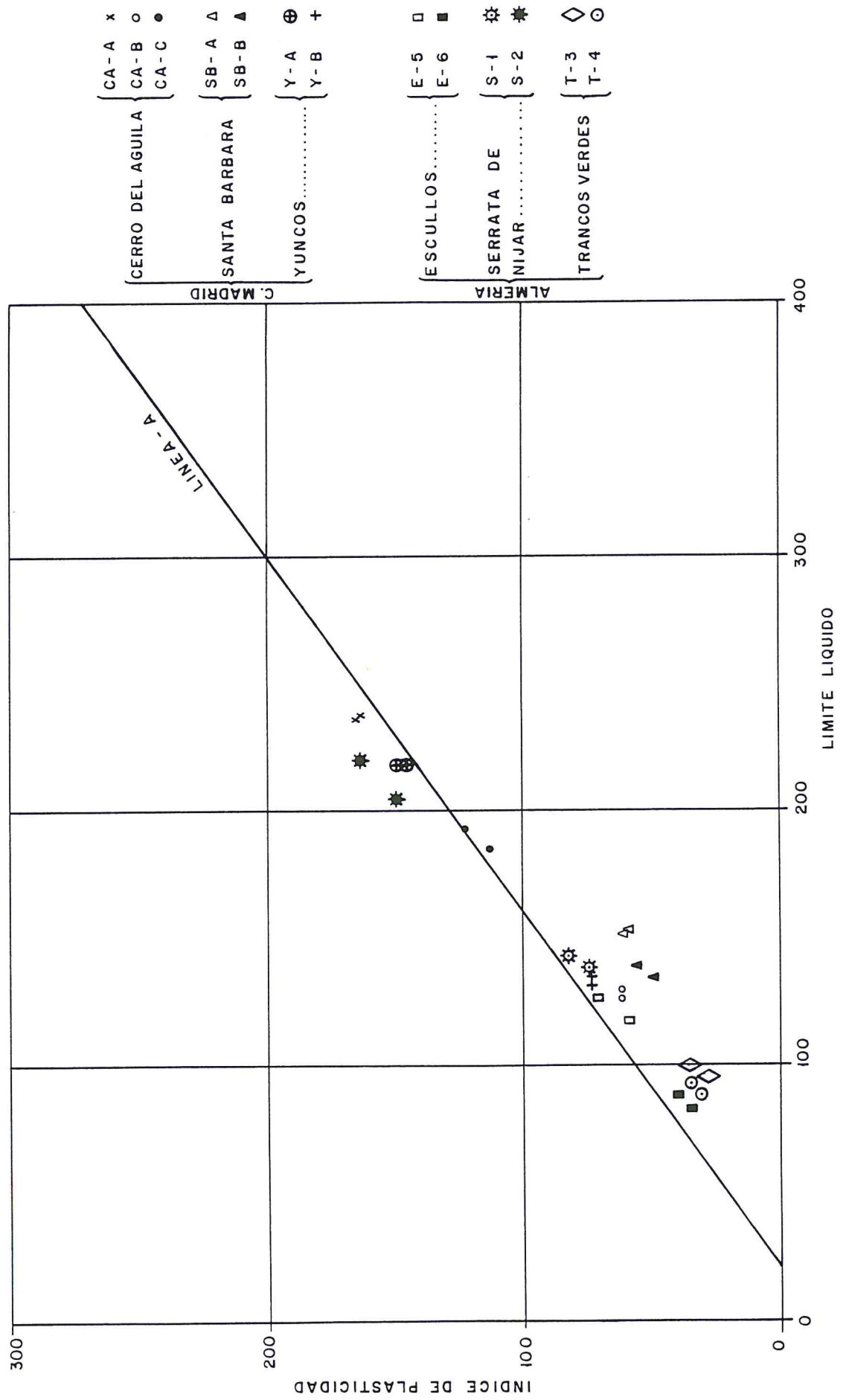


GRAFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE

FIG. 3

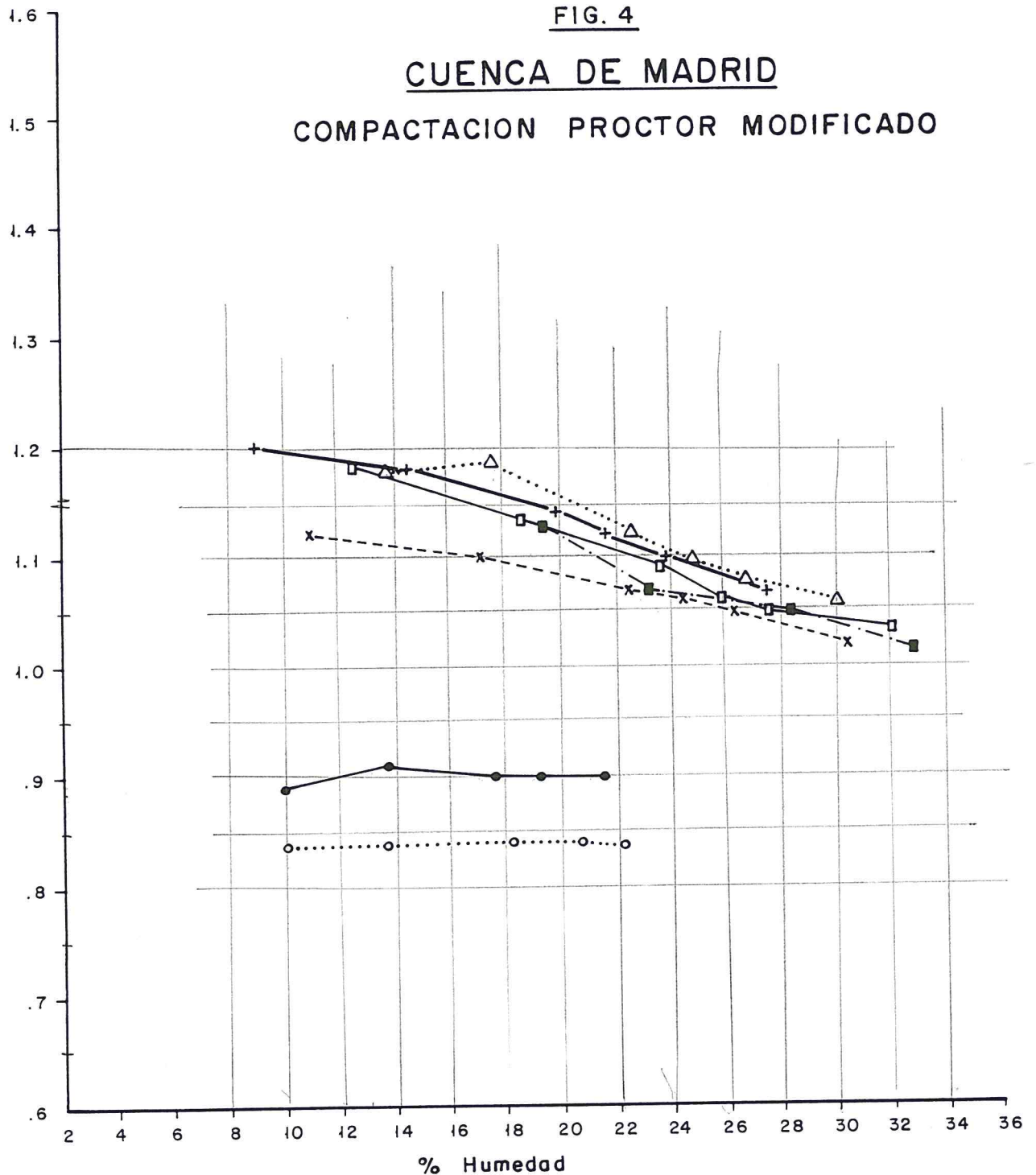


Densidad de la arcilla
seca (g/cm^3)

FIG. 4

CUENCA DE MADRID

COMPACTACION PROCTOR MODIFICADO

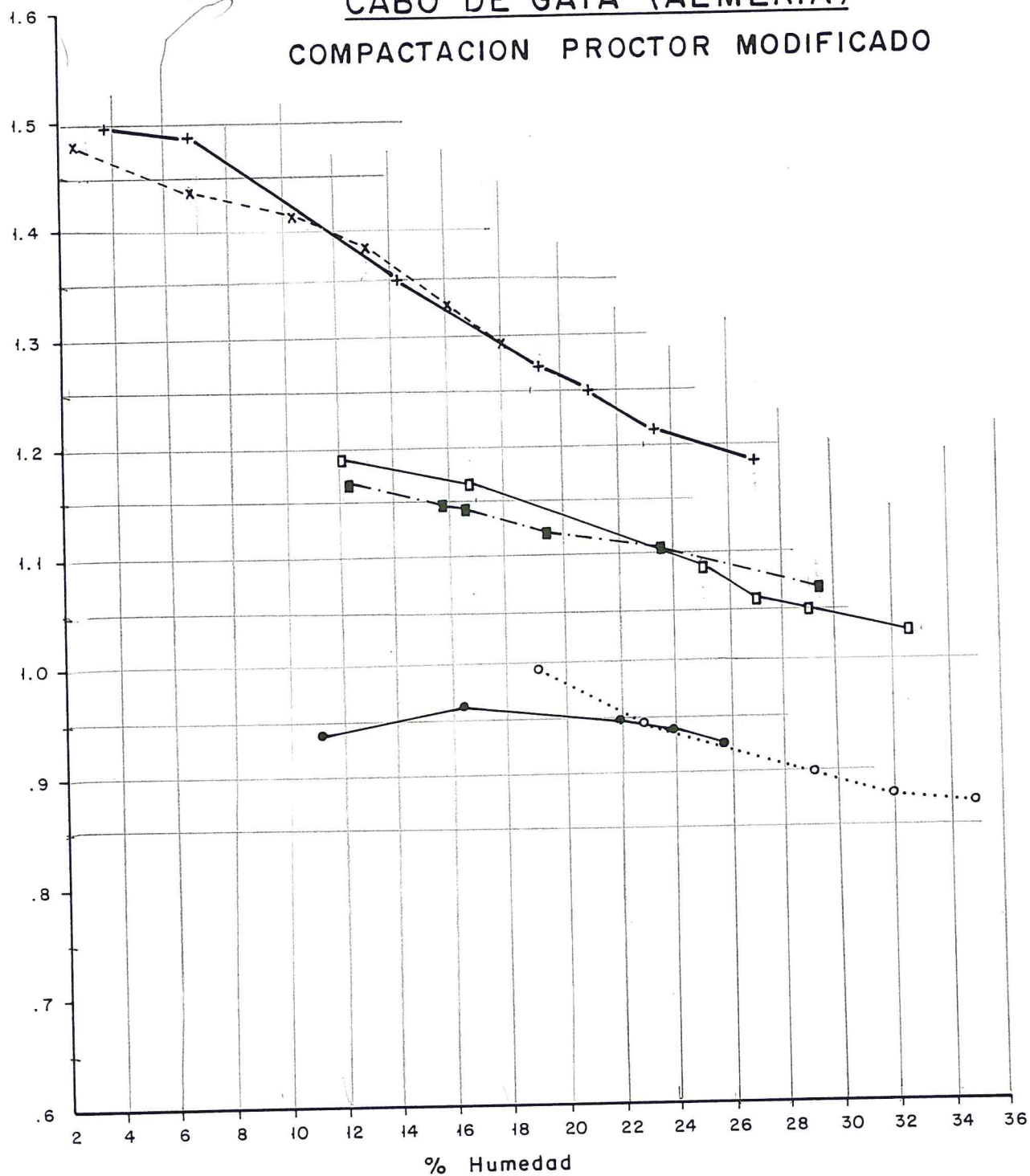


- MSB - B
- MSB - A
- x MY - A
- + MY - B
- MCA - A
- MCA - B
- △ MCA - C

FIG. 5

Densidad de la arcilla
seca (g/cm^3)

CABO DE GATA (ALMERIA)
COMPACTACION PROCTOR MODIFICADO



- T-3
- T-4
- x S-1
- + S-2
- E-5
- E-6

FIG. 6. DISTRIBUCIONES GRANULOMETRICAS COMPUESTAS
A PARTIR DEL MOLTURADO DE MONTMORILLONITA
(S-2) Y SAPONITA (MCA-C).
CURVAS ACUMULADAS.

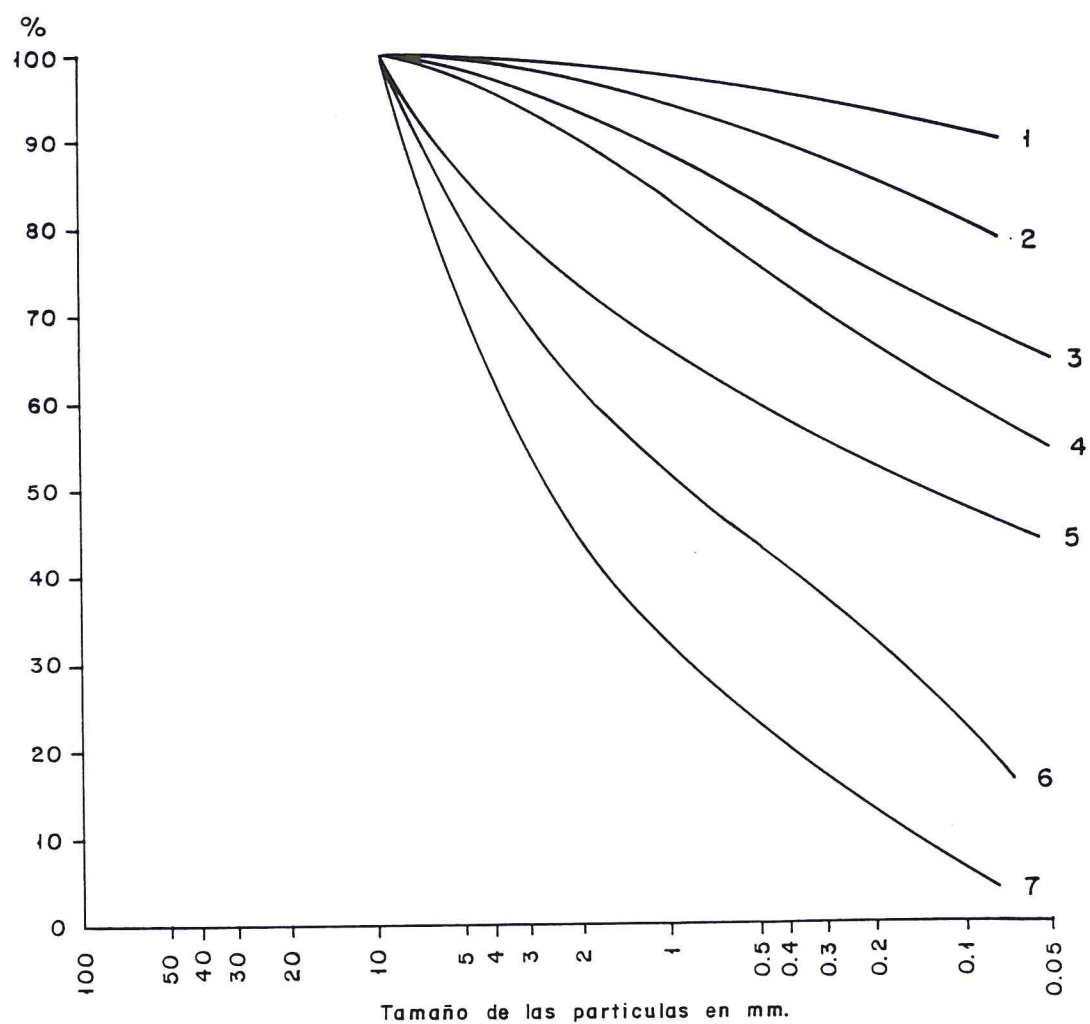


FIG. 7 MONTMORILLONITA DE LA SERRATA (S-2) HUMEDAD DE LA ARCILLA
EN FUNCION DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DEL
LABORATORIO.

DICIEMBRE 1989 a ABRIL 1990

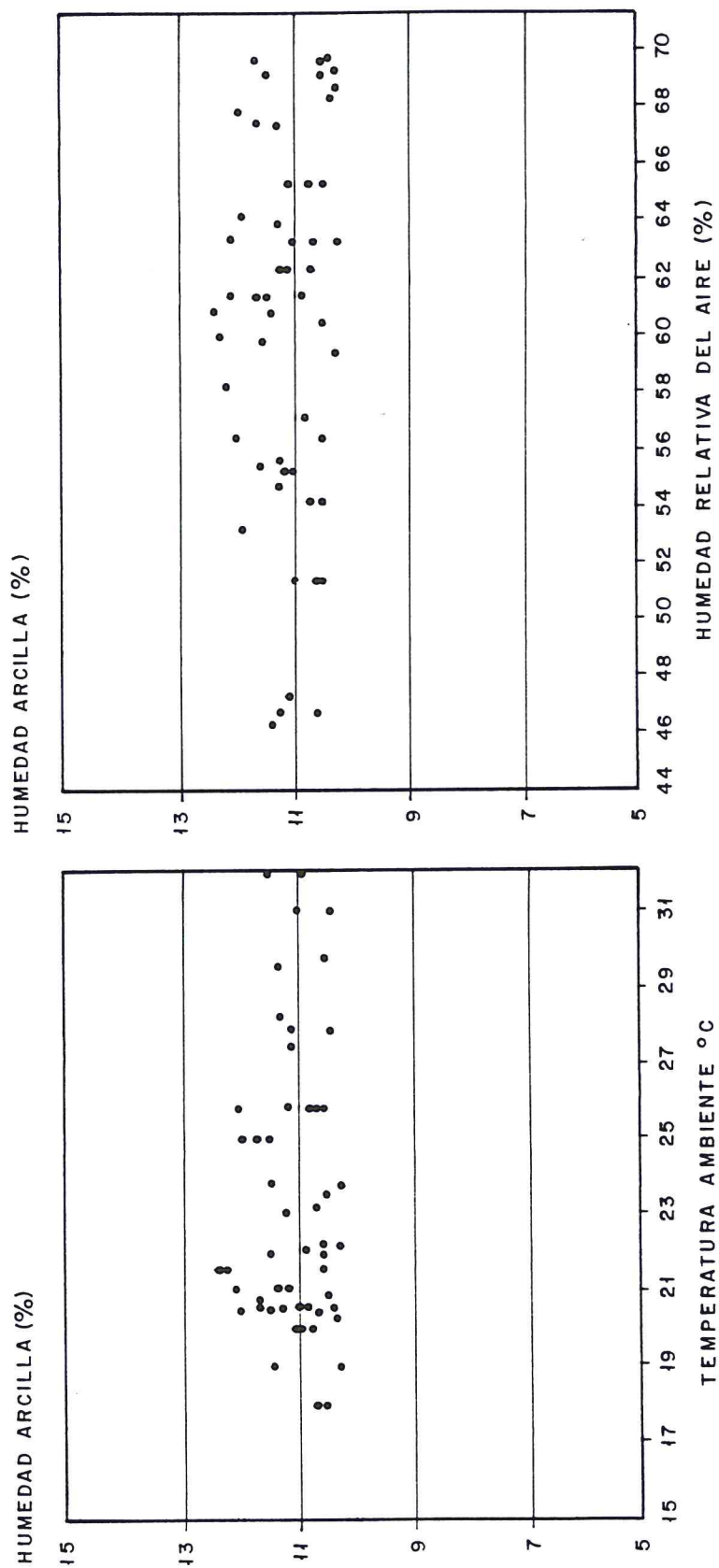


FIG. 8 SAPONITA DE CERRO DEL MONTE (MCA-C) HUMEDAD DE LA
ARCILLA EN FUNCION DE LA TEMPERATURA RELATIVA DEL
LABORATORIO.

DICIEMBRE 1989 a ABRIL 1990

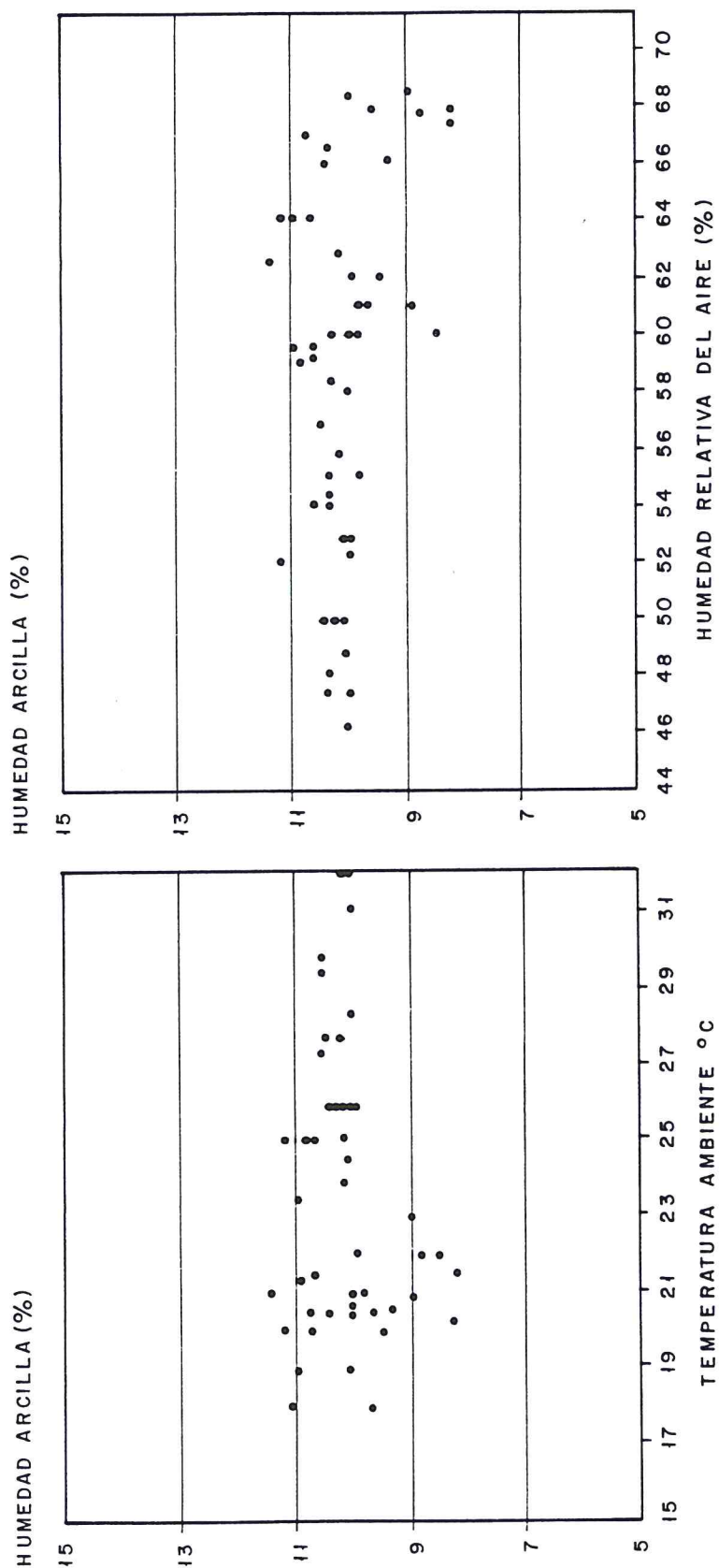
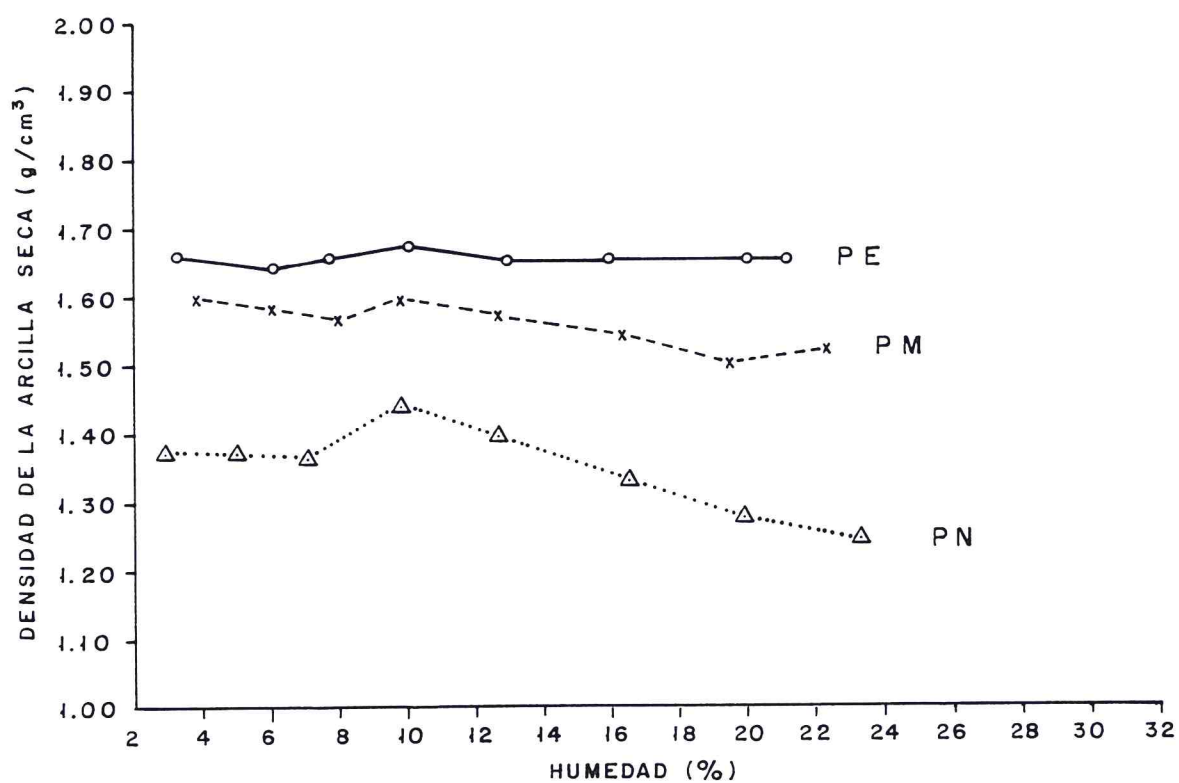


FIG. 9 . CURVAS DE COMPACTACION PROCTOR DE LA MONTMORILLONITA DE LA SERRATA.

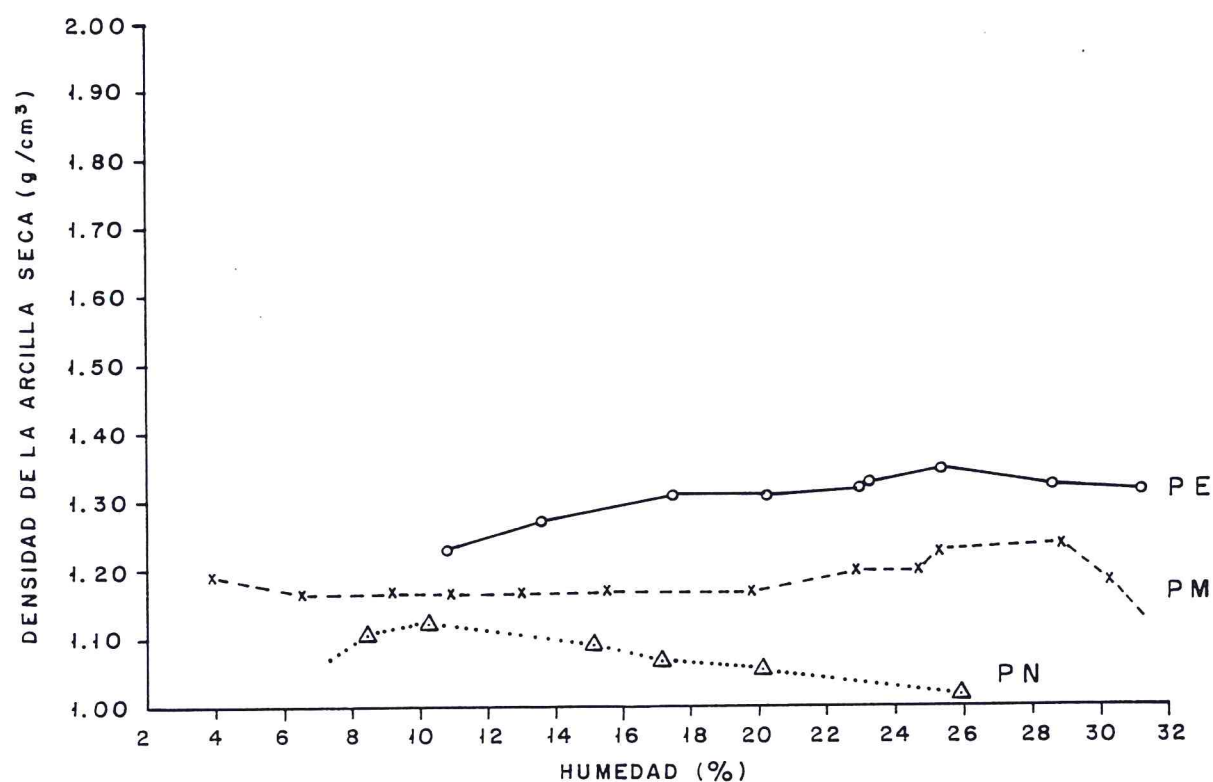


PN: Proctor normal, $E = 0.7 \text{ j/cm}^3$

PM: " modificado, $E = 3.4 \text{ j/cm}^3$

PE: " especial, $E = 13.5 \text{ j/cm}^3$

FIG. 10. CURVAS DE COMPACTACION PROCTOR DE LA SAPONITA DE CERRO DEL MONTE.

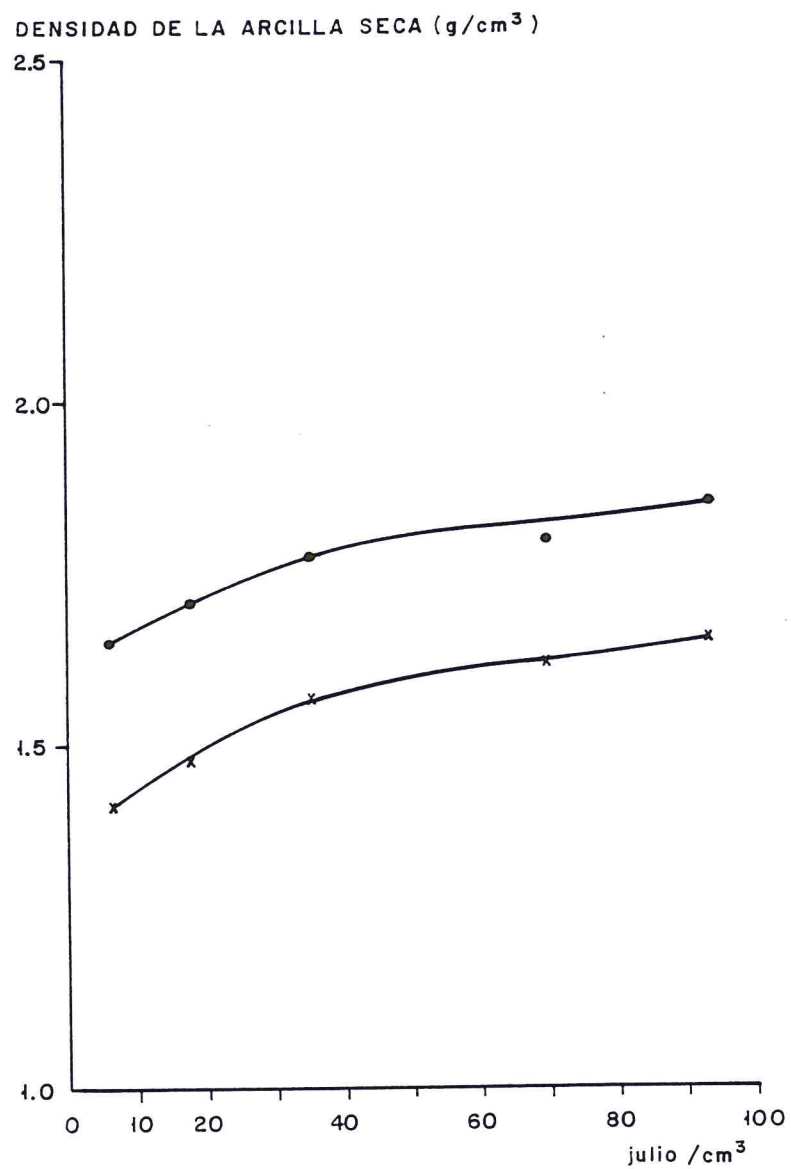


PN: Proctor normal, $E = 0.7 \text{ j/cm}^3$

PM: " modificado, $E = 3.4 \text{ j/cm}^3$

PE: " especial, $E = 13.5 \text{ j/cm}^3$

FIG. 11
COMPACTACION POR GOLPEO Y POR CAPAS



- S-2 ($h \approx 10\%$)
- x MCA-C ($h \approx 12\%$)

FIG. 12
COMPACTACION DINAMICA
MCA - C

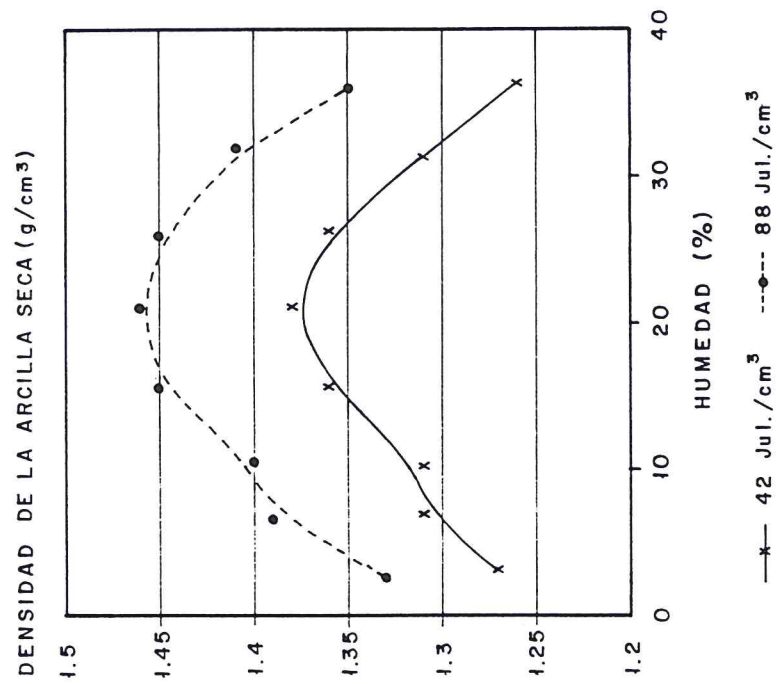


FIG. 13
COMPACTACION DINAMICA
S - 2

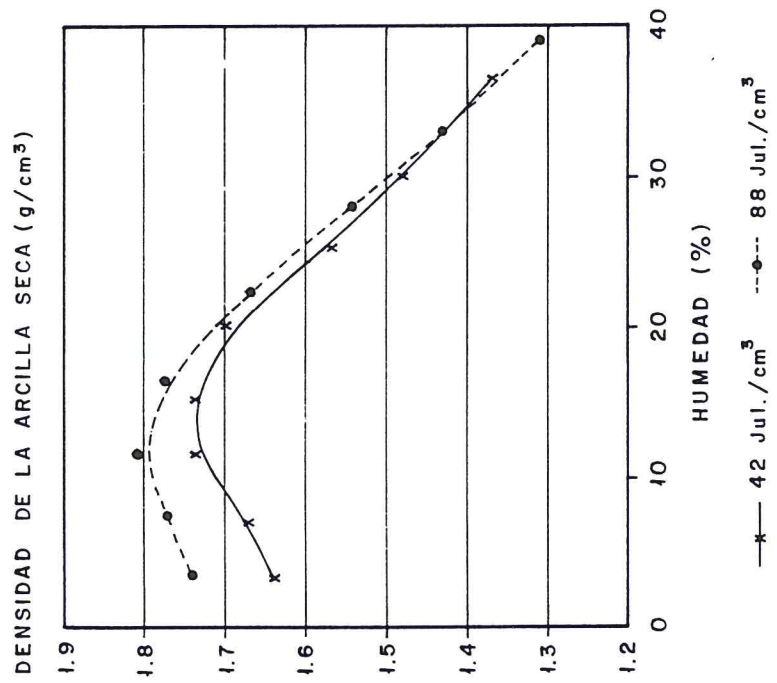


FIG. 14
COMPACTACION UNIAXIAL
MCA - C

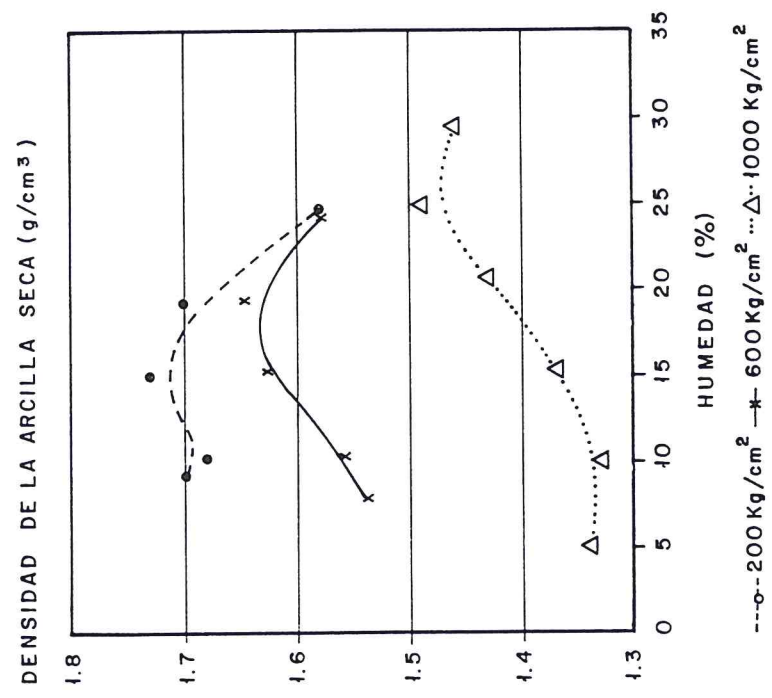
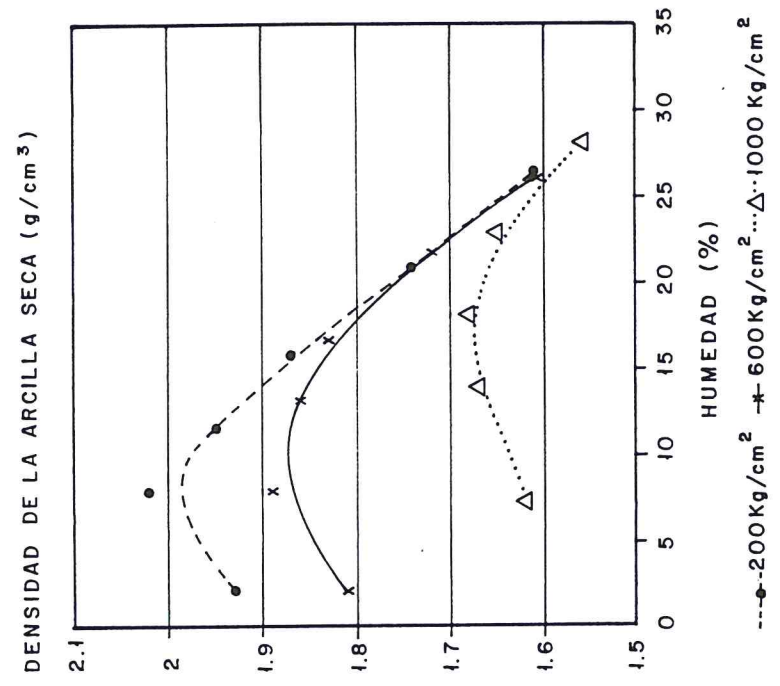


FIG. 15
COMPACTACION UNIAXIAL
S-2



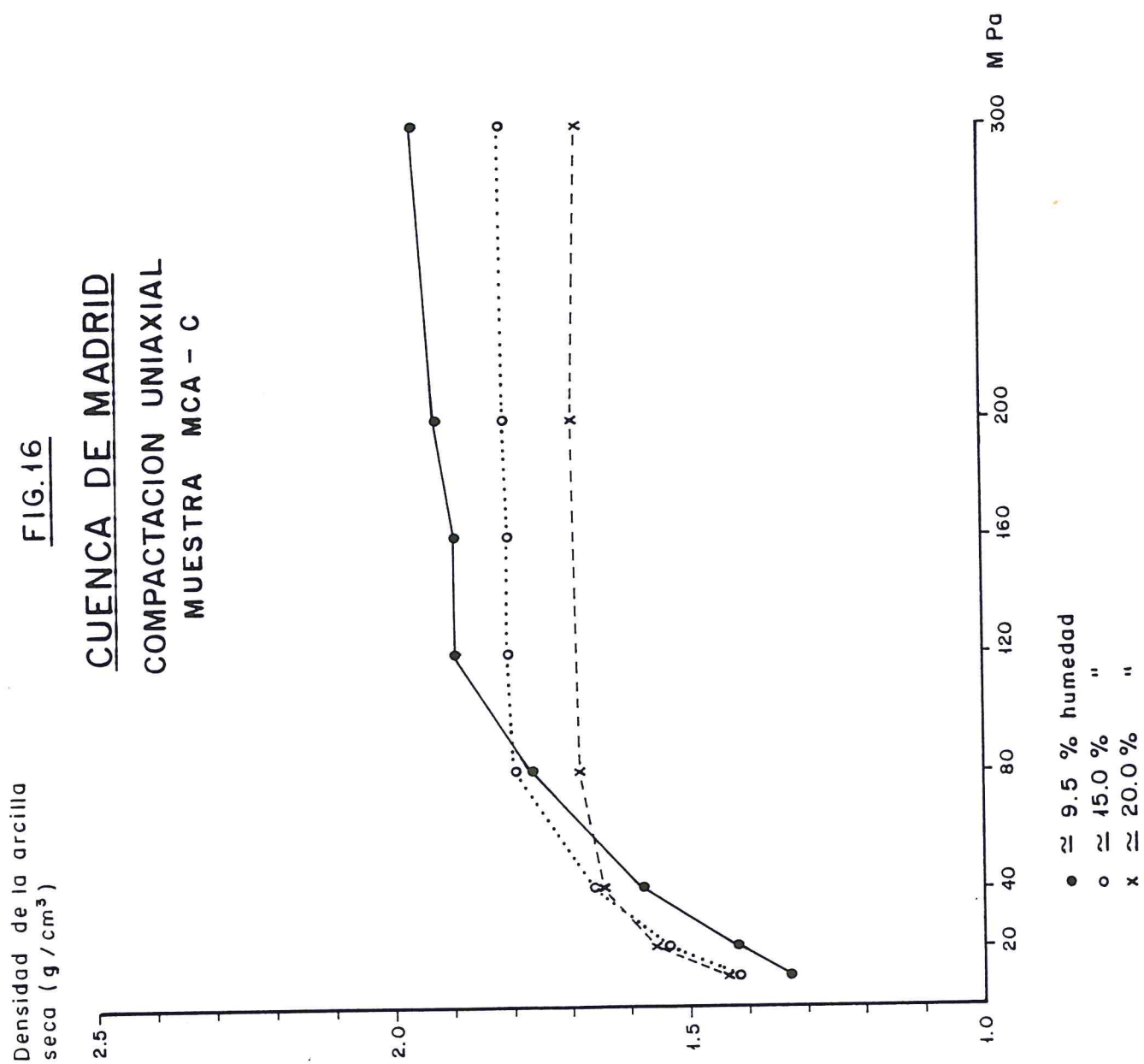


FIG.17
CABO DE GATA (ALMERIA)
COMPACTACION UNIAXIAL
MUESTRA S-2 SERRATA

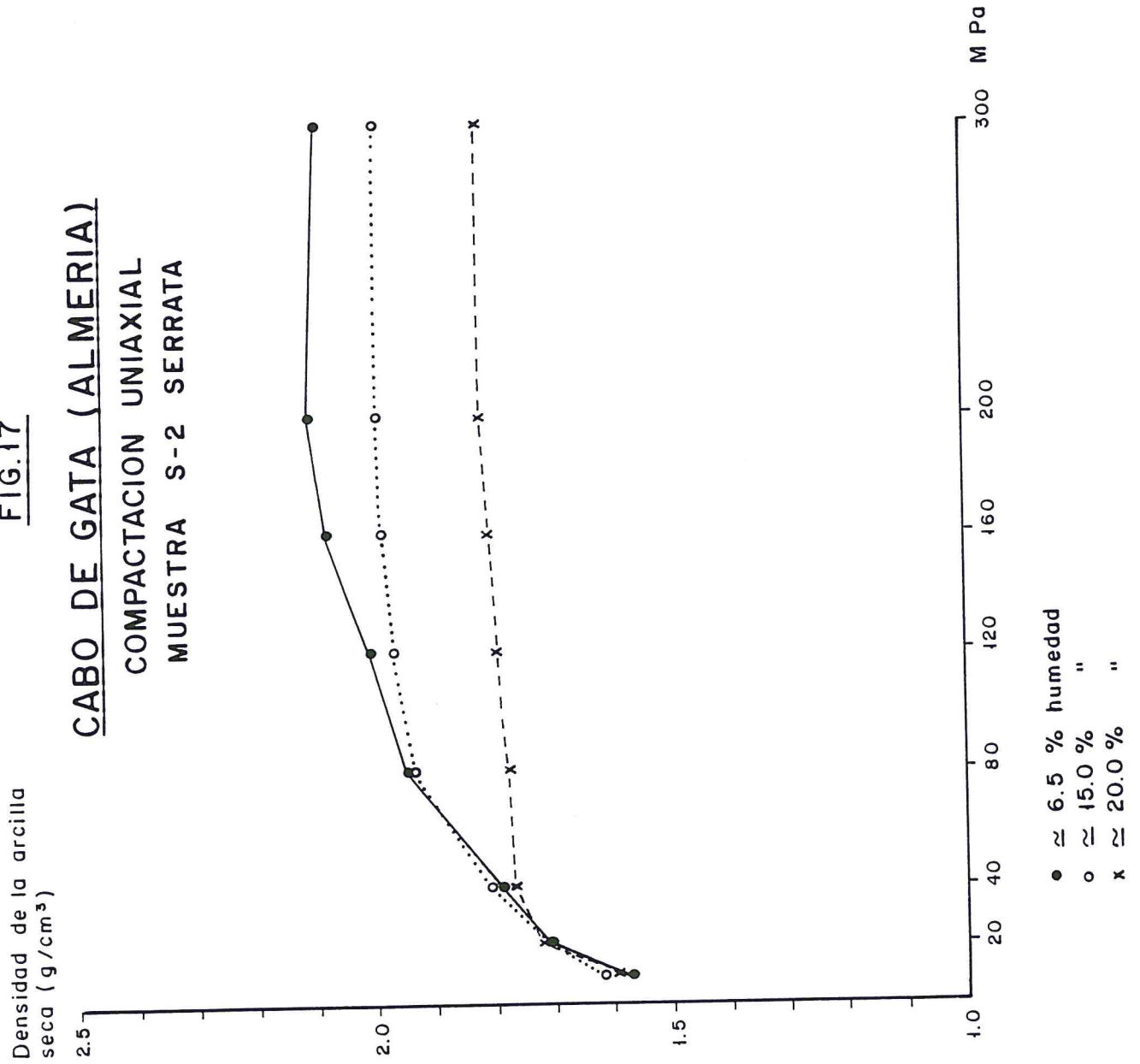


FIG.-18. INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRIA EN LA COMPACTABILIDAD DINAMICA.

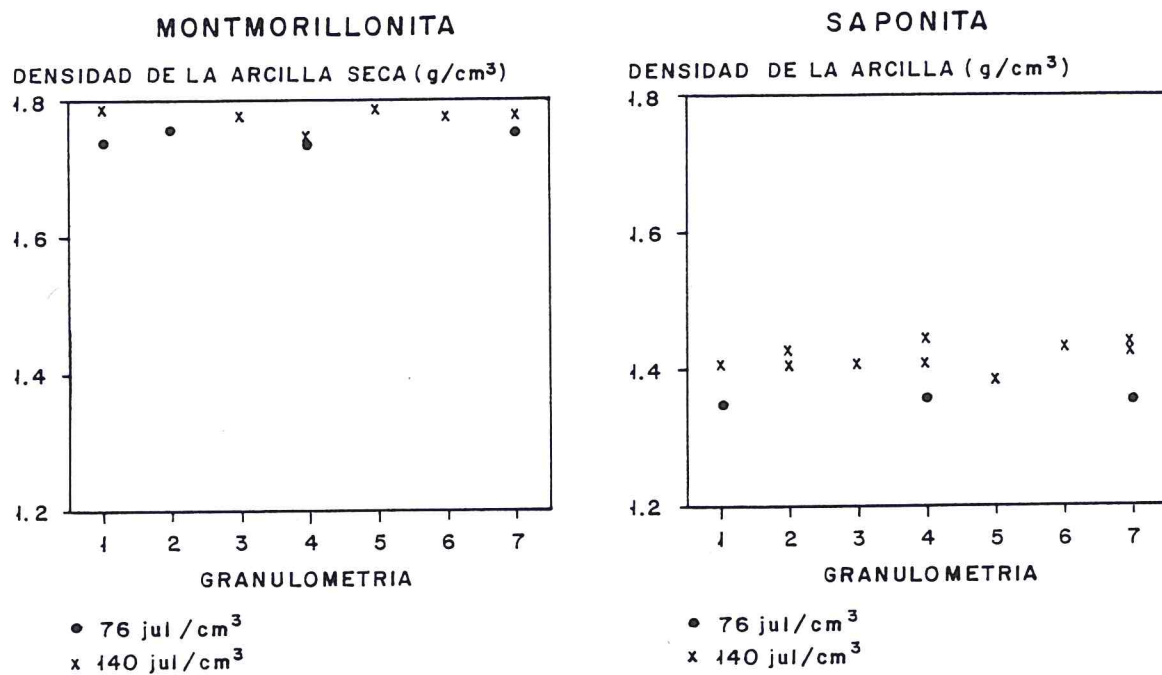


FIG.-19. INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRIA EN LA COMPACTABILIDAD UNIAXIAL.

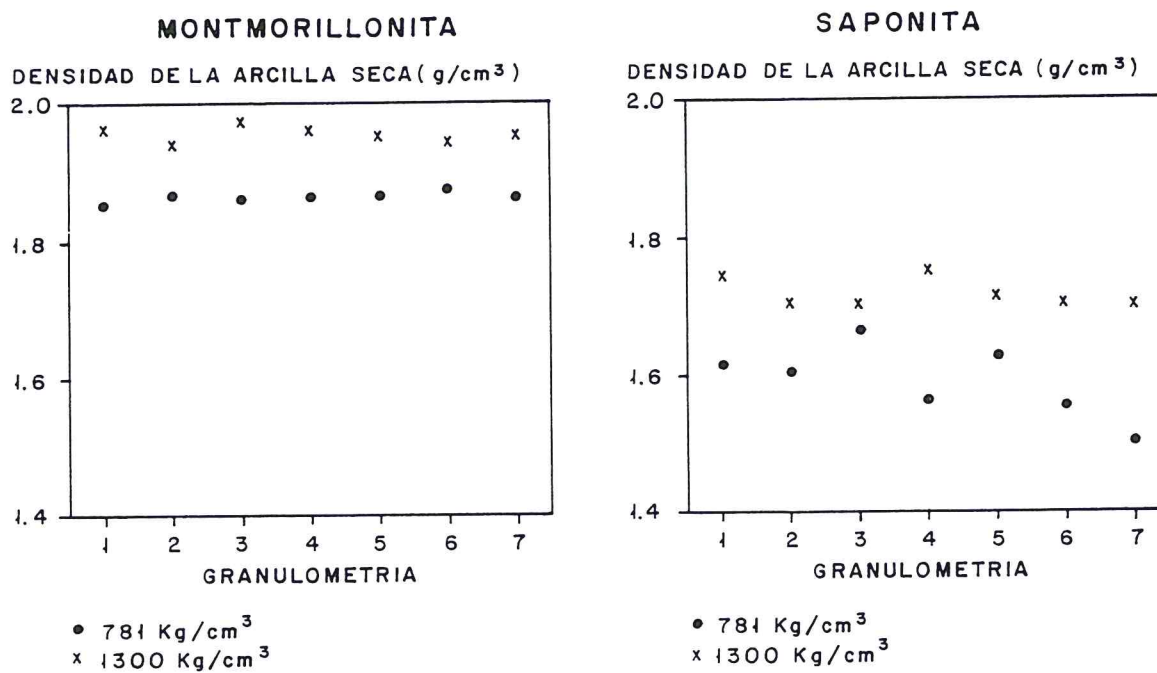


FIG.- 20

COMPACTABILIDAD MCA-C

MEZCLAS CON ARENA DE CUARZO

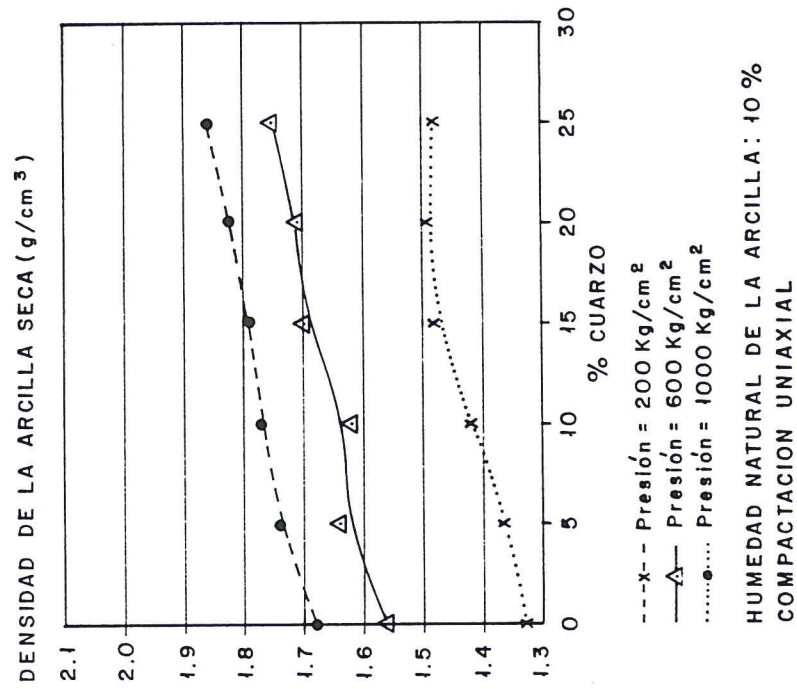


FIG.- 21

COMPACTABILIDAD S-2

MEZCLAS CON ARENA DE CUARZO

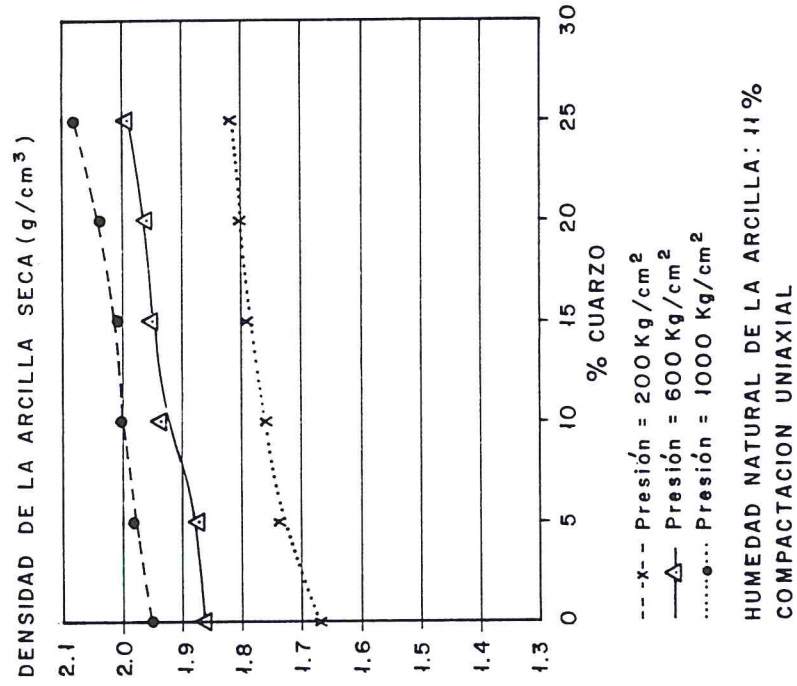
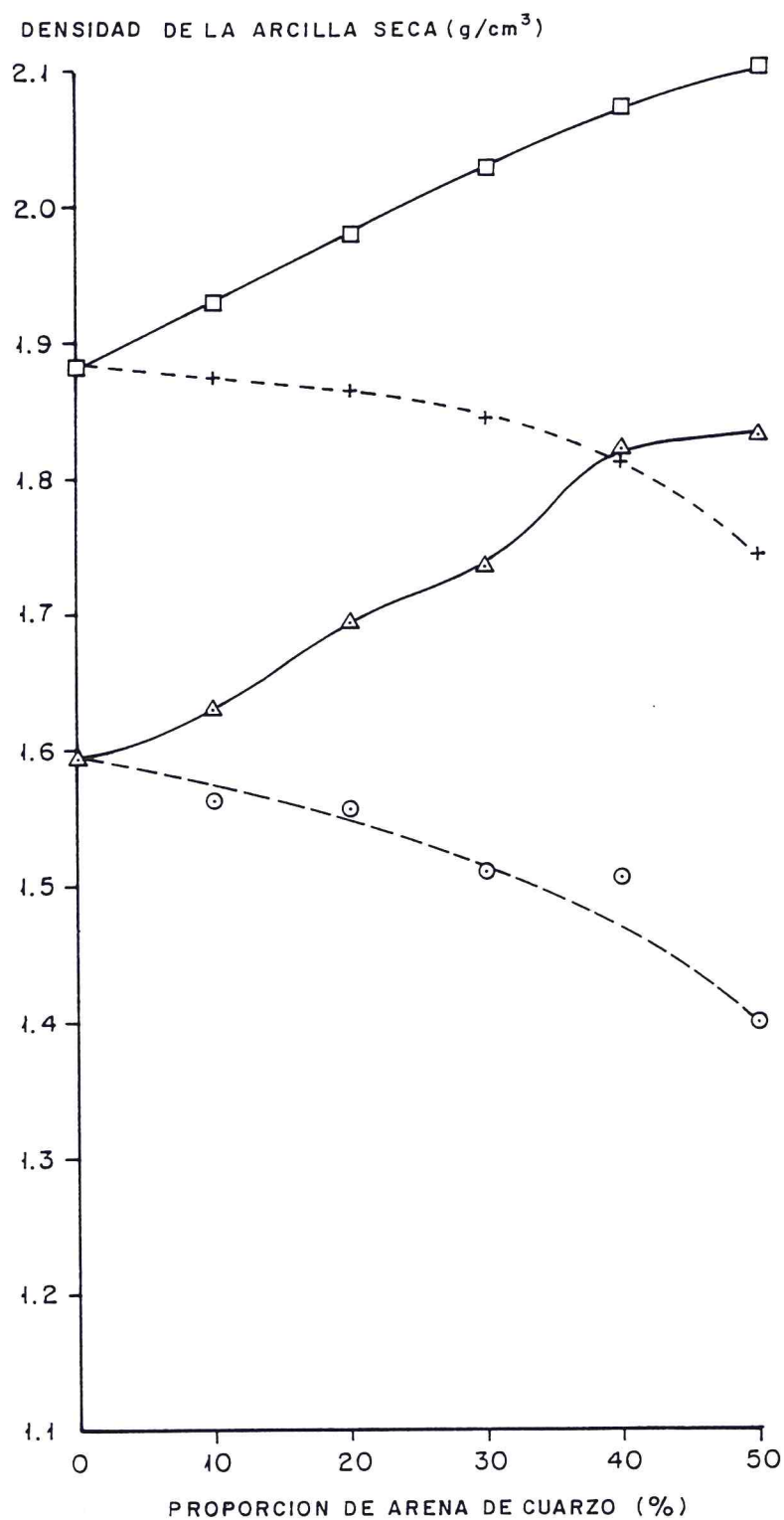


FIG. 22. COMPACTABILIDAD DE LAS MEZCLAS ARCILLA/ARENA DE CUARZO. COMPACTACION UNIAXIAL A 1000 Kg/cm².



DENSIDAD SECA DE LA BRIQUETA { $\square$ Montmorillonita
 $\triangle$ Saponita

DENSIDAD SECA DE LA ARCILLA { $+$ Montmorillonita
 $\odot$ Saponita

HUMEDAD { Montmorillonita 13.46 %
 Saponita 12.27 %

FIG. 23. RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE VERSUS
DENSIDAD SECA.
COMPACTACION POR GOLPEO.

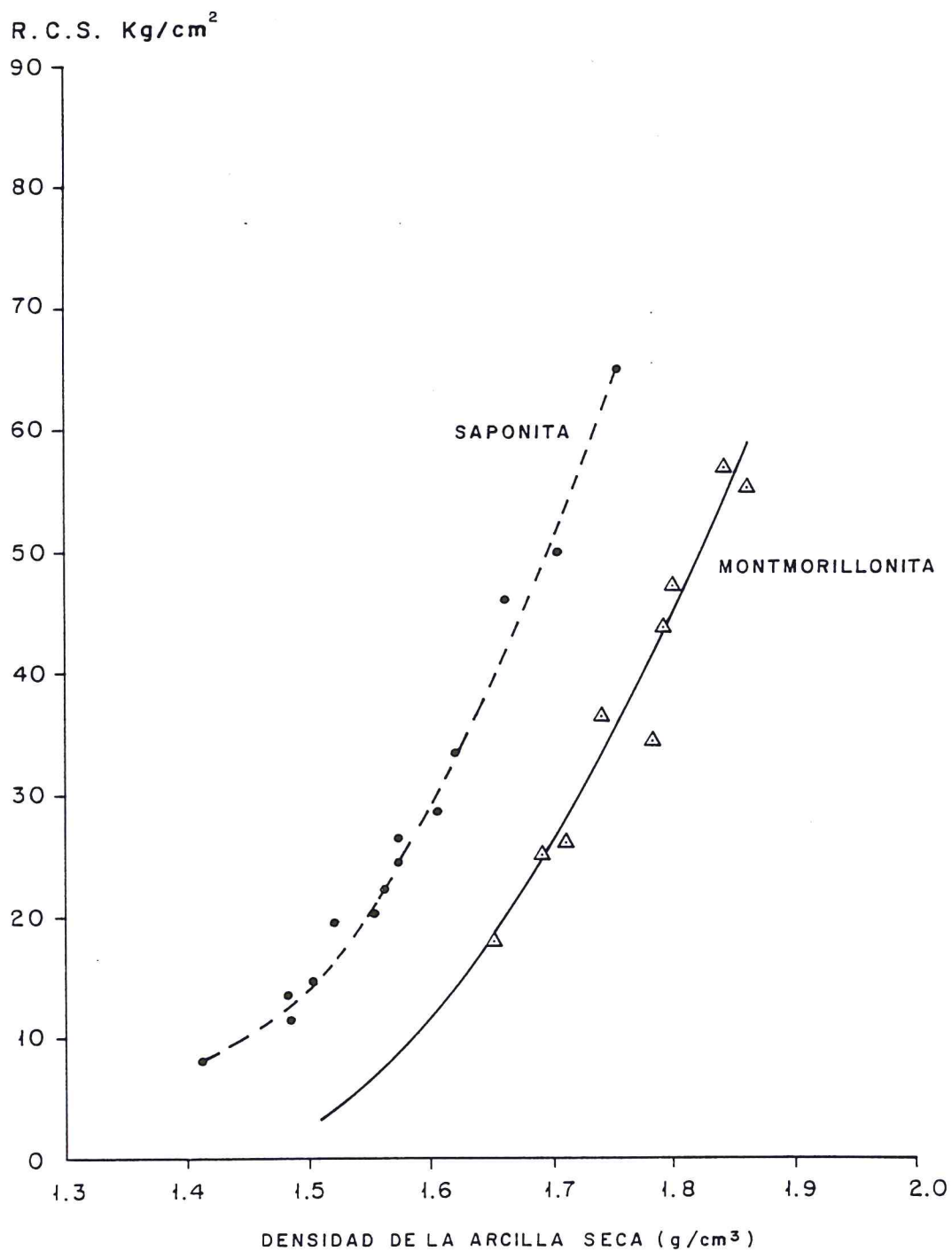


FIG. 24. RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE VERSUS
DENSIDAD SECA.
COMPACTACION POR PRENSADO UNIAXIAL.

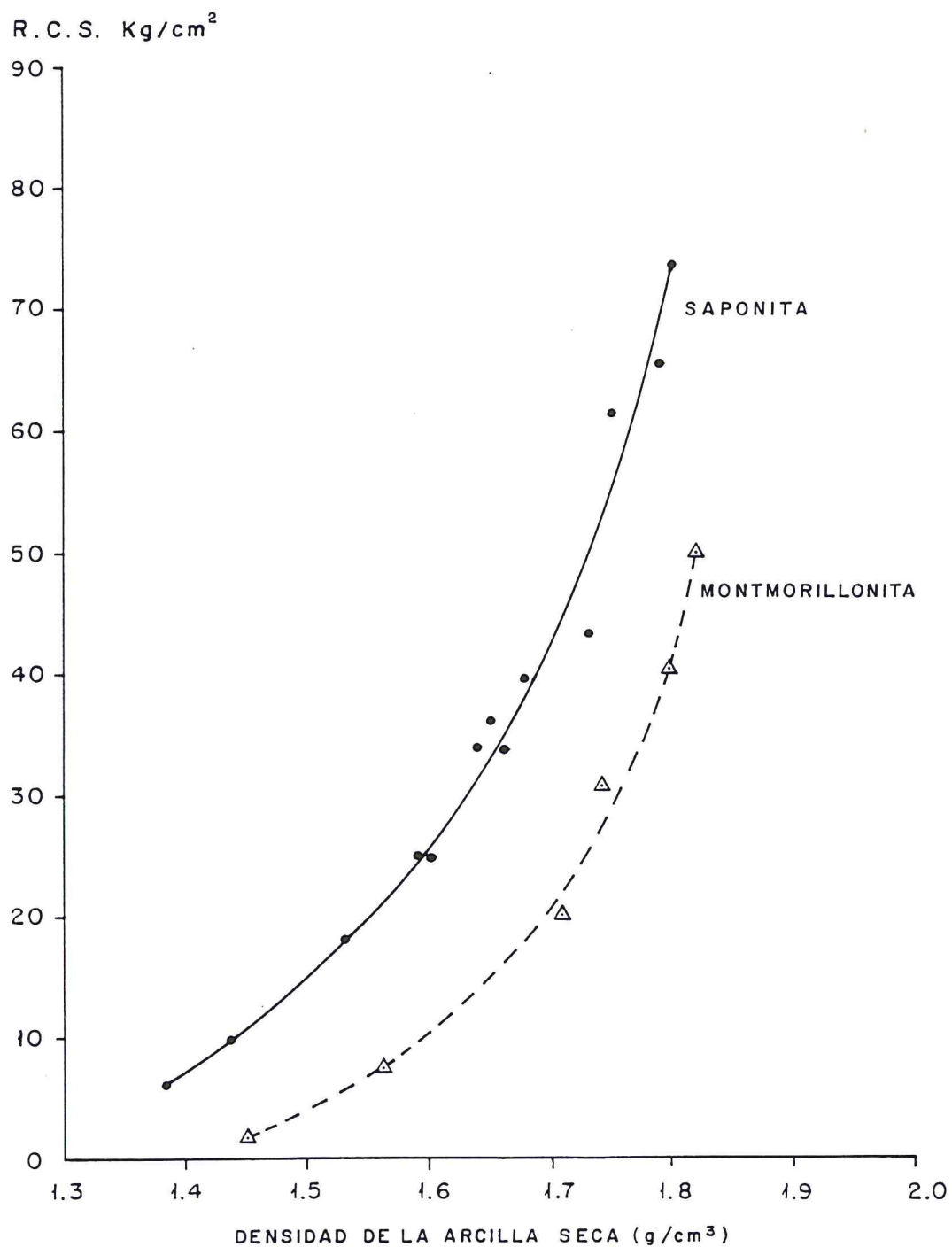


FIG. 25. INCREMENTOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA SAPONITA RESPECTO DE LA MONTMORILLONITA.

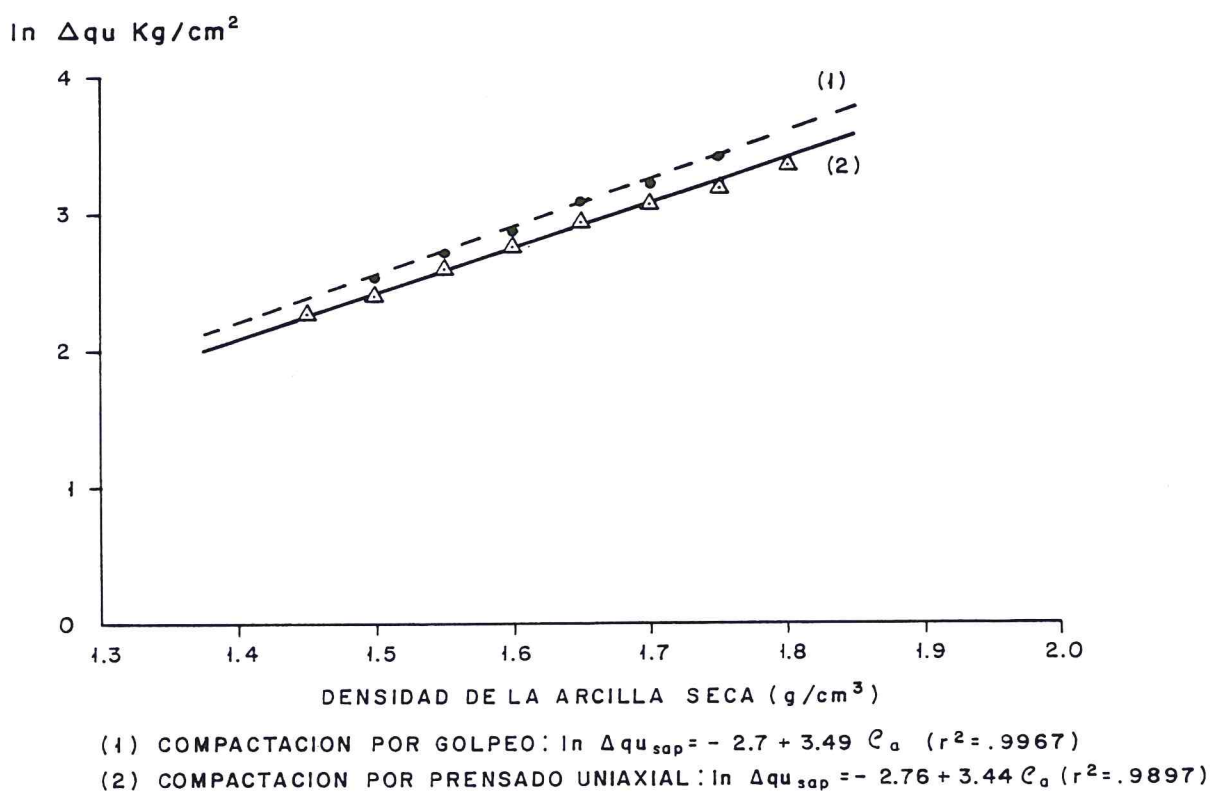


FIG. 26. RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE EN
 FUNCION DE LA DENSIDAD SECA, PARA
 DIFERENTES HUMEDADES.
 SAPONITA DEL CERRO DEL MONTE.

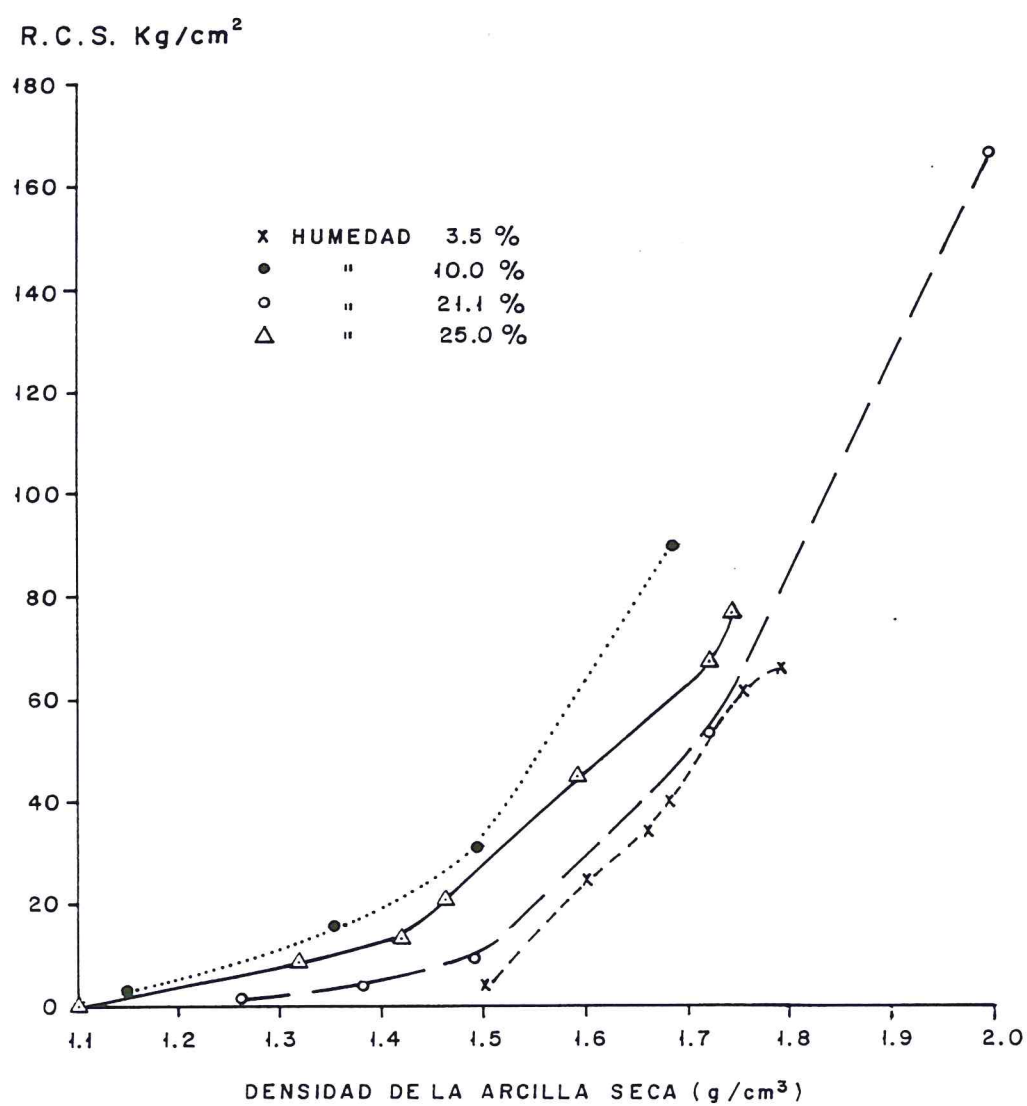


FIG. 27. RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE EN
 FUNCION DE LA DENSIDAD SECA , PARA
 DIFERENTES HUMEDADES.
 MONTMORILLONITA DE LA SERRATA.

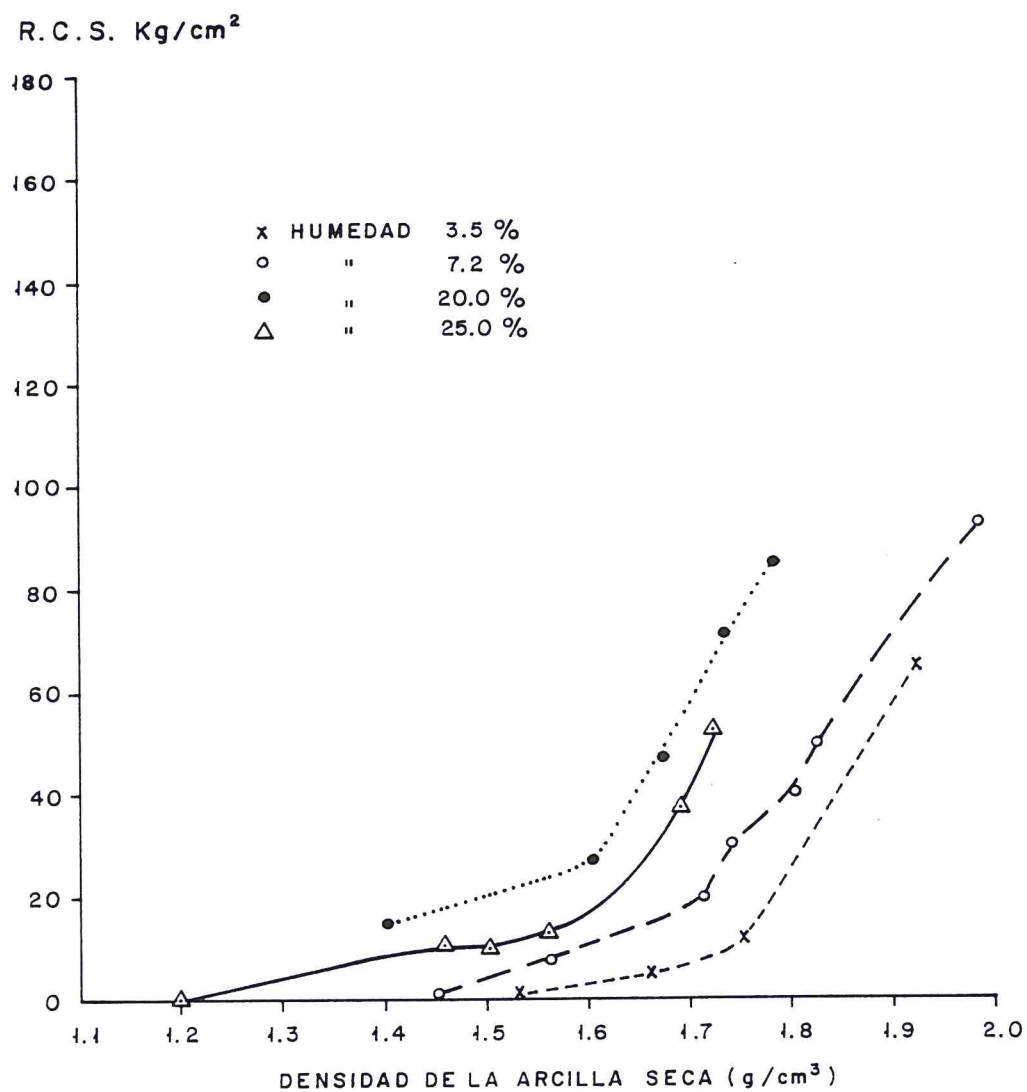


FIG. 28. RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE DE BRIQUETAS DE ARCILLA
FABRICADAS CON DIFERENTES GRANULOMETRIAS DEL GRANULADO.
COMPACTACION POR PRENSADO UNIAXIAL.

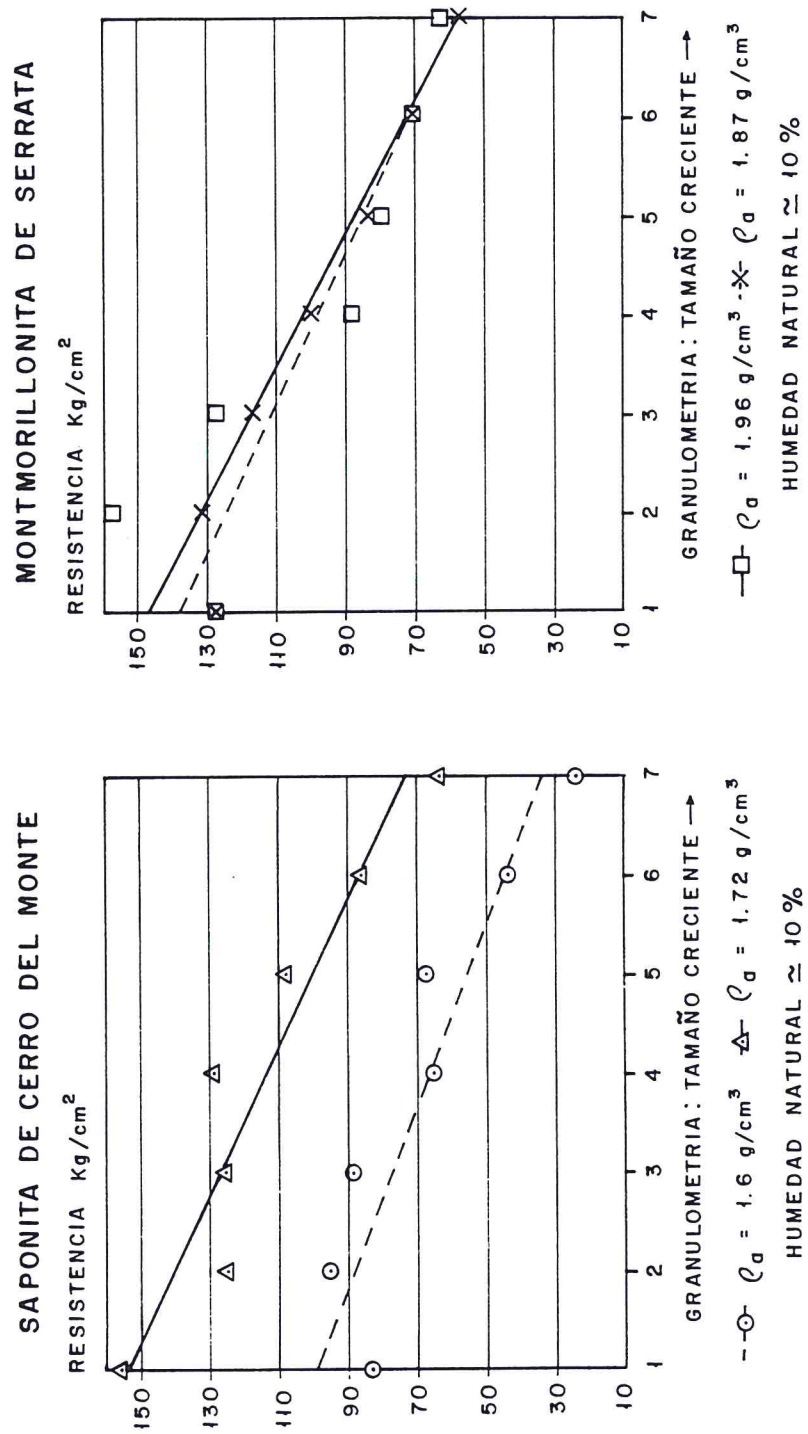


FIG. 29. RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE DE BRIQUETAS DE ARCILLA/CUARZO.
COMPACTACION POR PRENSADO UNIAXIAL.

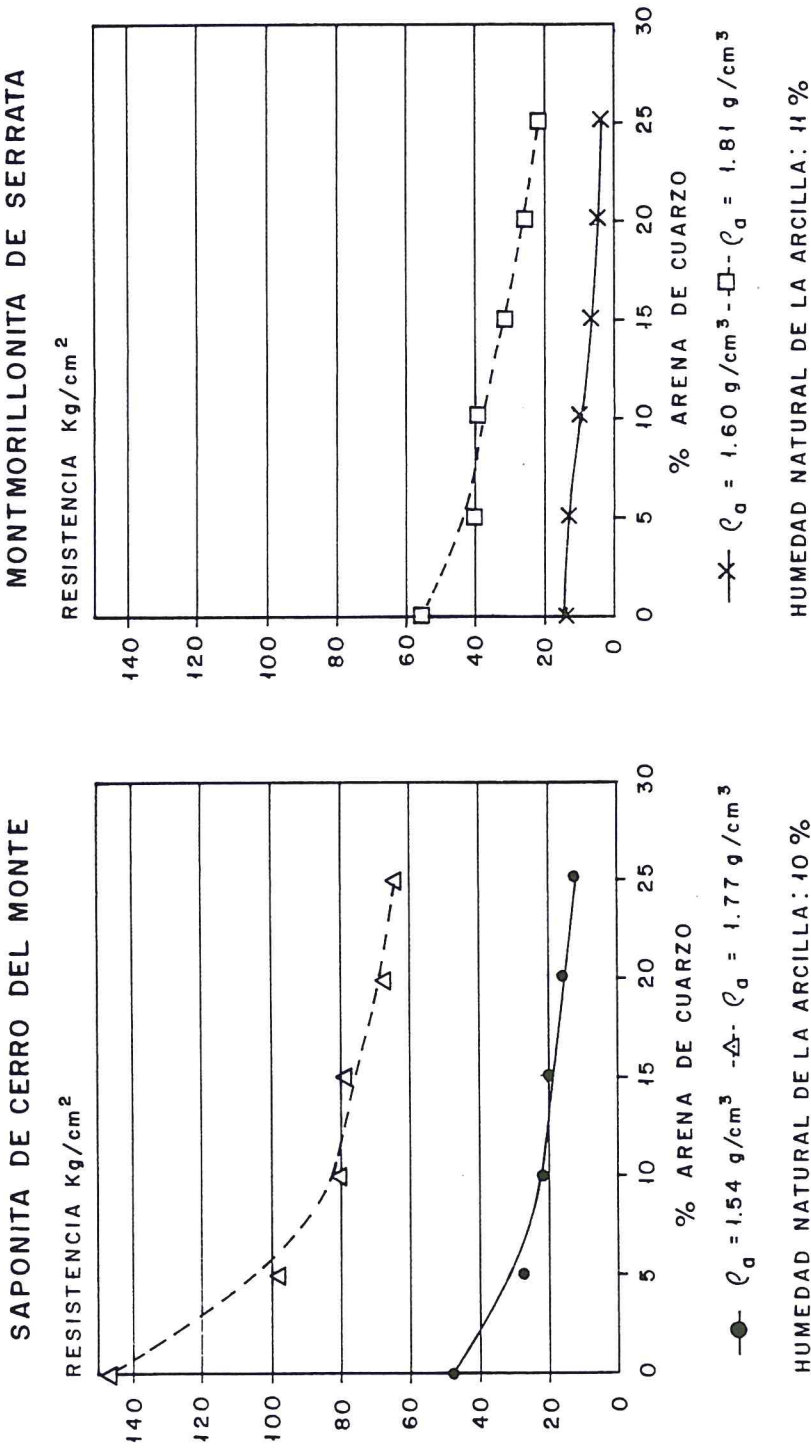


FIG.- 30. RELACION ENTRE LA PRESION DE HINCHAMIENTO Y LA DENSIDAD SECA DE LA MONTMORILLONITA EN COMPACTADOS DE MONTMORILLONITA Y MEZCLAS DE MONTMORILLONITA - ARENA DE CUARZO.

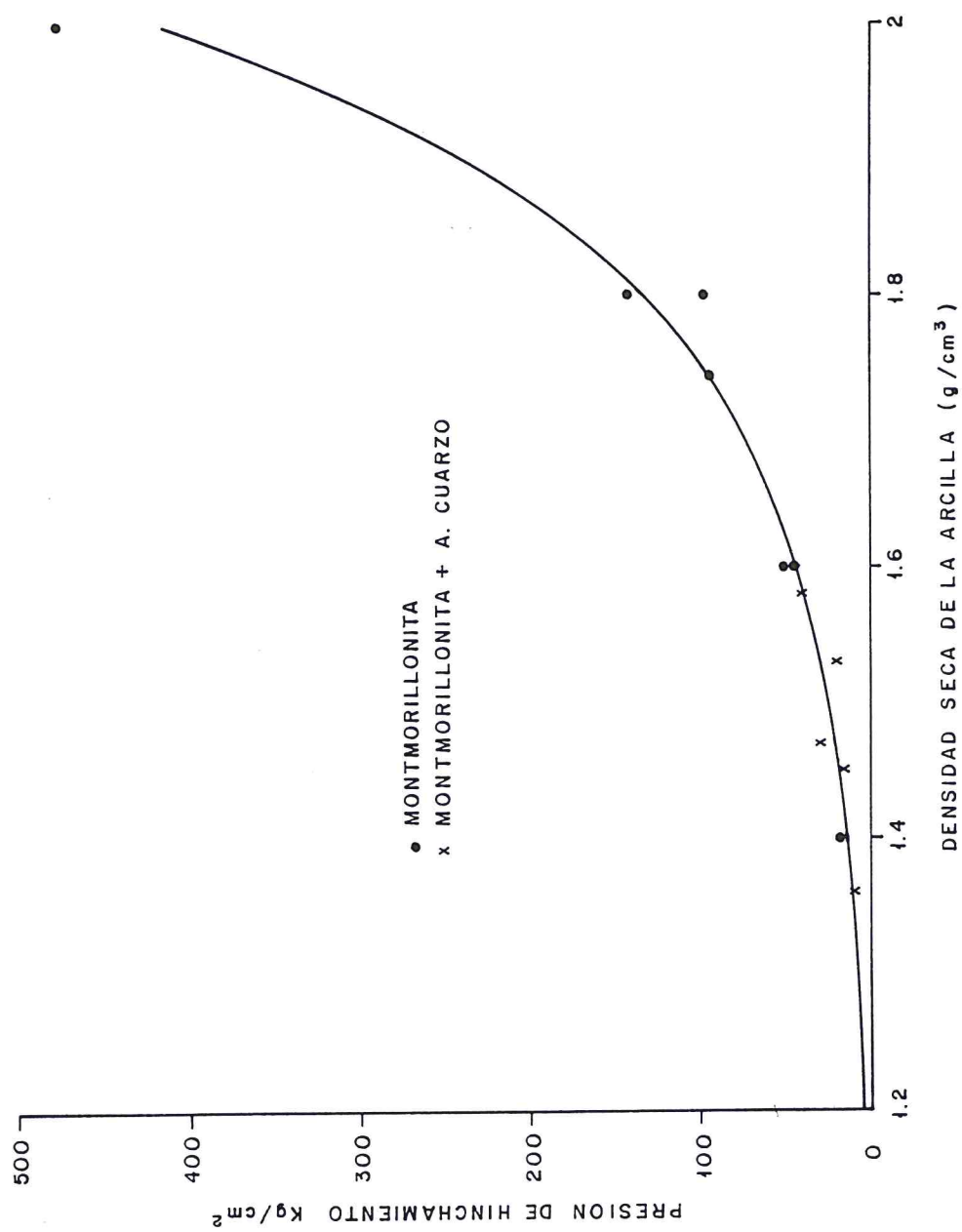


FIG.- 31. RELACION ENTRE LA PRESION DE HINCHAMIENTO Y LA DENSIDAD SECA DE LA SAPONITA EN COMPACTADO DE SAPONITA Y MEZCLAS DE SAPONITA -- ARENA DE CUARZO.

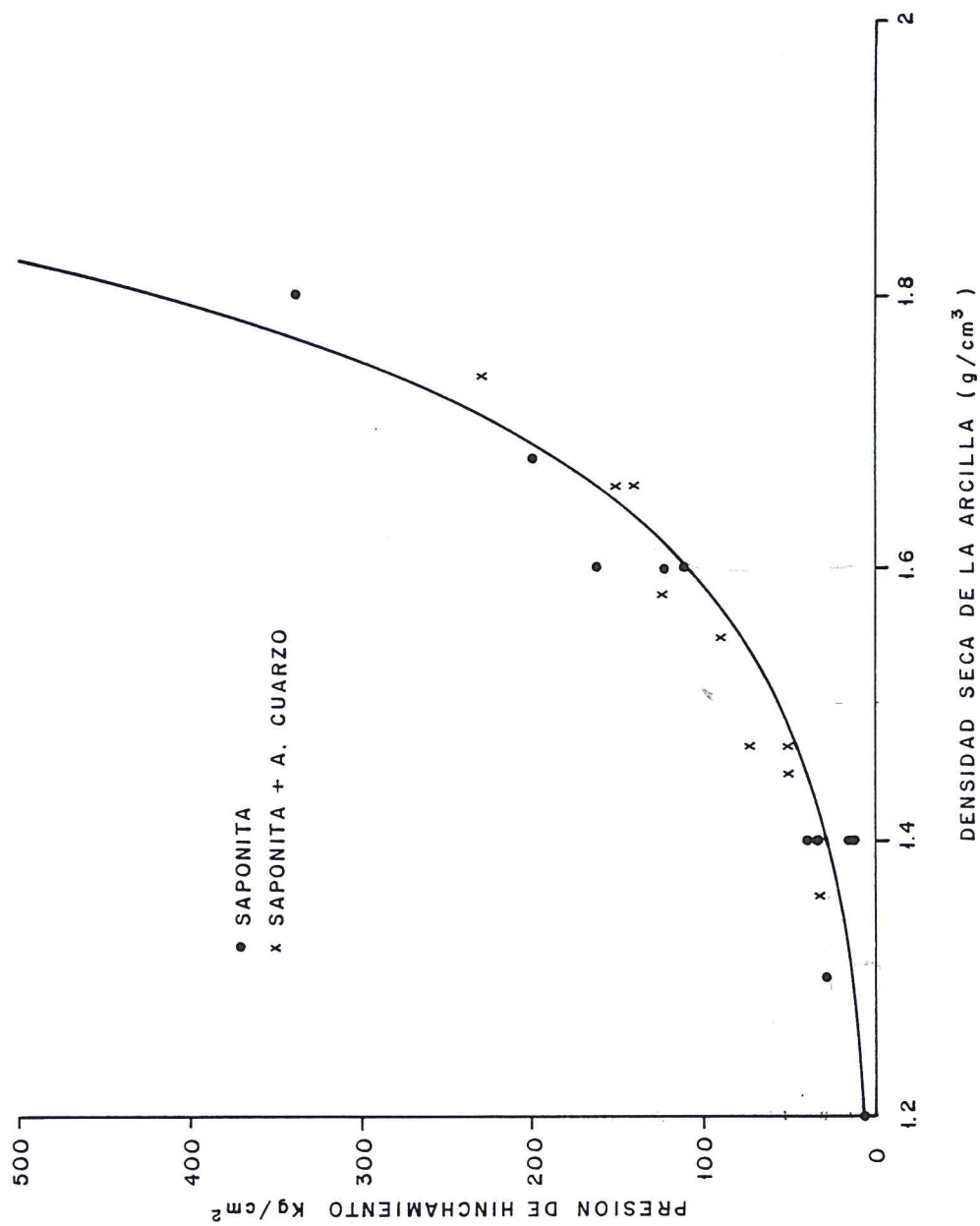


FIG.- 32. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DE LA MONTMORILLONITA Y DE LAS MEZCLAS MONTMORILLONITA / ARENA DE CUARZO EN FORMACION DE LA DENSIDAD DE LA ARCILLA SECA.

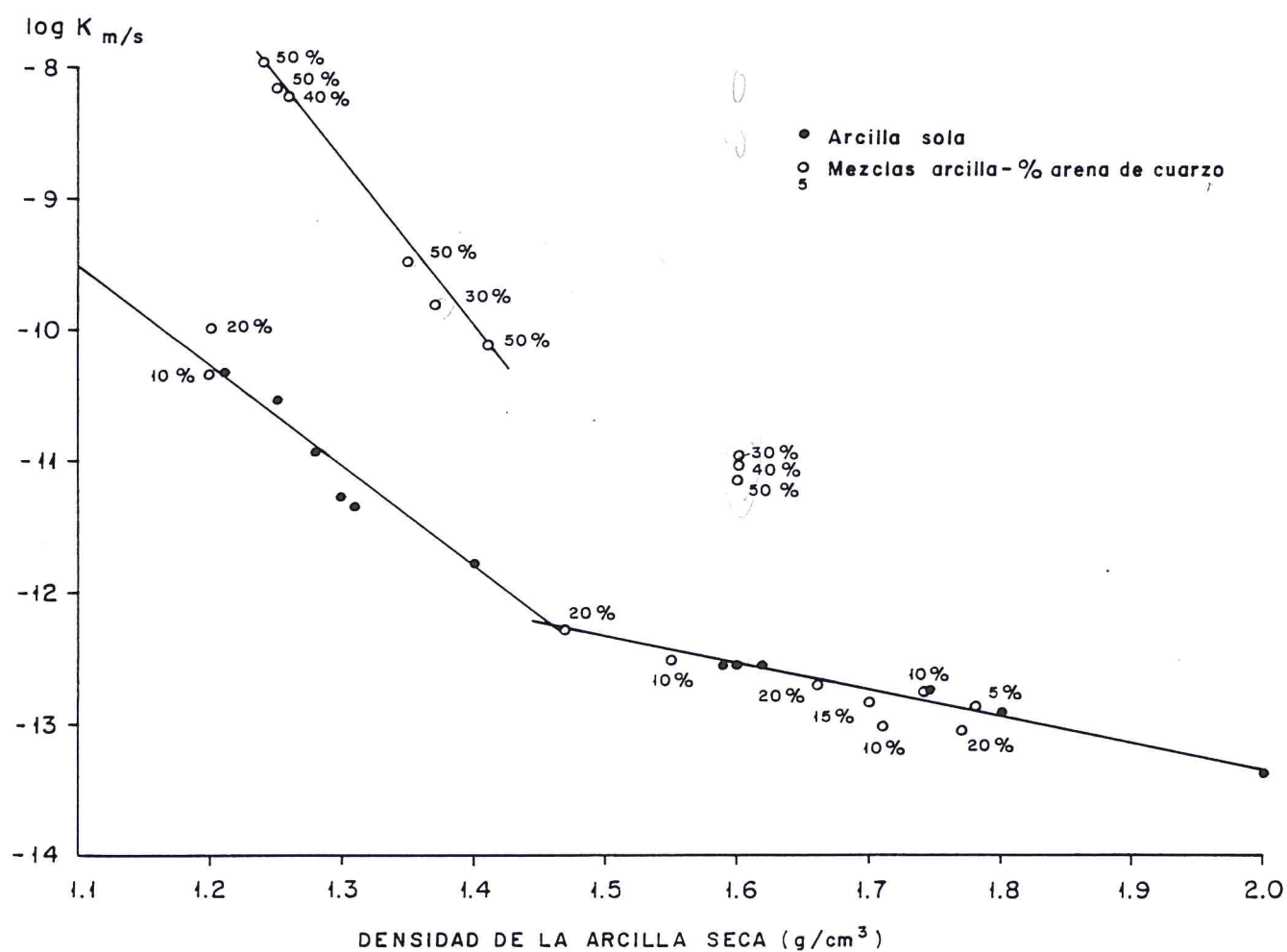


FIG.- 33. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DE LA SAPONITA Y DE LAS MEZCLAS SAPONITA/ ARENA DE CUARZO EN FUNCION DE LA DENSIDAD DE LA ARCILLA SECA.

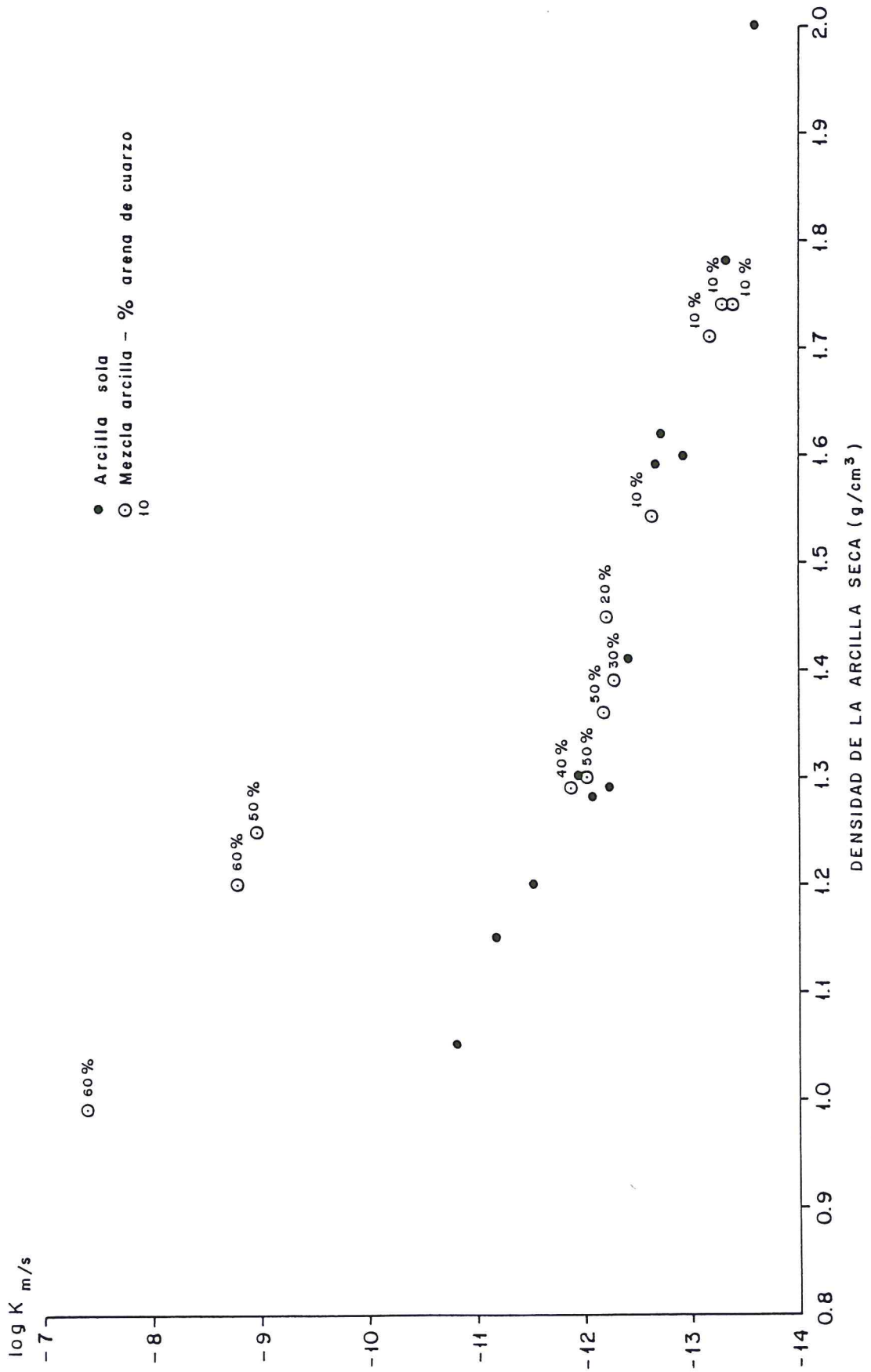


FIG. 34. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DE BRIQUETAS DE MONTMORILLONITA
($\rho_d = 1.593 \text{ g/cm}^3$) EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DEL ENSAYO.

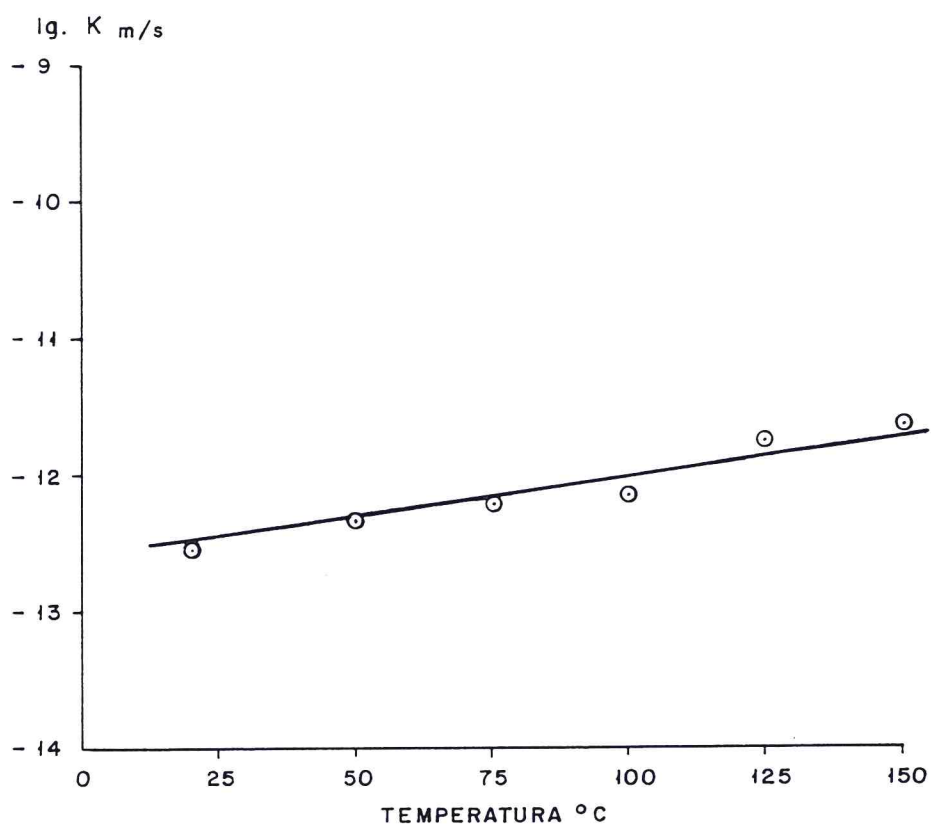


FIG. 35. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DE BRIQUETAS DE SAPONITA
($\rho_d = 1.588 \text{ g/cm}^3$) EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DEL ENSAYO.

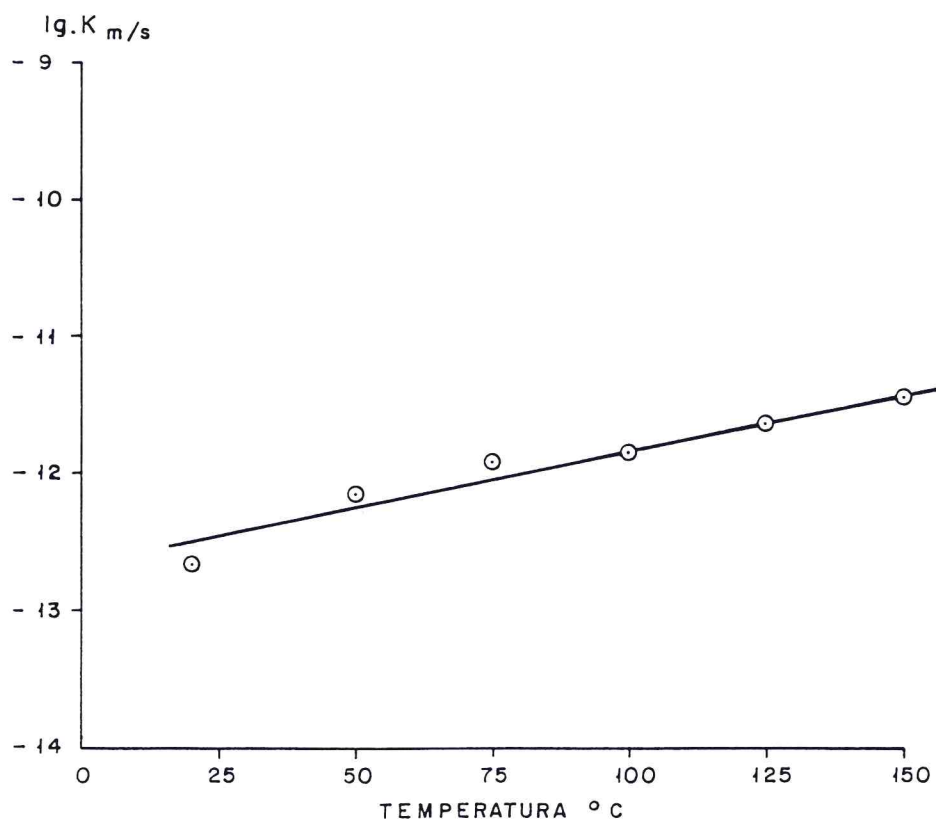


FIG. 36. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DE BRIQUETAS DE MONTMORILLONITA (ρ arc. 1.711 g/cm^3 CON UN 10% DE ARENA DE CUARZO) EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DEL ENSAYO.

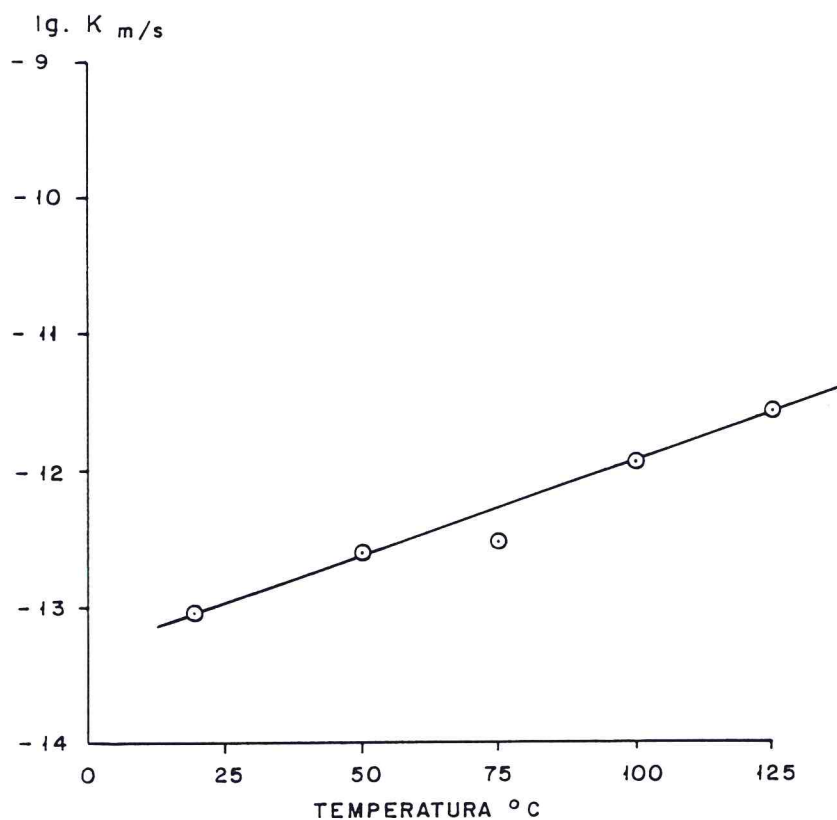


FIG. 37. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DE BRIQUETAS DE SAPONITA (ρ arc. 1.711 g/cm^3 CON UN 10% DE ARENA DE CUARZO) EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DEL ENSAYO.

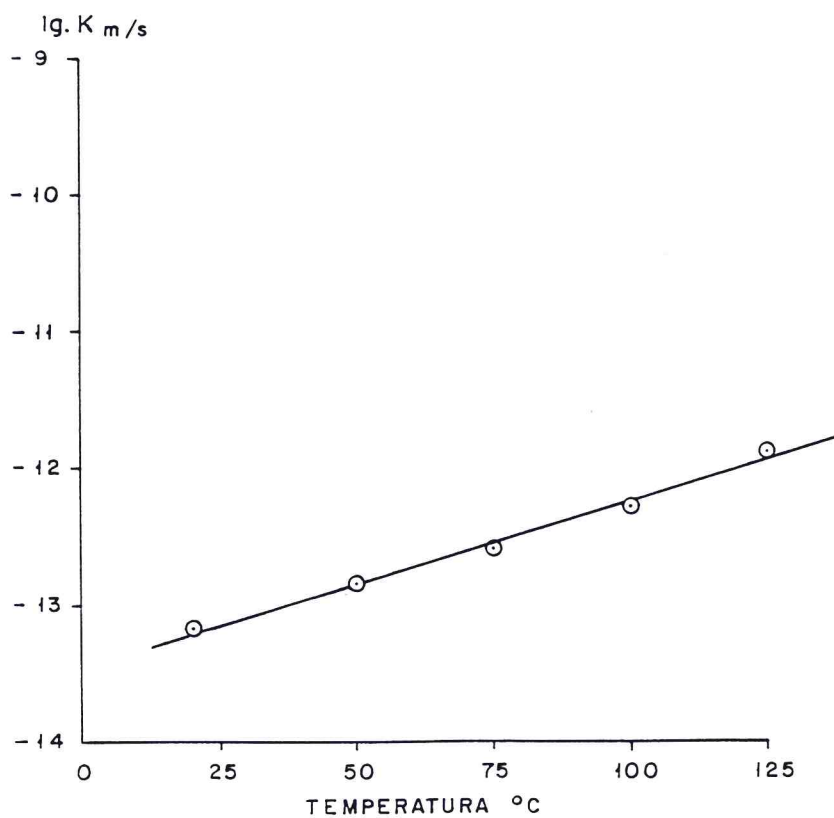


FIG.- 38. CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA MONTMORILLONITA EN FUNCION DE LA DENSIDAD Y HUMEDAD.

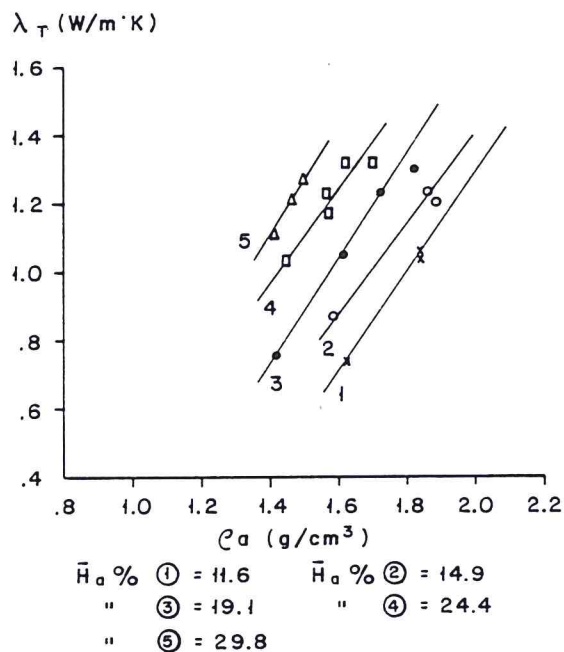


FIG.- 39. CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA MONTMORILLONITA EN FUNCION DE LA HUMEDAD. DENSIDAD CONSTANTE.

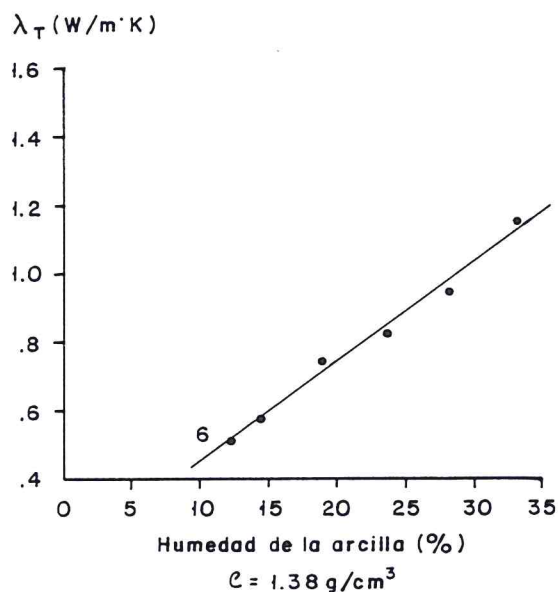


FIG.- 40. CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA MONTMORILLONITA EN FUNCION DEL CONTENIDO EN ARENA DE CUARZO. DENSIDAD Y HUMEDAD DE LA ARCILLA COSNTANTES.

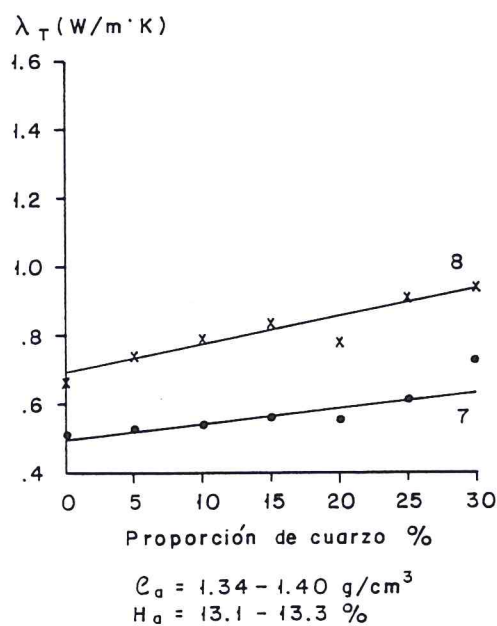


FIG.- 41. CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LAS MEZCLAS MONTMORILLONITA. ARENA DE CUARZO EN FUNCION DE LA DENSIDAD DE LA ARCILLA.

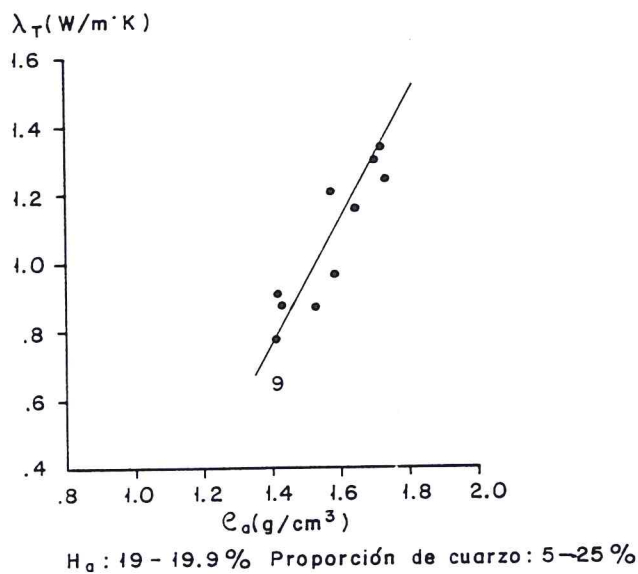


FIG.- 42. CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LAS MEZCLAS MONTMORILLONITA. ARENA DE CUARZO EN FUNCION DE LA HUMEDAD DE LA ARCILLA.

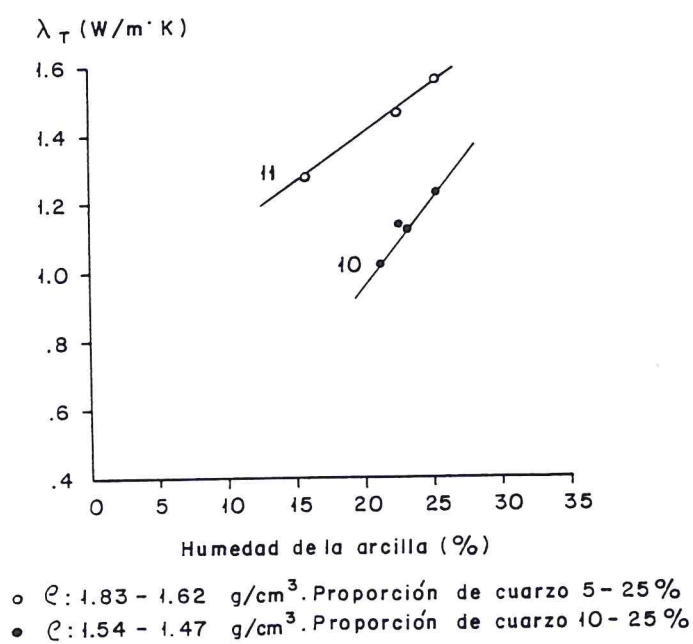


FIG.- 43. CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA SAPONITA EN FUNCION DE LA DENSIDAD Y HUMEDAD.

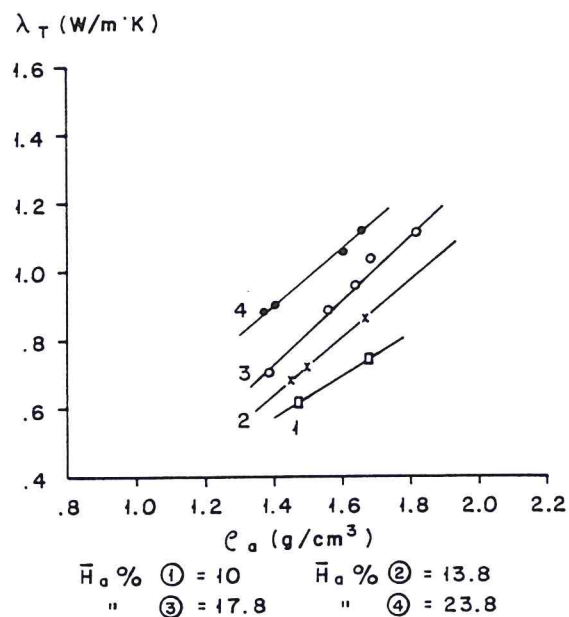


FIG.- 44. CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA SAPONITA EN FUNCION DE LA HUMEDAD. DENSIDAD CONSTANTE.

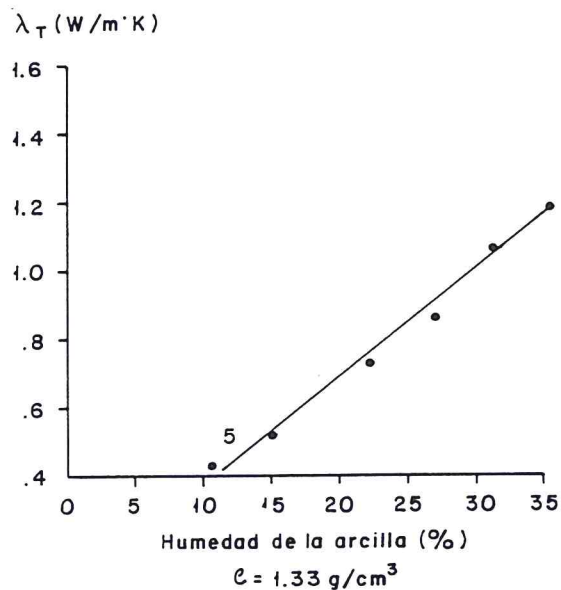


FIG.- 45. CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA SAPONITA EN FUNCION DEL CONTENIDO EN ARENA DE CUARZO. DENSIDAD Y HUMEDAD DE LA ARCILLA COSNTANTES.

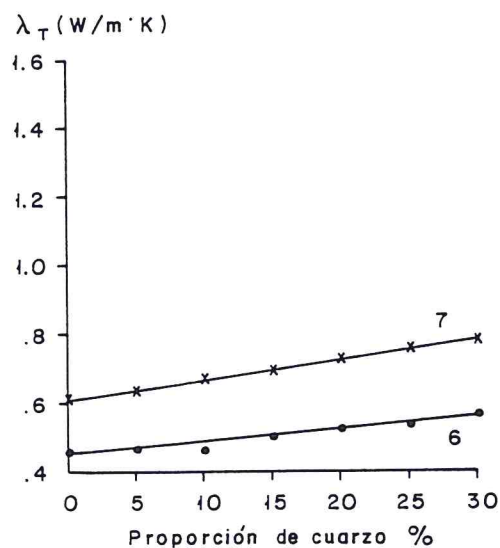


FIG.- 46. CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LAS
MEZCLAS SAPONITA . ARENA DE
CUARZO EN FUNCION DE LA
DENSIDAD DE LA ARCILLA.

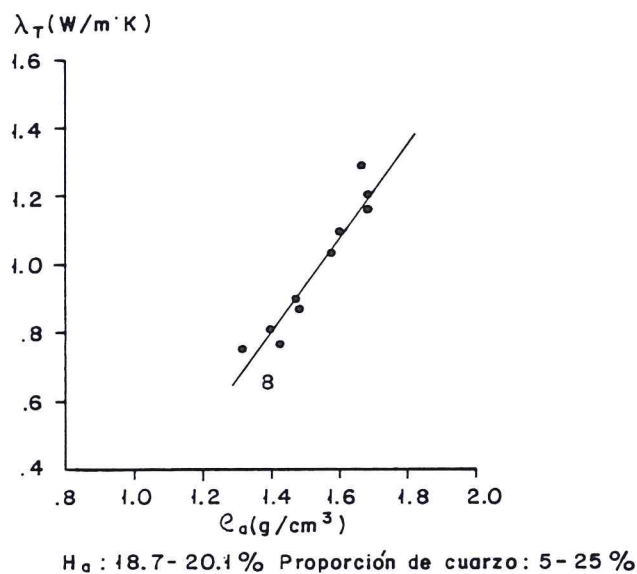


FIG.- 47. CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LAS
MEZCLAS SAPONITA . ARENA DE
CUARZO EN FUNCION DE LA HUMEDAD
DE LA ARCILLA.

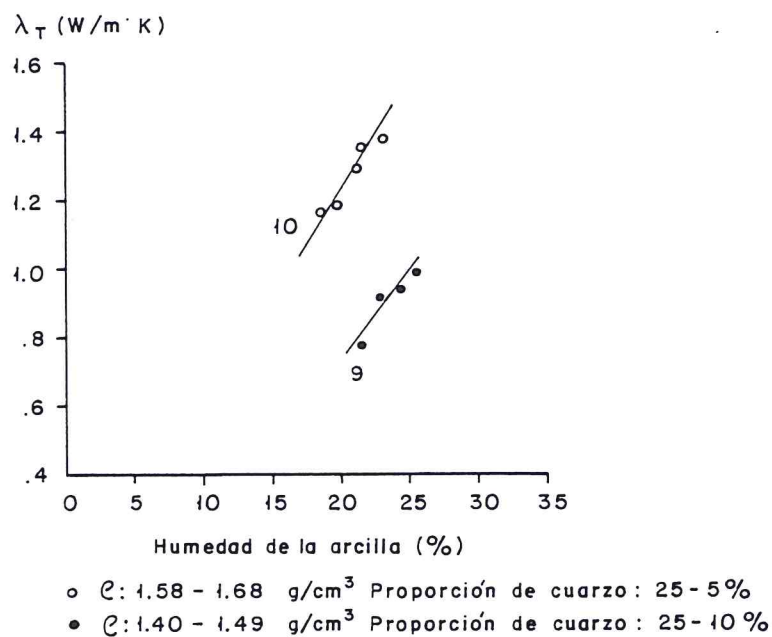


FIG.- 48. CONDICIONES AMBIENTALES DEL LABORATORIO DURANTE EL PERIODO DE REHIDRATACION DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A TRATAMIENTO TERMICO.

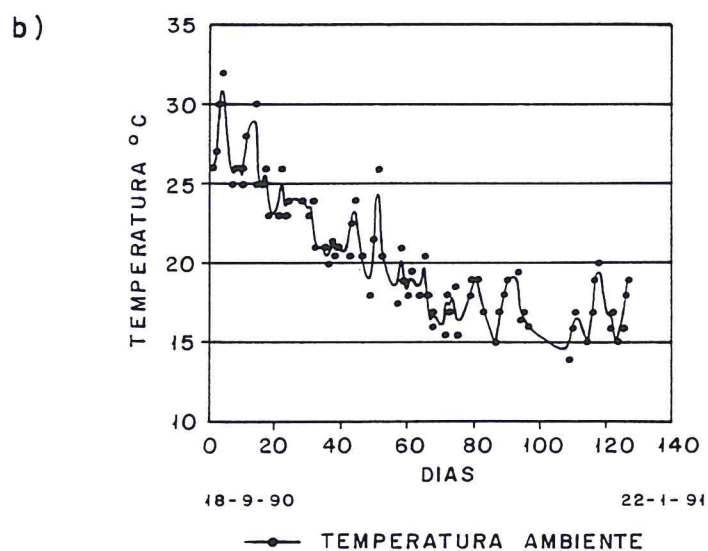
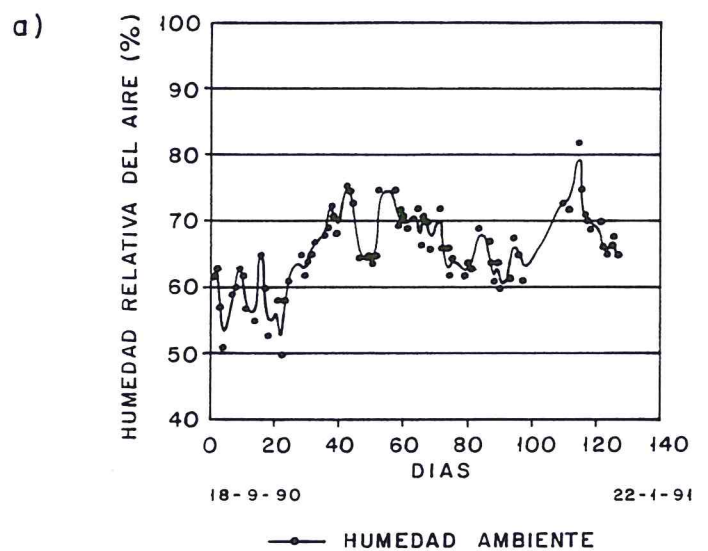


FIG.-49. GRAFICOS DE REHIDRATACION DE ARCILLA TRATADAS A DISTINTAS TEMPERATURAS.

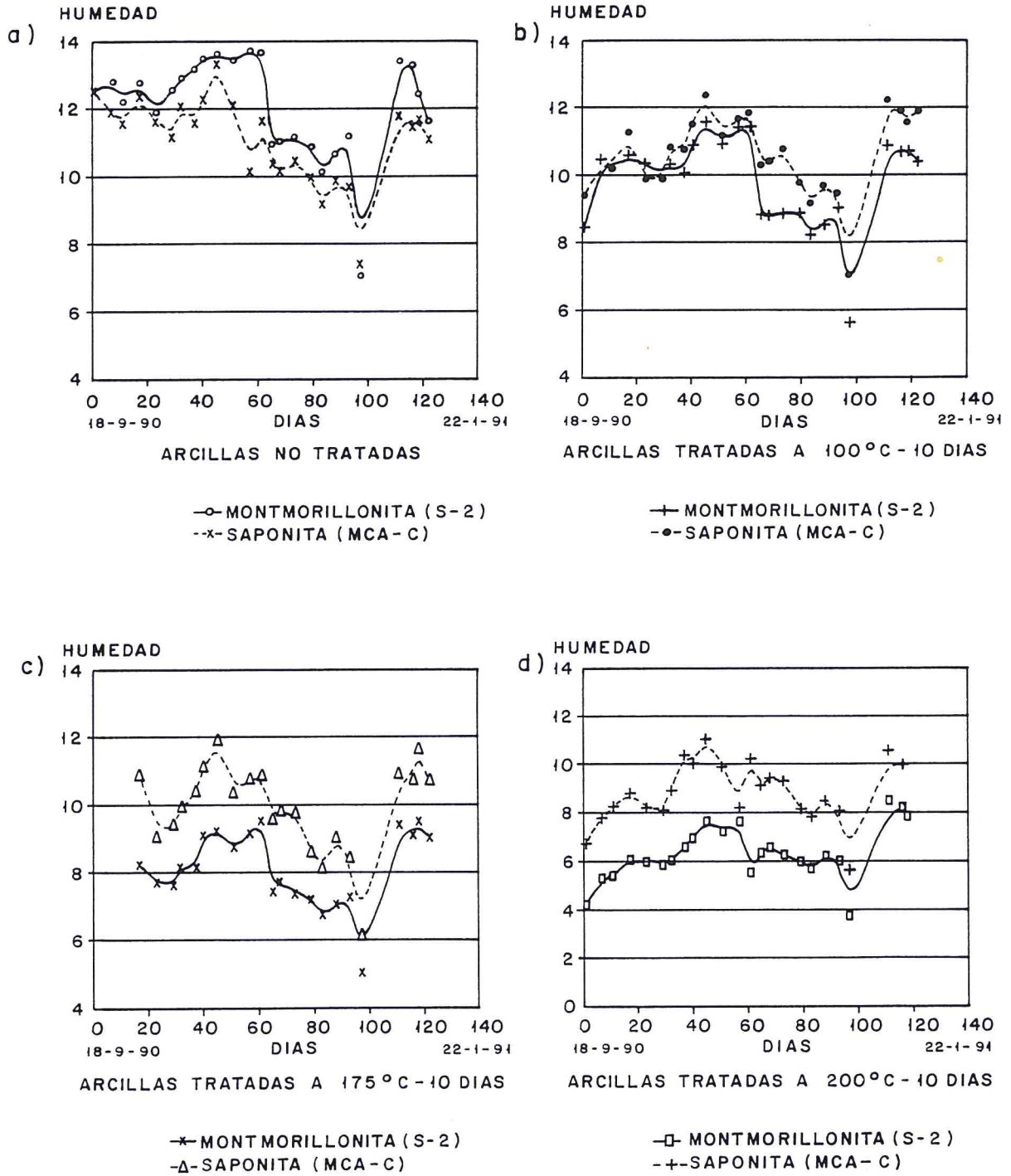
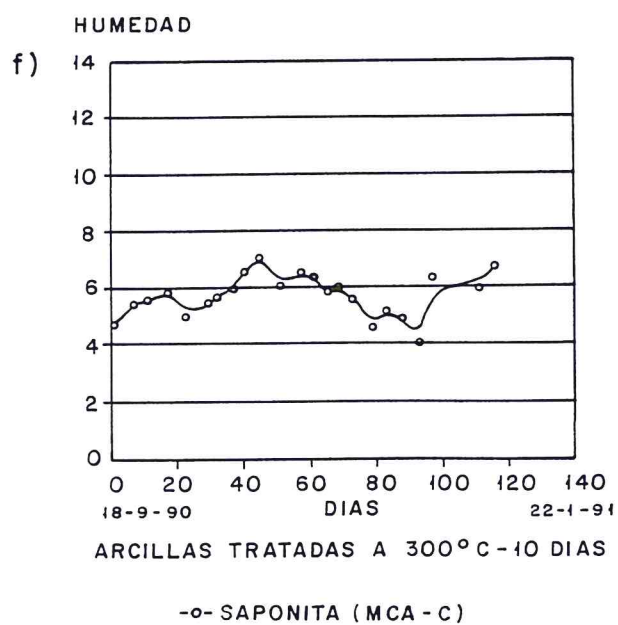
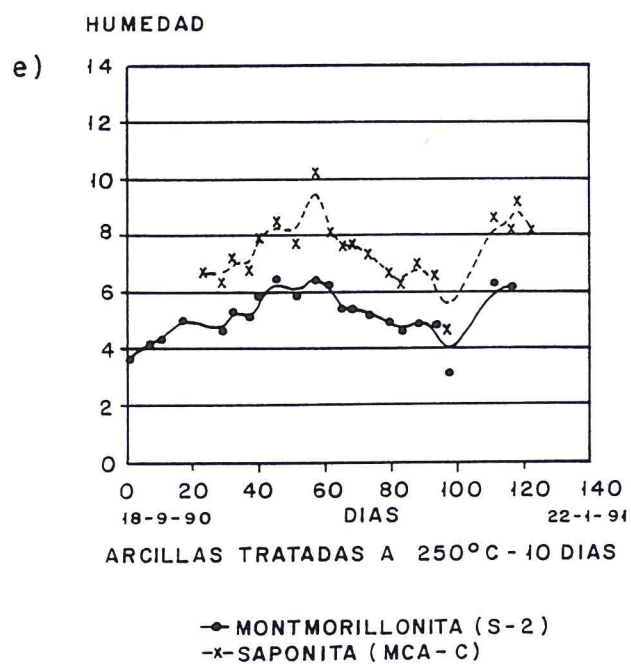


FIG.- 49. GRAFICOS DE REHIDRATACION DE ARCILLA TRATADAS A DISTINTAS TEMPERATURAS.



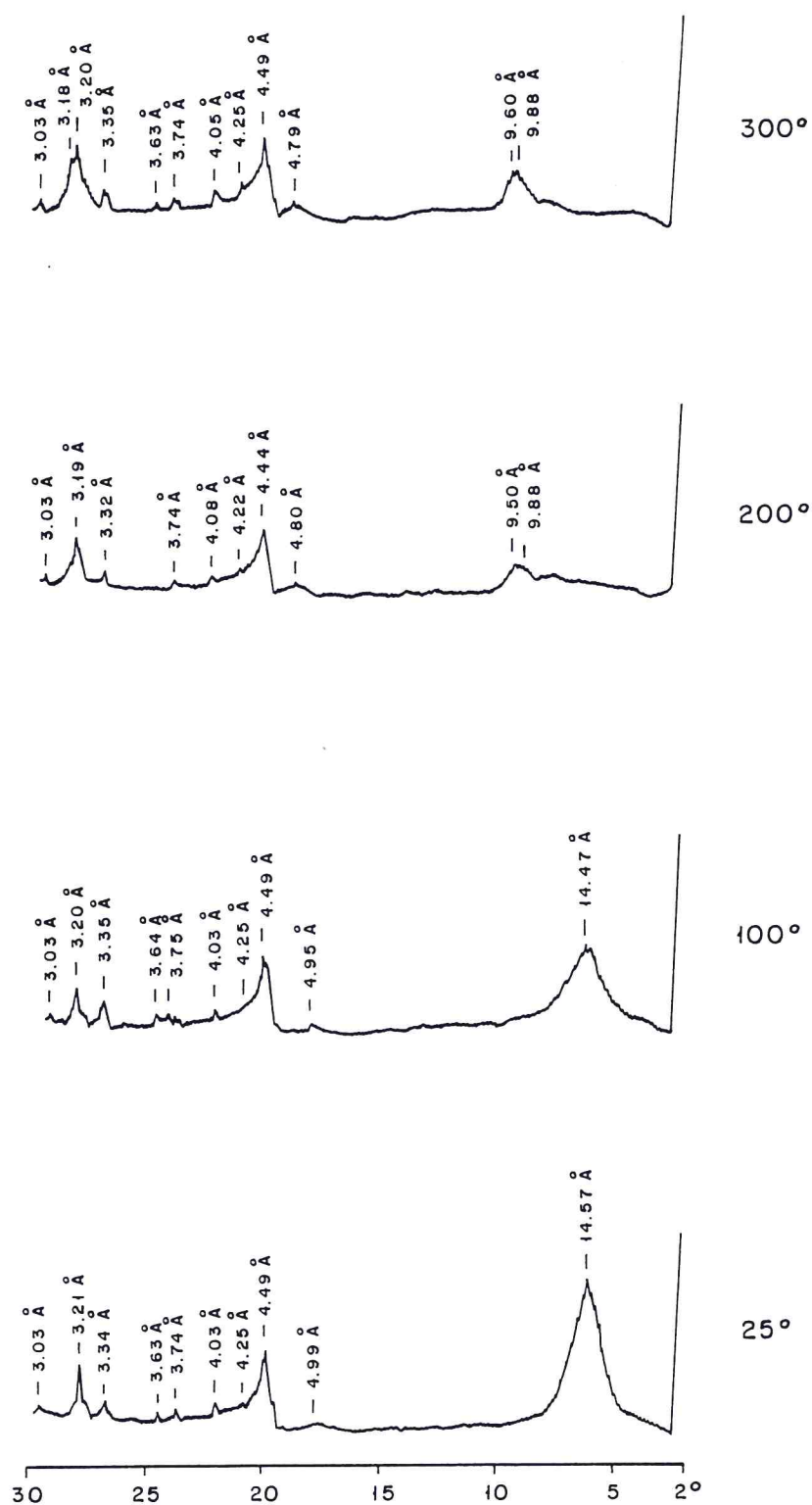


FIG.- 50. DIAGRAMAS DE DIFRACCION DE R.X. ($\text{Cu K}\alpha$)
 SOBRE MUESTRA TOTAL DE LA MONTMORILLONITA
 TRATADA A DISTINTAS TEMPERATURAS.

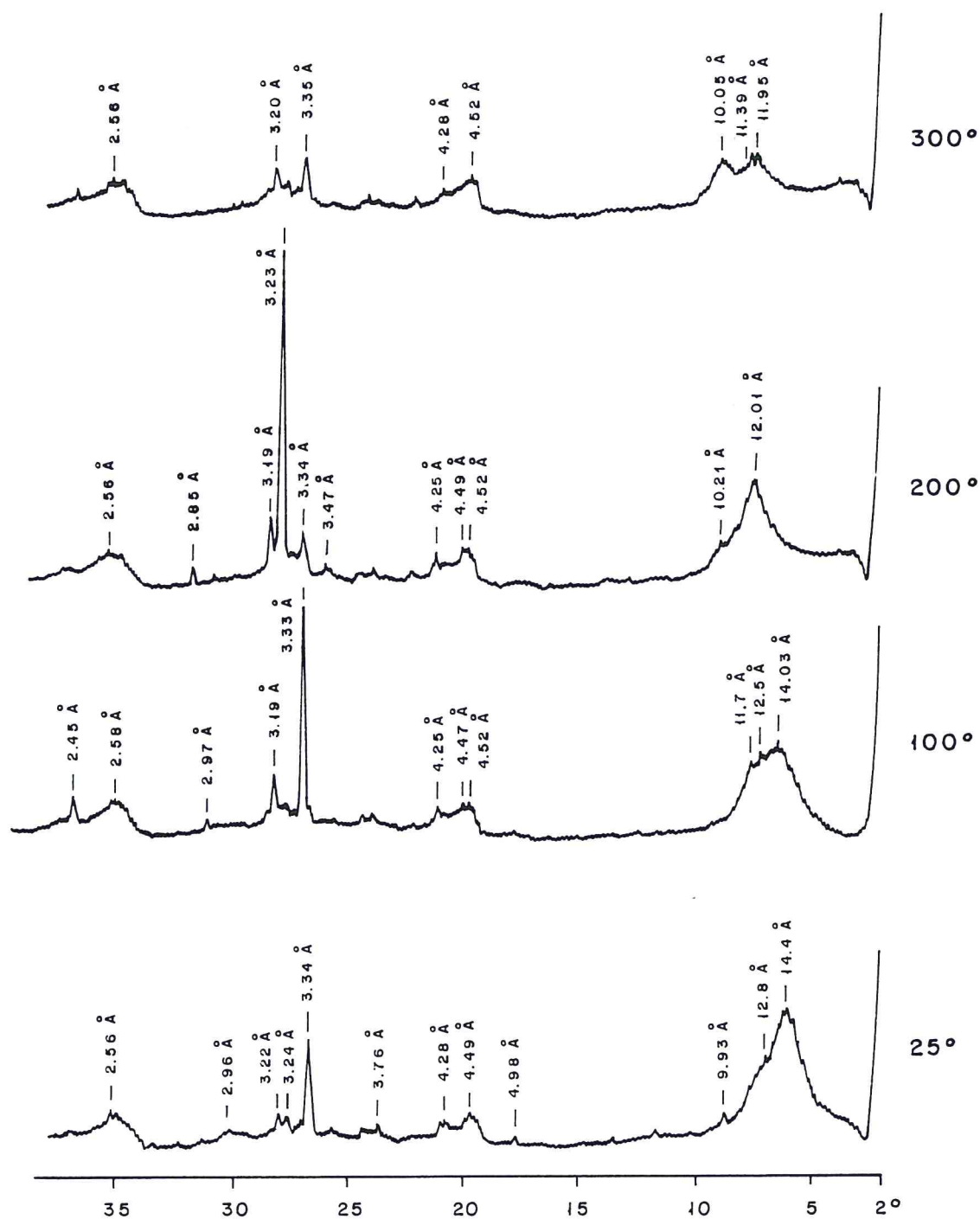


FIG.- 51. DIAGRAMAS DE DIFRACCION DE R.X. ($\text{Cu K}\alpha$) SOBRE MUESTRA TOTAL DE LA SAPONITA TRATADA A DISTINTAS TEMPERATURAS.

FIG.- 52. DIAGRAMA DE A.T.D. DE LA MONTMORILLONITA, TERMINOS EXTREMOS DEL TRATAMIENTO TERMICO.

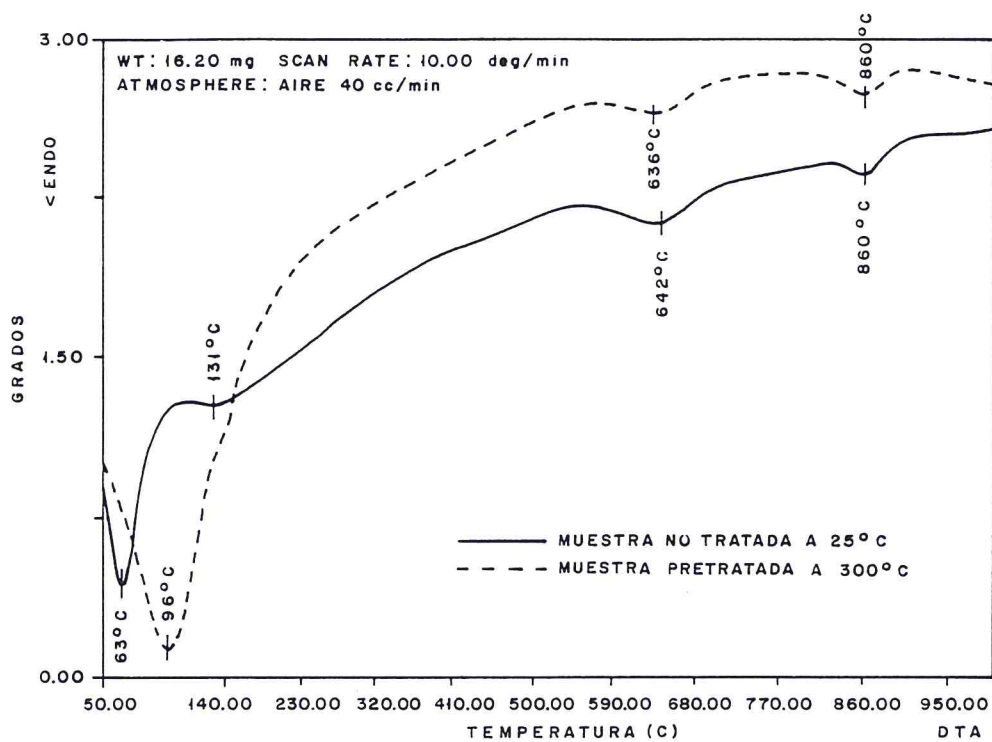


FIG.- 53. DIAGRAMA DE A.T.D. DE LA SAPONITA , TERMINOS EXTREMOS DE TRATAMIENTO TERMICO.

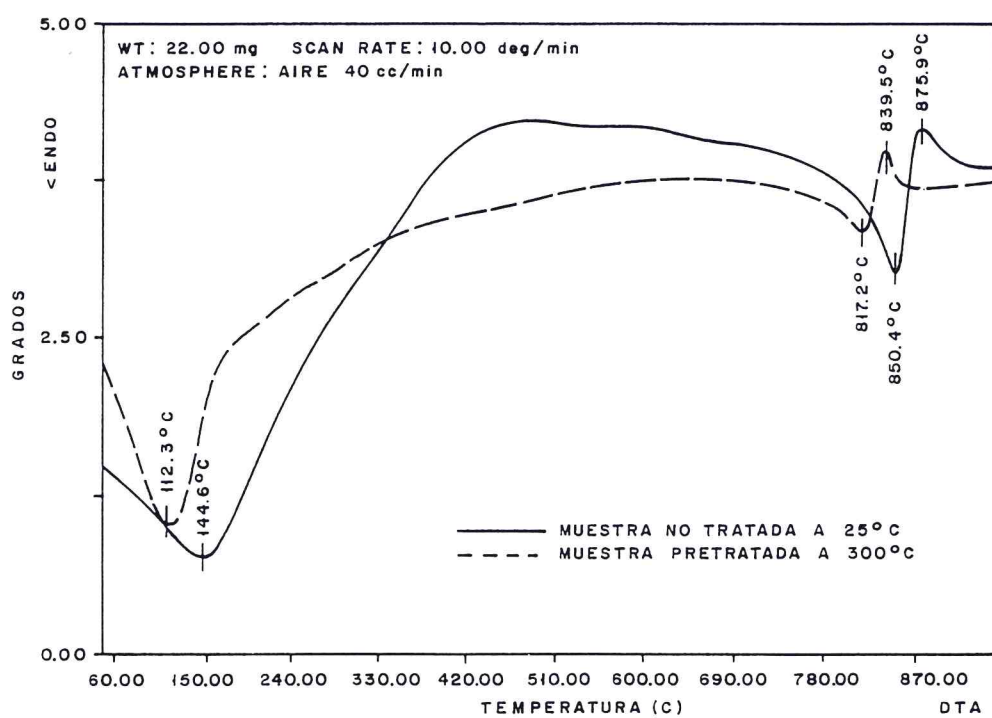


FIG.- 54. CURVAS TERMOGRAVIMETRICAS DE LA MONTMORILLONITA TRATADA A DISTINTAS TEMPERATURAS.

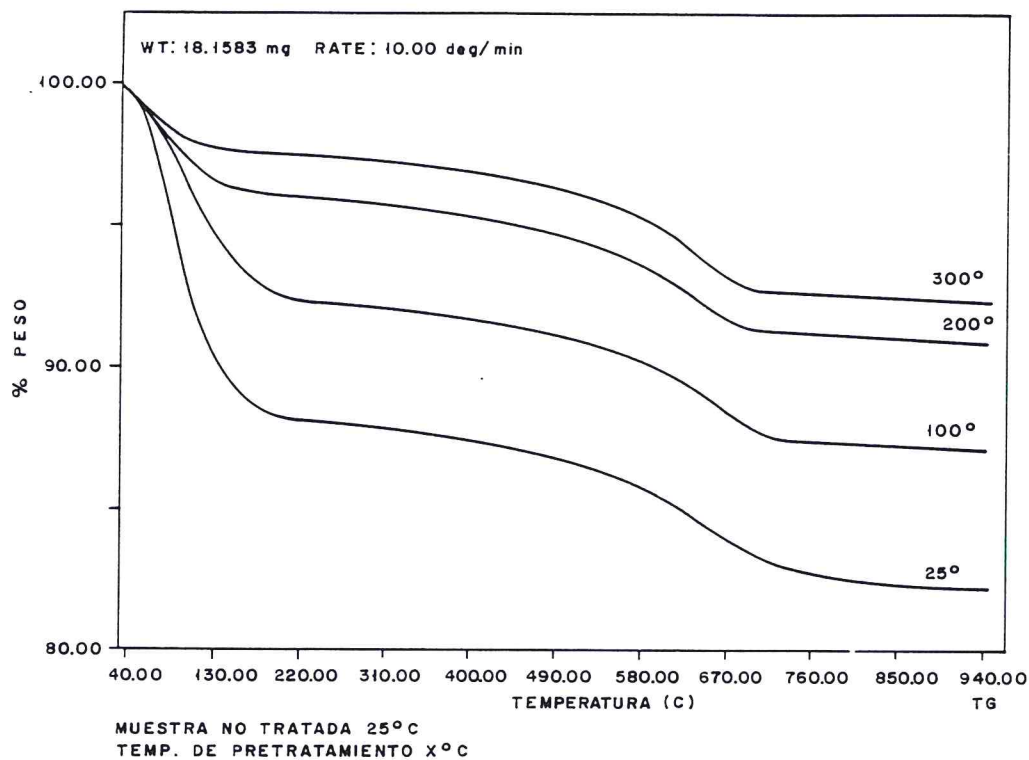
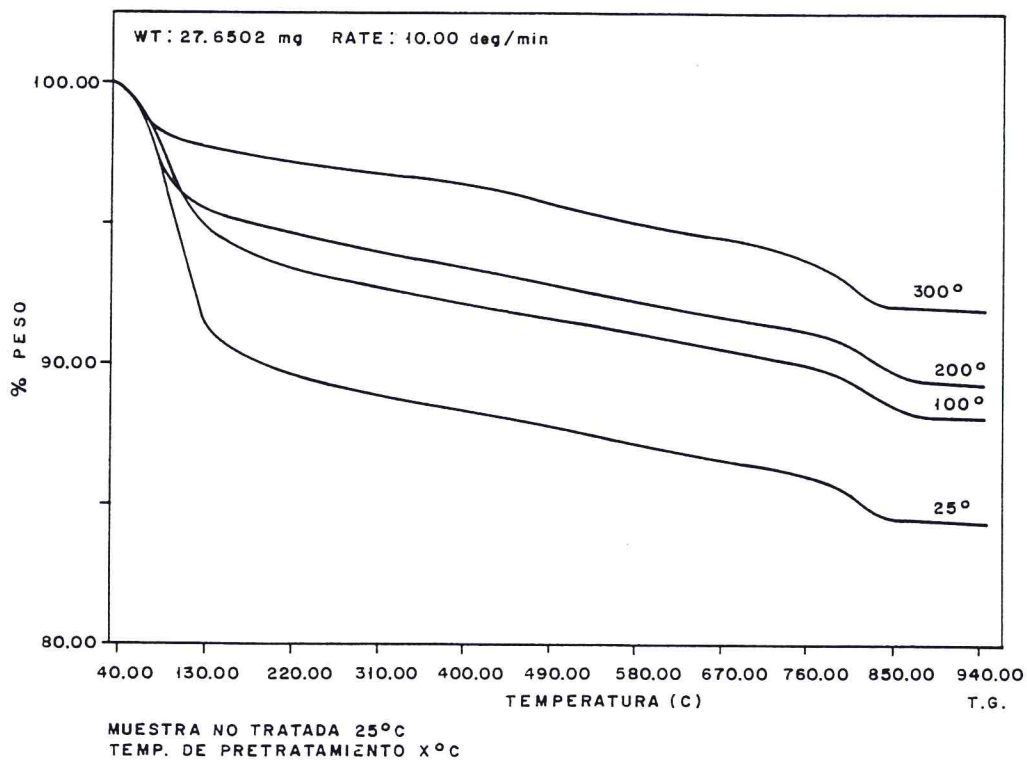
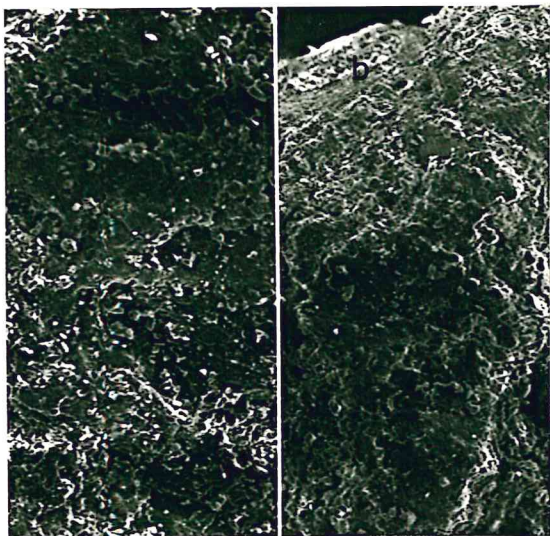
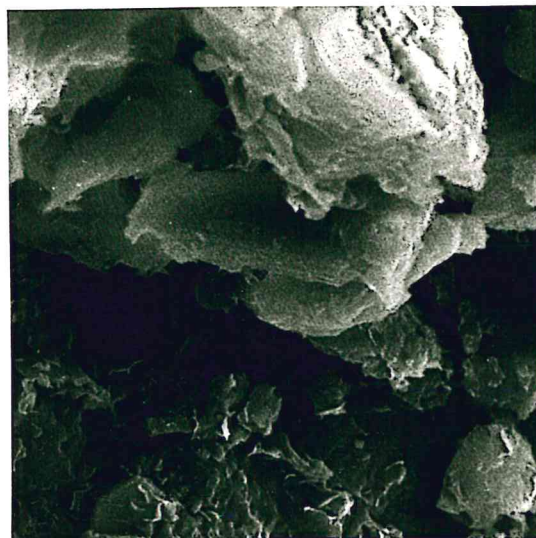


FIG.- 55. CURVAS TERMOGRAVIMETRICAS DE LA SAPONITA TRATADA A DISTINTAS TEMPERATURAS.

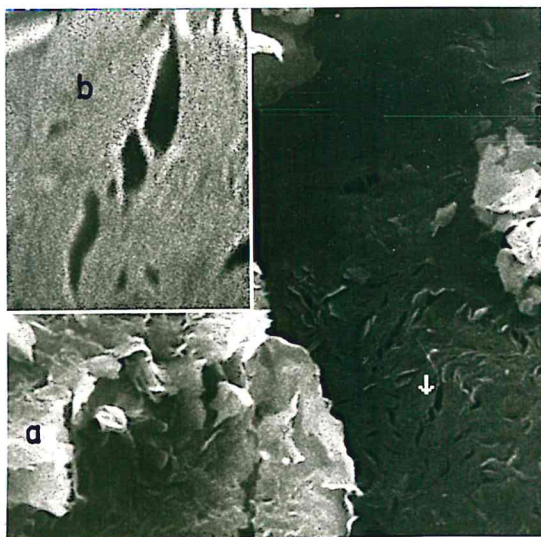




Fotomicrografía 1.x150. Imágenes de electrones secundarios. Aspecto general de los gránulos de montmorillonita tratada a 300°C (a) y no tratada (b)

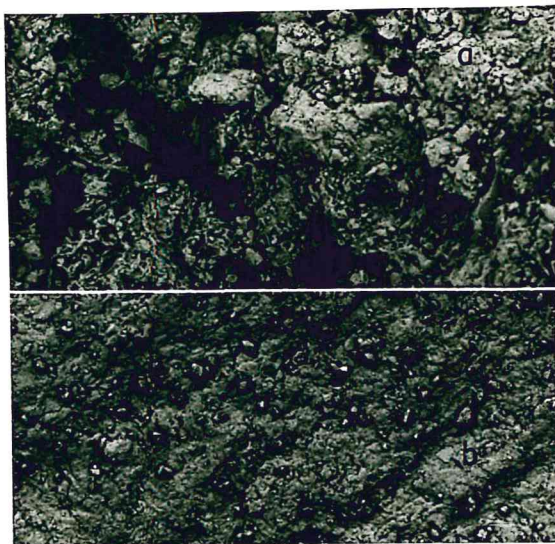


Fotomicrografía 2.x5000. Imagen de electrones secundarios. Aspecto de las láminas de montmorillonita sin tratamiento térmico.

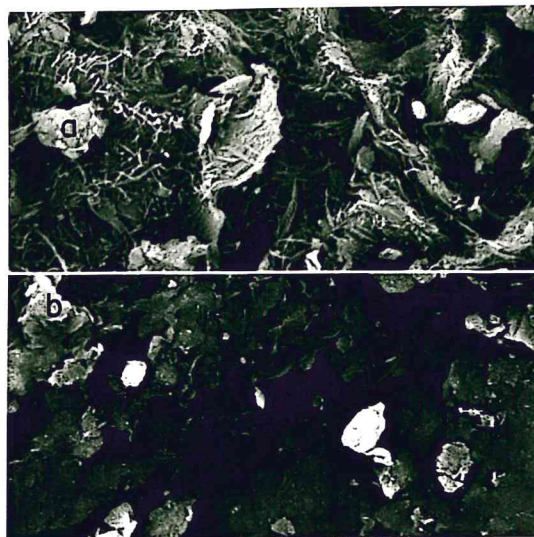


Fotomicrografía 3. Imágenes de electrones secundarios. a) Aspecto de las láminas de montmorillonita (x5000) tratada a 300°C. b) Detalle de los desgarres producidos por efecto térmico (x20000)

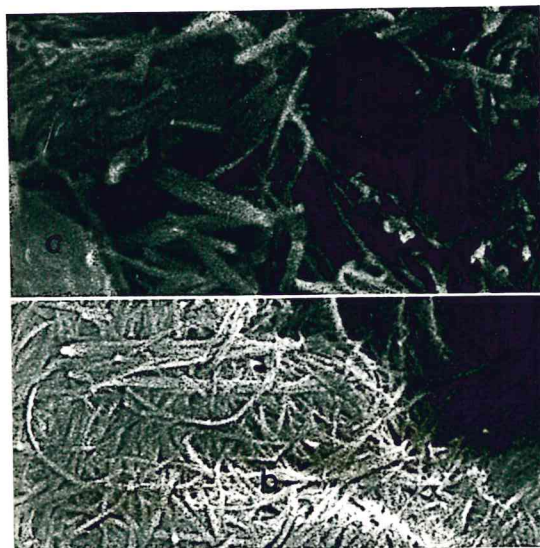
FIG.56. ASPECTOS MICROTURALES DE LA MONTMORILLONITA (S-2) Y MODIFICACIONES INDUCIDAS POR TRATAMIENTO TERMICO



Fotomicrografía 4x200. Imágenes de electrones retrodispersados. Aspecto general de la arcilla saponítica sin tratamiento térmico (a) y tratada a 300°C (b)



Fotomicrografía 5x2000. Imágenes de electrones retrodispersados. Aspecto fibroso-laminar de la arcilla saponítica sin tratamiento térmico (a) y sometida a 300°C (b)



Fotomicrografía 6x20000. Imágenes de electrones secundarios. La microtextura fibroso-laminar se resuelve, a grandes aumentos, en una textura marcadamente fibrosa en la arcilla sin tratamiento térmico (a). El tratamiento a 300°C induce la condensación textural y reducción de las dimensiones de las fibras (b)

FIG.57. ASPECTOS MICROTURALES DE LA SAPONITA (MCA-C) Y MODIFICACIONES INDUCIDAS POR TRATAMIENTO TERMICO

FIG.- 58. LIMITES LIQUIDO Y PLASTICO DE LA MONTMORILLONITA TRATADA TERMICAMENTE.

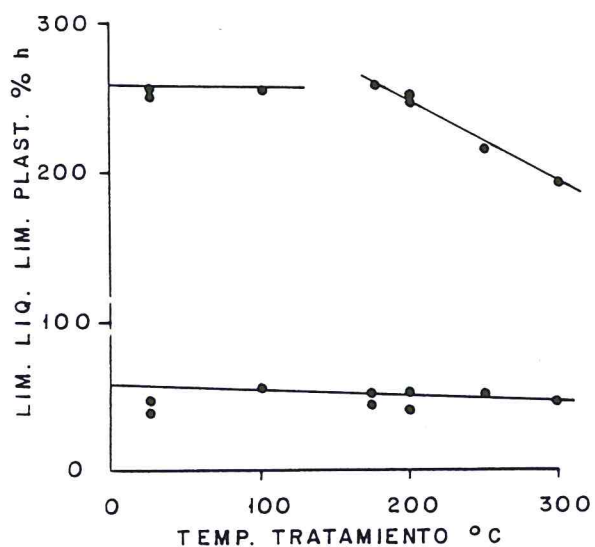


FIG.- 59. LIMITES LIQUIDO Y PLASTICO DE LA SAPONITA TRATADA TERMICAMENTE.

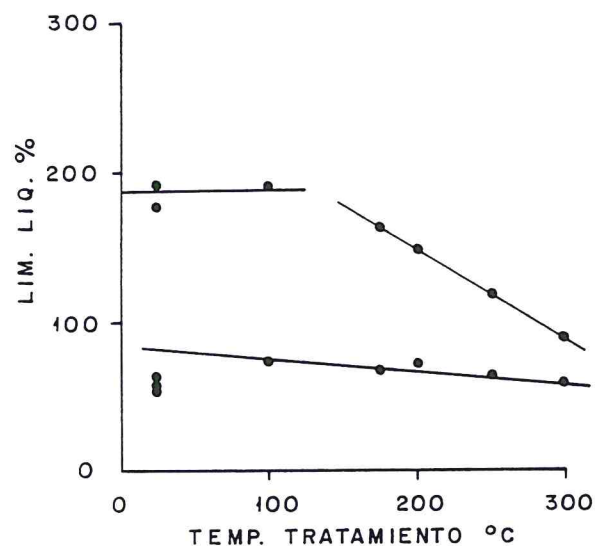
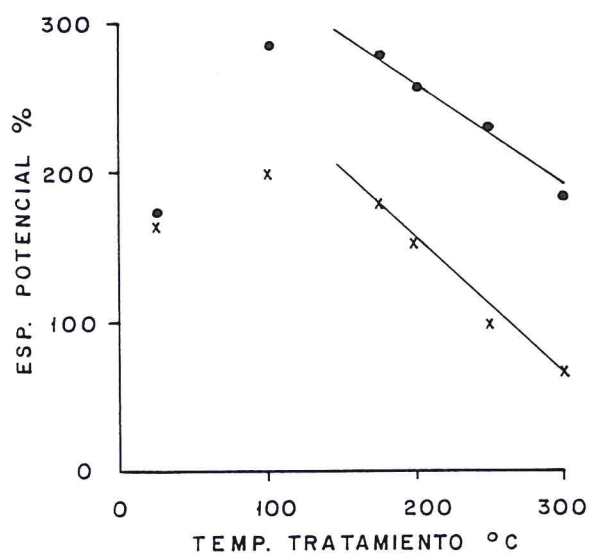


FIG.- 60. EXPANSION POTENCIAL DE LAS ARCILLAS TRATADAS TERMICAMENTE.



● Montmorillonita
x Saponita

FIG.- 61. PRESION DE HINCHAMIENTO DE LA MONTMORILLONITA TRATADA TERMICAMENTE.

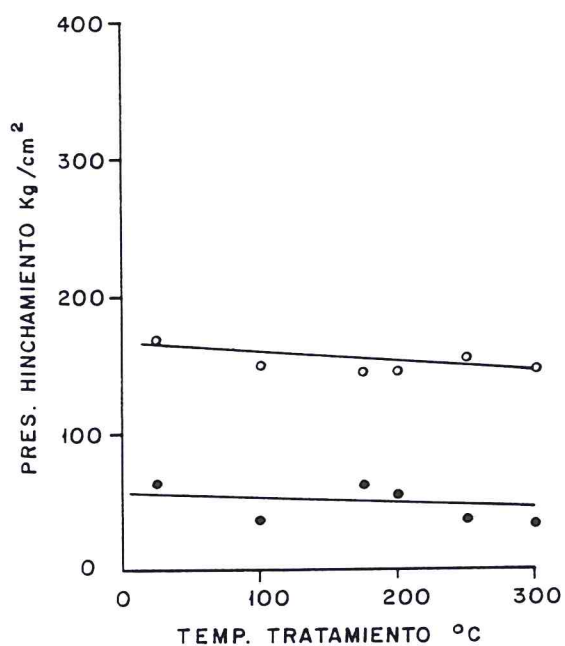


FIG.- 62. PRESION DE HINCHAMIENTO DE LA SAPONITA TRATADA TERMICAMENTE.

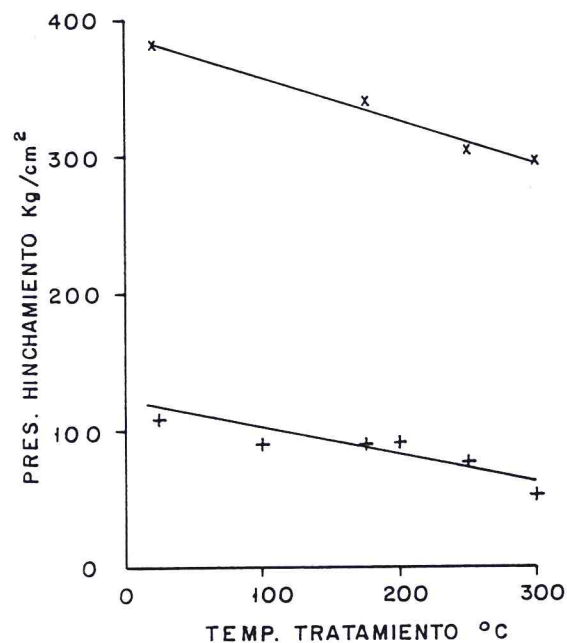
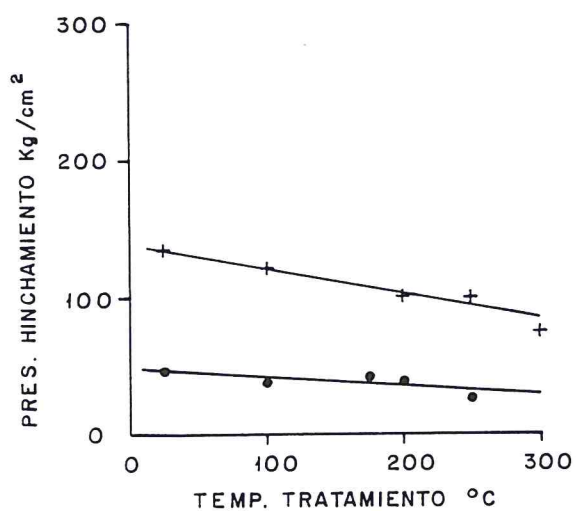


FIG.- 63. PRESION DE HINCHAMIENTO DE LAS ARCILLAS TRATADAS TERMICAMENTE Y REHIDRATADAS DURANTE 121 DIAS EN LAS CONDICIONES DEL LABORATORIO.



● Montmorillonita. Densidad seca 1,6 g/cm³
 ○ " " " " 1,8 g/cm³
 + Saponita. Densidad seca 1,6 g/cm³
 x " " " " 1,8 g/cm³

Fig.- 64. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA
DE LA MONTMORILLONITA
TRATADA TERMICAMENTE.

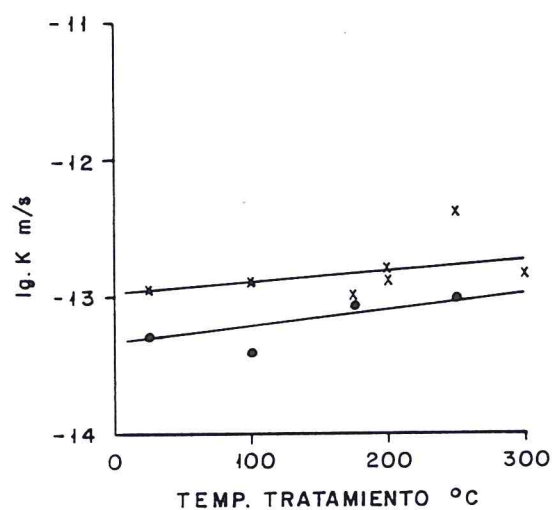
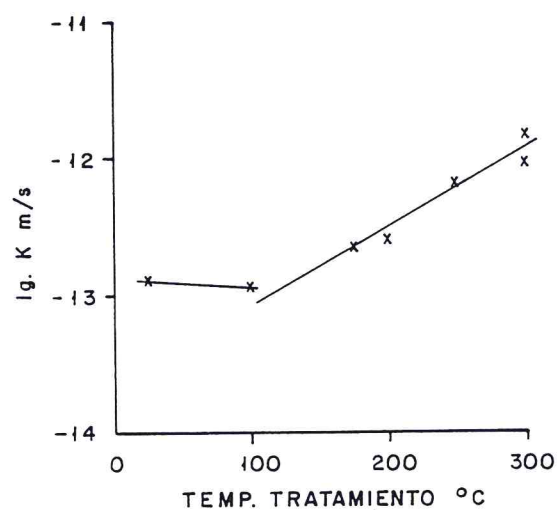


FIG.- 65. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA
DE LA SAPONITA TRATADA
TERMICAMENTE.



x Densidad seca $1,6 \text{ g/cm}^3$
• " " $1,8 \text{ g/cm}^3$

FIG.- 66. RESISTENCIA A COMPRESION
SIMPLE DE LA MONTMORILLONITA
TRATADA TERMICAMENTE.

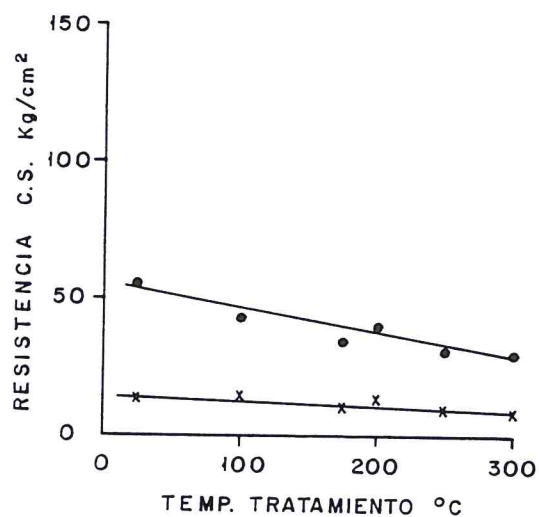
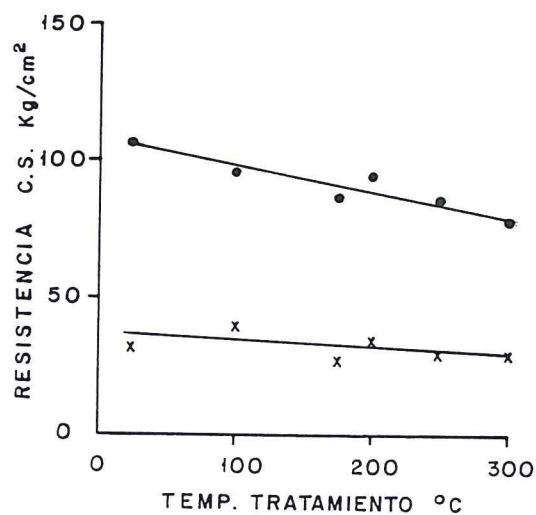


FIG.- 67. RESISTENCIA A COMPRESION
SIMPLE DE LA SAPONITA
TRATADA TERMICAMENTE.



x Densidad seca 1,6 g/cm³
 ● " " 1,8 g/cm³

FIG.- 68. MONTMORILLONITA

CURVA EDOMETRICA

Densidad seca inicial: 1.41 Humedad inicial: 8.3 Peso específico de las partículas: 2.68
 Índice de poros inicial: 0.563 Humedad final: 33.5 Diámetro muestra (cm): 2.03

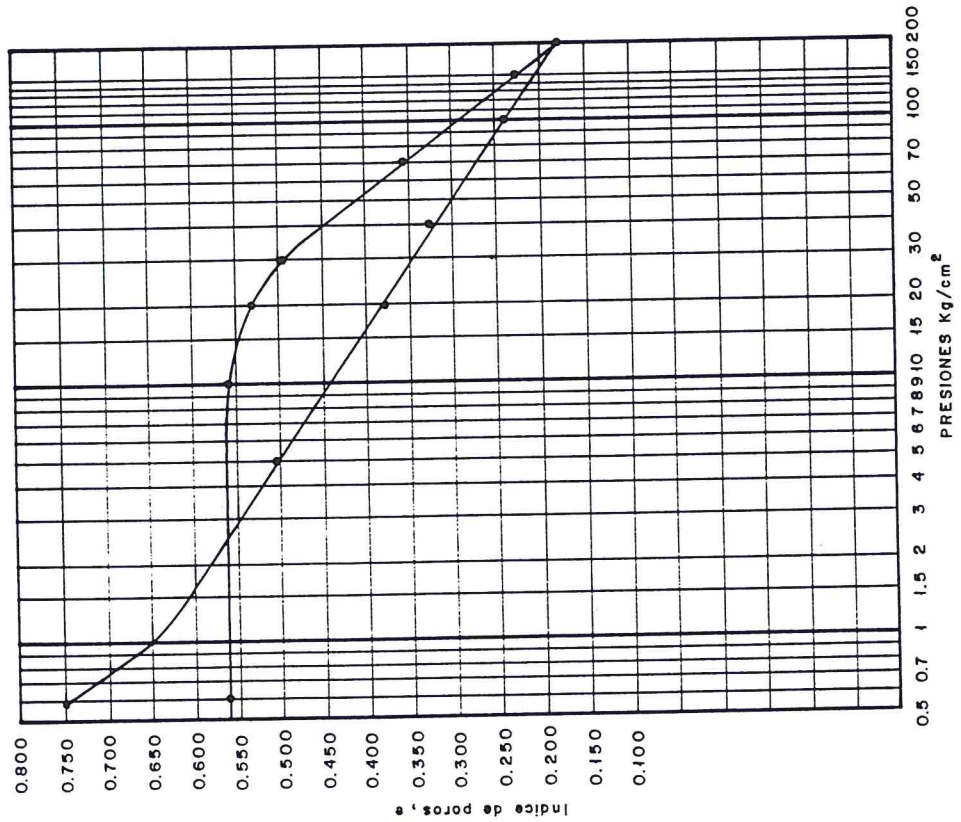


FIG.- 69. MONTMORILLONITA (1.41 g/cm³)

CURVAS DE CONSOLIDACION

Lectura inicial del cuadrante con carga nula: 50.0 Altura del edometro: 12 mm.

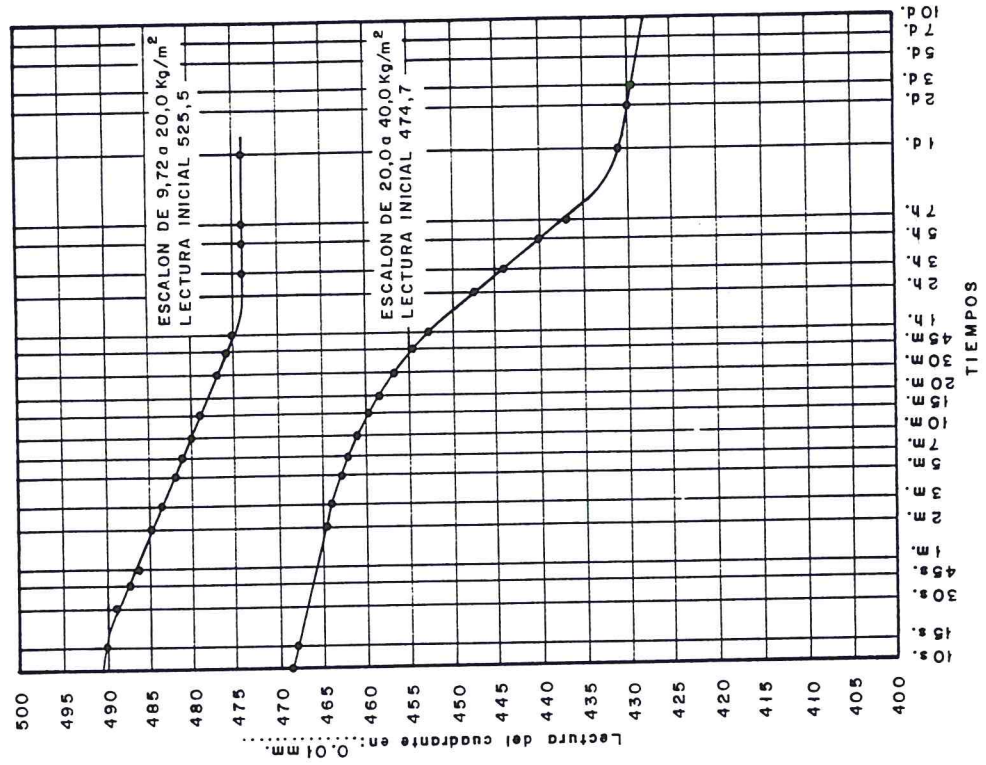


FIG.- 70. MONTMORILLONITA ($1,41 \text{ g/cm}^3$)

CURVAS DE CONSOLIDACION

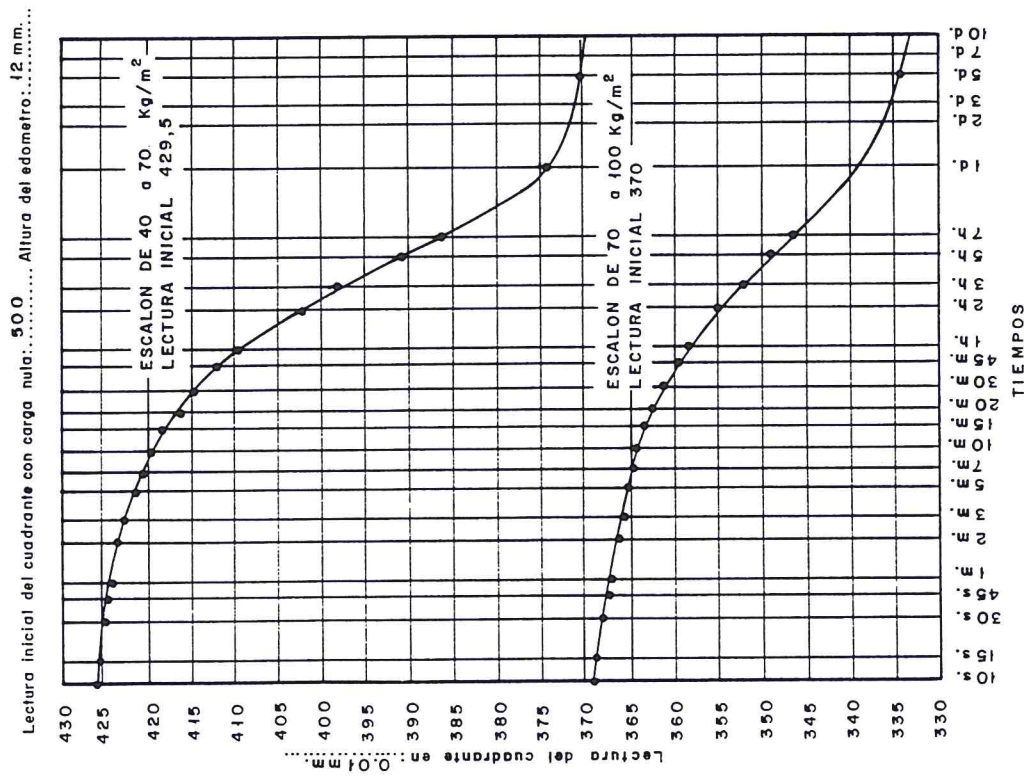


FIG.- 71. MONTMORILLONITA ($1,41 \text{ g/cm}^3$)

CURVAS DE CONSOLIDACION

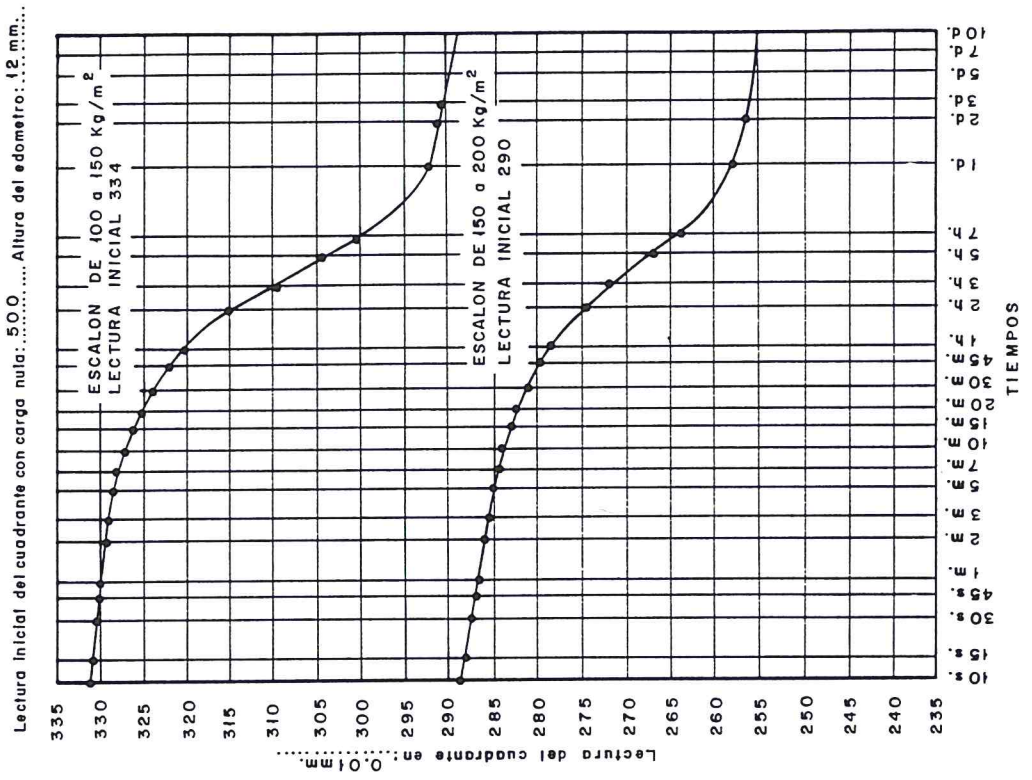


FIG.- 74. MONTMORILLONITA (1.59 g/cm^3)
CURVAS DE CONSOLIDACION

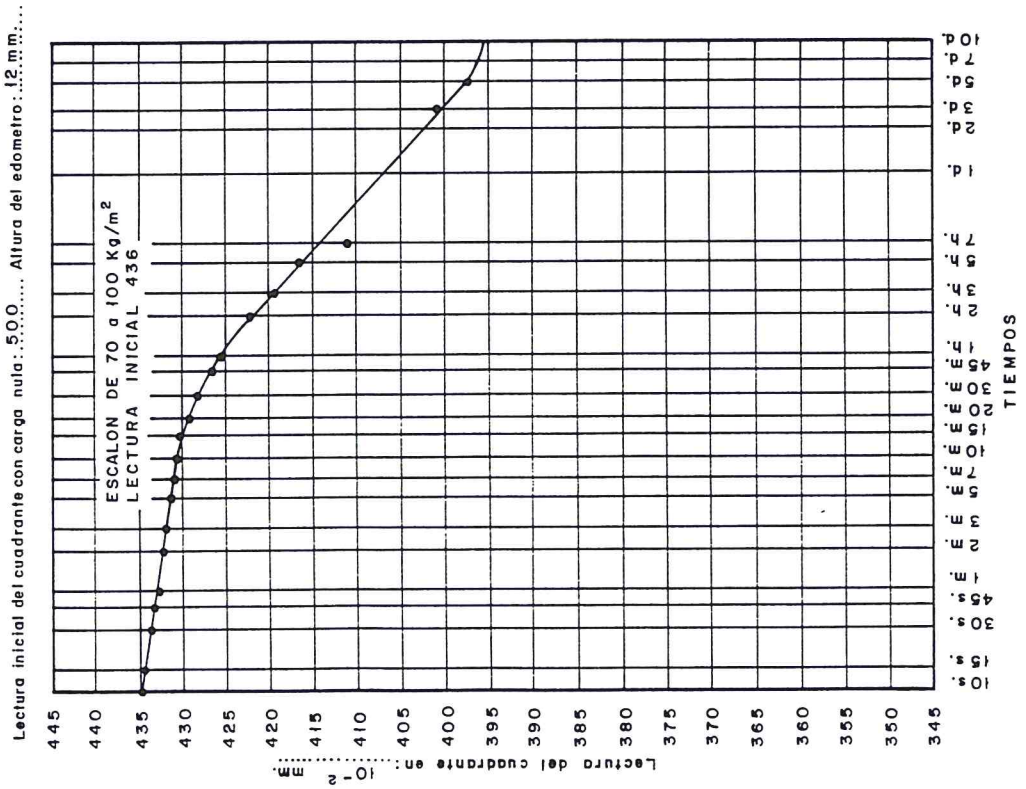


FIG.- 75. SAPONITA
CURVA EDOMETRICA

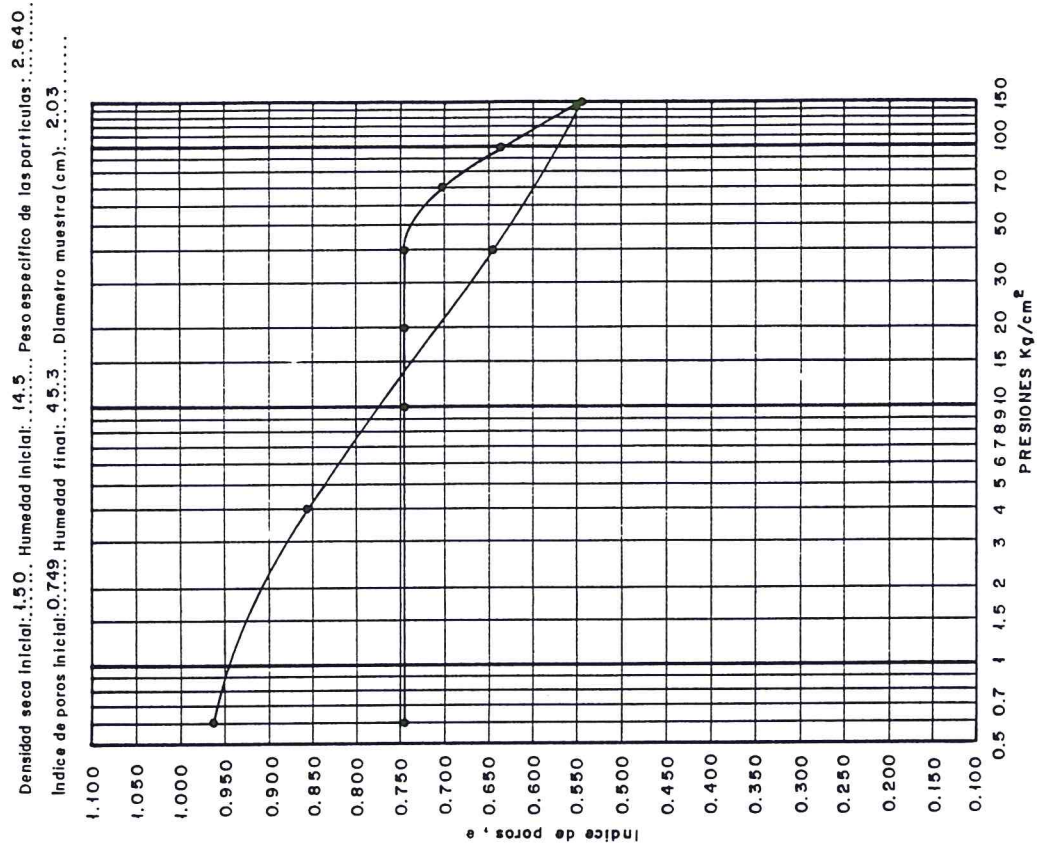


FIG.- 76. SAPONITA ($1,50 \text{ g/cm}^3$)
CURVAS DE CONSOLIDACION

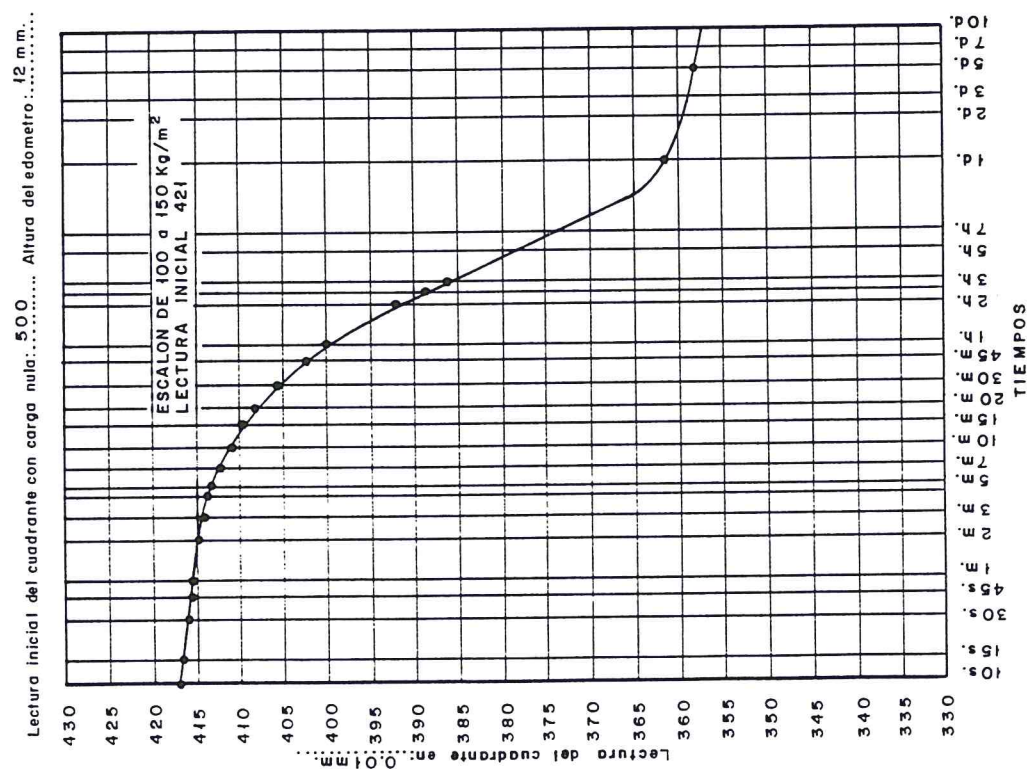


FIG.- 77. SAPONITA ($1,50 \text{ g/cm}^3$)
CURVAS DE CONSOLIDACION

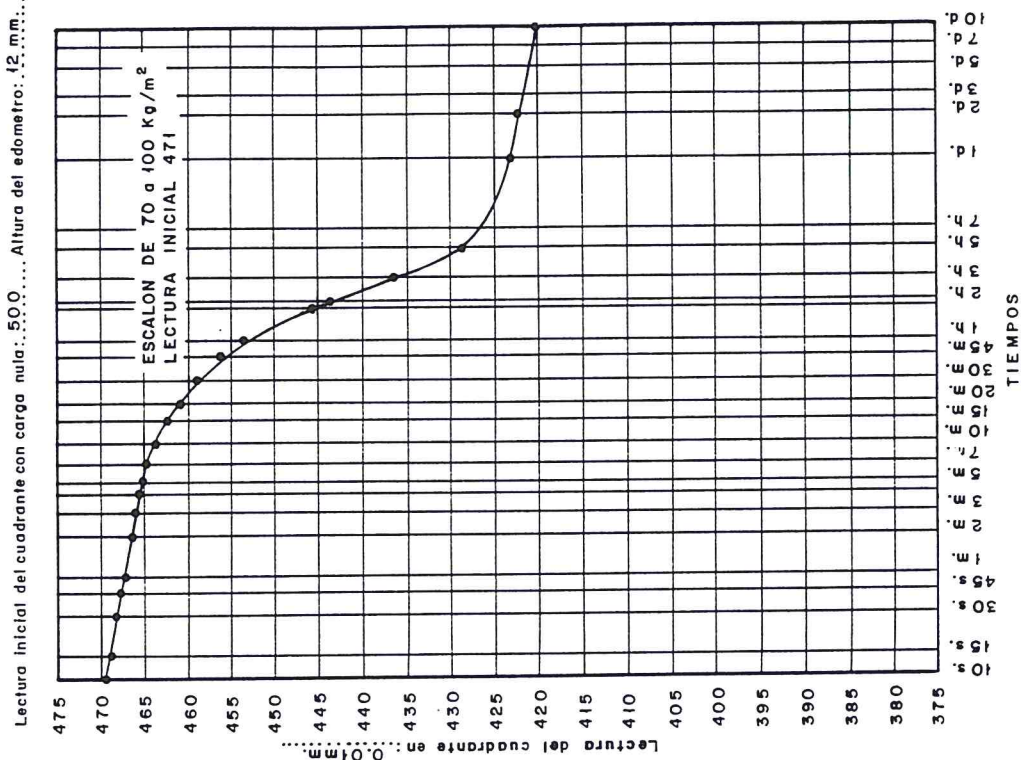


FIG.- 78. SAPONITA
CURVA EDOMETRICA

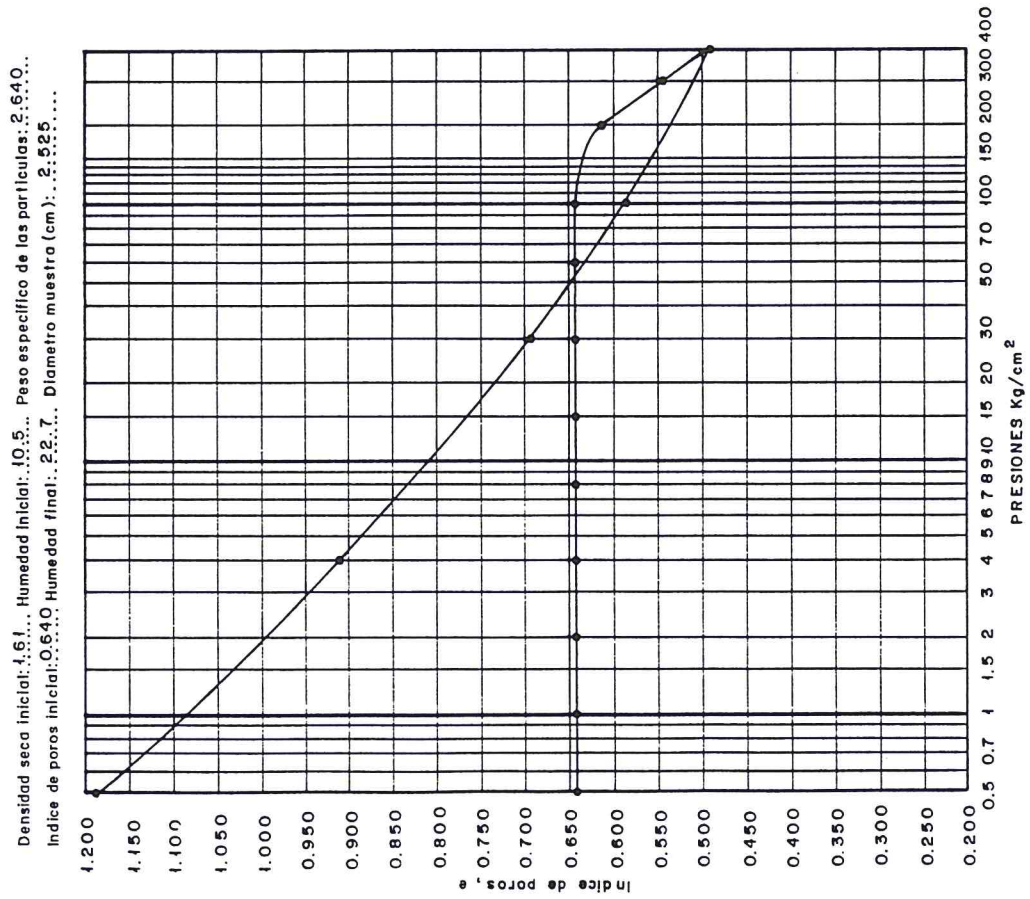


FIG.- 79. SAPONITA (1.60 g/cm³)
CURVAS DE CONSOLIDACION

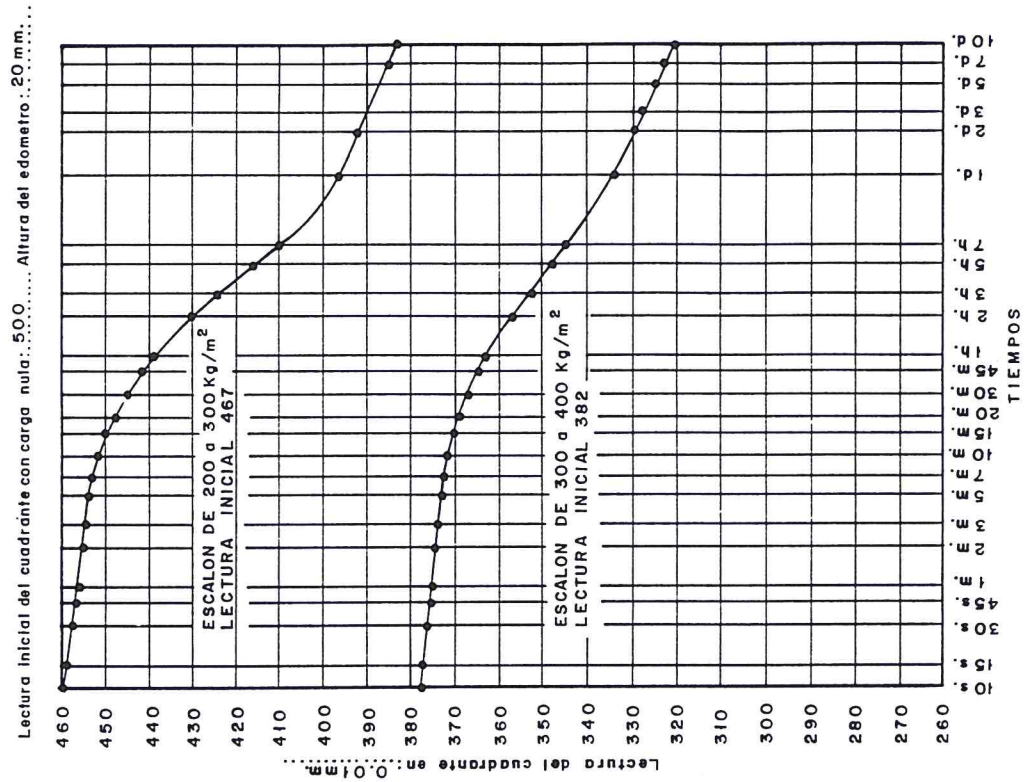


FIG.- 80. CURVA DE CAMBIO DE VOLUMEN- $\sqrt{t}$ DE LA MONTMORILLONITA
CON DENSIDAD SECA 1,60 g/cm³.

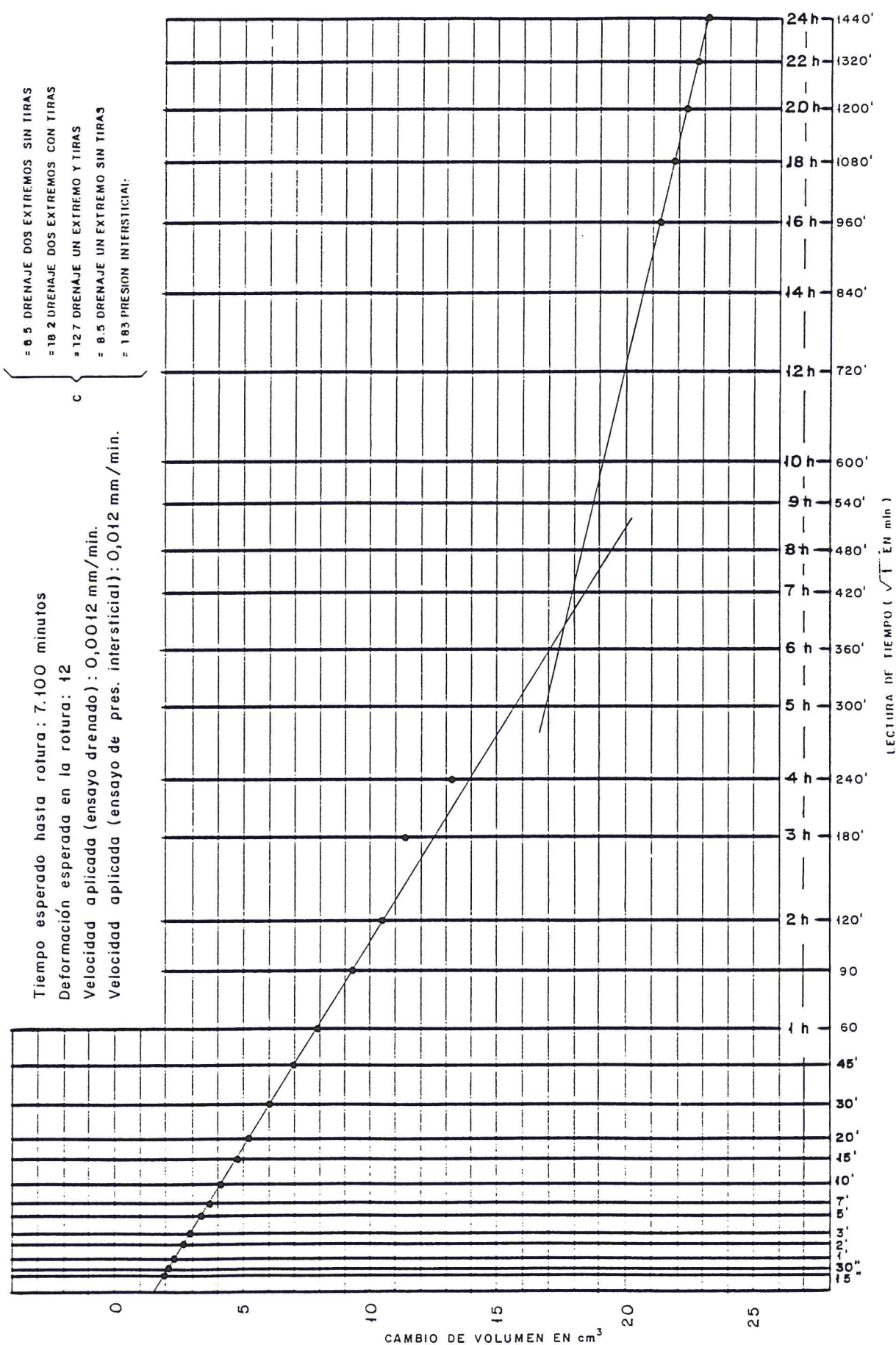


FIG.- 81. CURVA DE CAMBIO DE VOLUMEN $\sqrt{t}$ DE LA SAPONITA CON DENSIDAD SECA 1,40 g/cm³.

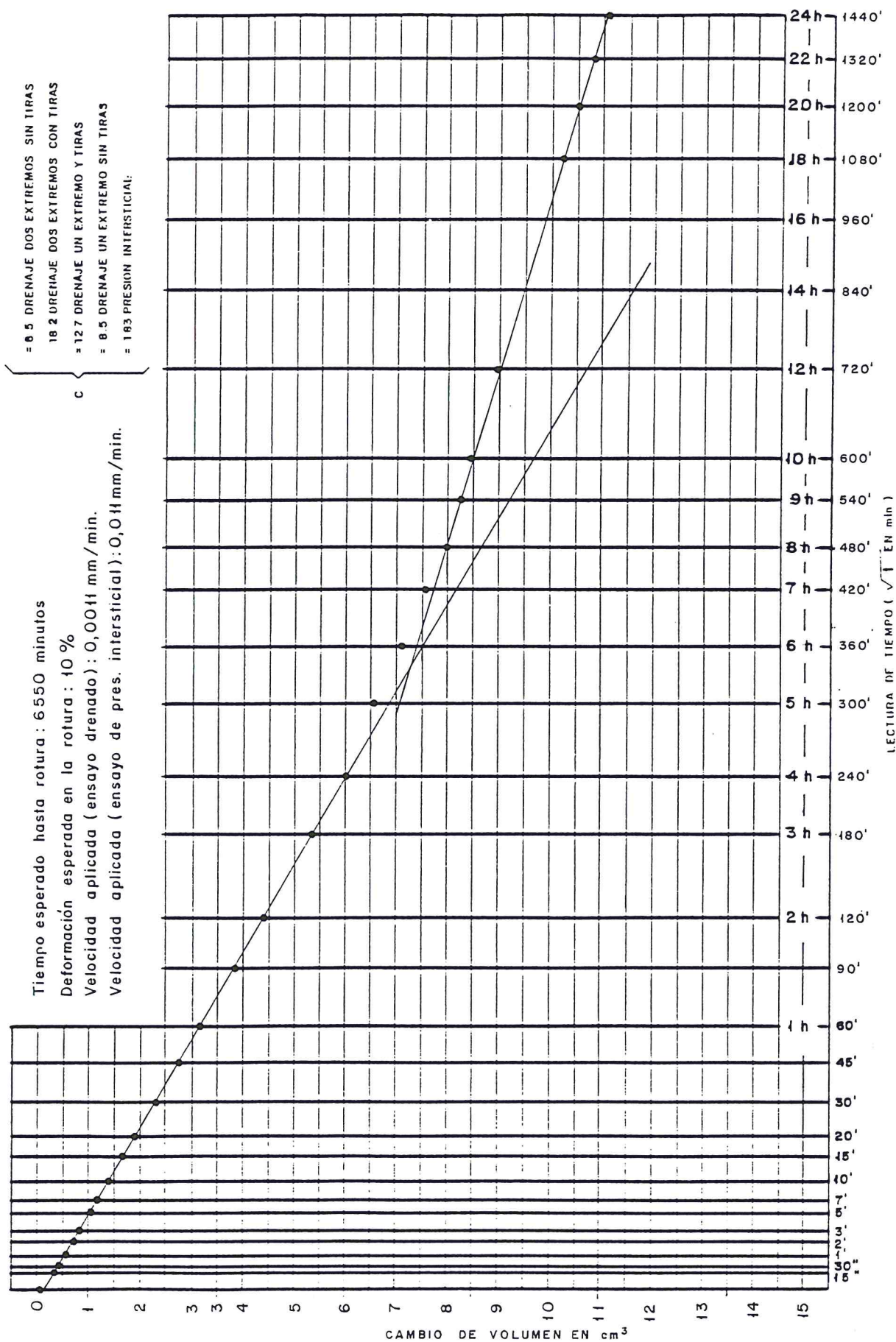


FIG.- 82. ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL. MONTMORILLONITA COMPACTADA (1,6 g/cm³)

PROBETA Nº	I	II	III			
σ_3 Kg/cm ²	94	76	60			
CONTRAPRESION Kg/cm ²	10	6	10			

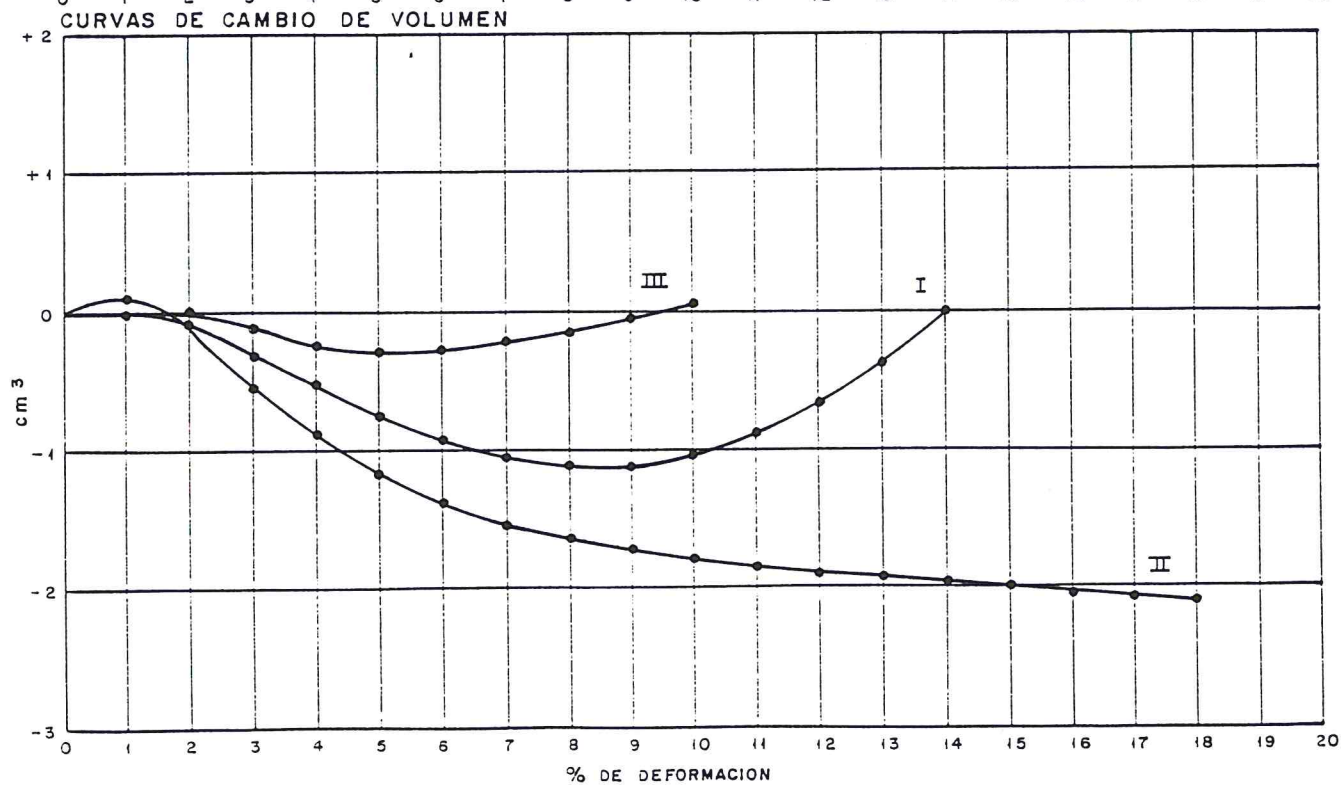
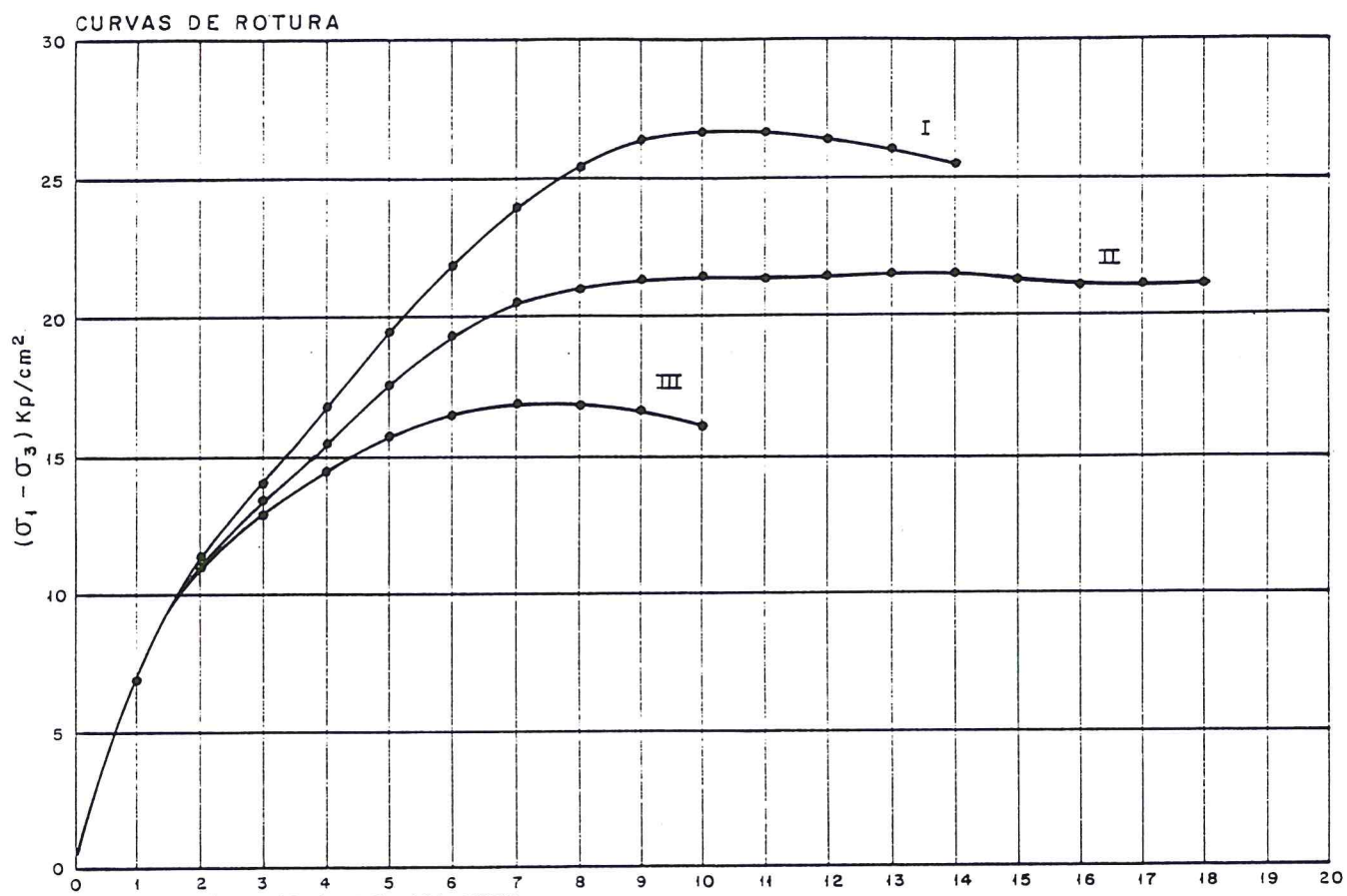


FIG.- 83. ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL. SAPONITA COMPACTADA ($1,4 \text{ g/cm}^3$)

PROBETA Nº	I	II	III			
$\sigma_3 \text{ kg/cm}^2$	100	80	60			
CONTRAPRESION kg/cm^2	10	10	10			

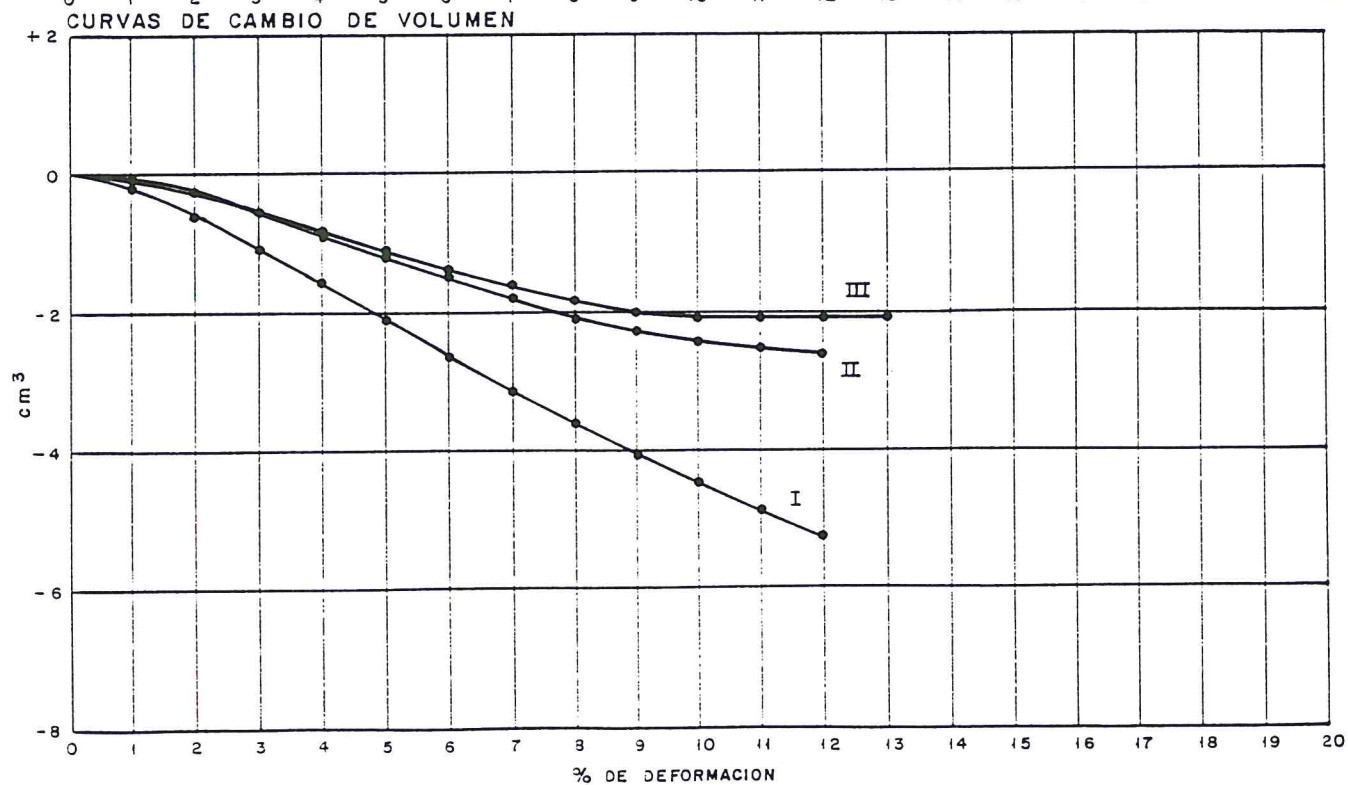
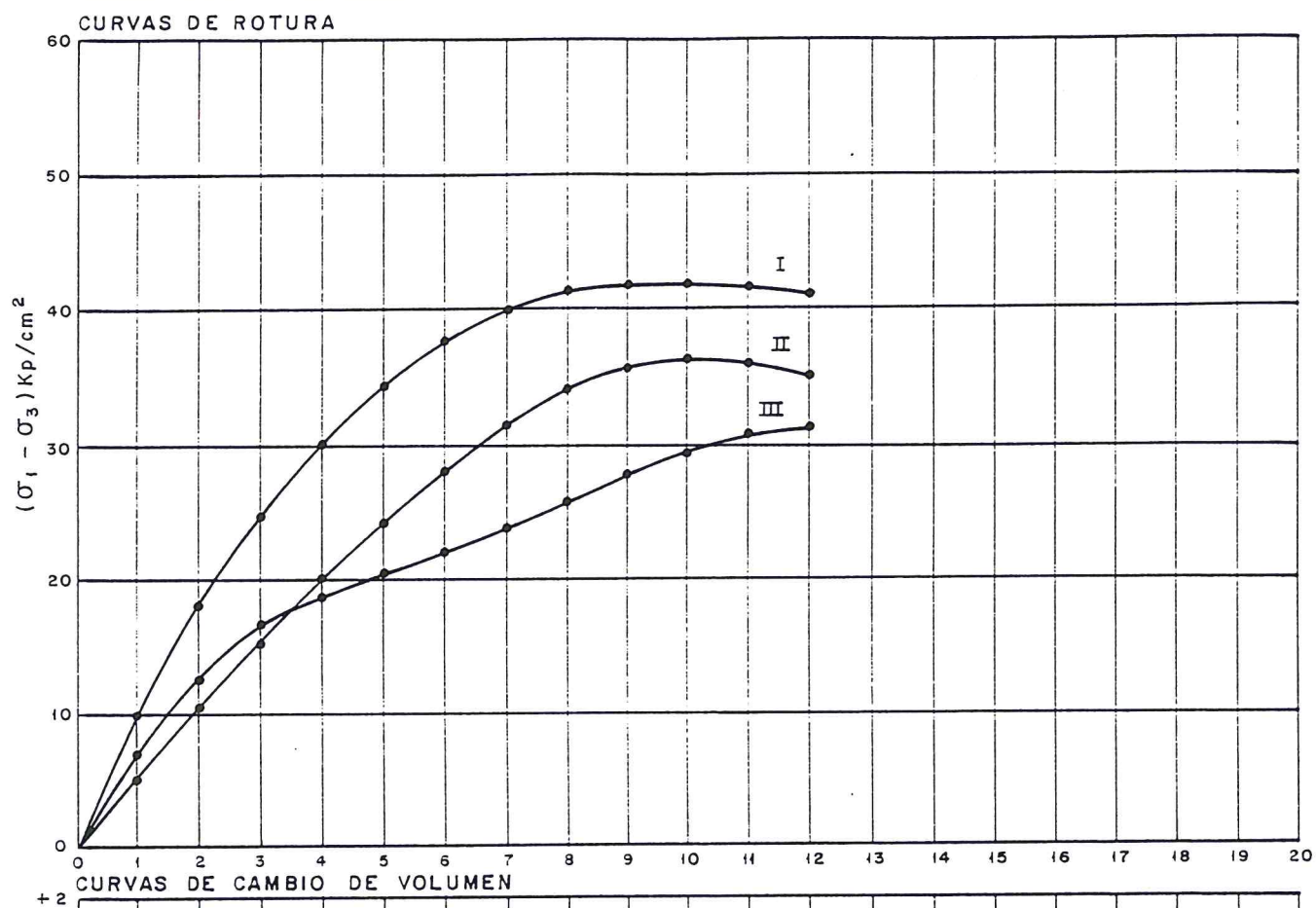
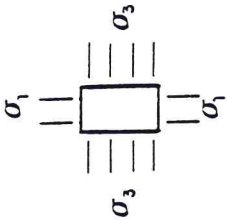


FIG.- 84. CIRCULOS DE MOHR DE LA MONTMORILLONITA.

PROBETA N°	I	II	III	IV	V
σ_3 (kg/cm ²)	94	76	60		
% HUM INICIAL	10.4	9.8	10.1		
% HUM FINAL	26.8	28.0	29.2		
DENSIDAD SECA	1.60	1.60	1.60		
% DEFORMACION A LA ROTURA	12	14	7		
VELOCIDAD DEL ENSAYO MINUTOS PARA 1% DEF.	620	620	620		

Tipo de muestra Montmorillonita compactada a densidad seca 1,6 g/cm³, ϕ 1 1/2".

Tipo de ensayo Triaxial con consolidación previa y rotura con drenaje.



OBSERVACIONES.- SATURACION CON CONTRAPRESION DE 10 Kg/m² LAS PROBETAS I y III y LA PROBETA II LA PRESION DE SATURACION FUE DE 60 Kg/cm²

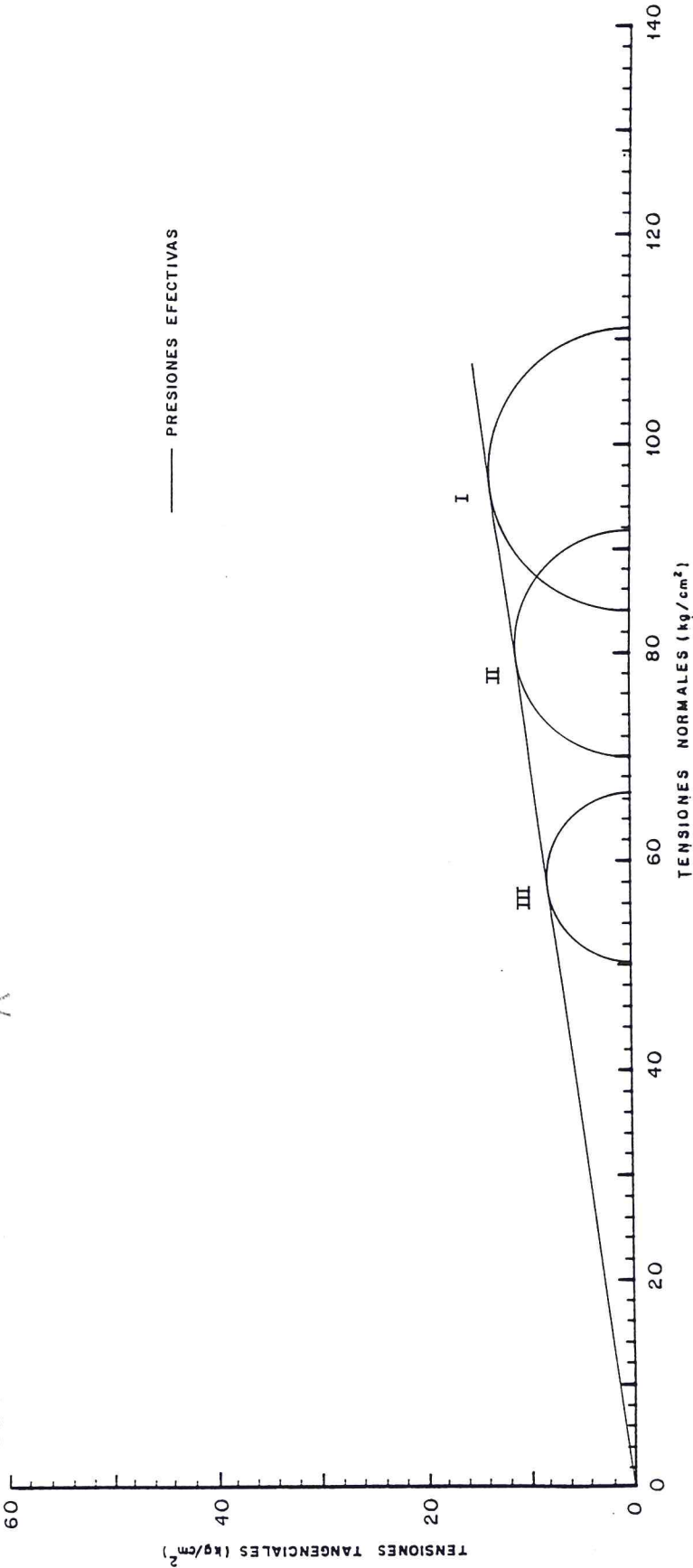
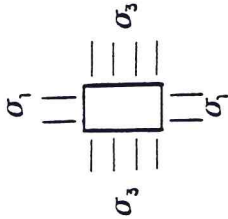


FIG.- 85. CIRCULO DE MOHR DE LA SAPONITA

PROBETA Nº	I	II	III	IV	V
σ_3 (kg/cm ²)	100	80	60		
% HUM INICIAL	10.8	10.3	10		
% HUM FINAL	35	38.2	37.4		
DENSIDAD SECA	1.40	1.40	1.41		
% DEFORMACION A LA ROTURA	9	11	12		
VELOCIDAD DEL ENSAYO MINUTOS PARA 1% DEF.	680	680	680		

Tipo de muestra Saponita compactada a densidad seca
1,4 g/cm³ ϕ 1 1/2"
Tipo de ensayo Triaxial con consolidación previa y
rotura con drenaje.



OBSERVACIONES.- SATURACION CON CONTRAPRESION
DE 10 Kg/cm²

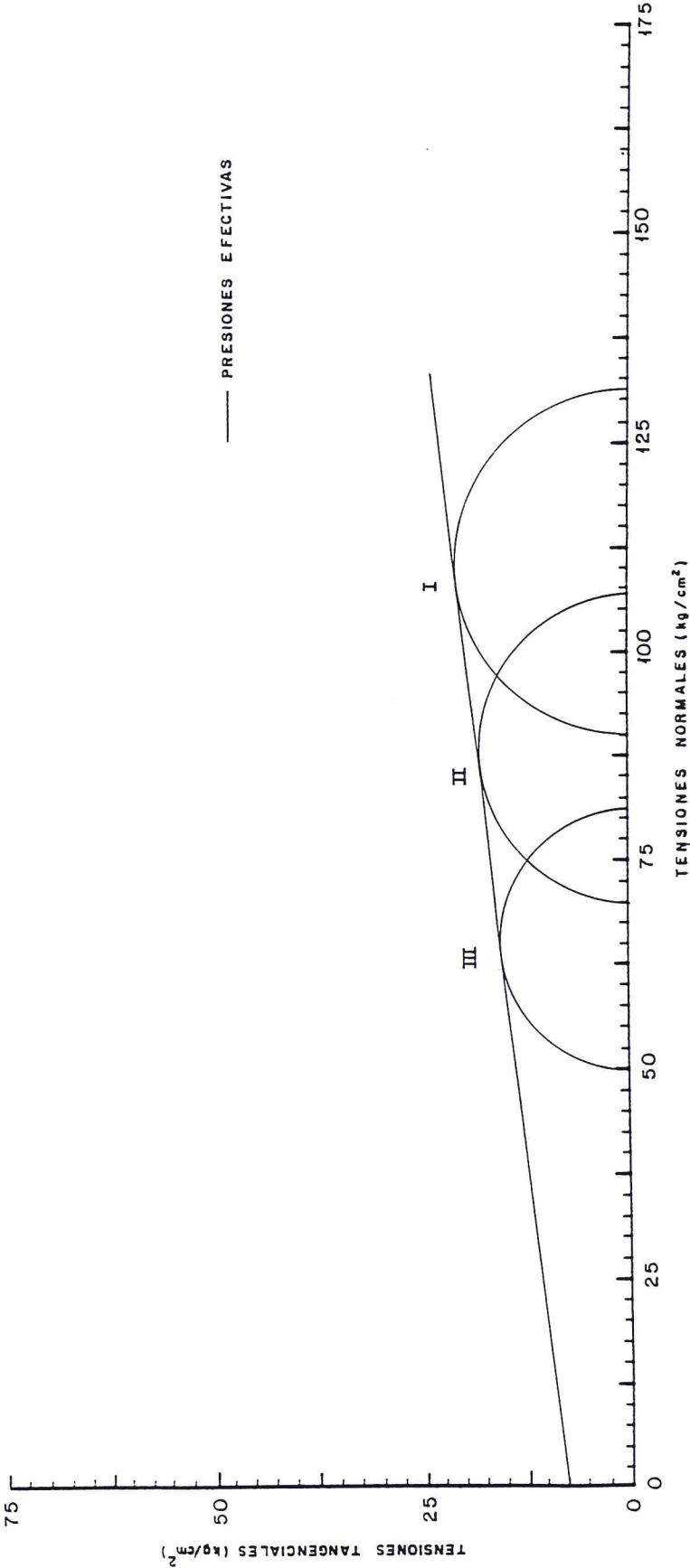


FIG.-86. ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL. MONTMORILLONITA COMPACTADA (1,60g/cm³)

PROBETA Nº	I	II	III			
σ_3 kg/cm ²	100	80	60			
CONTRAPRESION kg/cm ²	10	10	10			

CURVAS DE ROTURA

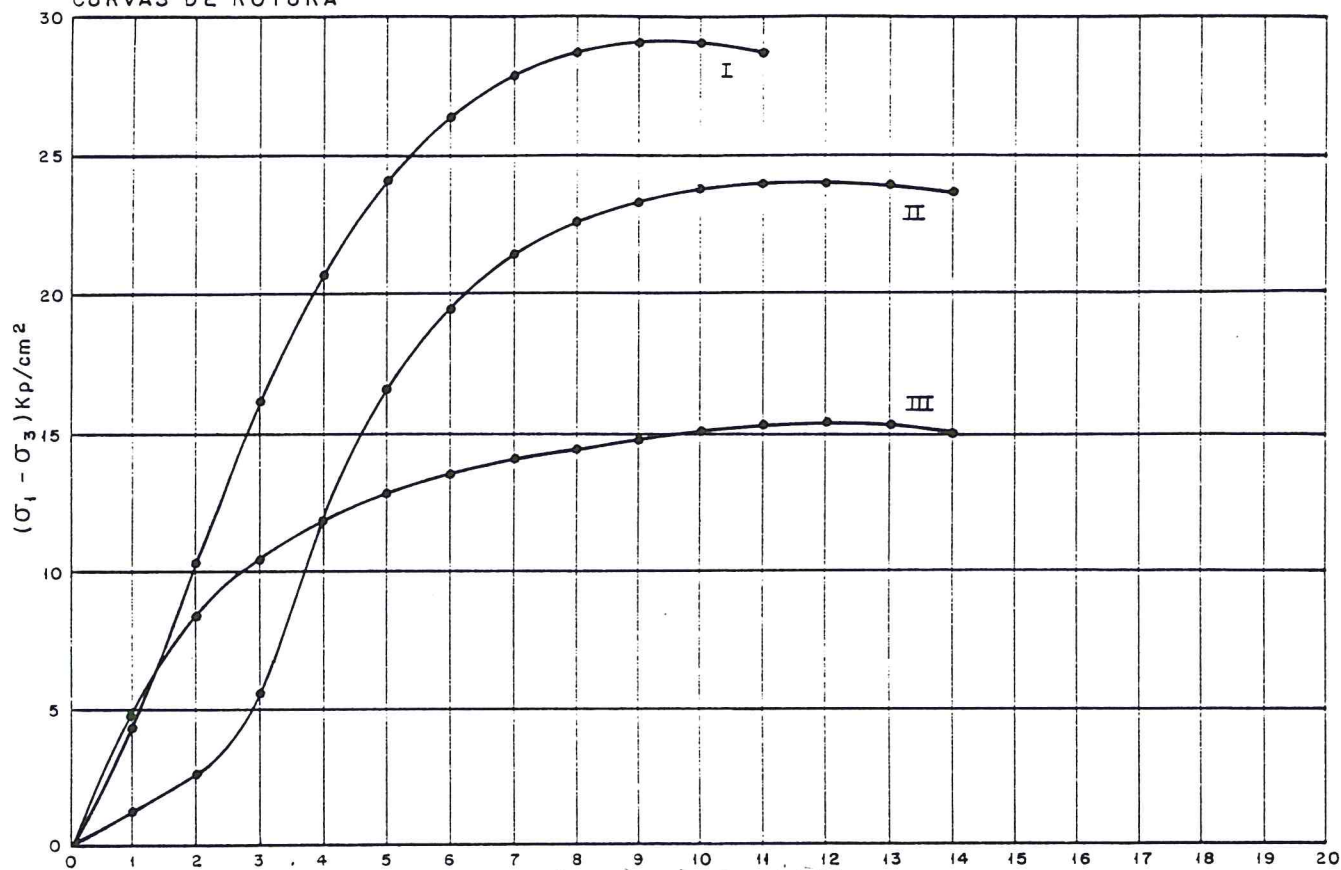
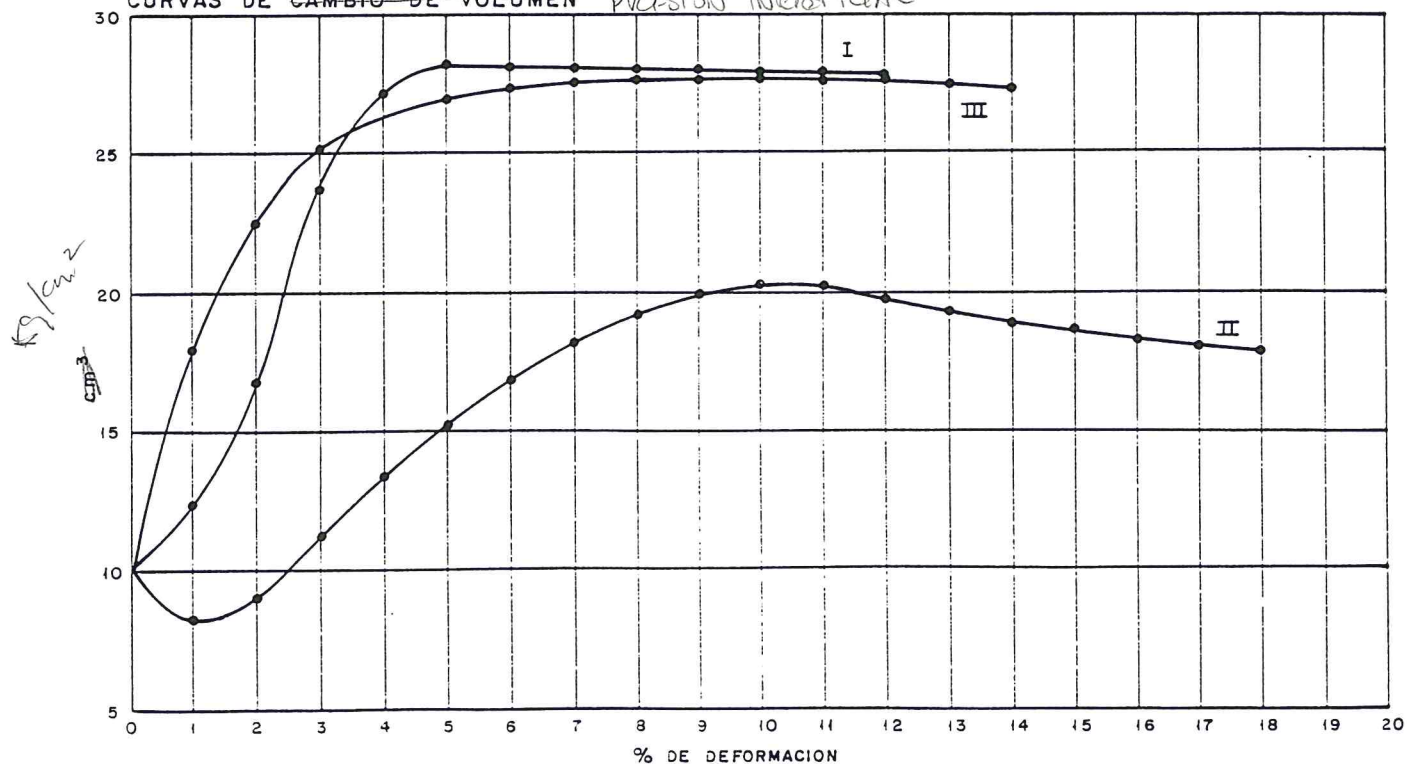
CURVAS DE CAMBIO DE VOLUMEN *PRISION INERSTICIAL*

FIG.- 87. ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL. MONTMORILLONITA COMPACTADA ($1,60 \text{ g/cm}^3$)

PROBETA Nº	I	II	III			
$\sigma_3 \text{ kg/cm}^2$	200	250	300			
CONTRAPRESION kg/cm^2	10	10	10			

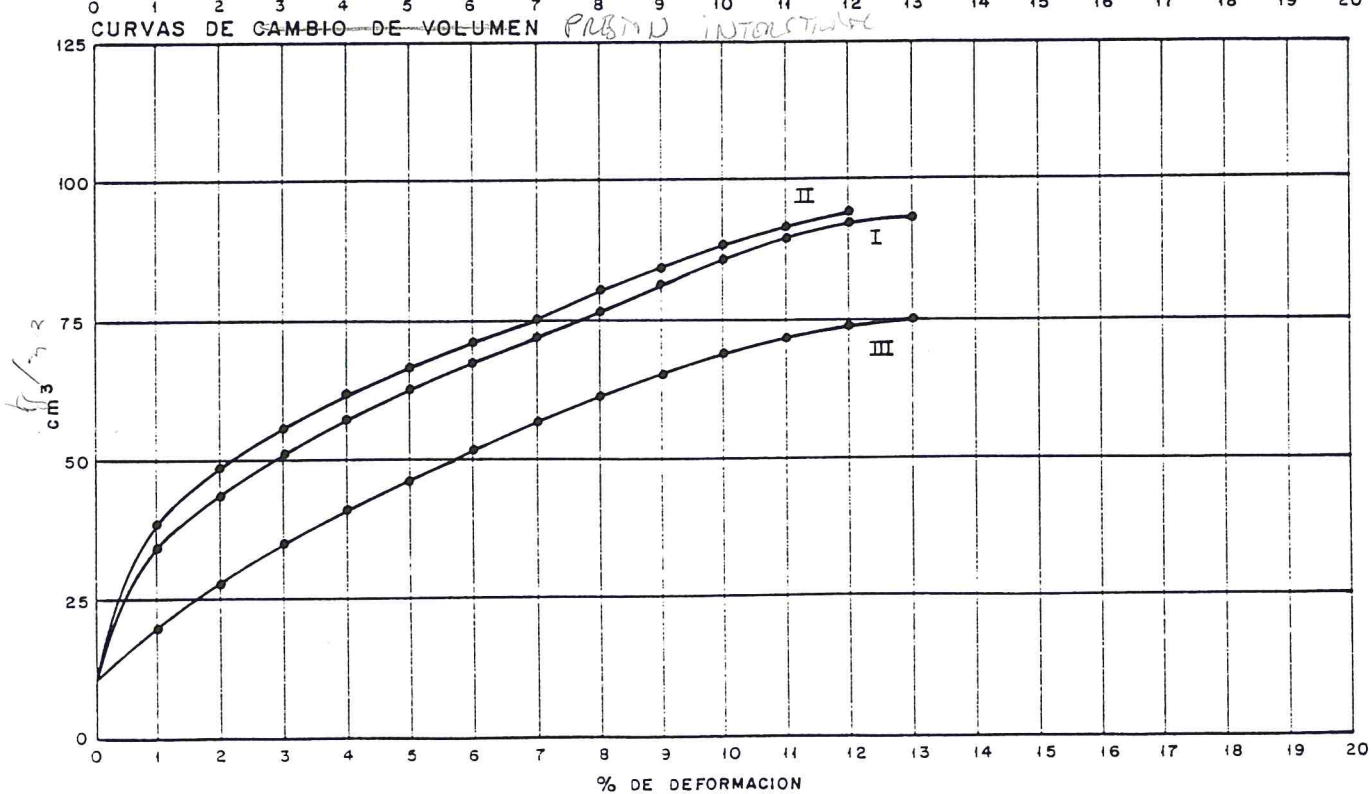
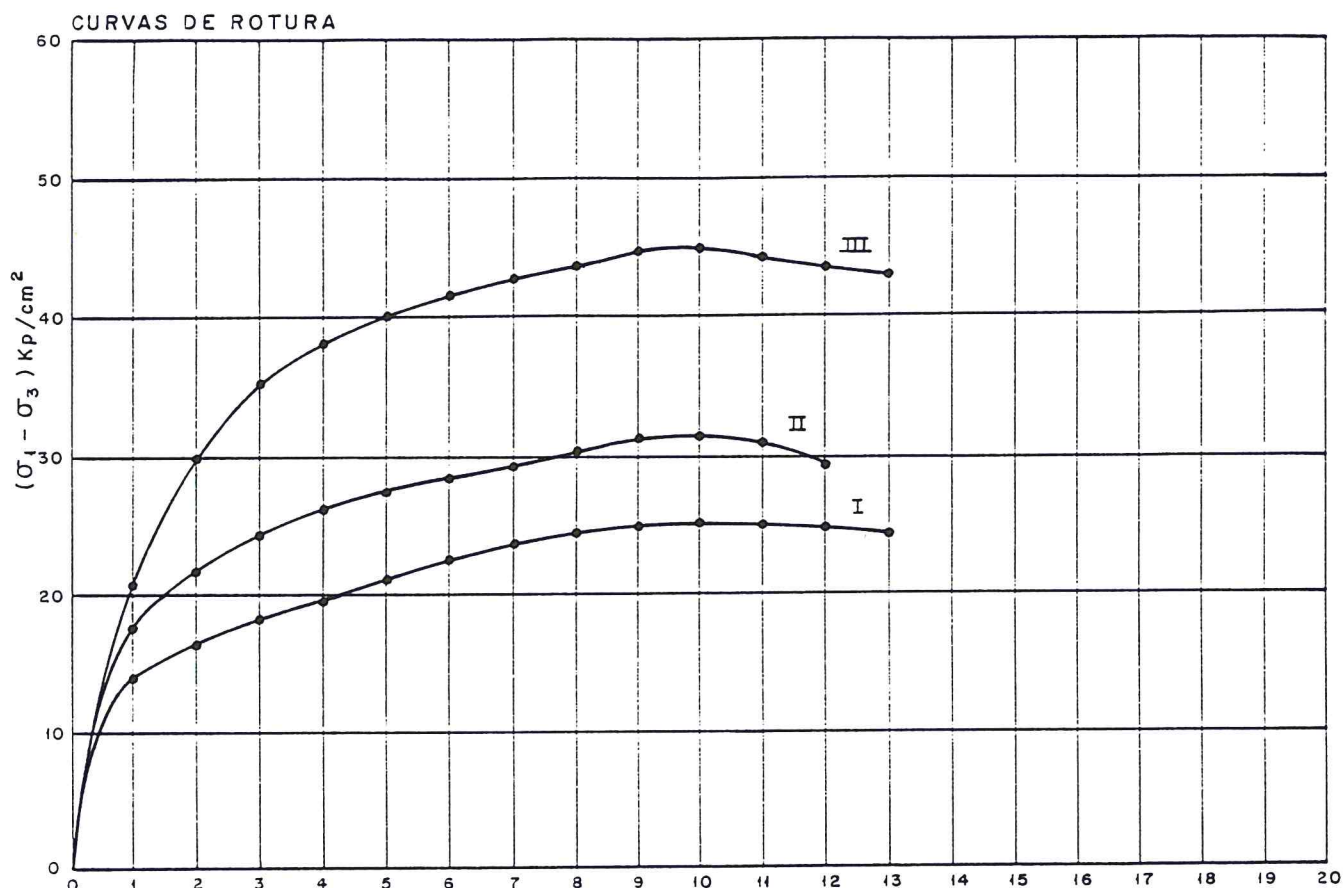
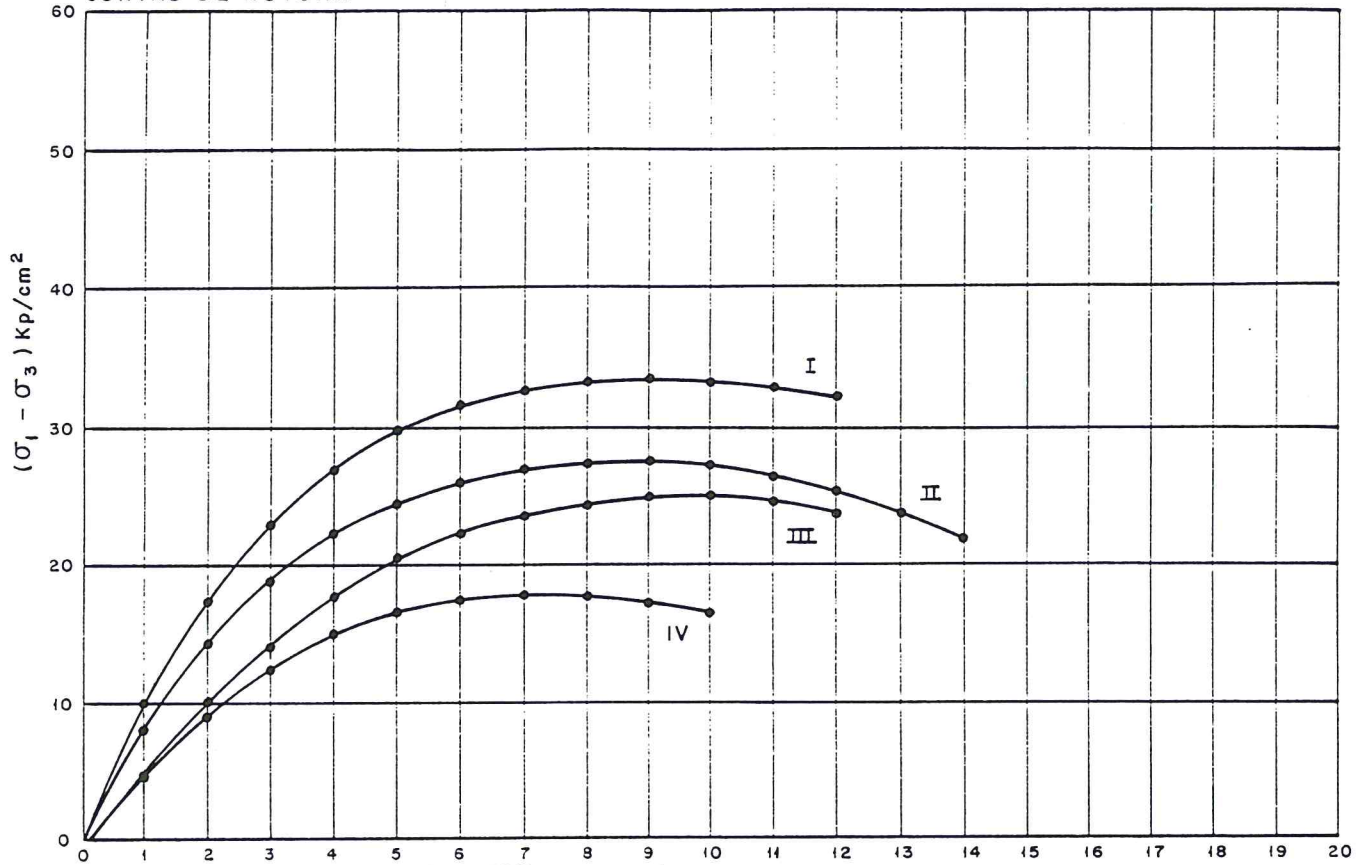


FIG.- 88. ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL. SAPONITA COMPACTADA ($1,40 \text{ g/cm}^3$).

PROBETA Nº	I	II	III	IV		
$\sigma_3 \text{ Kg/cm}^2$	100	80	60	40		
CONTRAPRESION Kg/cm^2	10	10	10	10		

CURVAS DE ROTURA



CURVAS DE CAMBIO DE VOLUMEN

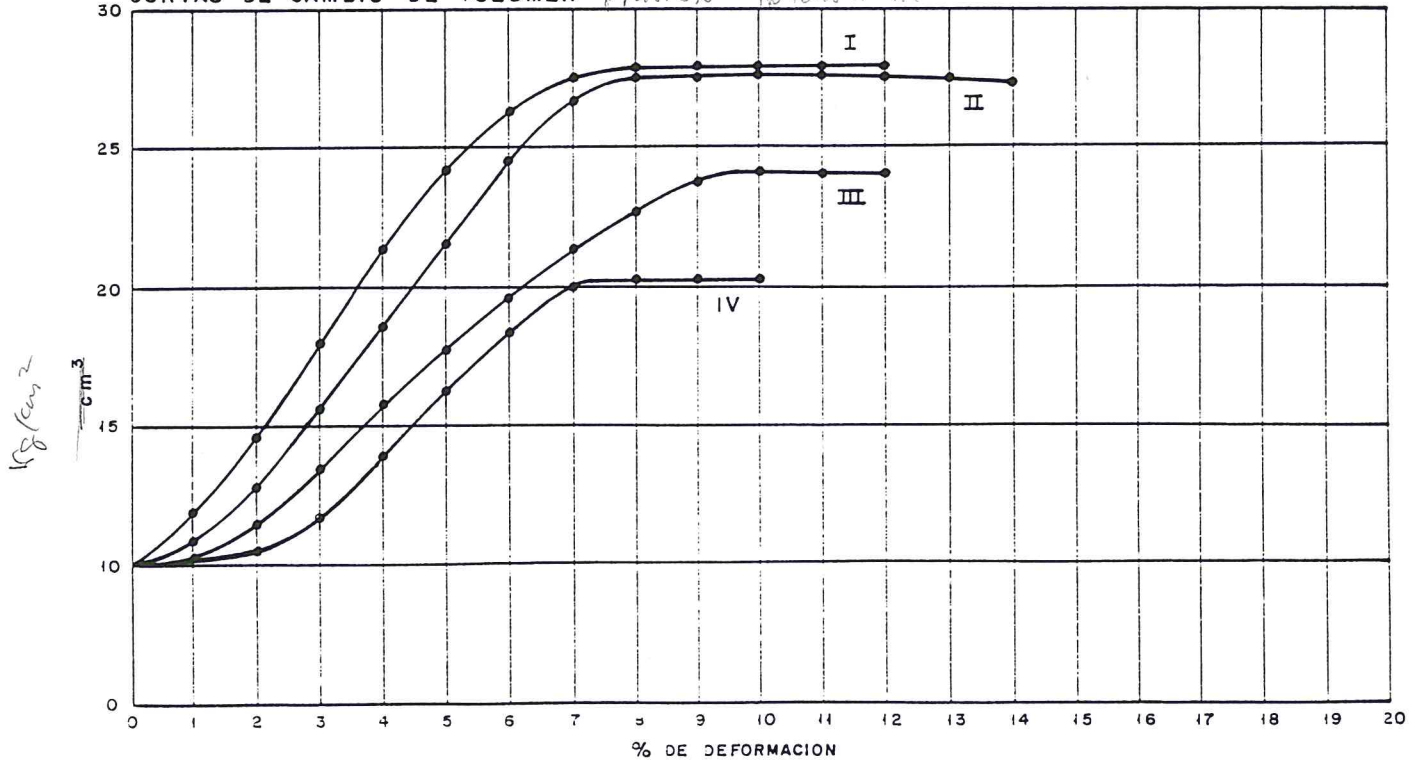
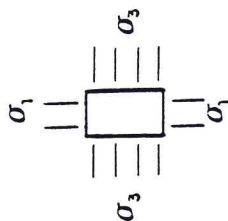


FIG.-89. CIRCULOS DE MOHR DE LA MONTMORILLONITA

PROBETA Nº	I	II	III	IV	V
σ_3 (kg/cm ²)	100	80	60		
% HUM INICIAL	41.3	41.0	42.1		
% HUM FINAL	27.0	27.3	31.5		
DENSIDAD SECA	1.59	1.60	1.59		
% DEFORMACION A LA ROTURA	9	12	12		
VELOCIDAD DEL ENSAYO MINUTOS PARA 1% DEF.	120	120	120		

Tipo de muestra Montmorillonita compactada (1.60 g/cm³), ϕ 1 1/2".

Tipo de ensayo Triaxial con consolidación previa, rotura sin drenaje y medida de las presiones intersticiales.



OBSERVACIONES.- SATURACION CON CONTRAPRESION DE 10 Kg/cm²
LAS PRESIONES TOTALES ESTAN DIBUJADAS UNA VEZ DESCONTADA
LA PRESION NEUTRA DE 10 Kg/cm²

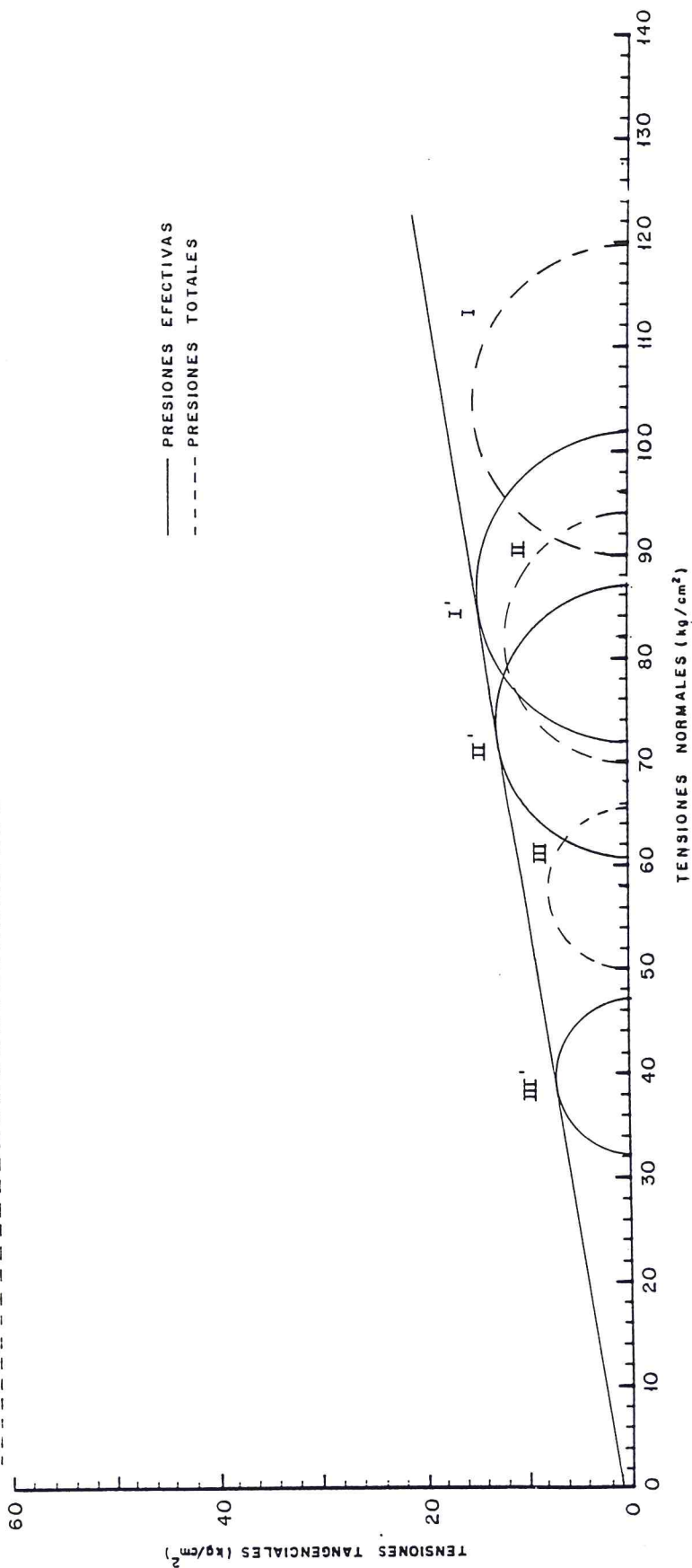
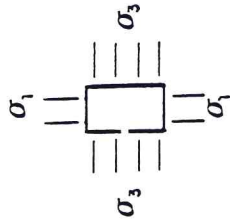


FIG.- 90. CIRCULOS DE MOHR DE LA MONTMORILLONITA

Tipo de muestra Montmorillonita compactada (1,60 g/cm³), $\phi \approx 1/2$ "

Tipo de ensayo Triaxial con consolidación previa, rotura sin drenaje y medida de las presiones intersticiales.



PROBETA N°	I	II	III	IV	V
σ_3 (kg/cm ²)	200	250	300		
% HUM INICIAL	11.9	11.8	12.4		
% HUM FINAL	28.6	26.2	26.2		
DENSIDAD SECA	1.60	1.60	1.60		
% DEFORMACION A LA ROTURA	10	10	11		
VELOCIDAD DEL ENSAYO MINUTOS PARA 1% DEF.	120	120	120		

OBSERVACIONES.- SATURACION CON CONTRAPRESION DE 10 Kg/cm²
LAS PRESIONES TOTALES ESTAN DIBUJADAS UNA VEZ DESCONTADA
LA PRESION NEUTRA DE 10 Kg/cm²

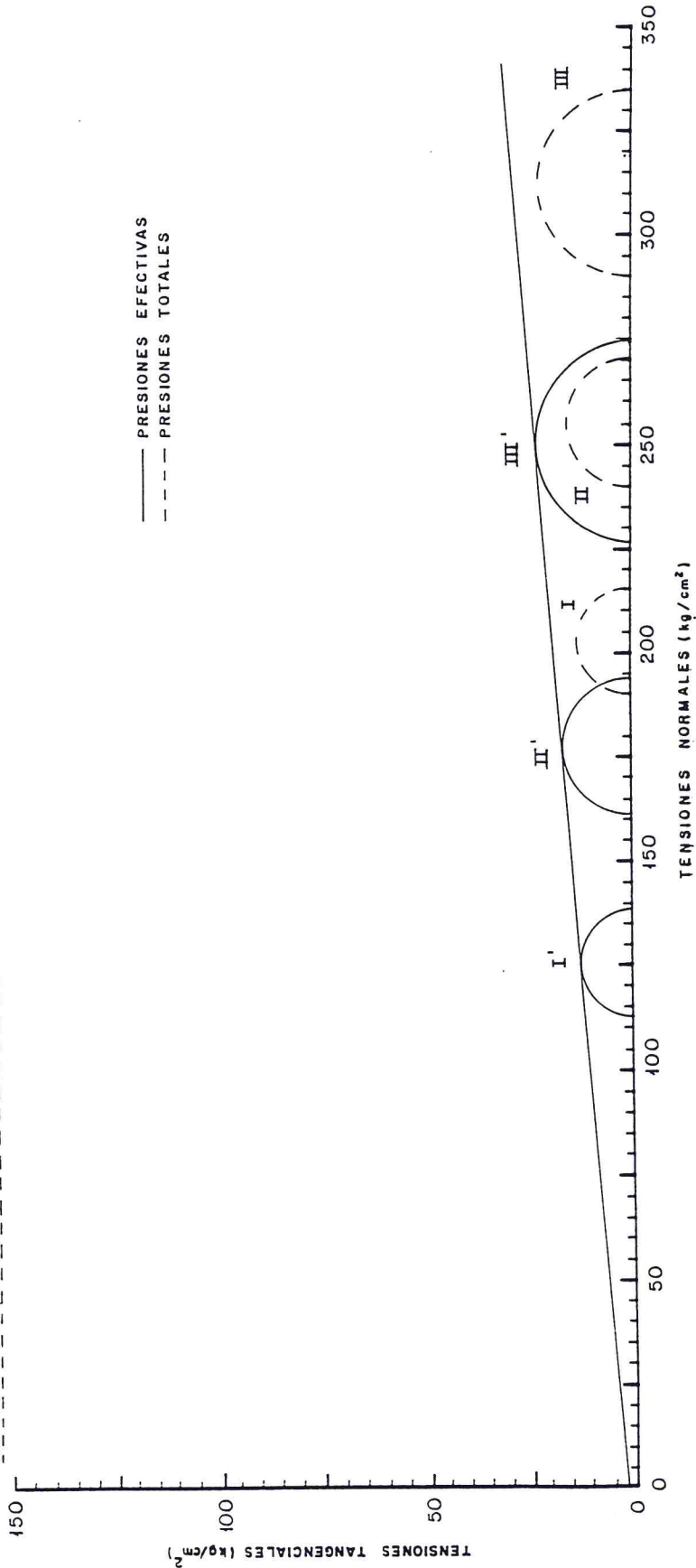
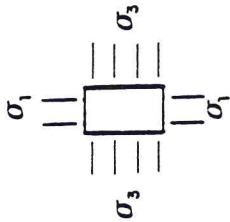


FIG.- 91. CIRCULOS DE MOHR DE LA SAPONITA

PROBETA Nº	I	II	III	IV	V
σ_3 (kg/cm ²)	100	80	60	40	
% HUM INICIAL	12.7	12.8	12.6	12.9	
% HUM FINAL	37.2	38.0	40.2	49.0	
DENSIDAD SECA	1.40	1.40	1.40	1.40	
% DEFORMACION A LA ROTURA	9	8	10	7	
VELOCIDAD DEL ENSAYO MINUTOS PARA 1% DEF.	120	120	120	120	

Tipo de muestra Saponita compactada (1.40 g/cm³), ϕ 1 1/2".
 Tipo de ensayo Triaxial con consolidación previa, rotura sin drenaje y medida de las presiones intersticiales.



OBSERVACIONES.- SATURACION CON CONTRAPRESION DE 10 Kg/cm²
 LAS PRESIONES TOTALES ESTAN DIBUJADAS UNA VEZ DESCONTADA
 LA PRESION NEUTRA DE 10 Kg/cm²

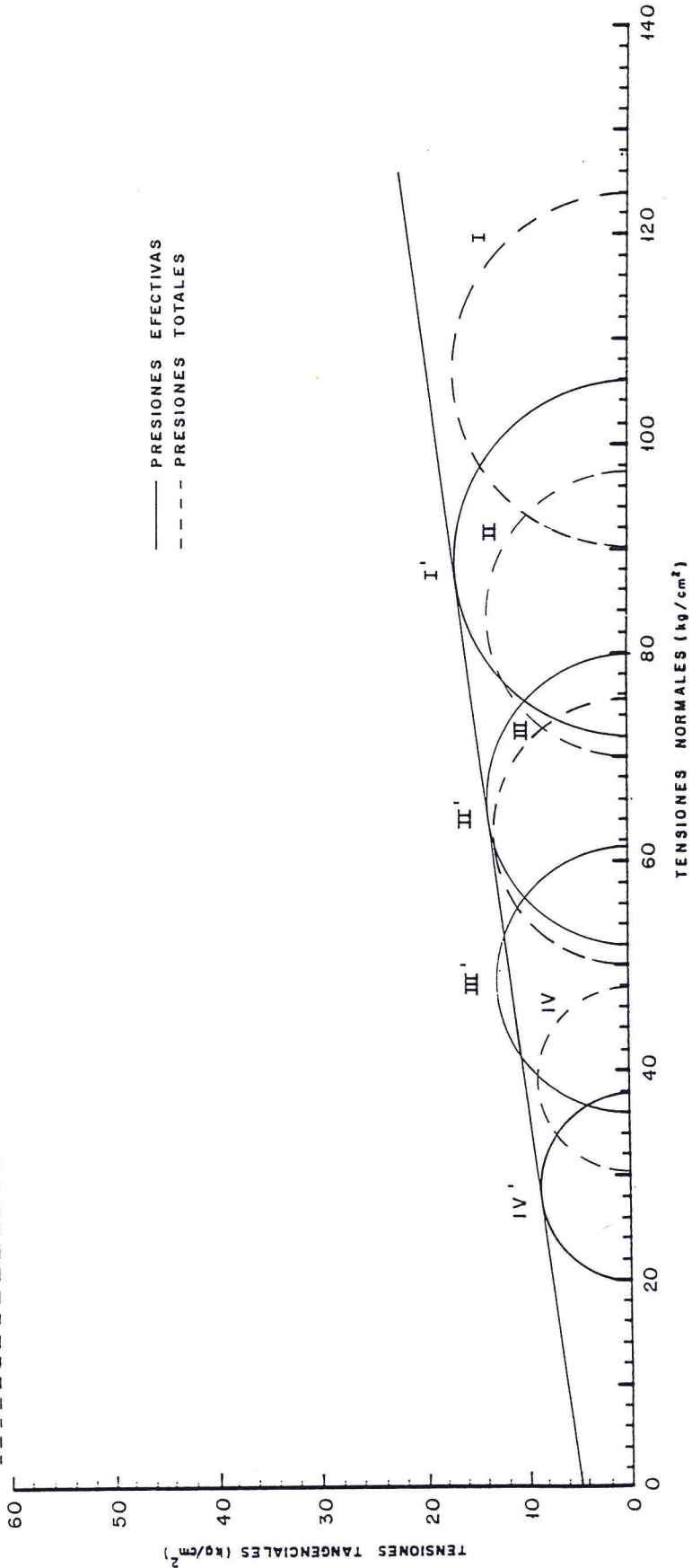


FIG.- 92. PERFIL DE DIFUSION DE ^{137}Cs EN LA MONTMORILLONITA
TIEMPO DE DIFUSION = 217 DIAS.

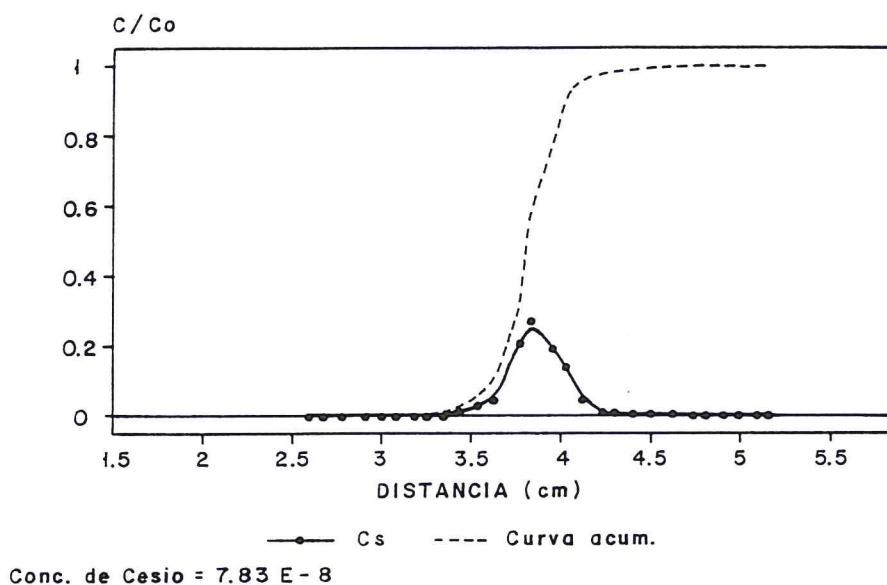


FIG.- 93. PERFIL DE DIFUSION DE ^{60}Co EN LA MONTMORILLONITA
TIEMPO DE DIFUSION = 217 DIAS.

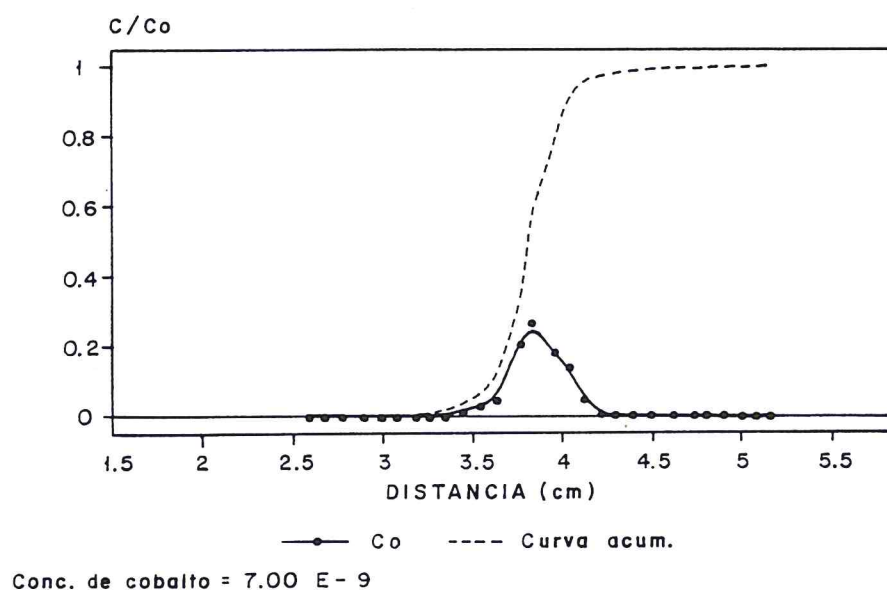


FIG.- 94. DIFUSION DE ^{137}Cs EN LA MONTMORILLONITA.

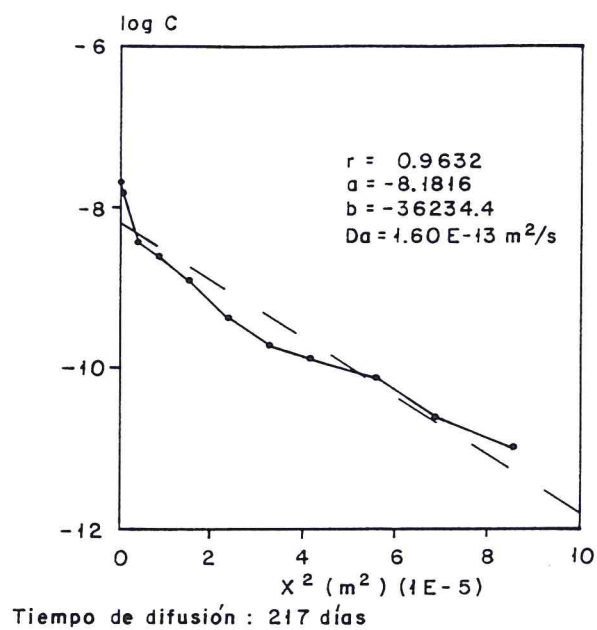


FIG.- 95. DIFUSION DEL ^{60}Co EN LA MONTMORILLONITA.

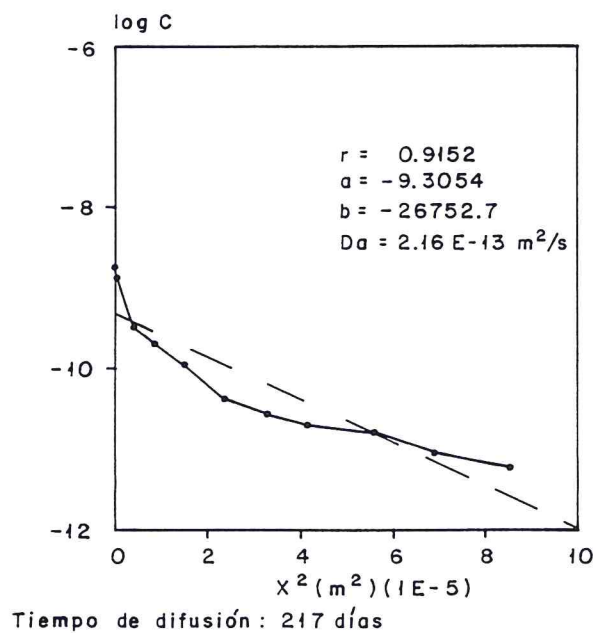


FIG.- 96. ISOTERMA DE ADSORCION DE AGUA A 25°C DE LA MONTMORILLONITA (S-2)

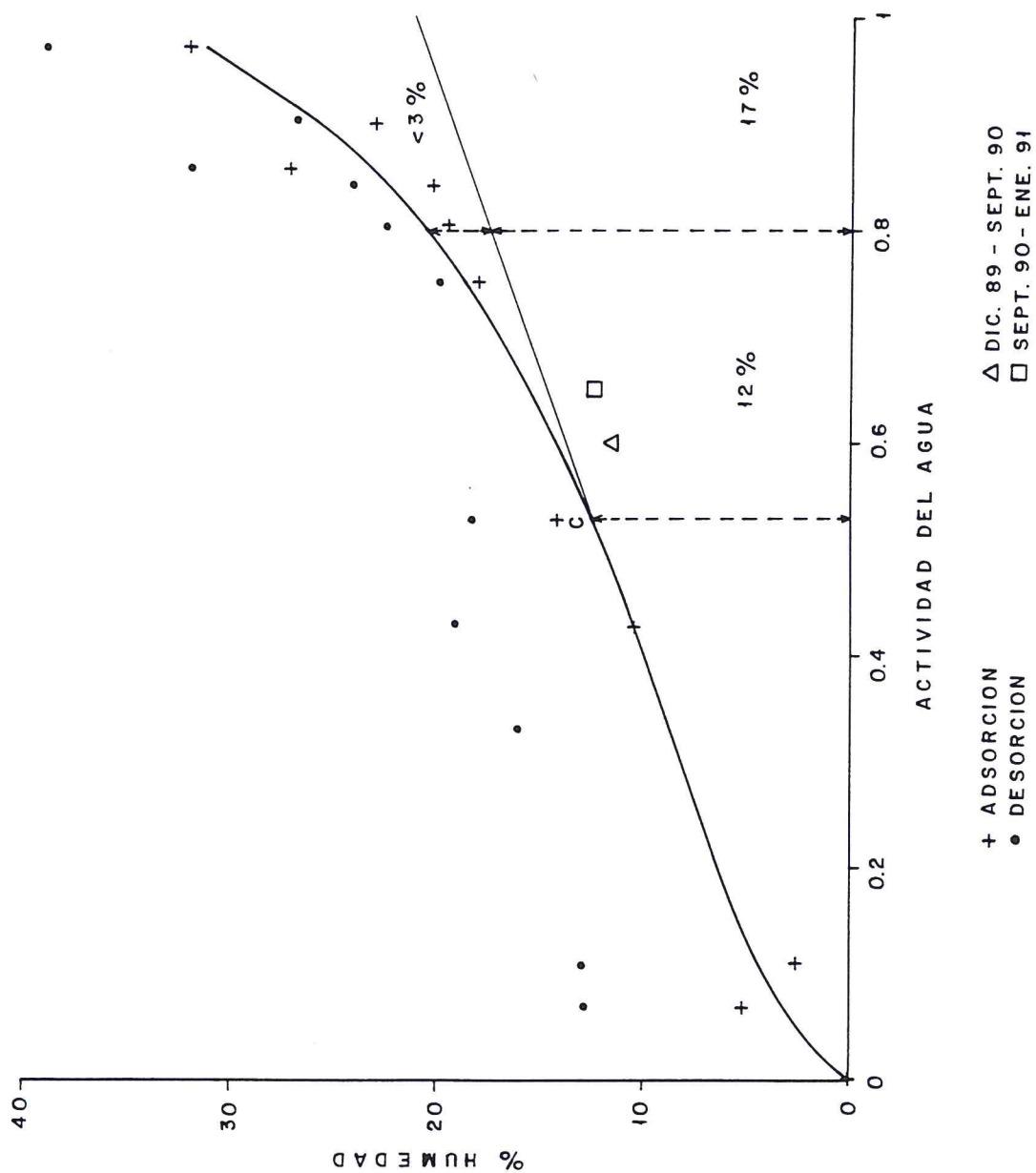


FIG.-97. ISOTERMA DE ADSORCION DE AGUA A 25 °C DE LA SAPONITA (MCA-C)

