

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

PLASTICIDAD REAL DE MATERIALES ARCILLOSOS ARGENTINOS

Tesis presentada para
optar al título de Doctor en Ciencias
Químicas, por Homero José Chamorro

LA PLATA

1968

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi profundo agradecimiento, a mis directores de tesis, Dres. Teodoro G. Krenkel y Enrique Pereira, por haberme sugerido el tema, colaborado y orientado en la realización del mismo, y al Dr. Jorge J. Ronco, por su desinteresado apoyo, para la ejecución del mismo en los laboratorios bajo su dirección.

Asimismo, agradezco al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, por haber subsidiado mediante una beca de perfeccionamiento, la realización del presente estudio; a Cerámica Haedo S.A., que me facilitara la utilización del plasticímetro según Pfefferkorn, y al Instituto Nacional de Tecnología Industrial, que me cediera en préstamo el plasticímetro 405, según Liassis.

Mi especial reconocimiento al Dr. Alfredo Calvelo, que colaborara con entusiasmo en la deducción y desarrollo de las fórmulas teóricas.

A todos, muchas gracias.

La Plata, Julio de 1968

<u>INTRODUCCION</u>	1
1. <u>ANEXOS BIBLIOGRAFICOS</u>	
1.1. Generalidades	2
1.2. Determinaciones experimentales de la plasticidad	7
2. <u>PASTE EXPERIMENTAL</u>	
2.1. Identificación de las muestras	14
2.1.1. Análisis térmico diferencial	15
2.1.2. Análisis por difracción de rayos X	16
2.2. <u>Determinaciones experimentales de la plasticidad</u>	
2.2.1. Método de Pfefferkorn	17
2.2.2. Uso del plasticímetro 405, según Lincoln	24
2.2.3. Relación entre los resultados	28
2.3. <u>Valor de fluencia, su importancia y cálculo</u>	34
2.3.1. Uso del reómetro de extrusión de Durrell-Sovers	41
2.3.2. Relación entre los resultados obtenidos por el método de Pfefferkorn y mediante el reómetro de extrusión.	
2.3.2.1. Determinaciones preliminares	46
2.3.2.2. Relación entre la presión de extrusión, el valor de fluencia y la viscosidad de un sistema arcilla-agua	50
2.3.2.3. Determinación de la viscosidad de pastas	52
2.3.2.4. Relación entre valores de fluencia y presiones de extrusión para velocidad igual a cero	56
3. <u>RELACION ENTRE EL VALOR DE FLUENCIA Y LA PLASTICIDAD SEGUN PFEFFERKORN Y CONCLUSION GENERAL ACERCA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS</u>	59

PLASTICIDAD REAL DE MATERIALES ARCILLOSOS ARGENTINOS

INTRODUCCION

El presente estudio, realizado a los efectos de ser presentado para optar al título de Doctor en Ciencias Químicas, de acuerdo con el plan de tesis que oportunamente se elevara a la consideración del Sr. Decano, comprende la determinación de la propiedad denominada plasticidad, en pastas formadas por agua y arcillas de utilización industrial, por medio de ensayos físicos con los plasticímetros según Pfefferkorn y Linacia, y el réómetro de extrusión de Barrell-Severs. Estos equipos permiten el cálculo de valores íntimamente ligados con la plasticidad, y mediante el análisis de los resultados obtenidos se lograron fórmulas que relacionan diversos métodos y factores que determinan el comportamiento plástico de las pastas estudiadas.

La identificación de las arcillas seleccionadas del total de muestras recibidas para efectuar las determinaciones de plasticidad fue realizada mediante análisis térmico diferencial, calorimetría dinámica y análisis por difracción de rayos X.

1. ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS

1.1. Generalidades

La plasticidad es una propiedad exhibida por sistemas sólido-líquido que evidencian una deformación permanente producida por un esfuerzo. La magnitud de esta deformación es proporcional al esfuerzo causal y permanece invariante al retirarse éste.

Las características de las pastas arcillosas son tales que el esfuerzo necesario para producir una deformación en las mismas debe sobrepasar un cierto valor mínimo, que se denomina valor de fluencia. Un esfuerzo inferior al valor de fluencia no produce ninguna deformación, ya que el sistema se comporta como un rígido-elástico.

Con respecto a la naturaleza de la plasticidad existen diversas teorías, algunas de las cuales no son concordantes.

Norton (33), sugiere que las únicas fuerzas que intervienen en una masa plástica son las siguientes: fuerzas repulsivas entre las partículas sólidas que tienden a separarlas, y las que corresponden a la tensión superficial del agua, que tratan de mantenerlas unidas. Con una plasticidad máxima, la película acuosa ocuparía solamente los capilares finos entre las partículas individuales y el sistema se comportaría como una membrana estirada. Mayores cantidades de agua harían disminuir la tensión superficial, como así también la fuerza que mantiene unidas a las partículas. Bajos porcentajes de agua, provocarían la ruptura de la capa que envuelve a las partículas y de ese modo la plasticidad sería destruida.

Otros investigadores han señalado que esta teoría de la non-

brana estirada no tiene en cuenta ni ofrece explicación del comportamiento de electrolitos agregados al sistema, que pueden transformar un sistema plástico en un líquido fluido, sin ningún cambio en el contenido de agua.

Un concepto de plasticidad, basado en la definición dada por Wilson (50), que señala al producto del valor de fluencia por la deformación máxima, como una medida de la trabajabilidad (sinónimo de plasticidad), fue utilizado en experiencias llevadas a cabo por Kingery y Franci (24). Estos investigadores establecen que la trabajabilidad y el valor de fluencia aumentan cuando mayor es la tensión superficial de soluciones acuosas de diversos aditivos activadores de superficie, de tipo aniónico y catiónico. Indicaron además que la trabajabilidad era una función lineal de la tensión superficial.

Estos discutibles conceptos son interpretados con la teoría de la membrana desarrollada previamente por Horton (op.cit.), para arcillas y otros materiales. Sin embargo, Leary (32), hizo críticas acertadas con respecto al significado correcto de "deformación máxima" y de la interpretación de la trabajabilidad en los experimentos llevados a cabo por Kingery y Franci.

Mas recientemente, Ormsby (35) criticó la teoría de la membrana estirada de Horton y especialmente las conclusiones de Kingery y Franci, a partir de mediciones de trabajabilidad y su modificación por surfactantes, en particular. Ormsby extendió la serie incompleta de agentes humectantes usados en las experiencias de Kingery, por medio de una elección mas sistemática de sustancias de

superficie activa. La conclusión de que la tensión superficial sería el factor esencial para modificar las propiedades de trabajabilidad es refutada por los datos adicionales de Crasby, quien llegó a la conclusión de que, aunque la teoría de Norton, original e modificada por otros autores, era aceptable en forma general, el hecho de que los surfactantes no iónicos y los catiónicos produjeran sistemas flocculados, mientras que los agentes aniónicos condujeran a sistemas deflocculados, era una clara indicación de que las fuerzas atractivas y repulsivas de estos sistemas eran de naturaleza electrocinética y de que las interacciones iónicas entre la arcilla y los líquidos podían alterar esas fuerzas, de modo de producir cambios en la deformación, floculación y sedimentación. Estas fuerzas serían decisivas por sí solas, y la tensión superficial e fuerzas debidas a la misma, no tendrían importancia primordial cuando se consideran las propiedades plásticas.

La naturaleza fisicoquímica de los fenómenos de plasticidad, en su compleja multiplicidad, fue extensa y exhaustivamente discutida por Gruner(20), quien llega a la conclusión de que en sistemas de fases sólido-líquido (como en típicos barro arcillosos), los principales contribuyentes al desarrollo de propiedades plásticas son las fuerzas químicas, unidas a factores físicos y cristalográficos. La hidratación de la superficie del cristal, de partículas de minerales arcillosos, complementada con la adsorción iónica (teniendo en cuenta el carácter bidimensional de estos minerales), es aparentemente la razón principal para que se observen propiedades plásticas, en sistemas de óxidos y silicatos con agua.

Gruner distingue tres tipos de comportamiento plástico. Los sistemas verdaderamente plásticos, que son consecuencia de reaccio-

nos de superficie entre fases sólida y líquida; en una mínima proporción es una propiedad química del sistema involucrado pero puede incrementarse en amplios términos por factores físicos en el estado de la fase sólida, por ejemplo, por efecto del tamaño de partícula (si los microcristales están dispersos en partículas de dimensiones coloidales), o por propiedades especiales de hábito del cristal, en microcristales (como en el caso de minerales arcillosos cristalinos), variables en un amplio margen. Los silicatos con estructura típica de capas, muestran una plasticidad verdadera, particularmente bien desarrollada, como consecuencia de su geminación de una fase líquida.

La plasticidad puede ser también consecuencia de procesos o de la acción de adiciones que generan o refuerzan reacciones de superficie activa. La condición principal que se debe cumplir para la acción de procesos auxiliares es el aumento del carácter hidrofílico de las superficies por parte de los materiales absorbidos.

El tercer tipo de comportamiento plástico, denominado por Graner plasticidad ficticia, se evidencia cuando las partículas sólidas de un tamaño dado están contenidas en líquidos o geles altamente viscosos o adhesivos.

Según Haase (21), la plasticidad estaría definida como la capacidad de un sólido para reaccionar con fuerzas externas deformándose permanentemente, sin perder la cohesión entre las partículas elementales. La plasticidad correspondería a la relación entre la fuerza de tracción y la viscosidad. Considera que durante el rápido moldeado de cuerpos cerámicos, su plasticidad es mayor debido a la disminución de la viscosidad con el aumento de la velocidad de de-

formación.

Marshall (30), indica que no existe una base general aceptada, para la cual se haya llegado a una medición cuantitativa de la plasticidad. La mayoría de las definiciones están elaboradas de modo de incluir otros aspectos de esa propiedad, tales como el valor de fluencia y el flujo plástico. Por este motivo, en vez de medidas de plasticidad existen muchas investigaciones cuantitativas acerca de este tipo de flujo, determinadas en un rango de humedad diferente al que realmente exhibe propiedades plásticas.

Desde un punto de vista microscópico, Searle (44) considera que la plasticidad está asociada principalmente a las partículas de tamaño coloidal y por lo tanto, relacionada con los conceptos fundamentales de la micela coloidal. Cuando las partículas de arcilla están suspendidas en agua, alrededor de las micelas existe una capa de iones cargados negativamente, que están balanceados por cationes difundidos a través de la hidrósfera. Esta hidrósfera tiene un tamaño variable, que depende del número, tamaño, carga y grado de hidratación de los cationes. Los aniones dan rigidez en las uniones entre las partículas coloidales y la plasticidad se desarrolla. La aplicación de una fuerza de corte provoca el movimiento de las partículas cargadas, pero rápidamente se forma otro sistema igualmente estable, que retiene su nueva forma una vez desaparecido el esfuerzo.

La plasticidad estaría relacionada con la formación de películas de agua de un cierto espesor, alrededor de cada gránulo. Si la cantidad de agua fuera mayor que la requerida, el "agua li-

bre* permitirá el flujo, con una consiguiente reducción de las propiedades plásticas. Si por lo contrario, el contenido de agua fuera muy bajo, las partículas individuales se tocarían y la plasticidad quedaría destruida.

Scharrer y Hofmann (42) determinaron el comportamiento de una pasta arcillosa en función del contenido de agua mediante análisis de los valores de tracción y extrusión de la misma, los que brindan un nuevo criterio de la plasticidad. Las mediciones de las fuerzas de tracción y de la deformación, dan una información mas completa del comportamiento plástico de las pastas de arcilla-agua.

También Baudran y Bordin (9), efectúan una reseña crítica que indica la invalidez de cualquier método que lleve al cálculo de la plasticidad mediante un solo parámetro y la necesidad de evaluar esta propiedad como la relación de un esfuerzo con la deformación.

Con respecto a los factores que afectan a la plasticidad y las propiedades asociadas a la misma, un análisis de las consideraciones bibliográficas, llevado a cabo por Carlo y Crinshaw (44), y limitado al sistema arcilla-agua, permite destacar en forma característica a los siguientes: contenido de agua del sistema, tamaño de las partículas de arcilla (distribución granulométrica), composición de las partículas, forma y estructura de las partículas, orientación de las partículas e historia previa del sistema.

1.2. Determinaciones experimentales de la plasticidad.

La diversa variedad de equipos que han sido utilizados para determinar la plasticidad, puede dar una idea de la complejidad en señalar con exactitud esta propiedad y las características asocio-

das con ella. Los criterios y determinaciones físicas modificadas y perfeccionadas a través del tiempo, han intentado la obtención de valores cuantitativos representativos de la plasticidad de las pastas procesadas, en algunos casos mediante un valor o índice, y en otros mas complejos, mediante el estudio de mas de una variable considerada representativa del comportamiento plástico de una pasta formada por arcilla y agua.

Una síntesis de los equipos utilizados y de los métodos empleados fue preparada por Moor (13).

Un método tradicional que pese a su antigüedad es todavía utilizado, en especial en el estudio de las características plásticas de suelos, fue propuesto inicialmente por Atterberg (7, 8). Aunque este método sufrió posteriores modificaciones en las determinaciones experimentales, introdujo la idea de constantes que definían el rango de humedad en el cual se observaban propiedades plásticas y dio de este modo una expresión cuantitativa a la plasticidad, indicada por un índice.

El índice de plasticidad de Atterberg se obtiene mediante la determinación de dos contenidos de agua en la pasta en ensayo. El límite plástico superior,⁺ que Atterberg denomina límite de adhesión, indica el máximo contenido de agua con el cual la muestra procesada exhibe comportamiento plástico. Una humedad mayor haría a la pasta muy fluida para que fuera trabajable. El límite plástico inferior,⁺⁺ denominado por Atterberg "rolling out limit", indica la mínima cantidad de agua que la pasta puede contener para evidenciar propiedades plásticas. También se lo denomina lími-

⁺ ó "límite líquido".

⁺⁺ llamado también "límite plástico".

te de cohesión, ya que si la cantidad de agua disminuyera, desaparecería la cohesión entre las partículas de la pasta y no se produciría una deformación, sino la ruptura de ésta, al ser sometida a esfuerzo.

La diferencia entre el porcentaje de agua correspondiente a cada uno de los límites da el número de plasticidad o índice de plasticidad de Atterberg. Este autor propuso la clasificación de las arcillas en cuatro clases, de acuerdo con los valores de sus índices de plasticidad:

<u>Tipo de arcilla</u>	<u>Índice de Atterberg</u>
Clase I	17 - 27
Clase II	5 - 15
Clase III	4 - 7
Clase IV	0 - 1

Como ya lo señalara Rieke en 1911, los número de Atterberg se correlacionan muy bien con el poder de unión de las partículas mas que con la plasticidad. El número de Atterberg no describe completamente la plasticidad pero define el rango de agua en el cual el material exhibe esta propiedad.

Este método fue perfeccionado por Casagrande (16), quien introdujo un dispositivo para determinar con mayor exactitud el límite plástico superior. La importancia fundamental de este método perfeccionado radica en la reproducibilidad de los resultados obtenidos, especialmente en el estudio de suelos, y en la simplicidad de las determinaciones.

Pfefferkorn (37) ideó un plasticímetro mediante el cual se deforma un cilindro normalizado, confeccionado con pastas arcillo-

ses con distintos porcentajes de agua. La humedad correspondiente a una deformación determinada, indica el índice de plasticidad según Pfefferkorn. Cuando mayor es este valor mas plástica se considera la arcilla.

Aunque este método tiene en cuenta en forma fundamental la cantidad de agua que puede aceptar una arcilla, la curva resultante de los valores de deformación en función de la humedad, proveen una información mas completa del comportamiento de la misma. Este método ha sido utilizado en la parte experimental del presente trabajo.

Entre los ensayos de tracción, se pueden considerar los descritos por Hind y Degg (22), (23), y por Macey (28). Este último señala que la extensión para un esfuerzo máximo E_m no puede ser tomada como un criterio de plasticidad, ya que E_m varía con la velocidad de aplicación del esfuerzo, de modo que no puede ser el único dato significativo que represente la plasticidad.

Hind y Degg (o. c. cit.) realizaron también ensayos de compresión. Esta clase de ensayos ha sido adoptada principalmente en mecánica de suelos. Mason (31), confeccionó un aparato muy simple para medir la compresión.

En el caso de pastas cerámicas, han sido mas utilizadas las pruebas de torsión. Los aparatos usados varían en detalles. Horton (34), presentó un equipo de cuyos ensayos derivó un "factor de trabajabilidad", definido como el producto del valor de fluencia por la deformación máxima, que muestra un valor máximo para un

cierto contenido de agua, que Norton consideró óptimo para la plasticidad de la masa. Existe evidencia de que el valor de fluencia y la deformación máxima están muy relacionados, sino linealmente, en forma aproximadamente lineal, en ciertos rangos de contenidos de agua.

El plastógrafo de Brabender es un aparato muy difundido (47) desarrollado por primera vez por Thiess (46). Fue también utilizado por Marshall (29), y en una versión modificada, por Vest y Laurence (48). Consiste en una cámara de mezclado donde se mide y registra eléctricamente, en unidades arbitrarias, el torque desarrollado por las pelotas que rotan en forma continua en la masa plástica. El registro se realiza con alta sensibilidad y el desarrollo de la tixotropía se hace mínimo debido a que no hay un período de relajamiento entre el mezclado y el ensayo. Por medio de agregado de agua a la arcilla en el mezclador, es posible obtener un gráfico completo de consistencia en función del contenido de agua y determinar la trabajabilidad óptima de la pasta.

Atci (18) recomienda este equipo, como el instrumento más conveniente para determinaciones prácticas de la plasticidad. Sin embargo, Moor (13) señala algunos inconvenientes provocados por fricción generada entre la arcilla y la parte estática del mezclador. Lindeis también criticó el plastógrafo, en particular por la dificultad de incorporar agua uniformemente durante el ensayo.

El Bureau of Standards (6) aconseja el uso de un método de compresibilidad, basado en medidas físicas estandarizadas, que también se distingue por la reproducibilidad de sus valores, aunque pe-

rece mas adecuado a mecánicas de suelos, que a pastas para uso cerámico.

Los ensayos de esfuerzo de corte (shear test), utilizan lo que se denomina "shear box". Tienen mucha aplicación en mecánicas de suelos y fueron usados originalmente por Hooke (39). Para un trabajo de aplicación en arcillas, Kingery y Franol (24) utilizan el mismo procedimiento. Según Bloor (13) este ensayo no puede estar libre de algunos efectos de estiramiento de la muestra y es factible que los bordes de la barra de arcilla sufran algunas fallas. No obstante se obtienen curvas de esfuerzo-deformación similares a las provenientes de ensayos de torsión.

Existen algunos ensayos físicos consistentes en cortes o hendiduras en pastas arcillosas, citados por Bloor (op.cit.), aunque es cuestionable que permitan la determinación de las propiedades plásticas de las mismas.

Kieck (38) utiliza un índice que se obtiene restando el valor correspondiente a la humedad en el límite plástico inferior del ensayo de Atterberg (pag. 9) al índice de plasticidad de Pfefferkorn. Este índice se calcula en un trabajo de Rosenthal (40), donde se relacionan valores de plasticidad utilizando diversas técnicas, y también es calculado en la parte experimental del presente trabajo.

Linceis (25),(26),(27), diseñó un equipo para ensayos de tracción y extrusión, que fue utilizado posteriormente por Scharrer y Hofmann (42) con resultados satisfactorios. Dado que un equipo similar se utilizó en el presente trabajo, en la parte experimental se

detalla el funcionamiento del mismo y las ventajas e inconvenientes que presenta.

Para determinar valores de fluencia y otras propiedades relacionadas con la plasticidad, Owen y Durrell (36) confeccionaron un equipo donde se somete una pasta a extrusión por presión de un gas inerte, a través de una boquilla cilíndrica. Un equipo de funcionamiento similar, denominado redómetro de extrusión de Durrell-Severs, se utiliza en la parte experimental del presente trabajo, con los mismos fines.

En 1961, Astbury y Moore (1) presentaron un criterio original para determinaciones del comportamiento plástico de pastas cerámicas, mediante un equipo que permite someter a las mismas a un esfuerzo cíclico sinátrico de torsión.

Astbury y sus colaboradores realizaron varios trabajos con el equipo señalado (2),(3),(4). Una síntesis de los mismos, con conclusiones generales, apareció recientemente(5). Astbury considera que los experimentos llevados a cabo confirman el hecho de que las propiedades plásticas de una pasta cerámica se deben a dos efectos distintos: una plasticidad intrínseca basada en las características propias del material; y una plasticidad extrínseca, basada en el contenido de agua de la pasta. Analiza el comportamiento de varias arcillas y otros materiales que exhiben plasticidad, considerando las curvas de histéresis obtenidas mediante el procesamiento con el equipo señalado. Por este motivo, indica que el comportamiento plástico de una arcilla no puede ser descripto por un índice solamente y que además, no existe una seguridad total de que los dos parámetros propuestos en el trabajo, sirvan siempre para hacer una des-

cripción completa del comportamiento plástico.

Dado que el equipo mencionado es mas adecuado para un laboratorio de investigación, que para un trabajo en planta, Astbury propone un plastómetro de compresión, que permita determinar dos índices. Uno de ellos representaría la plasticidad intrínseca y el otro la extrínseca.

Los resultados y las consideraciones de Astbury se discuten mas adelante en base a los datos experimentales y conclusiones logradas en el presente trabajo.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. IDENTIFICACION DE LAS MUESTRAS

Con el objeto de realizar el presente trabajo, se solicitó a proveedores y usuarios importantes de arcillas de tipo industrial, muestras de las mismas en una cantidad aproximada de 20 kilos de cada una.

Las muestras recibidas se molieron hasta pasar malla 40 IRM, luego se cuartearon y separaron fracciones para los ensayos de identificación y para las determinaciones de plasticidad.

El total de las 18 muestras recibidas (codificadas con numeración del 501 al 518), fue analizada térmicamente y por difracción de rayos X, y se determinó la plasticidad correspondiente a cada una por el método de Pfefferkorn. Por razones de volumen de trabajo, se eligieron 8 muestras representativas de arcillas en un amplio rango de valores de plasticidad, para proseguir con los ensayos posteriores.

Las arcillas seleccionadas fueron: 501 y 505, de San Julián,

Santa Cruz; 508 de Dorquino, Rio Negro; 509 de Zapala, Neuquén; 510 de Handa Castro, Neuquén; y 513, 515 y 517 de Trelew, Chubut.

2.1. Análisis térmico diferencial

Los detalles sobre la técnica empleada y la preparación de las muestras, así como del funcionamiento del equipo utilizado, se puede consultar en un trabajo anterior del autor (17).

Las condiciones de operación para los ensayos, fueron las siguientes:

Muestra: Aproximadamente 0,2 g de arcilla, molida hasta pasar malla 80 IMA, con empaquetamiento "sandwich" (una capa de muestra entre dos capas de sustancia de referencia).

Sustancia de referencia: Alúmina calcinada.

Sensibilidad de registro: 1/1 (máxima).

Velocidad de calentamiento: 10° C/min.

Temperaturas inicial y final del horno: 20°C y 1000°C respectivamente.

Fue utilizado un equipo de análisis térmico diferencial, según Schwabe, fabricado por Gebrüder Netzsch, de Selb, Alemania.

Las curvas obtenidas aparecen en las páginas A1, A2 y A3. El análisis de las mismas permite suponer que en general las muestras no están constituidas por un mineral puro, sino que se trata de mezclas en las que predominan minerales de tipo caolinitico, con cantidad variable de minerales no arcillosos, acompañados en algunos casos de materia orgánica.

La muestra 507 corresponde a una bentonita, y la 514 a una

toda liparítica, por lo cual ambas muestras fueron descartadas para la prosecución del trabajo.

Con el mismo equipo se procesaron las muestras según la técnica de calorimetría diferencial dinámica. Los registros obtenidos son semejantes a los correspondientes a análisis térmico diferencial y aparecen los mismos picos, aunque con menor sensibilidad.

2.2. Análisis por difracción de rayos X.

Los análisis se llevaron a cabo con un equipo Philips, de procedencia holandesa. Se estudiaron las condiciones óptimas de trabajo, para el caso de las muestras en ensayo, y se eligió el rango de difracción entre 1 y 50° de 2θ . Otras condiciones de operación elegidas fueron las siguientes:

Muestras sólida, en polvo, partículas molidas hasta pasar malla 100 IRAM.

Portamuestras metálico, inmóvil, permite la exposición de una superficie de polvo plana, rectangular, bien compactada.

Rayos: $X\alpha$ Cu, 40 kV y 20 mA.

Velocidad de barrido: 1° de 2θ por minuto.

Sensibilidad de registros: 200 ó 400 cuentas a fondo de escala.

Velocidad del papel: 600 mm/h (1 cm/min).

Se realizaron ensayos de difracción de todas las muestras recibidas. Dado que las de mayor importancia para el presente estudio son las 8 seleccionadas previamente, se procedió a identificar los picos más característicos de las mismas. La tabla I indica los principales tipos de minerales que las componen.

Como es posible apreciar, las muestras están formadas principalmente por caolín y cuarzo como componentes principales, y feldespatos, montmorillonita e illita como acompañantes.

TABLA I

<u>MUESTRA</u>	<u>CAOLIN</u>	<u>CUARZO</u>	<u>MONTMORILLONITA</u>	<u>FELDSPATOS</u>	<u>ILLITA</u>
501	contiene	contiene	no contiene	no contiene	no contiene
505	contiene	contiene	no contiene	no contiene	no contiene
508	contiene	contiene	no contiene	no contiene	no contiene
509	contiene	contiene	probable	contiene	contiene
510	contiene	contiene	no contiene	no contiene	probable
513	contiene	contiene	no contiene	probable	contiene
515	contiene	contiene	no contiene	no contiene	no contiene
517	contiene	contiene	no contiene	contiene	no contiene

Los difractogramas de las ocho muestras principales, aparecen en las páginas A4 y A5 del apéndice, con la indicación de los picos característicos que se señalan en la tabla I.

2.2. DETERMINACIONES EN BREVES DE LA PLASTICIDAD

2.2.1. Método de Pfefferkorn

El método de Pfefferkorn se basa en la deformación de cilindros normalizados en diámetro y altura (obtenidos con pastas de arcilla y agua), mediante la caída sobre el área superior de los mismos, desde una altura fija, de un plato rígido guiado por un vástago, con un peso total de 1192 g. Según Pfefferkorn, la plasticidad puede determinarse por el grado de aplastamiento del cilindro y esa propiedad se evidencia para cilindros que sufren una relación de deformación entre 2,5 y 4. Esta relación se obtiene dividiendo

la altura inicial del cilindro por la altura final del mismo deformado. Cuando la relación es menor de 2,5 la masa es difícil de formar, es decir está demasiado seca; si es mayor de 4, la masa se hace mas fluida. El porcentaje de agua correspondiente a una relación de deformación de 3,3 (media entre 2,5 y 4), indica cuantitativamente el índice de plasticidad. Cuando mayor es este valor, mas plástica se considera la arcilla.

Las objeciones principales señaladas a este método están basadas en que considera fundamental, como en el caso del método de Atterberg, la cantidad de agua que puede aceptar una arcilla, en el rango de humedades en que exhibe comportamiento plástico.

Es necesario tener en cuenta, que además de este factor, la variación de la relación de deformación, en función de la humedad, es representativa de las fuerzas de unión de las partículas que forman la masa plástica, dado que cuando mayores sean las fuerzas li-gantes que existan entre estas, a humedad constante, la deformación producida será menor. Este hecho, independientemente del contenido de agua, representa una característica intrínseca de la arcilla y está directamente relacionado con el comportamiento de la pasta producida por métodos mas modernos, como el plasticímetro según Lunessis, que se utiliza en posteriores determinaciones.

Para llevar a cabo las determinaciones experimentales, se utilizó un plasticímetro según Hefferkorn cedido por Cerámica Mac-do S.A., y con posterioridad, otro equipo similar, pero de dimensiones diferentes, que aparece en la figura 1.

Cada arcilla fue molida hasta pasar malla 40 IRM, y luego se le agregó agua hasta formar una pasta con una humedad ligeramente

superior a la correspondiente al límite líquido de Atterberg. Esta pasta se amasó y distribuyó sobre una superficie de yeso, a distintos intervalos de tiempo se tomaron porciones que fueron nuevamente amasadas para lograr homogeneidad, con la cuales se confeccionaron cilindros con 3 a 6 porciones de pasta de diferente humedad. Cada cilindro fue deformado en el equipo y luego se determinó la humedad de los mismos. Se graficó la relación de deformación en función de la humedad de cada muestra y se interpoló en la curva obtenida, el valor correspondiente a una relación de deformación de 3,3. El valor numérico de la humedad en la ordenada, indica el índice de plasticidad según Pfefferkorn.

Aparato para determinación de la plasticidad según Pfefferkorn



FIGURA 1

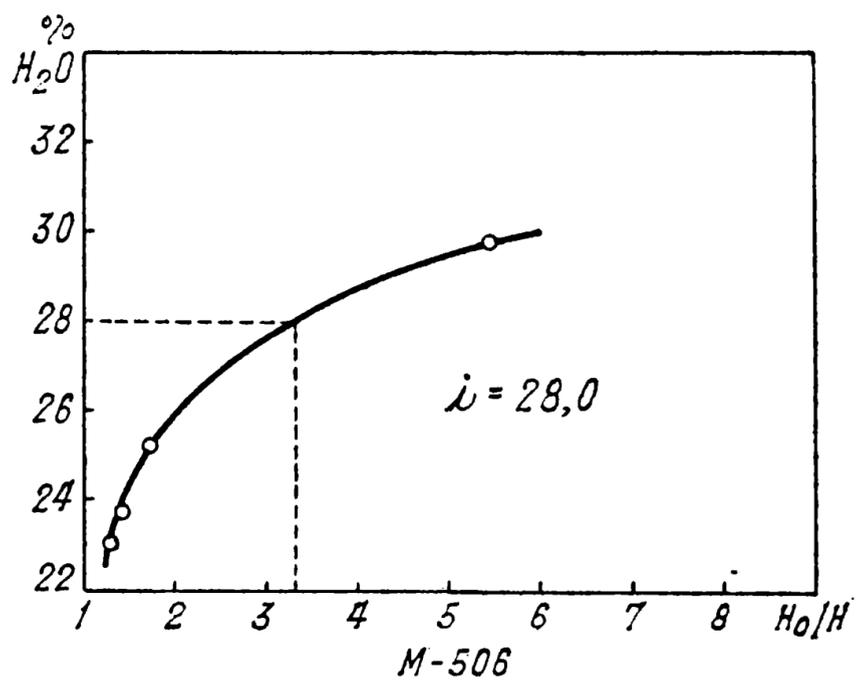
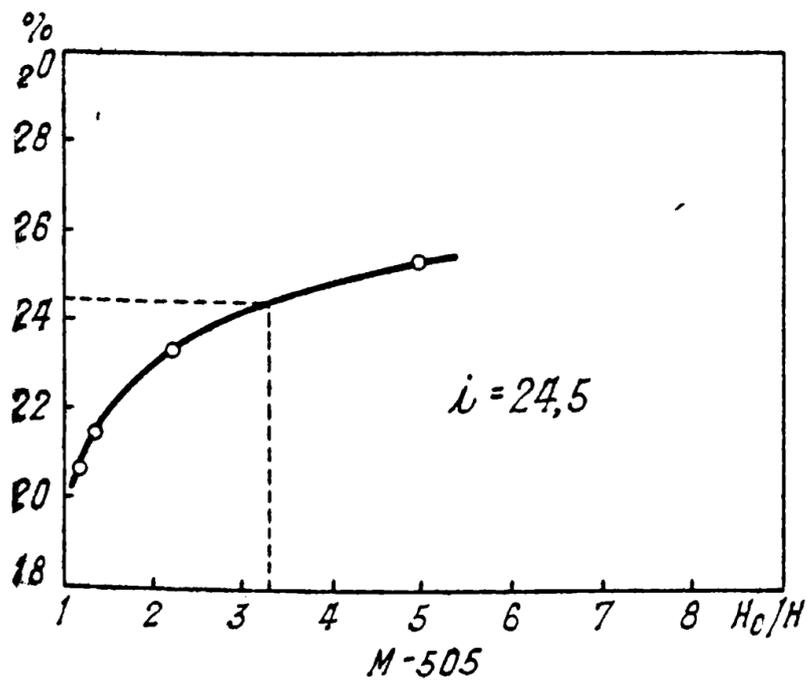
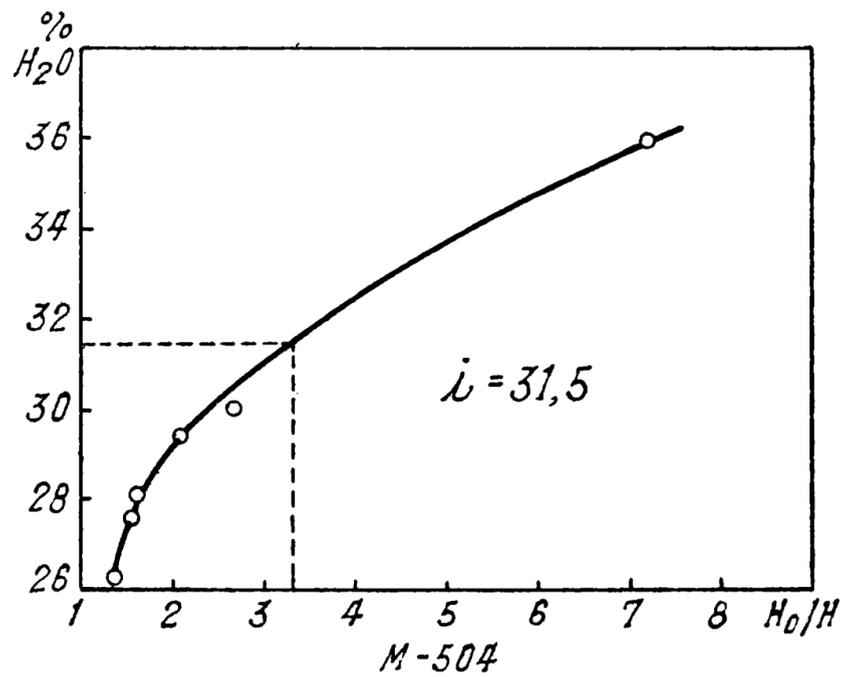
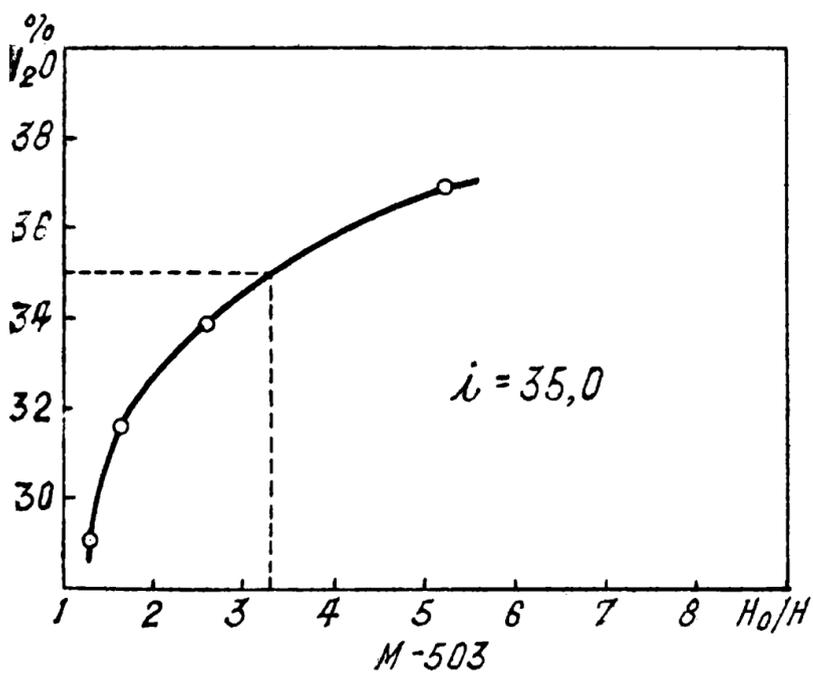
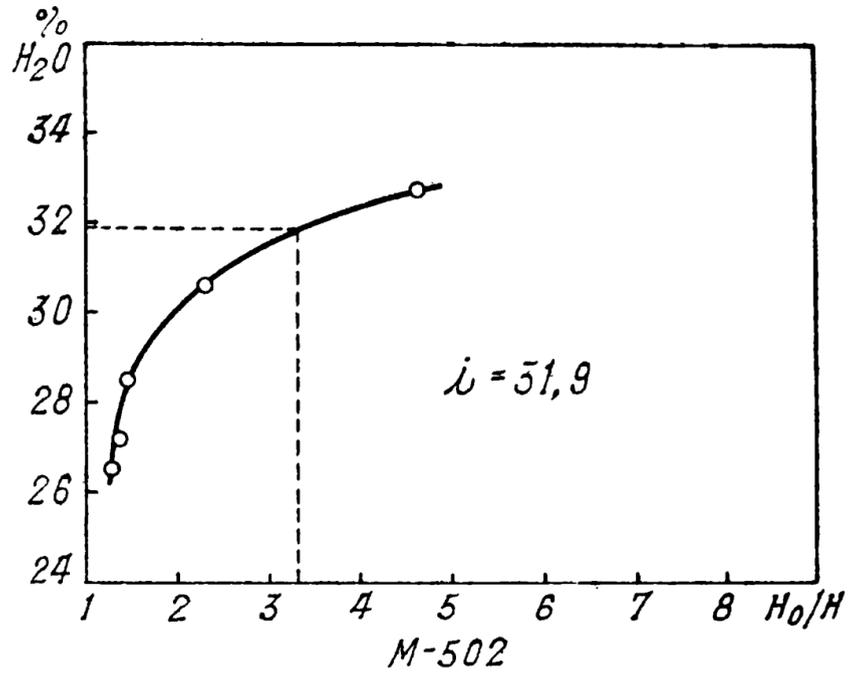
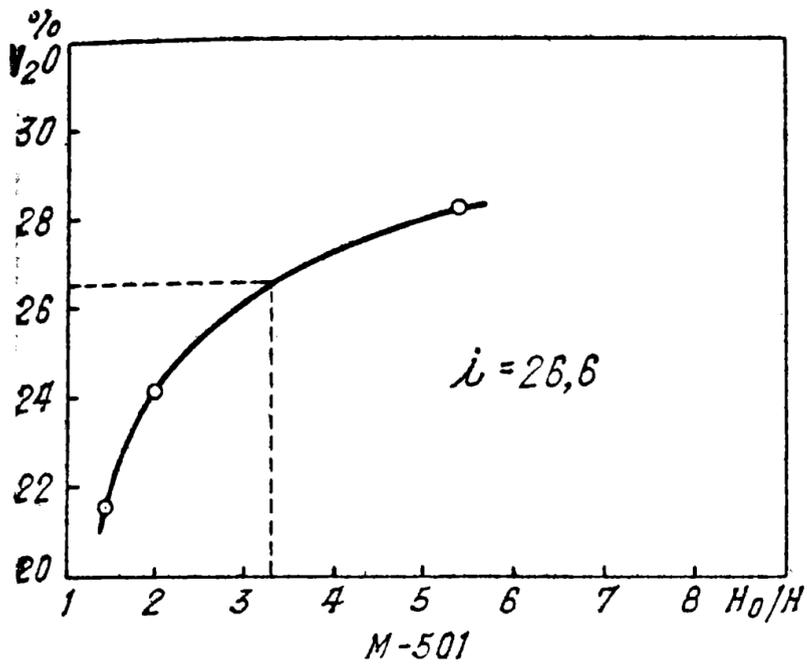
Se procesaron por este método las 18 arcillas recibidas y se determinaron los índices respectivos, que aparecen con los valores experimentales obtenidos y calculados, en las tablas I y II del apéndice. Las curvas correspondientes a cada determinación, aparecen en las páginas 21, 22 y 23.

La principal dificultad técnica del sistema consiste en la manera de confeccionar los cilindros, de modo tal que no queden burbujas de aire en el interior y presente homogeneidad en cuanto a la distribución de agua. El amasado previo permite lograr además, una total desorientación en las partículas de la masa plástica. Este factor es de importancia ya que la orientación de las partículas modifica los valores de fluencia y a la vez la resaca de la pasta al ser sometida a esfuerzo. La medición del cilindro deformado por medio de un calibre, permite reducir el error porcentual a un mínimo.

Del total de arcillas ensayadas, se seleccionaron ocho, dentro de un amplio rango de índices: 501, 505, 508, 509, 510, 513, 515 y 517. Posteriormente se determinó el índice de Atterberg a estas muestras seleccionadas. Los valores experimentales obtenidos y calculados, aparecen en la tabla III del apéndice.

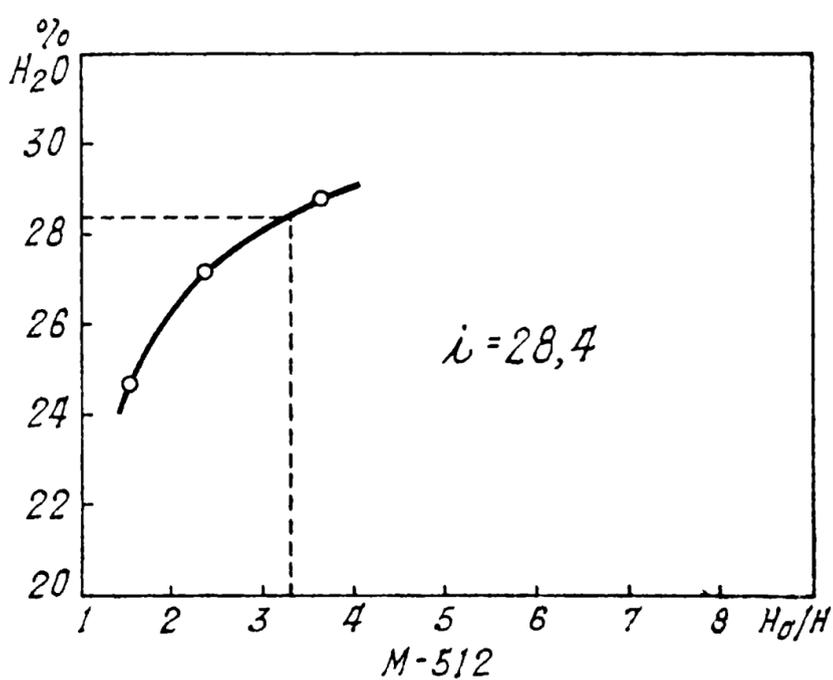
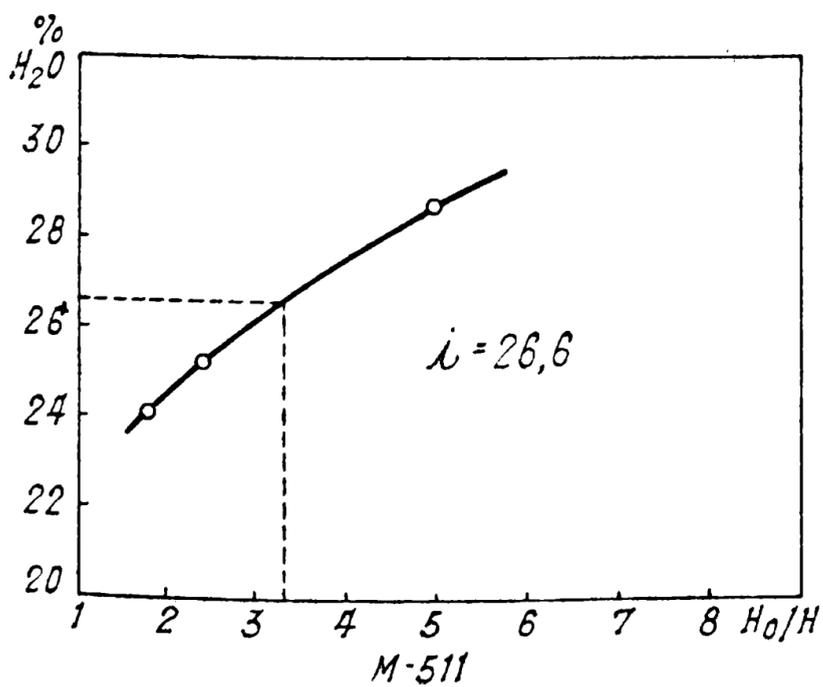
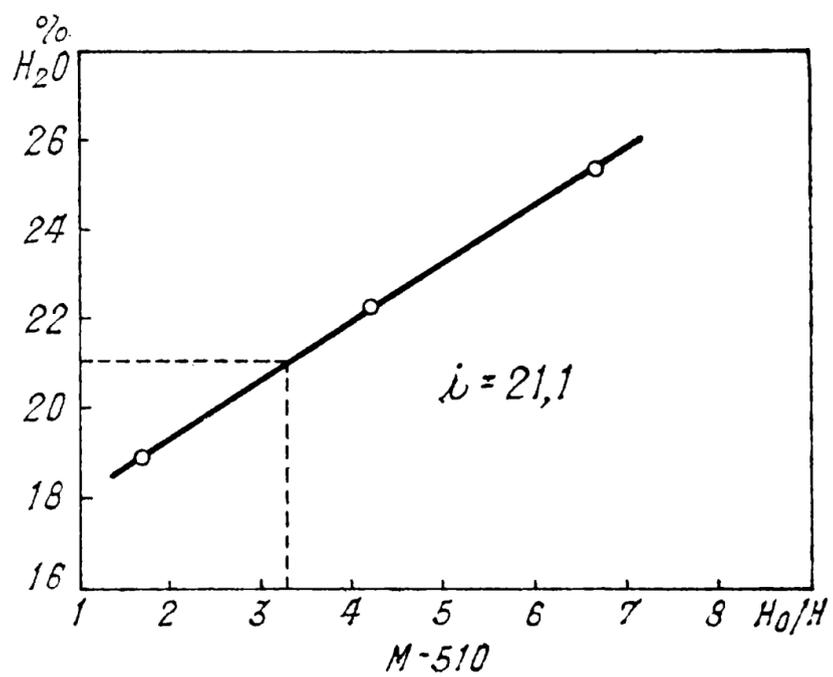
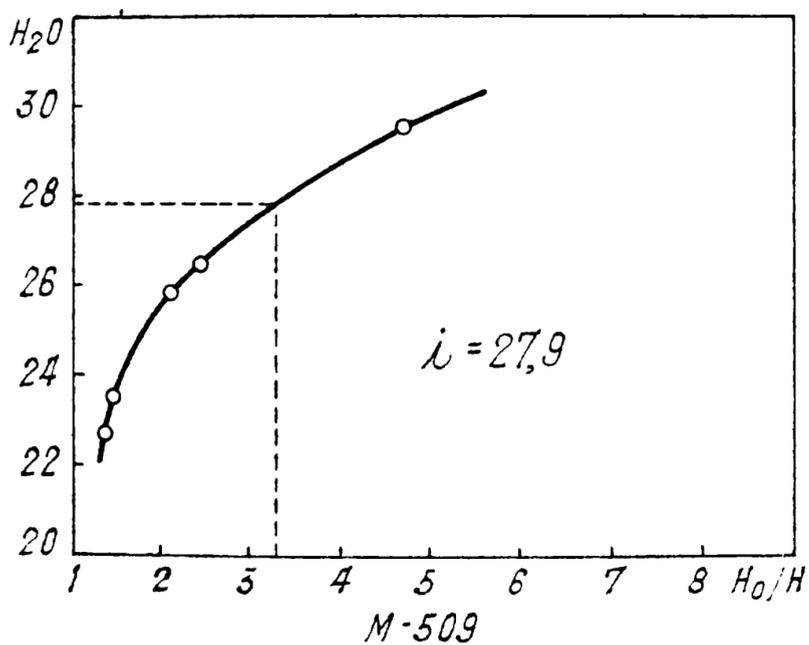
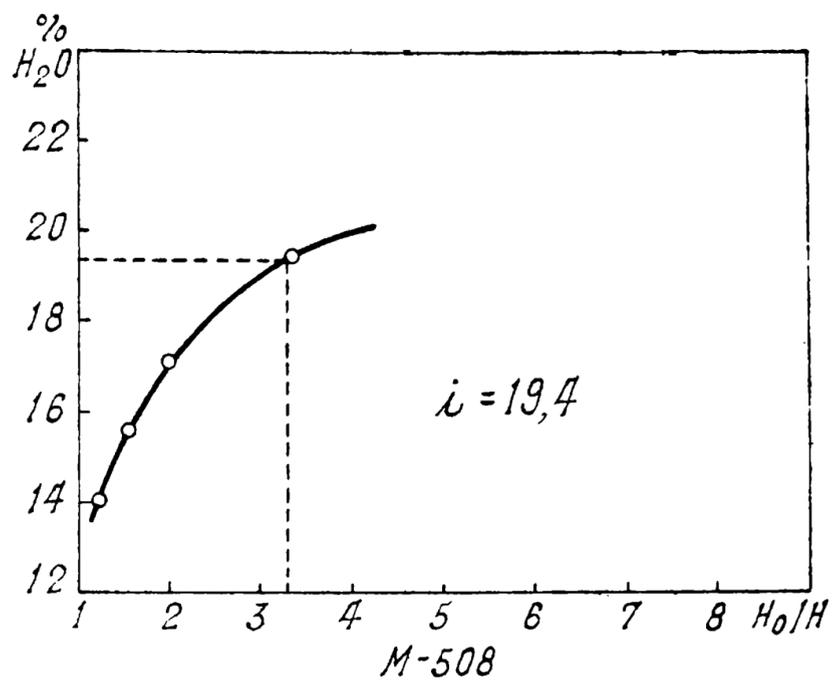
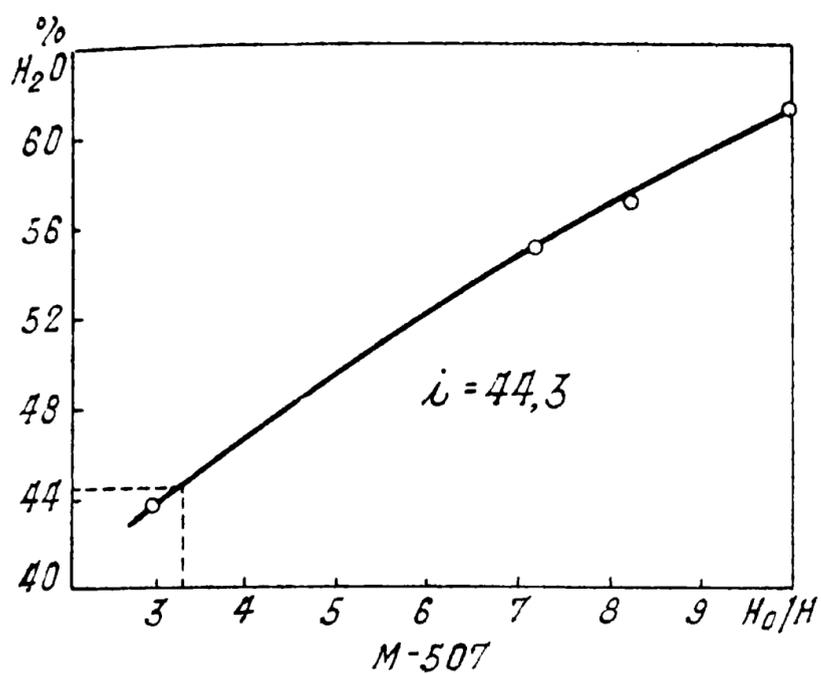
Los resultados obtenidos según el método de Atterberg, están muy relacionados con los índices de Pfefferkorn, en la mayoría de las muestras. De acuerdo con los valores numéricos, es posible ubicar a siete de las arcillas en la clase II, y a la muestra 508, mucho menos plástica que las restantes, en la clase III. Es necesario hacer notar que en las determinaciones del límite plástico superior y del límite de cohesión, el error experimental es aproximadamente

INDICES DE PLASTICIDAD DE ARCILLAS NACIONALES
SEGUN PFEFFERKORN



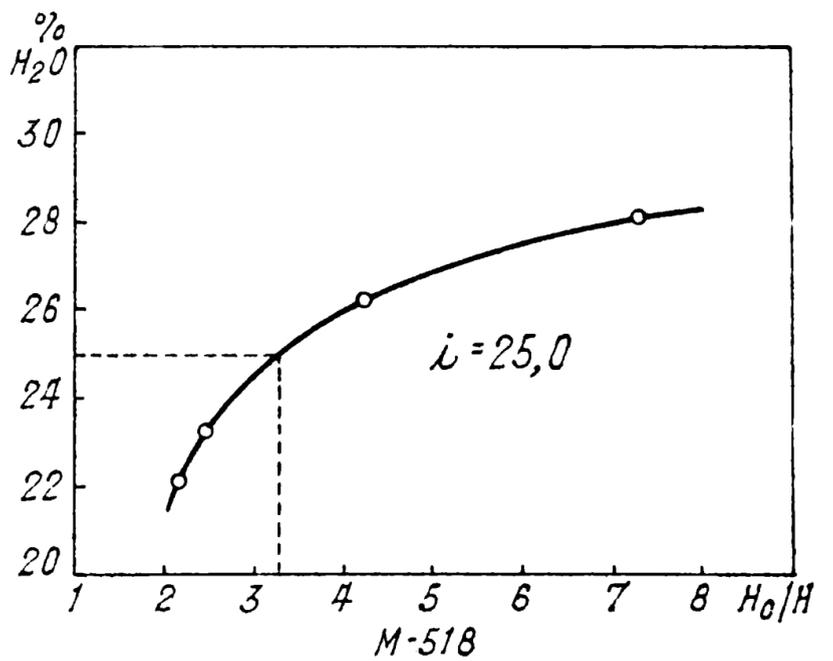
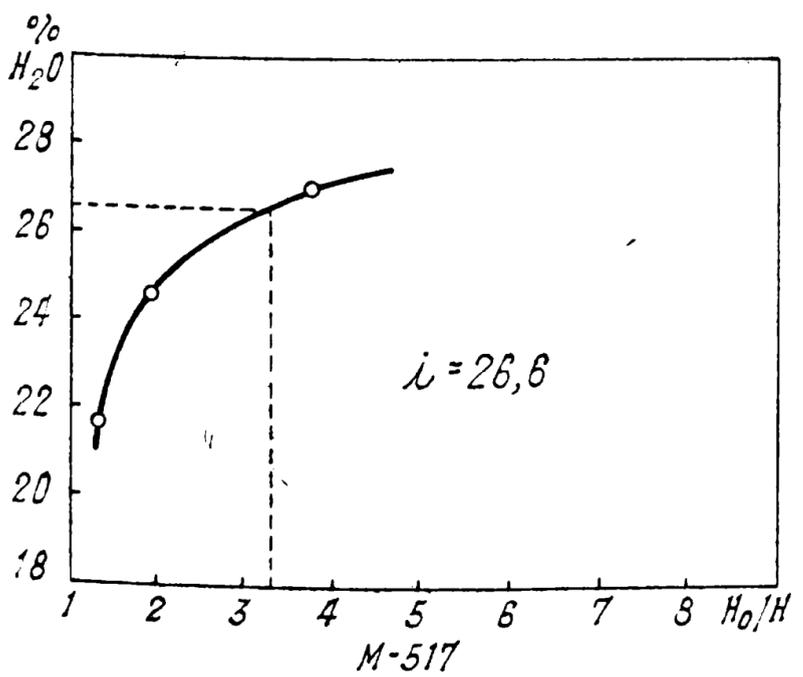
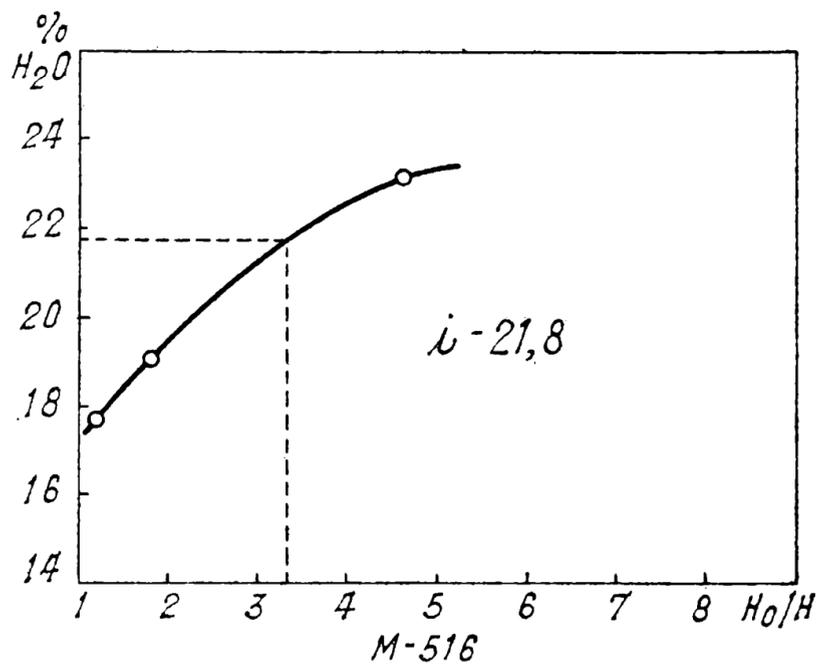
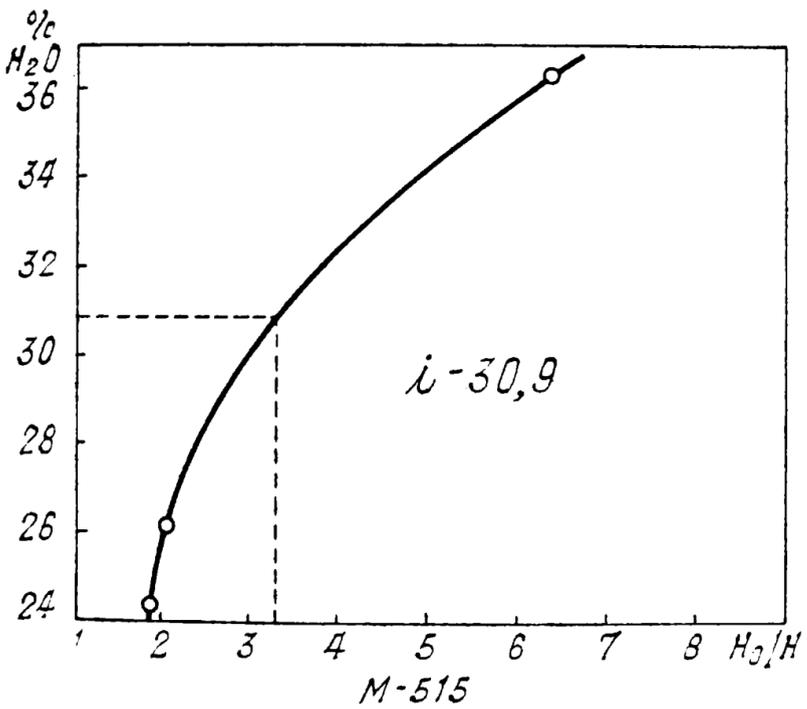
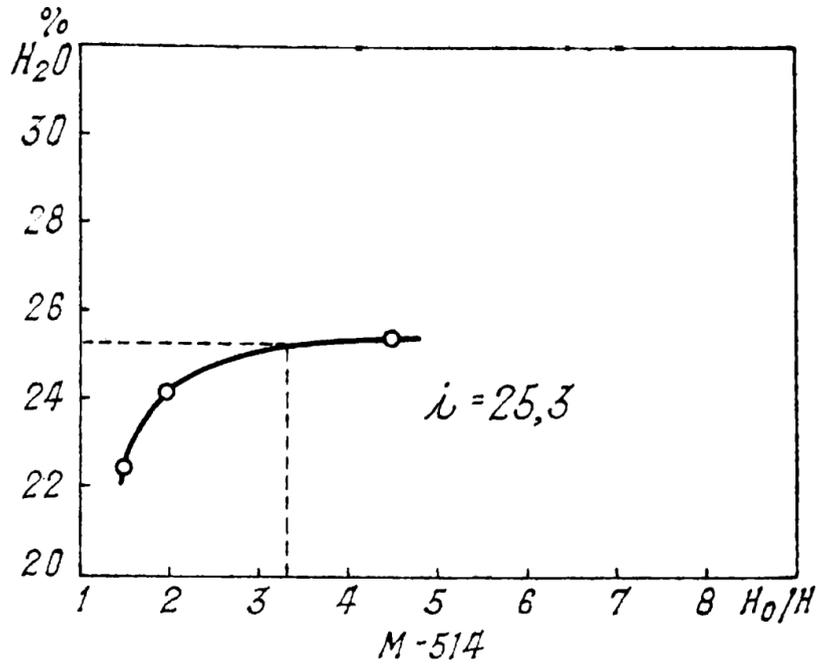
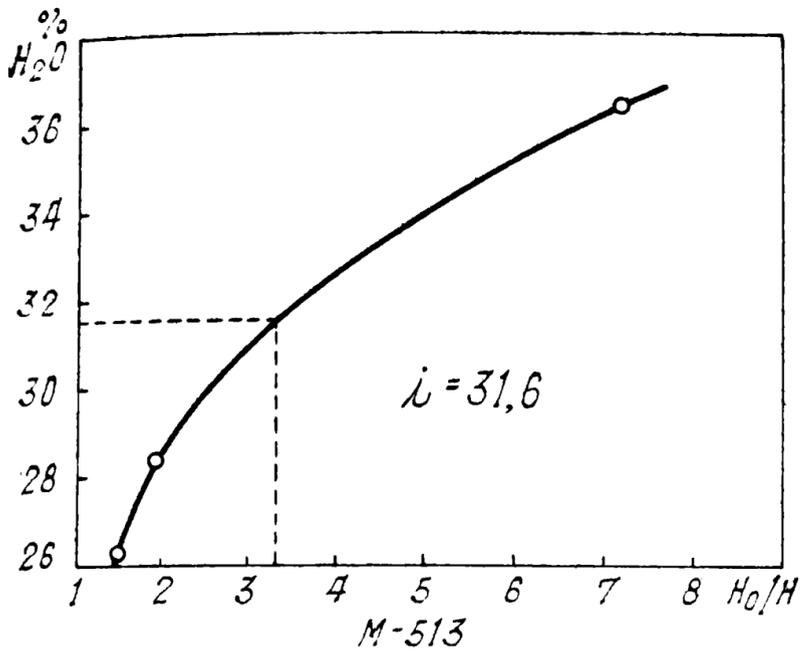
INDICES DE PLASTICIDAD DE ARCILLAS NACIONALES

SEGUN TERZAGHI



INDICES DE PLASTICIDAD DE ARCILLAS NACIONALES

SEGUN PFEFFERKORN



de una unidad, por lo cual el valor del índice tendrá un error máximo de dos unidades.

Restando al índice de Pfefferkorn, el porcentaje de agua correspondiente al límite plástico inferior (o límite de cohesión), se obtiene el índice de Rieks (página 12). Los valores obtenidos con los tres procedimientos señalados, aparecen en la tabla II.

TABLA II

MUESTRA	Índice de Atterberg	Índice de Pfefferkorn	Límite plástico inferior	Índice de Rieks
501	9,4	26,6	19,6	7,0
505	8,5	24,5	17,6	6,9
508	3,8	19,4	16,2	3,2
509	11,7	27,9	18,3	9,6
510	8,1	21,1	17,2	3,9
513	10,1	31,6	23,7	7,9
515	14,8	30,9	21,0	9,9
517	11,4	26,6	16,4	10,2

2.2.2. Uso del plasticímetro 405, según Linscis

Las muestras seleccionadas anteriormente, fueron procesadas en el plasticímetro 405, según Linscis, equipo fabricado por Hetschel Gerätebau, de Weib, Alemania, que permite someter a las pastas a ensayos sucesivos de extrusión y tracción. Estos ensayos son similares a los que experimenta una pasta arcillosa en su procesamiento industrial, en el rango de humedad en que las mismas exhiben comportamiento plástico. El equipo utilizado, aparece en la figura 2.

Desde un punto de vista práctico, una pasta debe tener una humedad máxima tal que no pueda deformarse antes de ser sometida al

proceso de moldeado y una humedad mínima que permita la deformación sin que se pierda la cohesión entre las partículas de arcilla y la pasta se rompa en vez de adoptar una forma determinada. Este rango de contenido de agua indica la zona de trabajabilidad de la muestra.

Elasticómetro 403, según Lincoln

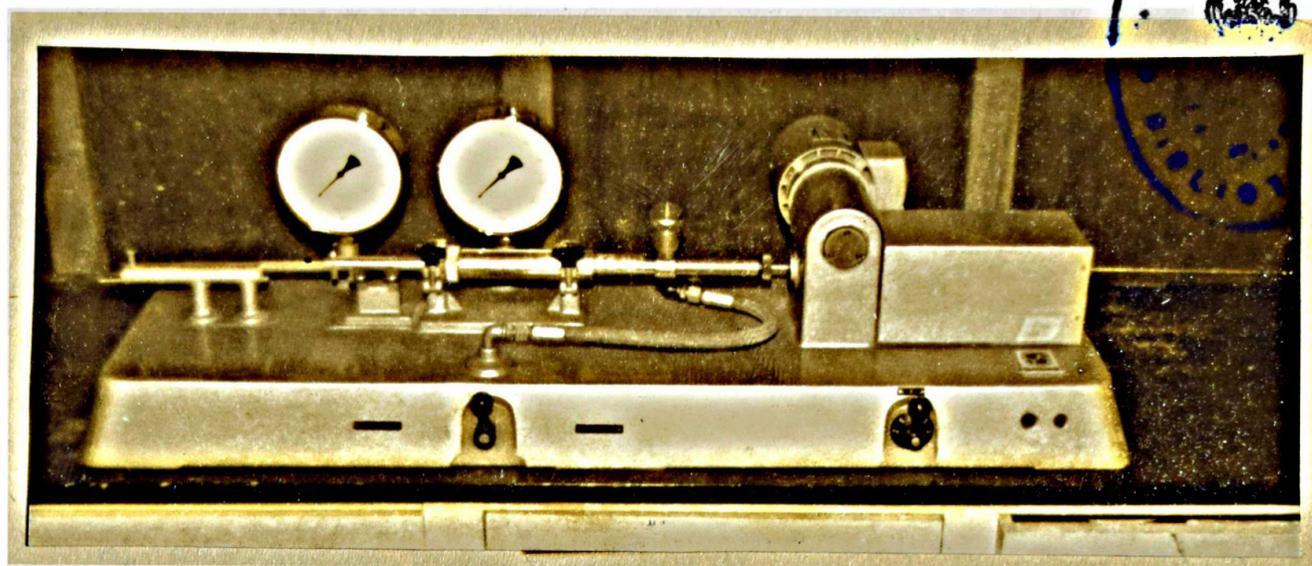


FIGURA 2

La trabajabilidad ha sido considerada por muchos autores como un sinónimo de la plasticidad, y es realmente una expresión cualitativa de las propiedades plásticas, dado que cuando mayor es el rango de humedad en el cual la muestra es trabajable, la arcilla se considera más plástica.

El equipo utilizado está compuesto fundamentalmente de un sistema de extrusión y tracción (figura 3), forrado por un cilindro de prueba *g*, con una boquilla *f* en su extremo izquierdo, y un pistón metálico *h*, que se introduce desde la derecha en el cilindro de prueba, a una velocidad constante, accionado por un motor eléctrico. La presión generada por el pistón, hace pasar la pasta a través de la boquilla en el ensayo de extrusión, y la presión necesaria se

registra en el manómetro b. Para el ensayo de tracción, la presión generada del modo anterior se registra en el manómetro a, y es utilizada en estirar una barra de arcilla e, que ha salido por la boquilla, hasta provocar su rotura.

GRUPO DEL SISTEMA PARA EXTRUSION Y TRACCION

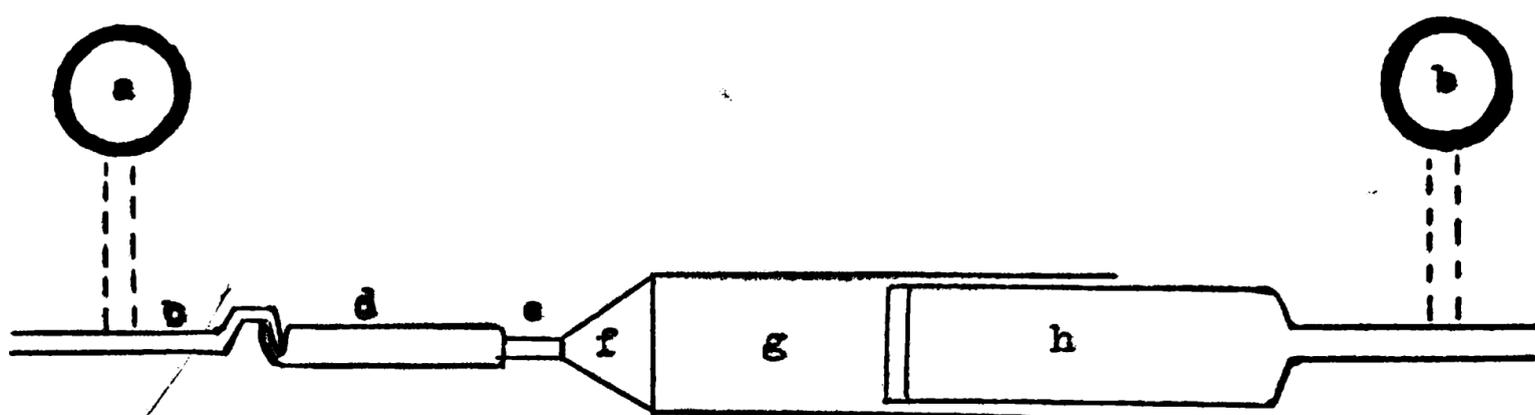


FIGURA 3

- a. manómetro para tracción
- b. manómetro para extrusión
- c. varilla que ejerce tracción sobre la parte dentro del tubo d
- d. tubo metálico para tracción
- e. barra de arcilla que se somete a tracción
- f. boquilla de extrusión
- g. cilindro de prueba
- h. pistón que ejerce presión sobre la pasta colocada en el cilindro de prueba

La pasta se prepara de modo exactamente igual a la procedida según Pfefferkorn, y una vez mezclada, se la deja durante 24 horas en ambiente saturado de humedad. Antes de ser sometida a ensayo se agita nuevamente para asegurar su homogeneidad. Cada porción (de una cantidad distinta), se coloca en el cilindro de prueba y extrúese, registrándose el valor de la presión requerida. A continuación la boquilla se fija al tubo dentro del cual se introduce muestra extruyendo nuevamente la pasta unos pocos segundos. El tubo es dest

bado y también por extrusión se procede de modo de que entre la entrada de éste y la salida de la boquilla, quede una barra de pasta arcillosa de unos 5 mm de largo (a). Se conecta entonces el dispositivo de tracción, que presiona el tubo hacia la izquierda hasta que la barra se corta. La presión necesaria, registrada en el manómetro a, se anota. Luego se determina la humedad de la pasta ensayada.

Esta operación se repite hasta obtener dos o tres valores de extrusión y tracción para una misma humedad. Se promedian estos valores y se prosigue el ensayo, reemplazando la pasta con otra porción de diferente humedad.

Todo el procedimiento se repite hasta tener promedio de valores para 3 a 8 contenidos de agua diferentes, para cada arcilla.

Se realizaron ensayos con las ocho arcillas seleccionadas previamente.

El error máximo aceptable para extrusión es de 2 a 3 kg/cm^2 , y para tracción de 0,3 kg/cm^2 . La fuente principal de error está constituida precisamente por esta poca sensibilidad de registro, para el caso de procesar pastas muy húmedas. Los datos obtenidos en un rango de humedad tal, que las lecturas sean de 6 a 8 kg/cm^2 para el ensayo de extrusión, y de 0,30 a 0,60 kg/cm^2 para tracción, deben ser tomados con reservas.

El cilindro de prueba debe lubricarse ligeramente, al igual que el pistón metálico, para que este último se desplace sin atascarse, (ya que en este caso se registraría una presión mayor que la real. La variación de humedad de la muestra, durante el ensayo de tracción y antes de ser pesada, tiene poca significación si se trabaja en un ambiente no muy seco y con una temperatura relativamente constante.

Los resultados para una arcilla con distintos contenidos de

agua se pueden expresar graficando la presión de extrusión en función de la presión de tracción. Para un determinado valor de extrusión, los valores de tracción mas altos corresponden a las muestras mas plásticas.

Otro modo de expresar los resultados incluye la variable humedad y los valores se representan en un diagrama triangular, en el que aparecen los valores de extrusión, tracción y humedad.

Una representación de la relación entre las presiones de tracción y extrusión, en función del contenido de agua, constituye otra alternativa que permite una diferenciación mas evidente de las propiedades plásticas de las arcillas ensayadas.

Los gráficos que representan los valores experimentales aparecen en las páginas 29, 30 y 31. Los valores obtenidos y calculados, aparecen en las tablas IV a VIII del apéndice.

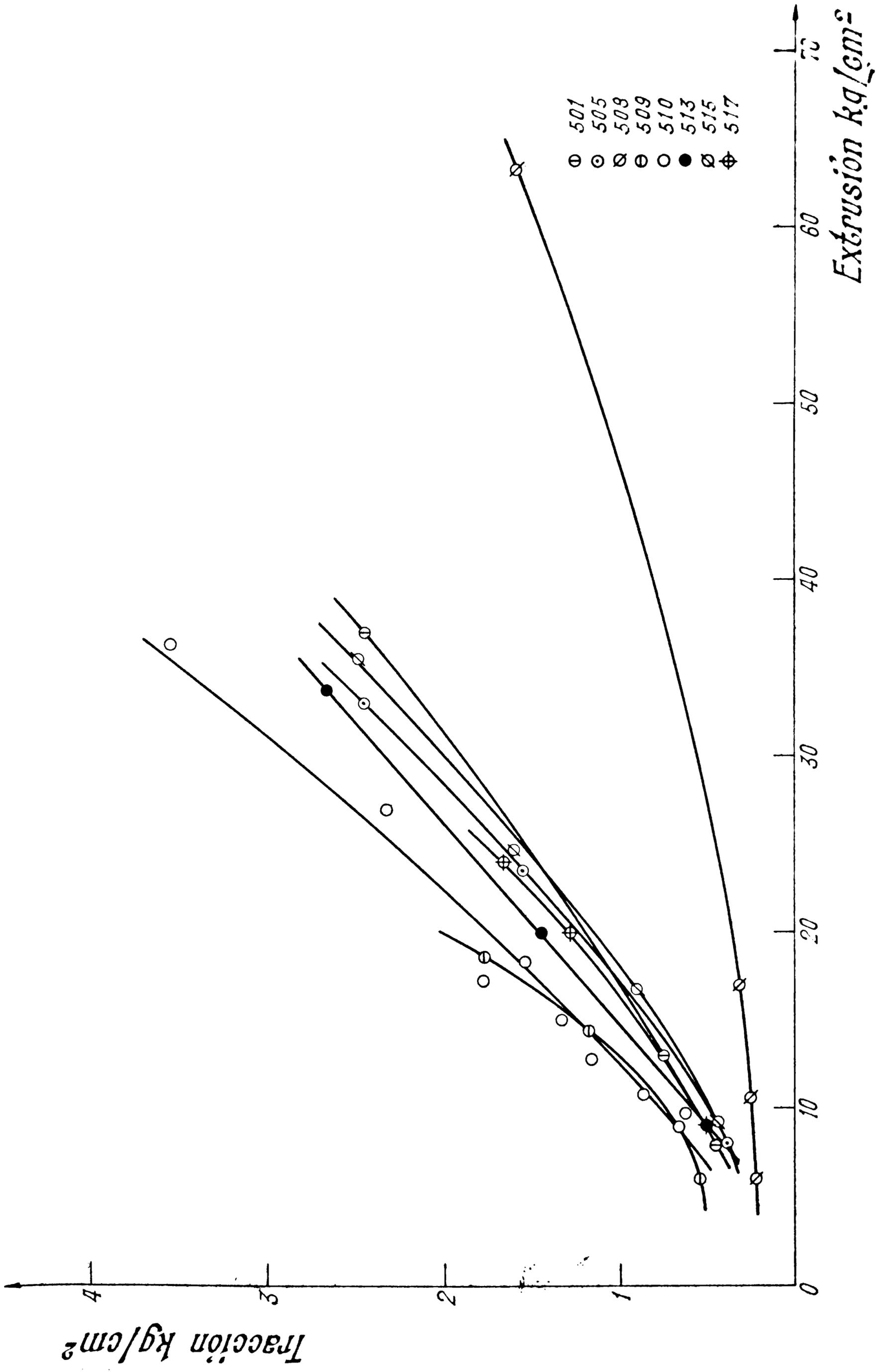
3.2.3. Relación entre los resultados obtenidos por ambos métodos

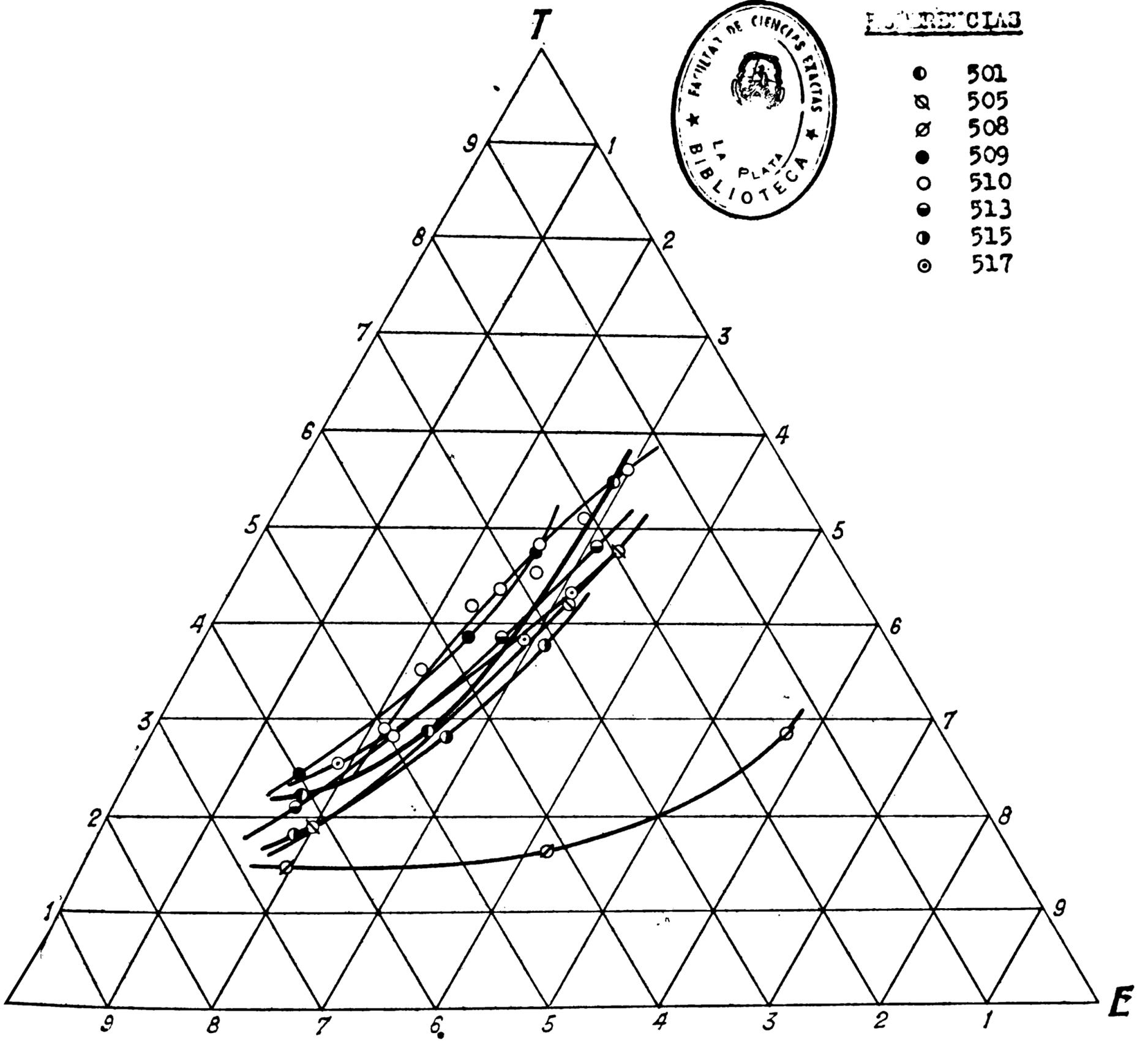
Existe una relación evidente entre ambos métodos. La plasticidad, de acuerdo con Astbury (5), puede considerarse como una propiedad resultante de dos contribuciones: una intrínseca, que depende de la arcilla y la otra determinada por la humedad de la pasta, que Astbury denomina plasticidad extrínseca.

Ambos métodos usados dan importancia similar a la humedad de la pasta, en el rango de valores en que ésta exhibe comportamiento plástico (excepte el gráfico de la página 29, representación que se considera la mas imperfecta de las tres presentadas).

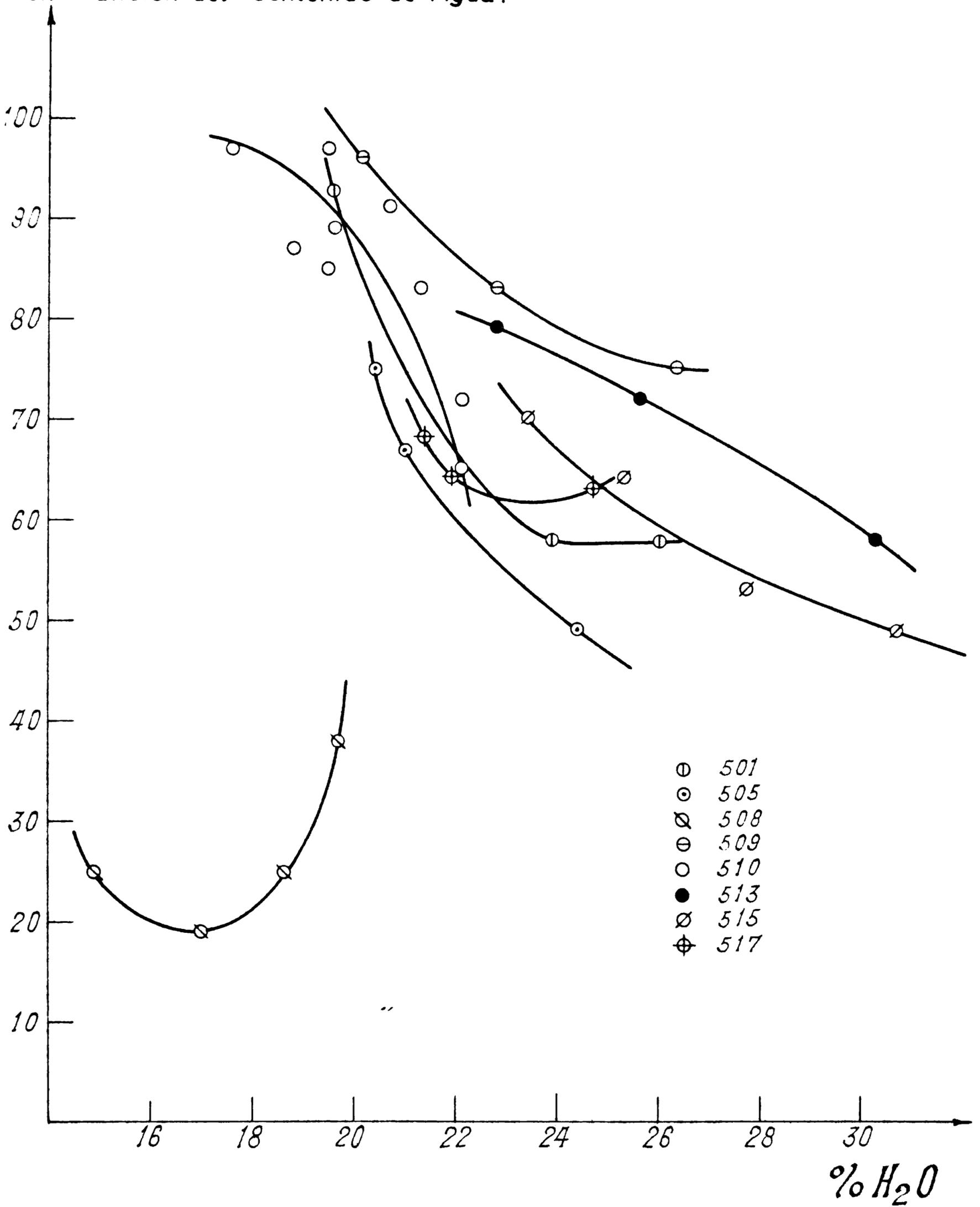
Con respecto a los valores representativos de la plasticidad intrínseca, en el método de Hefferkorn se indican por una resistencia a la deformación del cilindro de prueba, que es función del poder ligante o cohesión de la pasta. Una deformación menor, pe-

Representación gráfica de valores promedio en un Diagrama de Tensión vs. Deformación





Representación de Relación entre los Valores Promedio de Tracción y Extrusión en Función del Contenido de Agua.



acción de un peso similar, para una pasta que tenga igual humedad que otra, se traducirá en un índice de Wefferkorn mayor.

En los ensayos de tracción y extrusión aparecen las mismas características: el valor de tracción está relacionado con el poder ligante de la pasta y su resistencia a ser deformada. Dado que esta resistencia daría valores de extrusión mayores (indicación de mayor plasticidad) es imprescindible considerar la relación entre ambos ensayos físicos, de modo de adjudicar a esta facultad de deformarse, un valor realmente representativo. Este hecho pone en evidencia el motivo principal de graficar en ordenadas la relación entre tracción y extrusión, y en abscisas el contenido de agua. Este diagrama es por la razón citada, el más representativo del comportamiento real de la pasta, y por medio del mismo se puede intentar una comparación cuantitativa entre los métodos de Wefferkorn y Lincoln.

En el diagrama de tracción/extrusión vs contenido de agua, se pueden tener en cuenta tres factores: a) la forma de la curva, b) la ubicación de la misma con respecto al eje de ordenadas, y c) el rango de humedad en que se encuentra trazada (que indica aproximadamente la zona de trabajabilidad, en las condiciones de ensayo del equipo).

Los distintos tipos de curvas, el número reducido de muestras utilizadas y presumiblemente la distinta influencia de los factores indicados en la página 7, impiden llegar a una conclusión generalizada con respecto al factor forma de las curvas.

Cualitativamente, la altura sobre el eje de ordenadas a la cual la muestra es trabajable, está en relación con la plasticidad de la misma, dado que cuando mayor es la fuerza de tracción para un

mismo valor de extrusión, la plasticidad es mayor. De igual modo, para valores constantes en el eje de ordenadas, las curvas correspondientes a las arcillas mas plásticas son las que se encuentran en rangos de mayor contenido de agua.

Es posible obtener datos cuantitativos correspondientes a la ubicación de las curvas en el gráfico, tomando el punto medio de los valores en que se halla la curva, en el eje de coordenadas y de abscisas.

La importancia relativa del porcentaje de humedad (abscisa), es mayor que la del valor representado en ordenadas.

De las consideraciones anteriores se puede obtener un valor o índice representativo del comportamiento de la muestra, sumando el valor medio de la curva en la ordenada, el triple del valor medio sobre la abscisa. Este valor, que denominaremos índice 405, aparece en la tabla III, junto con los índices de Pfefferkorn obtenidos anteriormente.

TABLA III

<u>MUESTRA</u>	<u>Índice de Pfefferkorn</u>	<u>Índice 405</u>
501	26,6	144
505	24,5	129
508	19,4	81
509	27,9	156
510	21,1	136
513	31,6	148
515	30,9	141
517	26,6	135

Es necesario no sobreestimar la importancia de los valores del índice 405, que se obtuvo solo como valor representativo de comparación con el índice de Pfefferkorn.

2.3. VALOR DE FLUENCIA, SU IMPORTANCIA Y CALCULO

En el análisis de los factores físicos experimentales, consideradas con el objeto de lograr un conocimiento mas completo de la plasticidad y de las propiedades asociadas con ella, las experiencias llevadas a cabo mediante los métodos de Hefferkorn y de Lindeis (Plasticómetro 405), señalan la importancia del punto o valor de fluencia (yield stress), en lo que respecta a su relación con las propiedades plásticas del sistema en estudio.

Los valores de relación de deformación, obtenidos según el método de Hefferkorn, están relacionados directamente con el valor de fluencia mediante una fórmula que se analizará mas adelante; además, en el caso del plasticómetro según Lindeis, las presiones de extrusión y tracción, que determinan las propiedades plásticas, tienen una relación con el valor de fluencia, mucho mas evidente en el ensayo de extrusión. En este último caso, el efecto se analiza extensivamente cuando se consideran las presiones de extrusión en el reómetro de Burrell-Levers, que se utilizará en posteriores determinaciones, en este trabajo.

Existen varias definiciones del valor de fluencia, que se pueden considerar fundamentalmente para dos sistemas básicamente distintos. Según Moor (13), para el caso de deformación de un cuerpo, el valor de fluencia es el correspondiente al esfuerzo mínimo necesario, al cual se debe someter al cuerpo para que cambie su forma de manera permanente, y en el caso de flujo de material, a través de un conducto, la presión mínima necesaria para que exista flujo continuo del material en consideración.

Para el caso particular de una pasta formada por arcilla y agua, los principales factores que pueden modificar el valor de fluencia son la cantidad de agua del material arcilloso y la tixotropía del sistema.

Russell y Hanks (41), encontraron que en pastas para porcelana, con contenidos de agua que variaban entre 23 y 35 %, en sistemas de flujo de material, la relación entre el valor de fluencia y la humedad, estaba representada por una recta, en un gráfico logarítmico. En experimentos realizados por Schwartz (43) y también Ringery y Francel (24), que analizan el rol de la tensión superficial, consideran que el valor de fluencia y la plasticidad decrecen simultáneamente.

Shiraki y Fukaura (45), mediante ensayos físicos de determinación de módulos de ruptura, encontraron que la relación anterior no se cumplía, pero posteriores experiencias con pastas arcillosas indicaron que la aparente anomalía se debía a que la técnica del módulo de ruptura no ofrecía resultados satisfactorios. Actualmente no existe discusión en la afirmación de que el valor de fluencia aumenta al disminuir el contenido de agua de la pasta.

Es evidente que la tixotropía del material debe jugar un papel importante en el comportamiento de pastas, especialmente cuando se comparan ensayos estáticos con otros dinámicos. Una pasta con alto contenido de agua mostrará un efecto tixotrópico representado por la degradación de su estructura que sufre al ser agitada. Según Moor (op. cit.) aunque este efecto debe existir siempre, en las pastas donde el volumen del sólido predomina en forma neta con respecto al volumen del líquido, es imposible un reordenamiento rápido de mo-

lículas y el efecto tixotrópico es poco notorio.

En lo que respecta a las determinaciones de valores de fluencia en forma experimental, la gran mayoría ha sido realizada en sistemas dinámicos, en un amplio rango de contenidos de agua, especialmente en la zona en que el sistema arcilla-agua no exhibe todavía propiedades plásticas, es decir que el porcentaje de agua es mayor que el correspondiente al límite líquido de la pasta en ensayo. Para estos casos se ha considerado el valor de fluencia según se lo definió para un sistema de flujo.

Para todos los sistemas en movimiento, el valor de fluencia, debido fundamentalmente a fenómenos tixotrópicos, adquiere distintos valores de acuerdo con el estado particular de movimiento que se imprime al sistema, y es también función del tiempo de reposo a que se someta el sistema antes de ser procesado. Es decir, en prácticamente todos los estudios experimentales hallados en la bibliografía está incluida la variable tiempo de deformación, de la cual es función el valor de fluencia en los ensayos que involucran flujo de material.

En este estudio, particularmente, el objetivo es distinto, ya que se trata de hallar un valor de fluencia definido y constante, cuyo valor cuantitativo pueda ser relacionado con valores de fluencia obtenidos a partir de ensayos de deformación. En este último caso, la magnitud de Y (valor de fluencia), puede ser deducida de métodos de determinación de la plasticidad, ya que los resultados de los mismos, en muchos casos dependen sustancialmente de esa propiedad.

De las determinaciones según el método de Pfefferkorn, es

posible obtener un valor aproximado de Y , relacionando la pérdida de energía potencial del plato deformante, con el trabajo que se gasta en la deformación del cilindro tipo utilizado:

$$W = \int F \, dS \quad (1)$$

donde W = trabajo, en ergios; F = fuerza en dinas; S = espacio en cm^2 para el caso de deformación de un cilindro $dS = dH$, donde dH es la variación de altura del cilindro.

$$W = h w \quad (2)$$

donde h = recorrido total del peso deformante y w la masa del mismo en gramos.

Según Capriz(14), si llamamos Y al valor de fluencia para un esfuerzo de corte, para el caso de compresión, el valor correspondiente será $\sqrt{3} Y$ (la deducción de esta fórmula aparece en la página A16 del apéndice). Por lo tanto la fuerza será

$$F = \sqrt{3} Y A \quad (3)$$

donde A = área superior del cilindro, en cm^2 ; reemplazando en (1):

$$h w = \int \sqrt{3} Y A \, dH \quad (4)$$

como el cilindro se considera incompresible, su volumen inicial y final serán iguales:

$$\pi R_0^2 H_0 = A H$$

donde R_0 = radio del cilindro original y H_0 = altura del cilindro original, ambos en cm. Reemplazando en (4), el valor de A :

$$h = \int \sqrt{3} Y \pi R_0^2 H_0 \frac{dH}{H}$$

integrando entre H_0 y H ; y despejando Y :

$$Y = \frac{h w}{\sqrt{3} \pi R_0^2 H_0 \ln(H_0/H)} \quad (5)$$

Si se aplica esta fórmula a los resultados experimentales se pueden obtener los valores de fluencia correspondientes. La fórmula 5, permite confirmar la afirmación de que el valor de fluencia disminuye cuando menos plástica es la muestra.

Si se consideran cilindros formados con pastas de igual contenido de agua, de arcillas hipotéticas de diferente plasticidad, de acuerdo con los conceptos anteriores surgidos del análisis de las curvas obtenidas por el método de Pfefferkorn, para un mismo peso de cada un cilindro se deformará menos cuando mas plástica sea la muestra. Las alturas finales de las muestras deformadas H , se indican en la tabla IV, donde aplicando la fórmula 5, se calculan los valores de Y correspondientes. Las medidas utilizadas, del aparato y del cilindro, corresponden a un plastifómetro de Pfefferkorn convencional, donde

$$A = \sqrt{3} \pi R_0^2 H_0 = 69,17 \quad w = 1192 \text{ g} \quad h = 18,6 - H$$

TABLA IV

Arcilla n°	H (cm)	$\frac{H_0}{H}$	$\log\left(\frac{H_0}{H}\right)$	$A \times \ln\left(\frac{H_0}{H}\right)$	$\frac{h}{H}$ (cm)	$h w$	Y (g/cm ²)
1	3,50	1,14	0,057	7,89	15,1	17999	2261
2	3,00	1,33	0,124	17,16	15,6	18565	1084
3	2,50	1,60	0,204	28,23	16,1	19191	679,8
4	2,00	2,00	0,301	41,66	16,6	19787	475,0
5	1,50	2,67	0,427	59,09	17,1	20383	344,9

La relación entre los valores de H y de Y para estas cinco arcillas hipotéticas, muestra que cuando menor es la plasticidad (menor valor de H), el valor de fluencia disminuye, en la forma que indica el gráfico de la figura 4.

RELACION DE LA PLASTICIDAD CON EL VALOR DE FLUENCIA

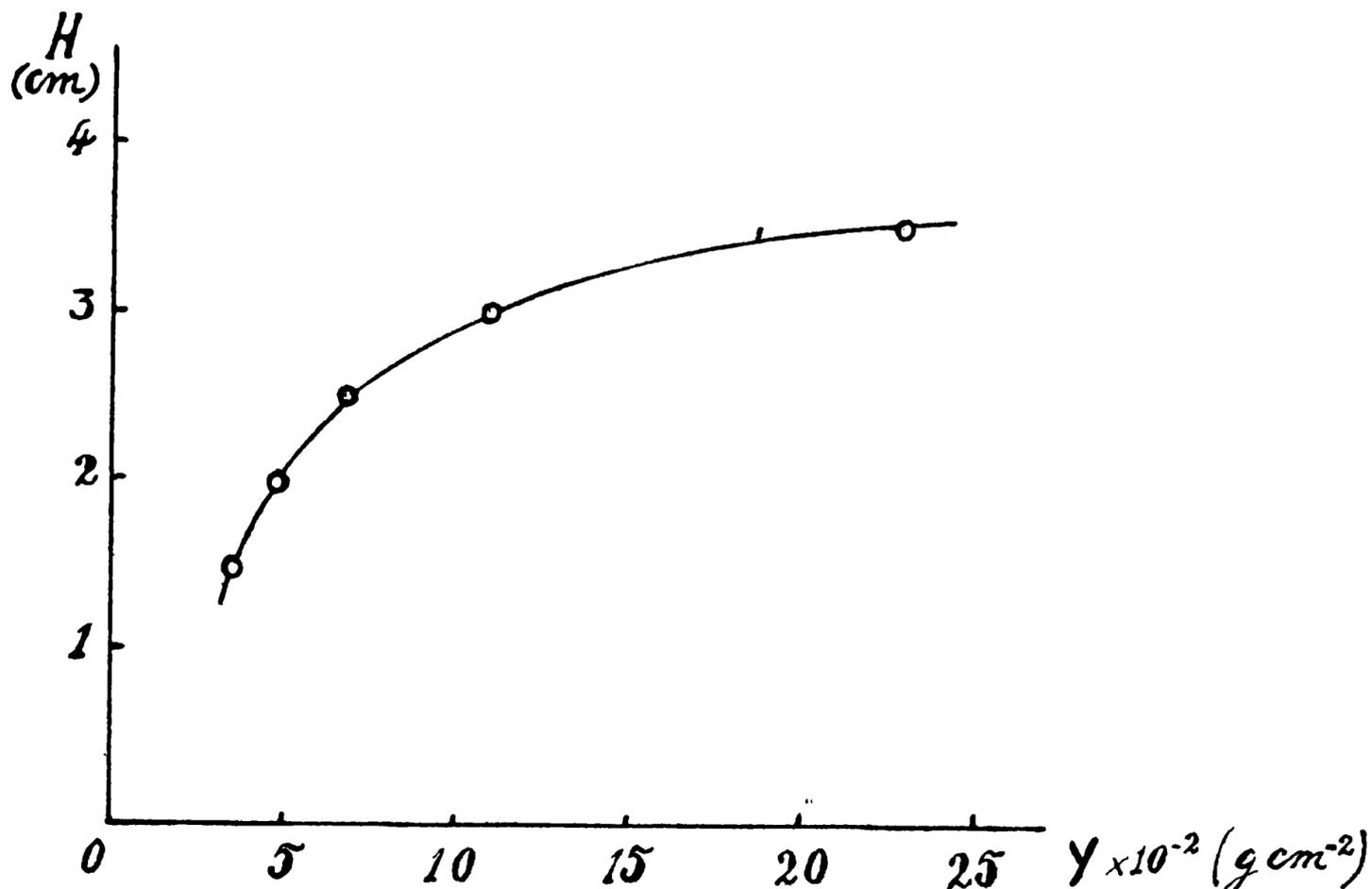


FIGURA 4

El plasticímetro 405, permite también obtener datos correspondientes a una presión mínima de extrusión, registrándolas en la primera parte del ensayo. Este procedimiento se siguió en varios ensayos pero los resultados obtenidos carecían de reproducibilidad, debido a la poca sensibilidad de registro del manómetro, en especial en el caso de pastas con alto contenido de agua, y también como consecuencia del roce entre el pistón que empuja la muestra y las paredes del cilindro de prueba. El aumento brusco de la presión inicial y la velocidad uniforme y rápida de avance del pistón constituyen otro inconveniente, para determinar valores de fluencia por este método.

Dado que el principal objetivo de la determinación de valo-

res de fluencia es el análisis de su variación, dentro del rango de contenidos de agua en que se trabajó en anteriores ensayos de plasticidad, se utilizó el reómetro de extrusión de Burrell-Cavers, con el objeto de obtener presiones mínimas de flujo (valor de fluencia en extrusión) y relacionarlas con los valores obtenidos y calculados, mediante las técnicas anteriormente utilizadas.

El comportamiento de una pasta húmeda dentro de la zona de trabajabilidad de la muestra, extrudada a muy baja velocidad, es prácticamente independiente de la tixotropía del material en estudio y permite obtener presiones mínimas de fluencia que son reproducibles y evidencian una variación pequeña, como consecuencia de la velocidad que se imprime a la muestra; este hecho permite extrapolar los valores experimentales obtenidos hasta lograr la presión correspondiente a una velocidad cero. Esta presión corresponde a un valor de fluencia característico del sistema en estudio, con el objeto de diferenciarlo del valor de fluencia estático, definido para el caso de deformación, se lo llamará "presión mínima de extrusión".

Owen y Kerrall (36) estudiaron experimentalmente las velocidades de flujo de pastas formadas con diferentes tipos de arcillas y agua, procesadas en un equipo de extrusión, que consistía principalmente en un tubo de prueba vertical con una boquilla cilíndrica en la parte inferior. El tubo contenía la pasta arcillosa que se hacía fluir a través de la boquilla mediante presión de aire comprimido ejercida en la parte superior del tubo. Capria (14), desarrolló teóricamente una fórmula que vincula la presión para dis-

tintas velocidades de flujo, con el valor de fluencia de la pasta ensayada.

2.3.1. Uso del reómetro de extrusión de Durrell-Severa

El reómetro de extrusión de Durrell-Severa (figura 5), es un equipo de origen norteamericano, que utiliza los mismos principios que el confeccionado por Owen y Worrall.

Reómetro de Durrell-Severa

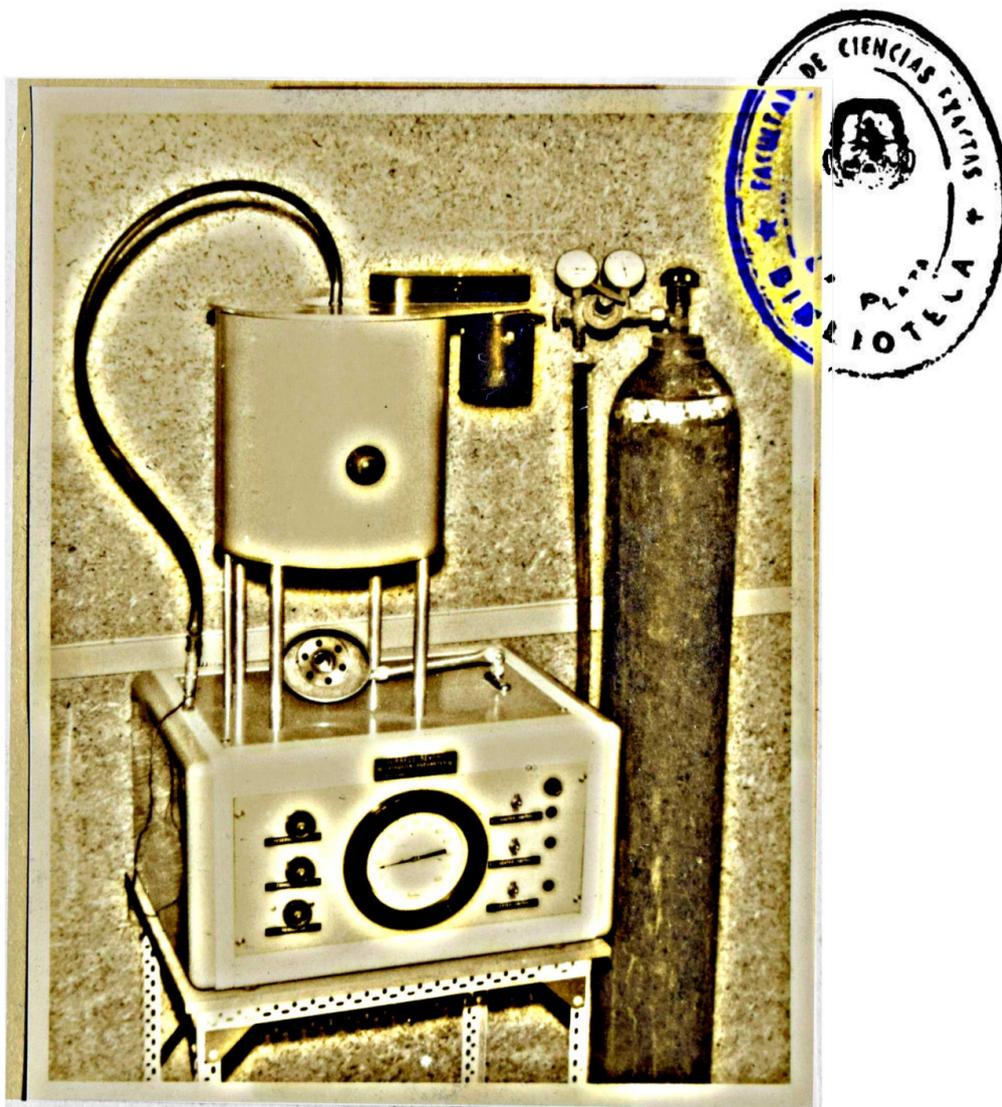
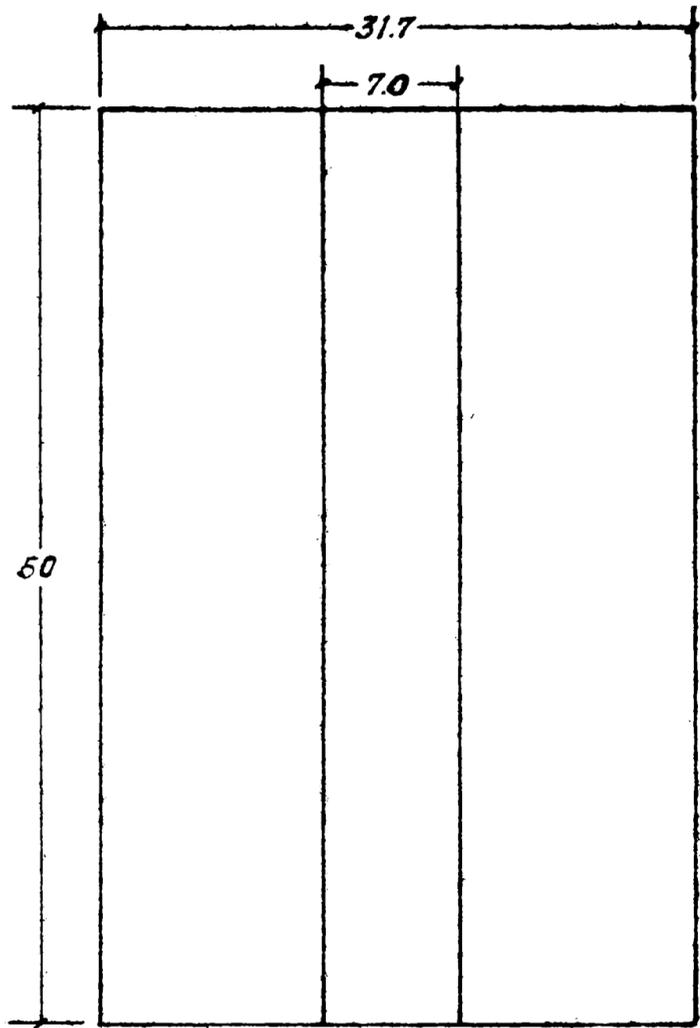
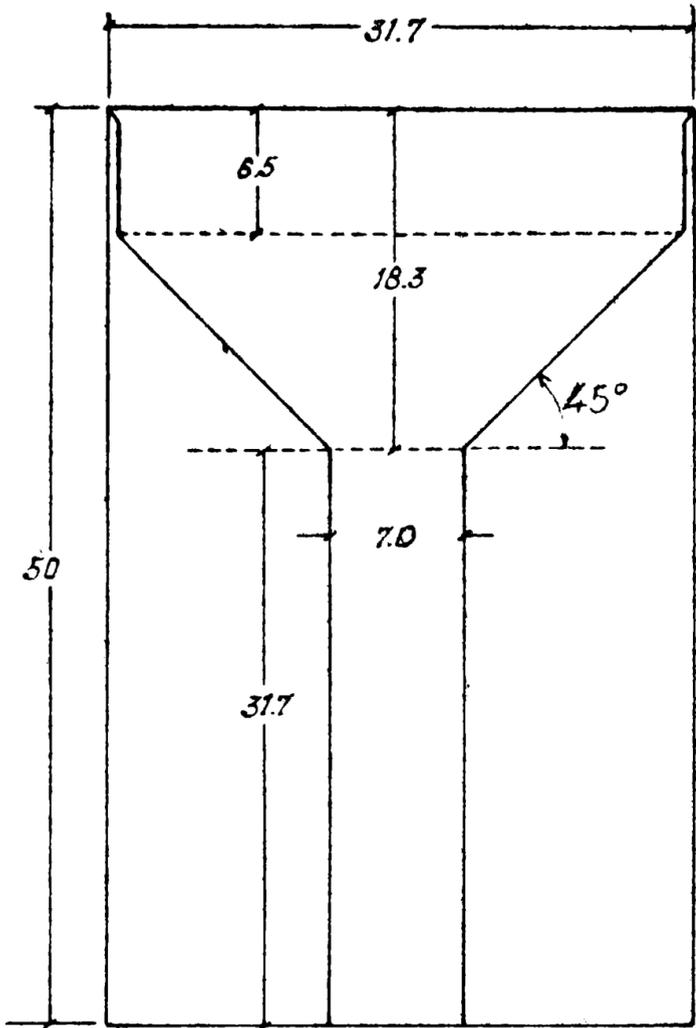


FIGURA 5

La presión se registra en un manómetro de alta sensibilidad y puede ser regulada con mucha exactitud. La boquilla utilizada en las experiencias de Owen y Worrall era de tipo cilíndrico, como la que se esquematiza en el diagrama de la página 42 (na-

Vistas en Corte

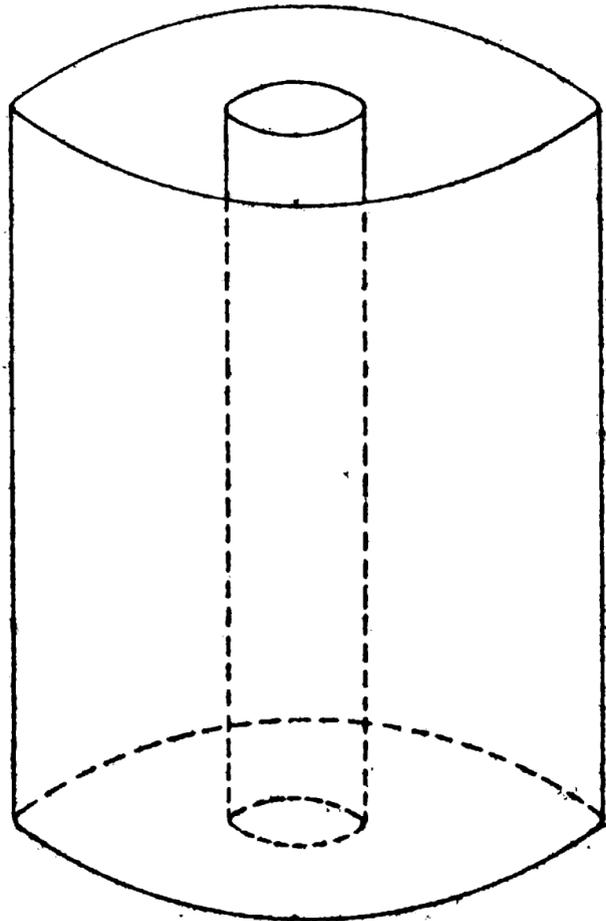
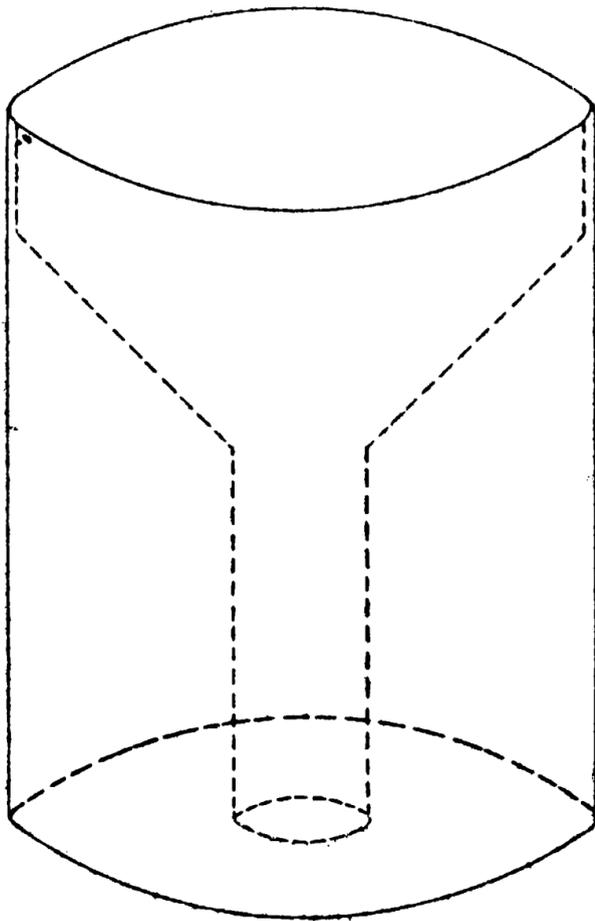
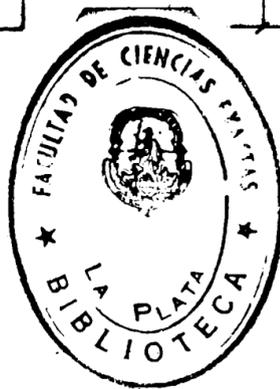
MEJIDAS EN MILIMETROS -



Matriz N°1

Matriz N°2

TOLERANCIA ± 0.1 mm



Perspectivas

tris N° 2). Dado que cuando fluye pasta desde un tubo que contiene la muestra a través de la boquilla, se produce una zona muerta de dimensiones difíciles de determinar, se prefirió utilizar otro tipo de boquilla, sugerido por Cariz (op. cit.), de forma cónica y un ángulo de 45° , cuyo esquema y sus dimensiones aparecen en el gráfico de la página 42 (matriz N° 1). El uso de esta boquilla permite obtener menor dispersión en los resultados experimentales, que con la boquilla de tipo recto, que fue probada en determinaciones preliminares.

Dado el número de variables en juego, se eligió para trabajar la muestra 509, con la cual se preparó una pasta del modo descrito para las determinaciones según Pfefferkorn y Lineas. Se cargó el cilindro de prueba en forma cuidadosa, de modo de evitar la formación de burbujas de aire en el seno de la pasta. El cilindro se cargó hasta 1 cm de su borde superior y se colocó su tapa que se ajustó herméticamente mediante una junta de cobre y otra de "Rhodite".

Los ensayos se realizan aumentando la presión gradualmente hasta que la pasta fluya a través de la boquilla. Se midió entonces la presión registrada, y la velocidad de salida de pasta por medio de un cronómetro y una regla graduada. Las determinaciones para una misma presión fueron repetidas dos o tres veces y se tomó el promedio de las velocidades alcanzadas. De este modo se obtuvieron valores de velocidad para varias presiones diferentes, con pasta de una misma humedad. Esta fue determinada dos o tres veces pesando porciones extrudadas y secándolas en estufa según el método usual.

Se trabajó en todos los casos con bajas velocidades de flujo, dado que el objetivo principal de estos ensayos, es la extrapolación de las curvas obtenidas, hasta la presión correspondiente a una velocidad cero (presión mínima de extrusión o valor de fluencia para extrusión). Para estas velocidades y considerando el rango de humedades de las pastas procesadas, el efecto de la tixotropía se considera despreciable. Este hecho se comprueba experimentalmente teniendo en cuenta la reproducibilidad de la velocidad cuando se realizan dos o mas ensayos a la misma presión, dado que una variación en la tixotropía del sistema produciría una velocidad de flujo diferente, en el caso de aplicarse una misma presión sobre la pasta.

Se realizaron en total seis ensayos completos con pastas provenientes de la muestra 509, con distintos contenidos de agua. Las curvas obtenidas se reproducen en el gráfico de la página 45, y los valores obtenidos y calculados, en las páginas A17 y A18 del apéndice

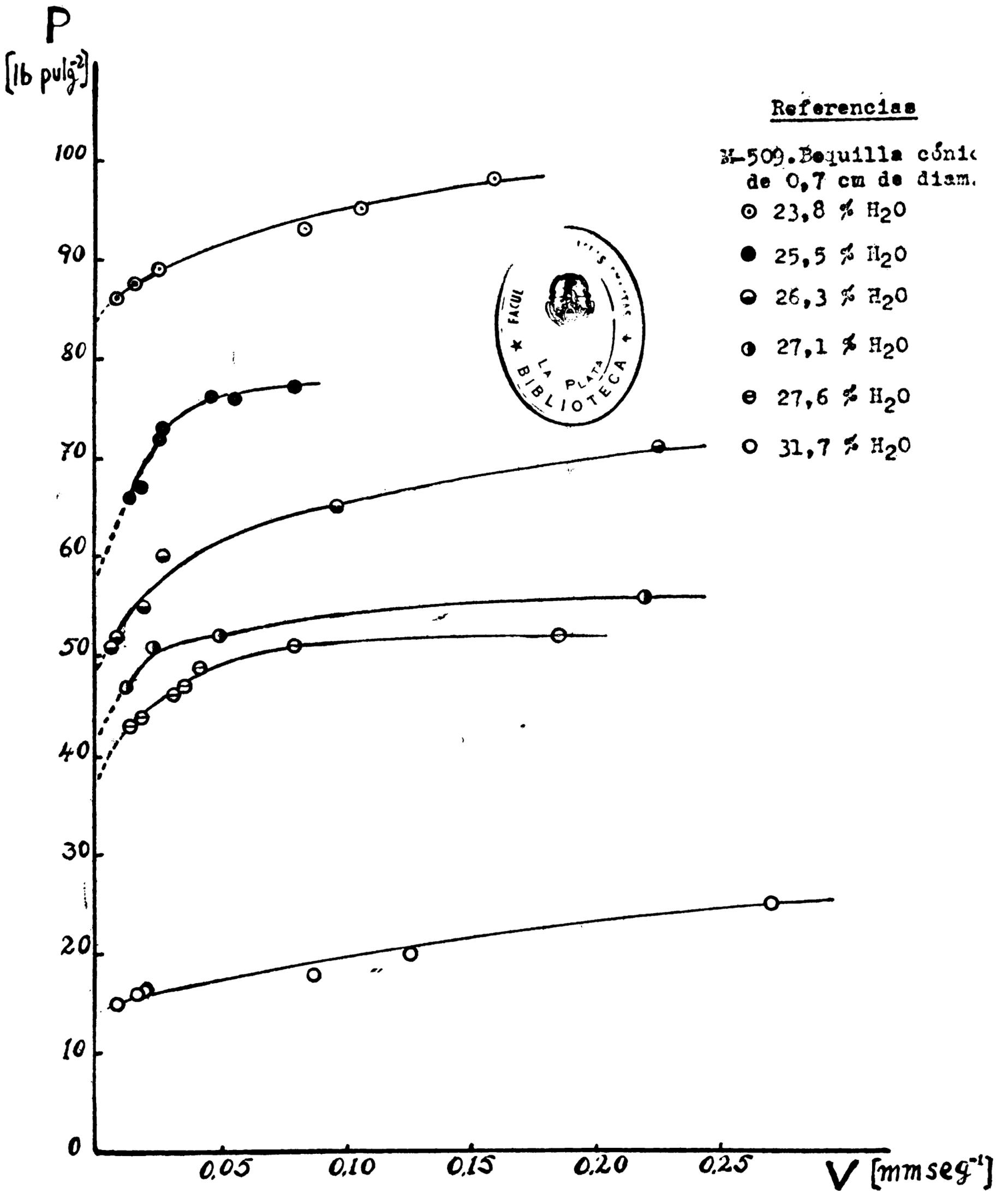
La extrapolación de las curvas obtenidas, para velocidad cero, permite hallar las presiones mínimas de extrusión, que aparecen en la tabla V.

TABLA V

Curva N°	Humedad	Presión mínima de extrusión
1	23,8	84
2	25,5	58
3	26,3	49
4	27,1	42
5	27,6	37,5
6	31,7	24

REOMETRO DE EXTRUSION DE BURRELL-SEVERS

VELOCIDADES DE FLUJO EN FUNCION DE LA PRESION



2.3.2. Relación entre los resultados obtenidos por el método de Pfefferkorn y mediante el reómetro de extrusión

2.3.2.1. Determinaciones preliminares

Con el objeto de obtener un mayor número de valores de fluencia en función de la humedad, por aplicación de la fórmula 5 (página 37), en un amplio rango de contenidos de agua, se utilizó nuevamente un plasticímetro según Pfefferkorn y se efectuaron 13 nuevos ensayos con cilindros de distinta humedad, confeccionados con la muestra 509.

El equipo utilizado difiere en algunas medidas del primitivo y lo denominaremos plasticímetro Pfefferkorn N° 2. En este caso los cilindros a ser deformados tienen 3,0 cm de diámetro y la altura h es de 16,5 cm, por lo cual fue necesario calcular un nuevo peso de caída que permitiera obtener resultados similares a los registrados con el equipo anteriormente usado. Dado que el valor de fluencia debe ser el mismo, independientemente del equipo utilizado, se puede obtener un valor de w por medio de la fórmula 5.

Si indicamos con subíndice 1 las medidas del plasticímetro de Cerámica Maeda S.A. y con subíndice 2, las correspondientes al plasticímetro N° 2, tendremos, dado que $Y_1 = Y_2$, como

$$Y_1 = \frac{h_1 w_1}{\sqrt{3\pi} R_1^2 H_0 \ln(H_0/H)}$$

$$Y_2 = \frac{h_2 w_2}{\sqrt{3\pi} R_2^2 H_0 \ln(H_0/H)}$$

$$\frac{h_1 w_1}{R_1^2} = \frac{h_2 w_2}{R_2^2}$$

$$w_2 = \frac{h_1 w_1}{h_2} \frac{R_2^2}{R_1^2} = \frac{14,6 \times 1192 \times 2,25}{12,5 \times 2,72} = 1151 \text{ g}$$

De este modo, con un peso de café de 1151 g, los resultados obtenidos serán comparables con los correspondientes al equipo usado anteriormente.

Los valores obtenidos y calculados, para los trece nuevos cilindros y los cinco primitivos, aparecen en la tabla III del apéndice, donde también se indican los valores de fluencia Y . La tabla VI reproduce los valores de Y para cada humedad.

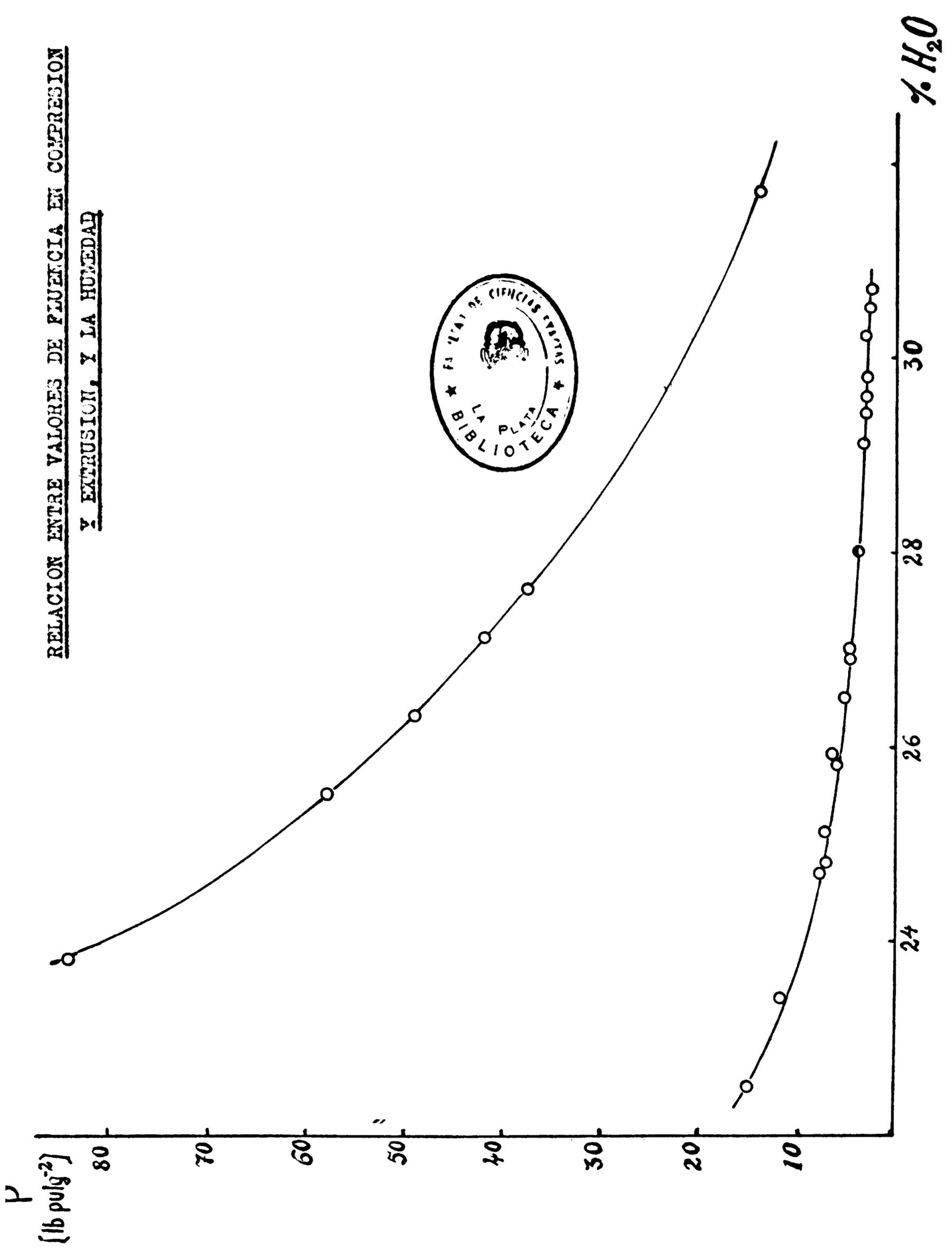
Tabla VI

ENLAYO Nº	Y (lb/pulg ²)	HUMEDAD	ENLAYO Nº	Y (lb/pulg ²)	HUMEDAD
1	5,4	26,5	10	2,8	30,7
2	11,8	22,4	11	2,9	30,5
3	15,2	22,5	12	3,0	30,2
4	6,6	25,9	13	3,9	28,0
5	3,3	29,6	14	3,1	29,8
6	3,3	29,4	15	6,0	25,8
7	3,5	29,1	16	4,7	27,0
8	4,8	26,9	17	7,8	24,7
9	7,2	25,1	18	7,0	24,8

En el gráfico de la página 48, aparece una curva que corresponde a las presiones mínimas de extrusión, y otra de los valores calculados de Y , ambas en función del contenido de agua.

Con el objeto de comparar los valores experimentales con los que obtuvieron Owen y Werrall, donde la humedad se expresa en base a la muestra seca, es necesario transformar los valores ya que en este trabajo todas las humedades están expresadas en base a la muestra húmeda. La relación entre ambas expresiones no es lineal. La relación entre H_w (humedad porcentual basada en la muestra húmeda), y

RELACION ENTRE VALORES DE FLUENCIA EN COMPRESION
Y EXTRUSION, Y LA HUMEDAD



H_g (humedad porcentual basada en la muestra seca), es la siguiente:

$$H_h = 100 - \frac{100}{1 + \left(\frac{H_g}{100}\right)} \quad (6)$$

La deducción de esta fórmula aparece en el apéndice, página A21 por medio de la misma es posible transformar las expresiones rápidamente.

Como factor previo al estudio del flujo de una pasta que recorre un cilindro de prueba vertical y la boquilla o matriz, impulsada por presión de un gas, es necesario señalar que existen controversias con respecto al tipo de flujo.

Se supone que en ambos tubos el tipo de flujo será similar aunque en el caso de la boquilla, la observación experimental es más difícil debido a su reducido diámetro.

Con el propósito de dilucidar este problema, se realizaron ensayos cargando el tubo de prueba con porciones de pasta de arcilla y agua, separadas por una fina capa de polvo de cuarzo, que inicialmente constituía una superficie plana. Mediante presión de aire comprimido se hizo recorrer a la pasta unos 5 cm dentro del tubo, manteniendo en la parte inferior la boquilla, a través de la cual salía la pasta extrudada. A continuación se retiró la boquilla y cuidadosamente se secó la pasta remanente en el tubo de prueba que permitió observar la existencia de un frente de velocidades característico de flujo viscoso, tanto en el caso de un ensayo con las paredes del cilindro lubricadas con aceite, como en otro ensayo similar sin lubricante.

Los trozos de pasta, que muestran el perfil, aparecen en la figura 6, donde una L señala las porciones de pasta cuando se usó lubricante.

Por el citado motivo, el hecho de postular la existencia de flujo pistón solo es justificable desde el punto de vista de la relativa simplicidad del tratamiento matemático. Solo sería posible obtener un comportamiento mas cercano a flujo pistón, si se trabajara con una pasta muy dura (dureza muy baja), lubricada por una grasa que formara una capa de espesor significativo entre la muestra y la pared metálica.

Flujo de pasta arcillosa en un conducto cilíndrico

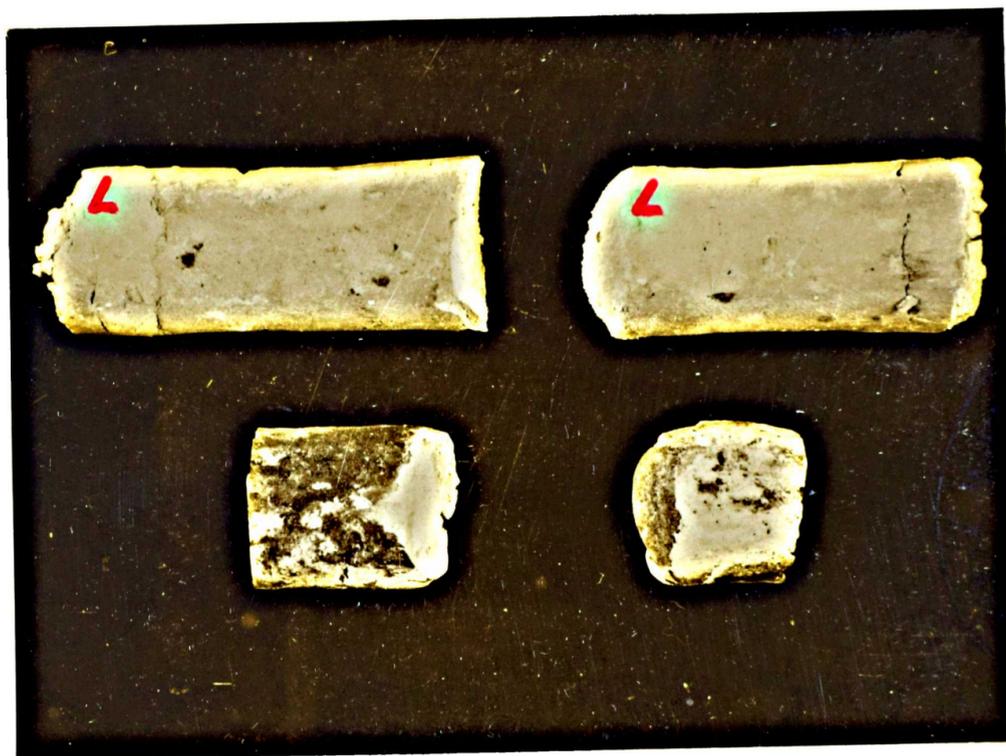


FIGURA 6

2.3.2.2. Relación entre la presión de extrusión, el valor de fluencia y la viscosidad en un sistema arilla-grasa

Capriz (14), supuso la existencia de flujo pistón y se basó en un modelo simplificado para desarrollar teóricamente una ecuación que vincula la presión de extrusión con el valor de fluencia y la viscosidad, para el caso de flujo en un tubo vertical, seguido de extrusión a través de una boquilla cónica.

Según Capriz:

$$P = Y \left(a + b \sqrt{\frac{4 \eta}{Y R^3}} \right) \quad (7)$$

donde P = presión de extrusión, en dina/cm²

Y = valor de fluencia, en dina/cm²

η = viscosidad, en poises, o sea g/cm seg

R = radio de la boquilla, en cm

g y h son constantes que dependen de la geometría de la boquilla. La deducción de esta fórmula aparece en las páginas A22 a A30 del apéndice.

El grupo adimensional $\frac{\eta}{Y R^3}$ es la inversa del número de Saint Venant o número de Bingham.

Para una boquilla cónica, el coeficiente g es[†]

$$g = \frac{1}{\tan^{\alpha}} + \left(\sqrt{3} \ln \frac{A(x)}{A(e)} \right) \quad (8)$$

donde α es el ángulo del cono de la boquilla (en este caso 45°),

$A(x)$ es el área transversal de la boquilla a una distancia x de la salida, y $A(e)$ es el área a la entrada de la misma.

Reemplazando los valores en la ecuación 8:

$$g = 1 + (1,73 \times 2,3 \times 1,27) = 6,05$$

El coeficiente h es[†]

$$h = \frac{8}{3\sqrt{2} \tan 45^{\circ}} \left[\frac{R(1)}{R(e)} \right]^{3/2} \left\{ 1 - \left[\frac{R(e)}{R(x)} \right]^{3/2} \right\} \quad (9)$$

donde $R(1)$ es el radio de la boquilla en la entrada superior, $R(e)$

el radio de la boquilla a la salida, y $r(x)$ el radio de un pistón

a una distancia x de la salida. Se considera que este radio es igual

al de entrada de la boquilla. Reemplazando los valores:

$$h = 1,07 \times 8,93 \times 0,89 = 8,48$$

De acuerdo con estos cálculos, la fórmula 7 sería la siguiente:

es:

$$P = Y \left(6,05 + 8,48 \sqrt{\frac{\eta}{Y R^3}} \right) \quad (10)$$

† La deducción aparece en las pags. A22 a A30 del apéndice.

La viscosidad de la pasta puede calcularse, considerando los valores de P obtenidos para distintos caudales con el reómetro de extrusión de Durrell-Devers y los valores de Y calculados a partir de las determinaciones experimentales con el método de Pfefferkorn.

Para el caso particular de $q = 0$, la fórmula 10 indica que el valor de fluencia en extrusión es aproximadamente 6 veces mayor que el valor de fluencia en compresión, calculado a partir de los datos obtenidos usando el método de Pfefferkorn. Un análisis de las curvas del gráfico de la página 48, permite observar la relación entre P y Y (interpolando valores en las curvas, para varios porcentajes de agua). En este caso, las presiones mínimas de extrusión (o valor de fluencia en extrusión), son entre 6,8 y 9,5 veces superiores a los correspondientes valores de fluencia en compresión. Este hecho demuestra un orden coincidente, entre el coeficiente g de la fórmula 10, obtenido a partir de consideraciones teóricas aproximadas, que consideran flujo pistón, con respecto a los valores experimentales que están representados en el gráfico de la página 48.

2.3.2.3. Determinación de la viscosidad de pastas

Debido a la tixotropía de las pastas formadas con arcilla y agua, la viscosidad en un sistema de flujo variará con la velocidad de salida de pasta, pero para el caso de velocidades muy bajas, es posible obtener una viscosidad aproximada, utilizando la fórmula 10 y tomando valores promedio para P y Q . El cálculo se realiza del siguiente modo:

- 1) Se determina para cada experimento realizado con el reómetro,

el valor correspondiente de Y , que se obtiene a partir de los ensayos según Wefferkern.

- 2) El valor de R^3 es constante.
- 3) El caudal de flujo se calcula multiplicando cada velocidad por el área de la boquilla.
- 4) El valor final de viscosidad surge de premedir los valores de P y de η , para cuatro velocidades de flujo diferentes.

De este modo tenemos valores de P , η , Y y R^3 . De la fórmula 10 se tiene que:

$$\sqrt{\frac{\eta}{Y R^3}} = \frac{(P/Y) - 6,05}{8,48} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{\left[\frac{(P/Y) - 6,05}{8,48} \right]^2 Y R^3}{Q} \quad (12)$$

reemplazando los valores se obtiene la viscosidad. Con este valor se puede obtener la inversa del número de Saint Venant para cada presión de extrusión.

Si se consideran valores arbitrarios para (P/Y) , se obtiene la curva teórica que aparece en el gráfico de la página 54, utilizando la fórmula 11. En el mismo gráfico se encuentran valores obtenidos a partir de datos experimentales, para velocidades de flujo entre 0,01 y 0,04 m/seg. Los cálculos correspondientes aparecen en las páginas A31 y A32, del apéndice. Los valores de la inversa del número de Saint Venant, para cada P/Y , con los cuales se confeccionó el gráfico, se encuentran en la tabla VII.

Las viscosidades de pastas más fluidas presentan valores no comparables dado que en esas condiciones de flujo el efecto de la tixotropía es de mayor importancia.

CURVA TEORICA Y VALORES EXPERIMENTALES PARA
FLUJO LENTO, CALCULADOS SEGUN CAPRIE

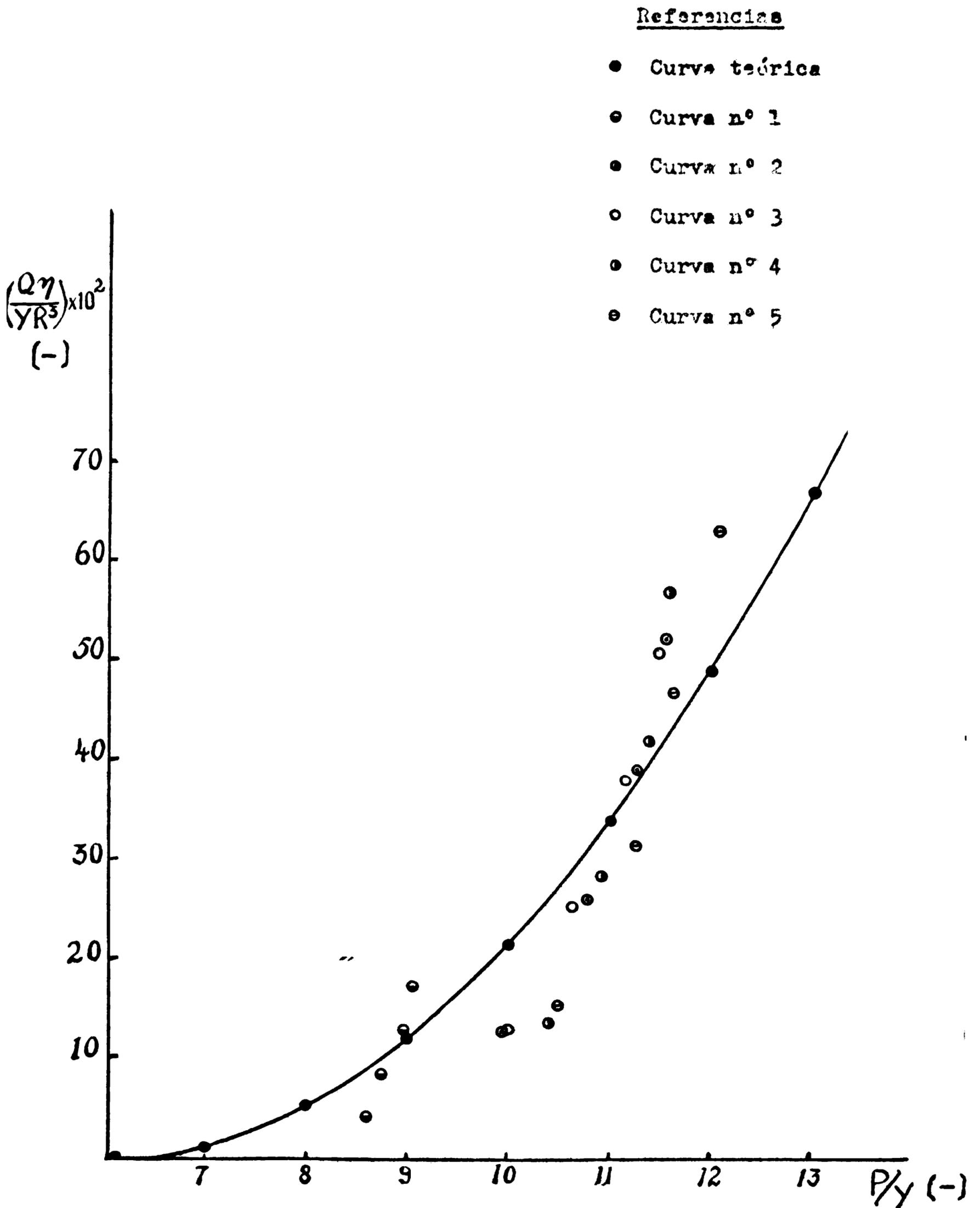


TABLA VII

Nº	F/Y	μ^{-1}	Nº	F/Y	μ^{-1}
1	8,60	$4,32 \times 10^{-2}$	11	11,14	$38,25 \times 10^{-2}$
2	8,75	$8,75 \times 10^{-2}$	12	11,47	$51,22 \times 10^{-2}$
3	8,95	$13,07 \times 10^{-2}$	13	10,40	$14,00 \times 10^{-2}$
4	9,05	$17,50 \times 10^{-2}$	14	10,89	$28,37 \times 10^{-2}$
5	9,55	$23,00 \times 10^{-2}$	15	11,38	$42,37 \times 10^{-2}$
6	10,77	$26,34 \times 10^{-2}$	16	11,56	$56,73 \times 10^{-2}$
7	11,26	$39,34 \times 10^{-2}$	17	10,50	$15,64 \times 10^{-2}$
8	11,54	$52,68 \times 10^{-2}$	18	11,25	$31,69 \times 10^{-2}$
9	10,00	$12,64 \times 10^{-2}$	19	11,62	$47,33 \times 10^{-2}$
10	10,63	$25,61 \times 10^{-2}$	20	12,05	$63,39 \times 10^{-2}$

Los valores calculados para la curva nº 6 (que aparecen en el apéndice, a continuación de los anteriores), no han sido considerados, dado que Y se obtiene a partir de datos según Jefferkern y para una humedad tan alta (31,7 % de agua), la extrapolación presenta una alta incertidumbre.

El valor de viscosidad obtenido para la curva nº 1, debe ser mas alto que el calculado, ya que la pasta tiene mayor contenido de agua que las restantes. Los valores para las otras cuatro curvas se consideran aceptables y pueden ser comparados con los que indica la literatura (10).

La dispersión de los valores experimentales, con respecto a los calculados teóricamente, es baja para números de Saint Venant altos (flujos lentos), pero aumentaría en forma notoria si se consideraran velocidades de flujo mas altas. La razón principal de este hecho, es que la fórmula 10 no representa con exactitud el con-

perteniente de una pasta que, sometida a una presión determinada, es extrudada a una cierta velocidad. Un aumento de un 10 % en la presión de extrusión produce un caudal de pasta 4 veces mayor, hecho que no refleja la fórmula 10. En este caso, de los valores utilizados para los cálculos llevados a cabo, correspondientes a flujos muy lentos, la ecuación se puede utilizar de la manera indicada anteriormente.

2.3.2.4. Relación entre valores de fluencia y presiones de extrusión para velocidad igual a cero

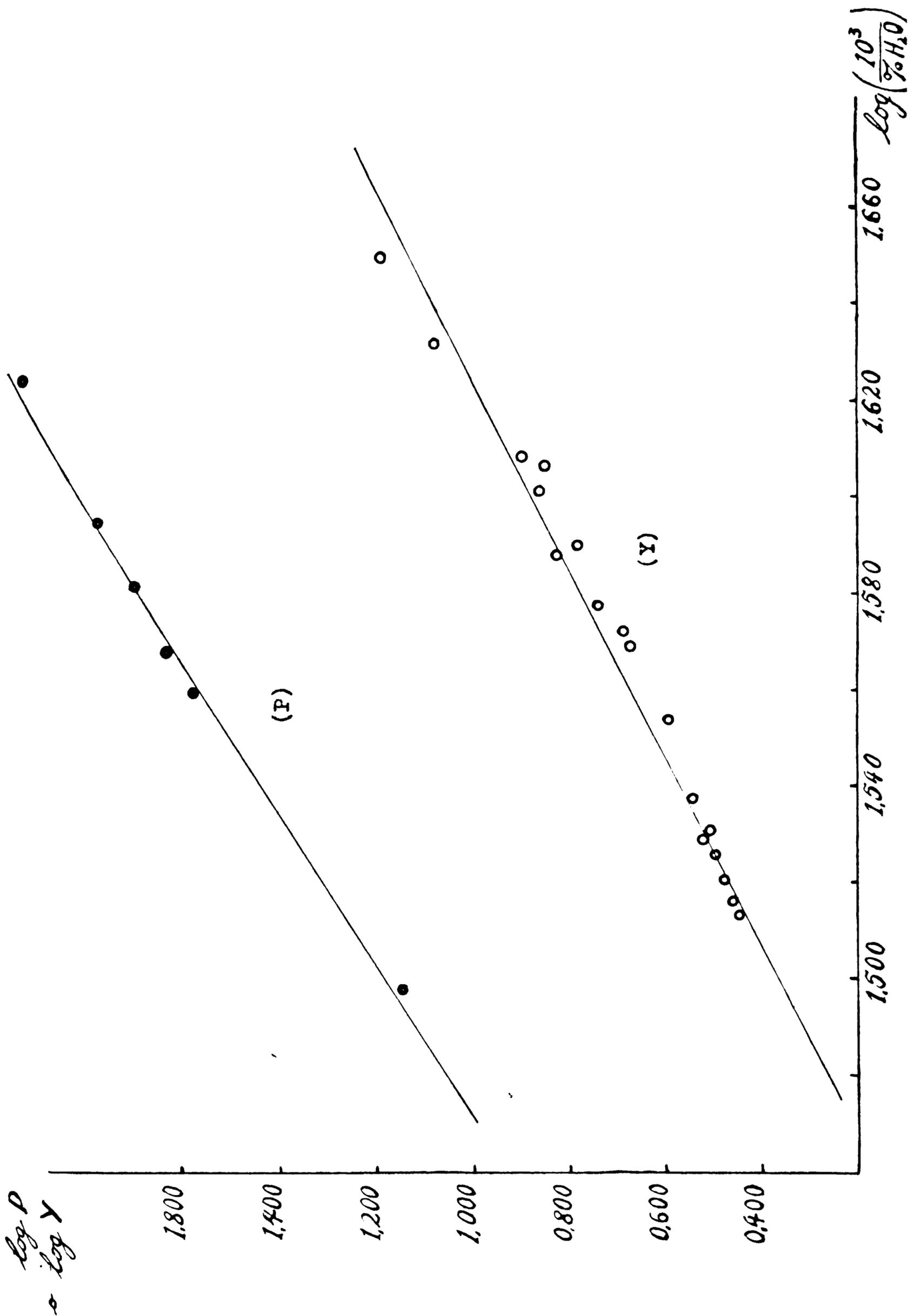
Un análisis de las curvas representadas en la página 48, permite prever una relación entre las mismas, ya que ambas son de tipo parabólico. Esta relación fue determinada para la muestra 509, utilizando los valores de Y resultantes de las 16 determinaciones experimentales (los cálculos de valores de fluencia aparecen en la página 49 del apéndice), y los valores de presión de extrusión, extrapolados para velocidad cero, provenientes de los ensayos con el equipo de Durrell-Wever.

En primer término se representaron en un diagrama logarítmico, los valores de P en función del contenido de agua, y de Y , también en función de la humedad. Por el método de los cuadrados mínimos se trazaron las rectas correspondientes a ambas representaciones. El gráfico de la página 57, muestra la relación entre los logaritmos de las variables indicadas. Las rectas obtenidas difieren evidentemente en la pendiente y en la ordenada en el origen, por lo cual es posible calcular la relación entre ellas.

Siendo a la ordenada en origen y b el coeficiente angular:

$$\log P = a + b \log Y \quad (13)$$

REPRESENTACION DE LOS LOGARITMOS DE VALORES DE EQUENOS EN LA FUNCION DEL LOGARITMO DE LA HUIDAD



según el método de los cuadrados mínimos:

$$\begin{aligned} a_P &= 9,175 & a_Y &= 1,454 \\ b_P &= 0,624 & b_Y &= 0,515 \end{aligned}$$

La relación entre ambas curvas es:

$$\frac{y_P - y_{0P}}{x - x_0} = m_P$$

$$\frac{y_Y - y_{0Y}}{x - x_0} = m_Y$$

por lo tanto

$$\frac{y_P - y_{0P}}{y_Y - y_{0Y}} = \frac{m_P}{m_Y} = \frac{0,624}{0,515} = 1,212$$

$$y_P = y_{0P} + 1,212 y_Y - 1,212 y_{0Y} \quad (14)$$

de la curva se tiene que $y_{0P} = 0,918$ • $y_{0Y} = 0,145$

reemplazando en (14):

$$y_P = 0,918 + 1,212 y_Y - (1,212 \times 0,145)$$

$$y_P = 0,742 + 1,212 y_Y$$

los valores de y_P e y_Y considerados, corresponden a la medida en $\log P$ y $\log Y$, respectivamente, y se pueden reemplazar en (13):

$$\log P = 0,742 + 1,212 \log Y \quad (15)$$

La tabla VIII, presenta un ejemplo de aplicación de la ecuación 15, donde aparecen en primer término los valores de Y obtenidos según Pfefferkorn y los valores de P según el método de extrusión, luego a partir de Y se hallan valores de P calculados según la fórmula 15, y se señala el error porcentual entre este valor y el experimental, proveniente de las mediciones en el gráfico y de los cálculos

involucrados.

TABLE VIII

N°	Humedad	Valores experimentales				Valores calculados		Error %
		Y	P	log Y	log P	log P	P	
1	24,7	8,10	71,0	0,908	1,851	1,842	69,9	2,1
2	29,1	3,52	25,5	0,547	1,406	1,405	25,4	0,4
3	30,7	2,62	18,2	0,418	1,260	1,249	17,7	2,8

3. RELACION ENTRE EL VALOR DE FLUENCIA Y LA PLASTICIDAD SEGUN PFEFFERKERN Y CONCLUSION GENERAL ACERCA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Las determinaciones experimentales, realizadas con el plastómetro según Pfefferkern y el rémetro de extrusión de Burrell Severs; la fórmula 5 (página 41), propuesta por Capria y analizada en este trabajo, que vincula la relación de deformación con el valor de fluencia en compresión, y la fórmula 15 (página 58), que establece una relación cuantitativa, con valores numéricos calculados exclusivamente para la muestra 509, entre este valor de fluencia en compresión y el valor de fluencia en extrusión (que se denomina "presión mínima de extrusión" en el presente trabajo), para el caso de pastas con igual humedad, permiten establecer una relación entre estos valores y el índice de plasticidad según Pfefferkern.

Si se denomina P a la presión mínima de extrusión o valor de fluencia en extrusión, e Y al valor de fluencia en compresión,

para el caso particular de la muestra 509, se obtuvo (ver páginas 56 a 58), que

$$\log P = 0,742 + 1,212 \log Y \quad (15)$$

$$P = e^{(0,742 + 1,212 \log Y)} \quad (16)$$

Para un valor determinado del valor de fluencia en compresión Y_0 , correspondiente a una relación de deformación igual a 3,30 (característica de un cilindro cuya humedad es el valor numérico del índice de plasticidad de Pfefferkorn), tendremos que, dado que $H_0 = 4,00$:

$$\frac{H_0}{H} = 3,30 \quad H = \frac{4,00}{3,30} = 1,21$$

si llamamos h_0 a la distancia entre la ubicación inicial del peso deformante y la base del aparato donde se ubica el cilindro a ser deformado, la carrera total h del peso deformante será

$$h = h_0 - H = 16,5 - 1,21 = 15,29$$

para un peso de caída de 1151 g, y un cilindro de altura inicial indicada $H_0 = 4,00$ cm, y un diámetro de 3,00 cm, el valor de Y_0 será

$$Y_0 = \frac{h w}{\sqrt{3} R_0^2 H_0 \ln(H_0/H)} = \frac{15,29 \times 1151}{\sqrt{3} \times 3,14 \times (1,5)^2 \times 4,00 \ln 3,3}$$

$$Y_0 = 302 \text{ g/cm}^2$$

Los coeficientes de las ecuaciones (15) y (16), han sido calculados para una presión expresada en libras por pulgada cuadrada (de acuerdo con la escala de registro del reómetro):

$$Y_0 = 302 \text{ g/cm}^2 = 4,44 \text{ lb/pulg}^2 \quad (17)$$

Si llamamos P_0 al valor particular de la presión mínima de extrusión, correspondiente a la pasta formada con muestra 509 y agua, con la humedad necesaria para obtener Y_0 :

$$P_0 = e^{(0,742 + 1,212 \log 4,44)}$$

$$P_0 = 33,6 \text{ lb/pulg}^2 \quad (18)$$

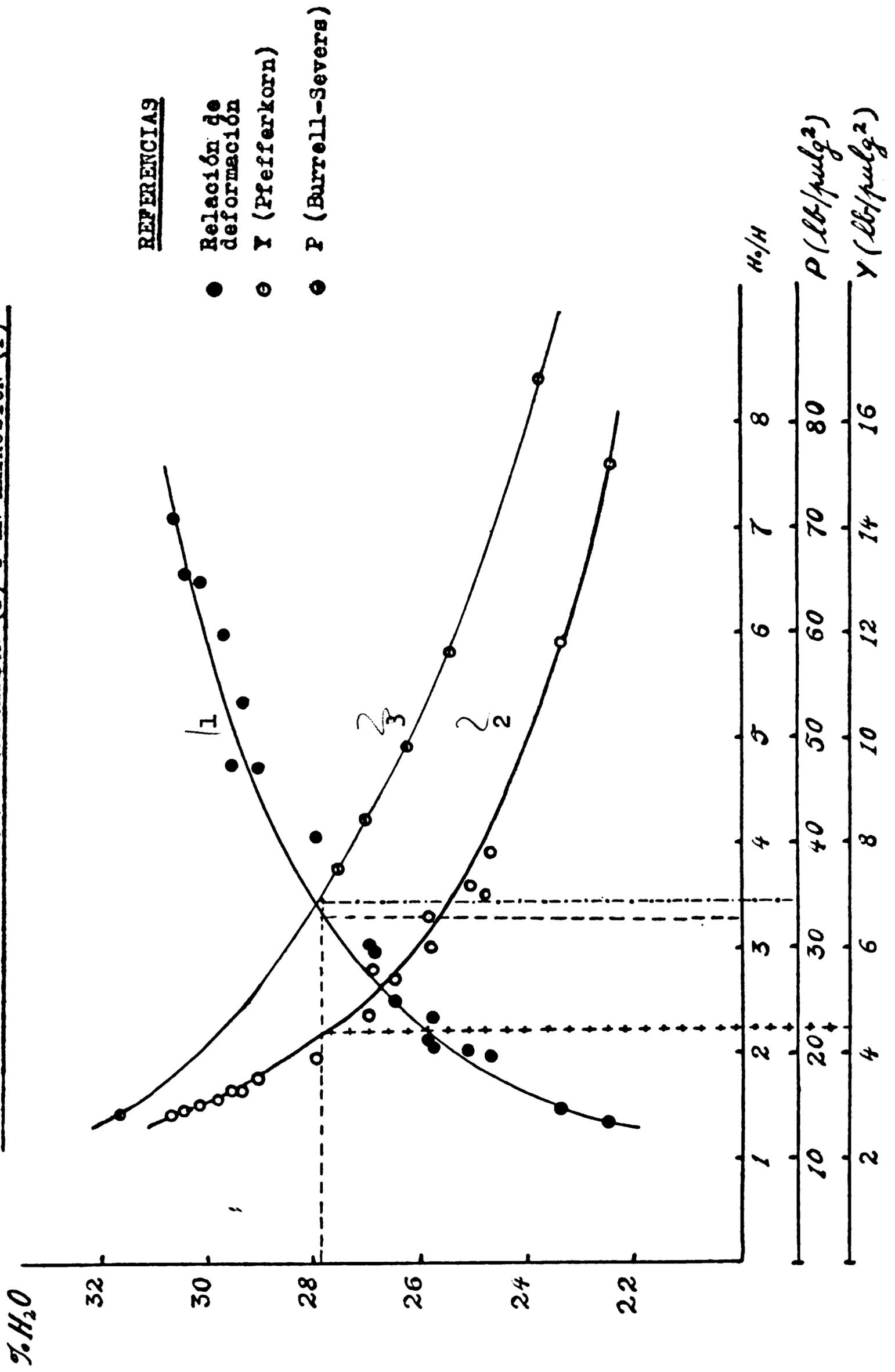
Los valores de Y_0 y P_0 , son característicos de un sistema arcilla agua cuya humedad es el valor numérico del índice de plasticidad según Pfefferkorn. El valor obtenido para P_0 es exclusivo de la muestra 509, pero el valor correspondiente a Y_0 es no solo independiente de la pasta utilizada y de las dimensiones del plastómetro de Pfefferkorn empleado, sino que puede prevenir de otros tipos de determinaciones que permitan obtener valores de fluencia en compresión.

Para los casos especificados, es posible obtener un índice de plasticidad según Pfefferkorn, realizando ensayos con pastas con distintos contenidos de agua, e interpolando en la curva obtenida, los valores de Y_0 o de P_0 , según sea el tipo de ensayo: compresión o extrusión.

La tabla IX, presenta valores de la relación de deformación obtenidos con el plastómetro de Pfefferkorn, y valores de Y_0 calculados aplicando la fórmula 5.

El gráfico de la página 62, indica la forma de obtener el índice de plasticidad, conociendo la relación de deformación (curva n° 1), a partir de valores de Y e interpolando para $Y_0 = 4,44$ lb/pulg² (curva n°2), o a partir de presiones mínimas de extrusión P_0 , que para la muestra 509 han sido obtenidas experimental-

INDICE DE PLASTICIDAD EN FUNCION DE LA RELACION DE DEFORMACION Y DE
LOS VALORES DE FLUENCIA EN COMPRESION (Y) Y EN EXTRUSION (P)



mente por medio del reómetro de extrusión de Burrell-Severs, e interpolando para P_0 , que para este caso (muestra 509), es 33,6 lb/pulg² (curva n°3).

TADLA IX

ENSAYO N°	H_0/H	Y (lb/pulg ²)	ENSAYO N°	H_0/H	Y (lb/pulg ²)
1	2,49	5,4	10	7,14	2,8
2	1,48	11,8	11	6,56	2,9
3	1,35	15,2	12	6,45	3,0
4	2,10	6,6	13	4,04	3,9
5	4,72	3,3	14	5,97	3,1
6	5,33	3,3	15	2,33	6,0
7	4,71	3,5	16	3,03	4,7
8	2,96	4,8	17	1,89	7,8
9	2,01	7,2	18	2,06	7,0

Las curvas 2 y 3, permiten apreciar que, cuando se consideran sistemas de arcilla y agua con igual contenido de agua, la plasticidad es mayor cuando mas alto es el valor de fluencia, tanto en el caso de compresión, como en el de extrusión.

CONCLUSIONES

1. Los resultados experimentales han demostrado que existe una relación directa entre los índices de plasticidad determinados según los métodos de Atterberg, Pfefferkorn y Linseis.
2. Extendiendo los conceptos de Astbury, se ha podido establecer que el índice de Atterberg representa la plasticidad extrínseca, determinada por la cantidad de agua que acepta la arcilla; en cambio, el índice de Pfefferkorn es el resultado de dos contribuciones: la plasticidad extrínseca anteriormente indicada, y la intrínseca, que se manifiesta por medio del poder ligante o cohesión de la pasta. Por lo tanto, comparativamente, el índice de Pfefferkorn representa para un laboratorio industrial, un mejor conocimiento del comportamiento plástico del material.
3. El plasticímetro según Linseis, reproduce el proceso de una pasta arcillosa en una planta industrial, y es el equipo más indicado para estudiar el comportamiento de pastas que deban ser sometidas a esfuerzos de tracción y/o extrusión. La curva obtenida mediante la relación de tracción/extrusión, en función del contenido de agua, es la que mejor representa el comportamiento del material, y permite diferenciar en forma más neta a arcillas de plasticidad parecida.

4. Introduciendo en la fórmula de Capria

$$P = Y \left(a + b \sqrt{\frac{A \eta}{Y R^3}} \right)$$

valores provenientes de los ensayos con el plasticímetro de Pfefferkorn y el reómetro de extrusión de Durrell-Severa, se

determinaron viscosidades de pastas arcillosas que coinciden en el rango de las encontradas en la bibliografía, para el caso de flujos muy lentos, o sea para altos números de Saint Venant (0,01 a 0,04 cm/seg). Para flujos mas rápidos, la fórmula de Capriz no se cumple, probablemente por que ha sido deducida para el caso de flujo pistón, y por la influencia de efectos tixotrópicos del sistema.

5. El tratamiento matemático relativo al comportamiento de una pasta arcillosa sometida a extrusión, considera la existencia de flujo pistón. Se comprobó experimentalmente que el flujo real es mas complejo y el perfil es parabólico. La lubricación con aceite liviano, del tubo y la boquilla de extrusión, no modifican sustancialmente el tipo de flujo, con respecto al que existe cuando se trabaja sin lubricación.

6. El valor numérico del contenido de agua de una pasta arcillosa que procesada por compresión, permita obtener un valor de fluencia Y , igual a 302 g/cm^2 ($4,44 \text{ lb/pulg}^2$), es el índice de plasticidad según Pfefferkorn de la mica.

7. Para el caso particular de una muestra, se ha encontrado una relación entre los valores de fluencia en compresión y extrusión. Si P es la presión mínima de extrusión, o valor de fluencia en extrusión, e Y es el valor de fluencia en compresión, se encontró que

$$\log P = a + b \log Y$$

donde $a = 0,742$, y $b = 1,212$. Es probable que la relación anterior sea general, lo cual debe ser comprobado con experimentos posteriores.

8. Introduciendo en la fórmula anterior, el valor de $Y = 4,44 \text{ lb/pulg}^2$ se encuentra que el índice de plasticidad según Pfefferkorn es el valor numérico de la humedad de una pasta formada por la arcilla

909 y agua, cuya presión mínima de extrusión, o valor de fluencia en extrusión P, sea igual a $33,6 \text{ lb/pulg}^2$, como ha sido comprobado experimentalmente.



BIBLIOGRAFIA

1. Astbury N.F. Trans. Brit. Ceram. Soc. 60, 1-32 (1961).
2. Astbury N.F. Trans. Brit. Ceram. Soc. 62, 1-18 (1963).
3. Astbury N.F. y Moore F. Science in Ceramics Vol.2. Academic Press for Brit. Ceram. Soc. (1965).
4. Astbury N.F., Moore F. y Lockett J.A. Trans. Brit. Ceram. Soc. 65, 435 (1966).
5. Astbury N.F. Bol. Soc. Española Ceram. 6, 337-355 (1967).
6. ASTM. Designation C.131 (1947).
7. Atterberg A. Institut Mitt. Bodenk. 1, 16 (1911).
8. Atterberg A. Institut Mitt. Bodenk. 2, 149 (1912).
9. Baudran A. y Bardin C. Bull. Soc. Franc. Céram. N°52, 27-35 (1961).
10. Bird H.B., Stewart W.E. y Lightfoot L.H. Fenómenos de Transporte (pag. 3-17), Ed. Reverté, Barcelona (1964).
11. Bird H.B., Stewart W.E. y Lightfoot L.H. Fenómenos de Transporte (pag. 3-21), Ed. Reverté, Barcelona (1964).
12. Bird H.B., Stewart W.E. y Lightfoot L.H. Fenómenos de Transporte (pag. 3-33), Ed. Reverté, Barcelona (1964).
13. Eloor L.C. Trans. Brit. Ceram. Soc. 56, 423-481 (1957).
14. Capriz G. Trans. Brit. Ceram. Soc. 62, 339 (1963).
15. Capriz G. y Laratte J. Trans. Brit. Ceram. Soc. 64, 19-31 (1965).
16. Casagrande L. Public Roads 13, 121-130 (1932).
17. Casanova H.J., Krenkel T.G. y Pereira E. Industria y Mineria Vol. 26, n°2 (1958).
18. Lital W. Silicate Science Vol. I. (pag. 486). Academic Press, New York (1964).
19. Fredrickson A.G. y Bird H.G., Ind. Eng. Chem. 50, 347 (1958).
20. Bruner E. Ber. Deut. Keram. Ges. 11, 135-142 (1954).
21. Heuse T. Ber. Deut. Keram. Ges. 34, 27 (1957).
22. Hind S.E. Trans. Brit. Ceram. Soc. Edgwood Dictionary Vol. 177 (Part I), 208 (Part II) (1930).

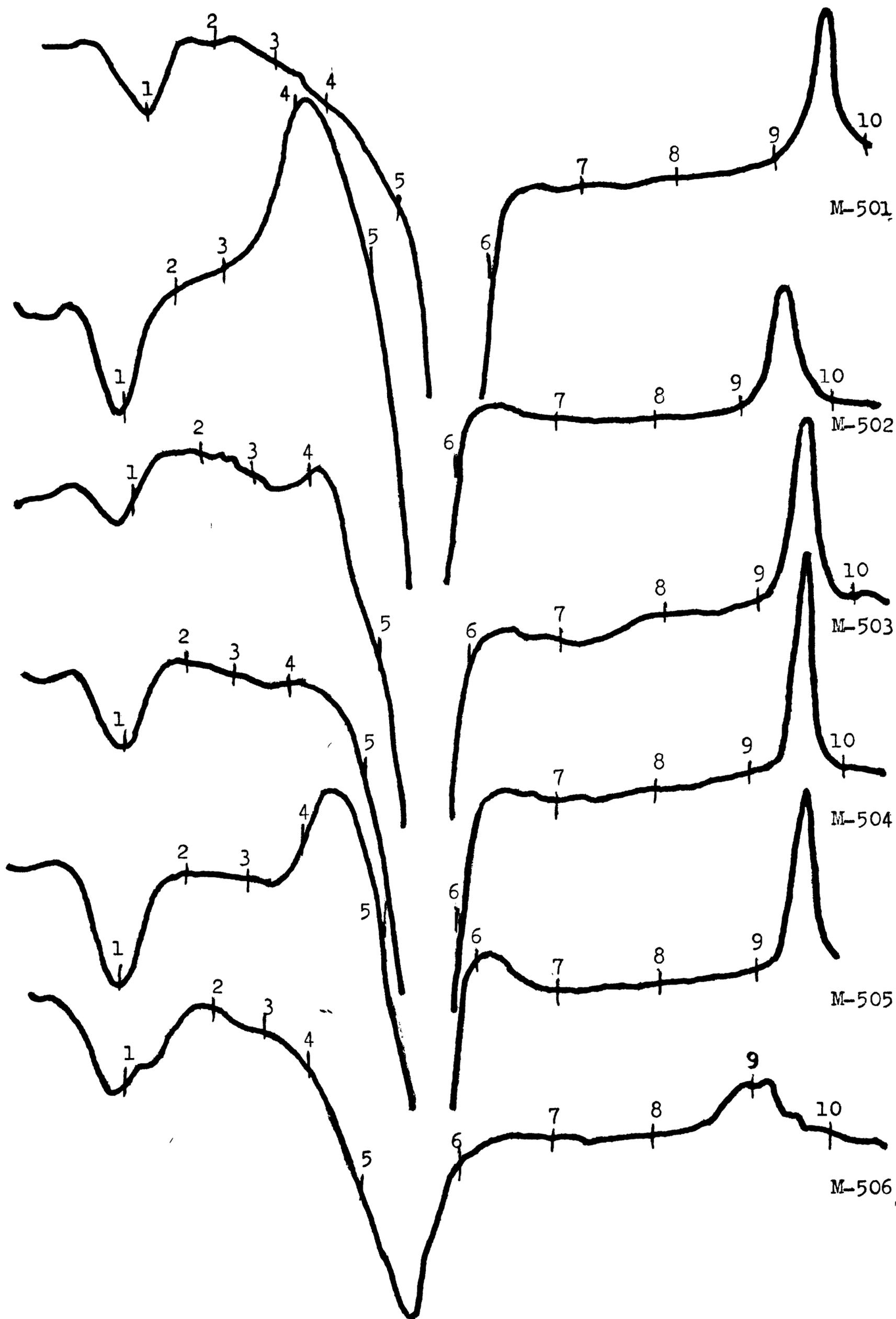
23. Hind S.R. y Degg B.P. Private comm. 1933 (Parts 3-6), citada en ref. 13, pag. 429.
24. Kingery W.D. y Francl C.J. Am. Ceram. Soc. 37, 596 (1954).
25. Linseis M. Sprechs. 83, 352, 389, 409, 433, 456 (1950).
26. Linseis M. Ber. Deut. Keram. Ges. 29, 35-37 (1952).
27. Linseis M. Sprechs. 87, 206 (1954).
28. Macey H.H. Trans. Brit. Ceram. Soc. 43, 5 (1944); 47, 183 (1948), 47, 259 (1948); 47, 291 (1948).
29. Marshall G.E., Am. Ceram. Soc. Bull. 34, 54 (1955).
30. Marshall G.E. The Colloid Chemistry of the Silicate Minerals. Academic Press Inc. New York 1959.
31. Mase P. Scient. Instrum. 30, 418 (1953).
32. McQuarry A., J., Am. Ceram. Soc. 38, 341 (1955).
33. Nerten F.H., J. Am. Ceram. Soc. 21, 33 (1955).
34. Nerten F.H. Elements of Ceramics. Addison-Wesley Press Inc. (1952)
35. Ormsby G.C., Am. Ceram. Soc. Bull. 39, 408-12 (1960).
36. Owen V.J. y Werrall W.E., Trans. Brit. Ceram. Soc. 59, 285 (1960).
37. Pfefferkorn K. Sprechs. 57, 297 (1924); 58, 183 (1925); 59, 457, (1926).
38. Rieke R. Richtlinien und Vorschläge des Materialprüfungsausschusses Feinkeramik, der Deut. Keram. Ges. Verlag Deut. Keram. Ges. Bonn (1960).
39. Rescoe K.H. Proc. 3rd. Int. Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering (1953).
40. Resenthal G. Ber. Deut. Keram. Ges. 40, 544 (1963).
41. Russell R. Jr. y Hanks C.F. Jr., J. Am. Ceram. Soc. 25, 16 (1942).
42. Scharrer E. y Hofmann U., Ber. Deut. Keram. Ges. 35, 278 (1958).
43. Schwartz H. J. Am. Ceram. Soc. 35, 41-43 (1952).
44. Searle A.D. y Grimshaw R.W. The Chemistry and Physics of Clays and other Ceramic Materials. Ed. E. Benn Limited. London (1960).
45. Shiraki Y. y Fukuura Y., J. Cer. Ass. Japan, 63, 527 (1955).

46. Thiess L.H., J. Am. Ceram. Soc. 22, 286 (1939).
47. Van Olphen H. An Introduction to Clay Colloid Chemistry (Chapter Drabender Micrograph). Wiley & Sons, New York (1953).
48. Best. R. B. y Lawrence W. G. Bull. Am. Ceram. Soc. 38, 135(1959)
49. White E.A. Am. Ceram. Soc. Bull. 44, 663 (1965).
50. Wilson L.O., J. Am. Ceram. Soc. 19, 115-20 (1936).

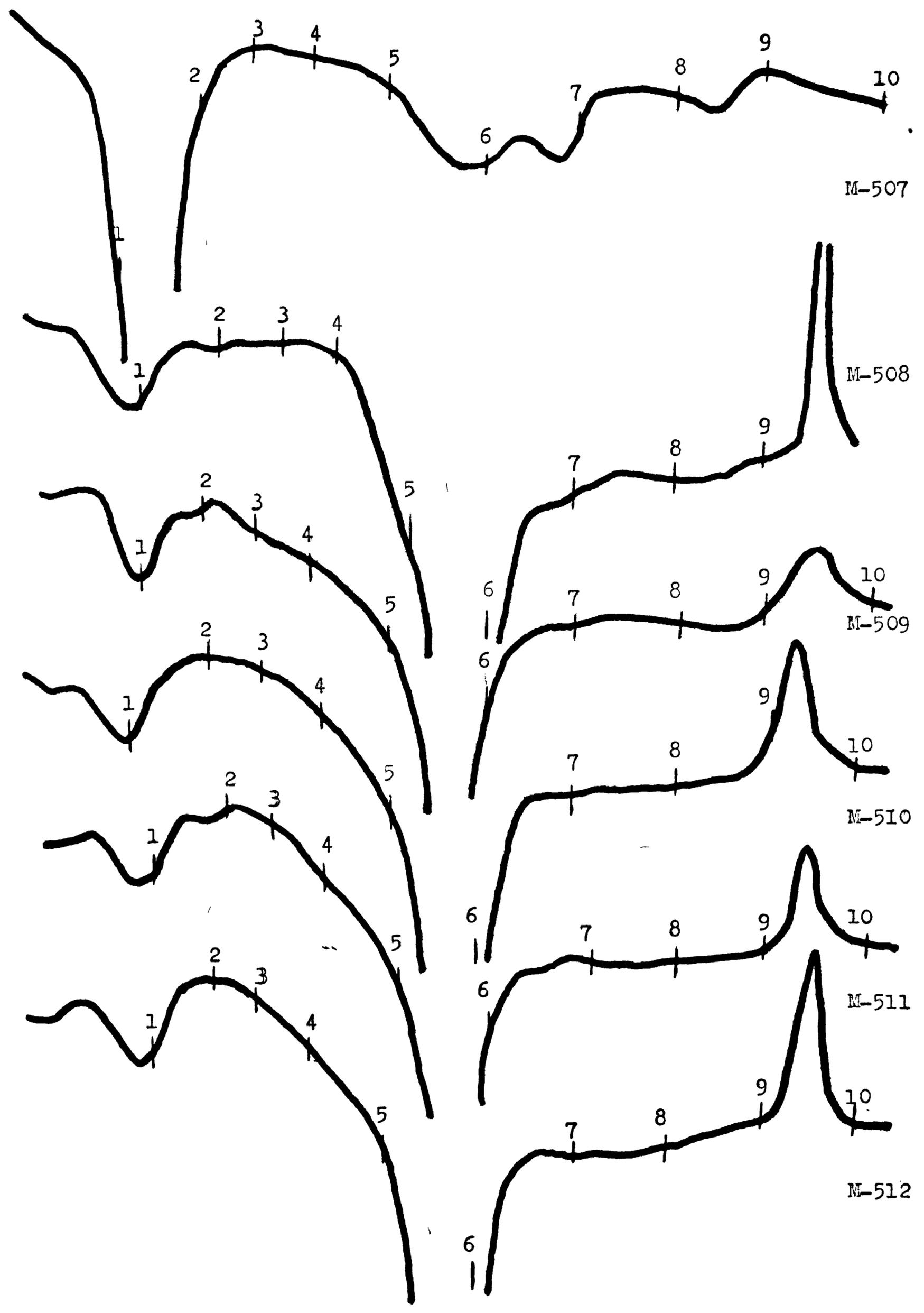
APENDICE

	<u>Páginas</u>
1. Termogramas obtenidos mediante análisis térmico diferencial	A1 a A3
2. Difractogramas de las muestras seleccionadas	A4 y A5
3. Método de Pfefferkorn. Valores experimentales y calculados para determinación de plasticidad	A6 y A7
4. Determinación del índice de Atterberg, valores experimentales y calculados	A8
5. Representación de valores obtenidos con el plasticímetro 405 y explicación acerca de la confección del diagrama triangular	A9
6. Plasticímetro 405. Valores obtenidos y calculados.	A10 a A14
7. Representación de tracción/extrusión en función del contenido de agua. Valores individuales	A15
8. Deducción de la relación entre la fuerza y el valor de fluencia en compresión	A16
9. Reómetro de Burrell-Severs. Valores experimentales y calculados	A17 a A19
10. Cálculo de valores de fluencia a partir de las determinaciones con el método de Pfefferkorn	A20
11. Relación entre contenido de agua basado en la muestra seca y en la muestra húmeda	A21
12. Deducción de los coeficientes a y b de la fórmula de Capria	A22 a A30
13. Cálculo para el gráfico de Capria (curva teórica)	A31
14. Cálculo de viscosidad promedio y del número de Saint Venant a partir de los valores experimentales de extrusión	A31 y A32

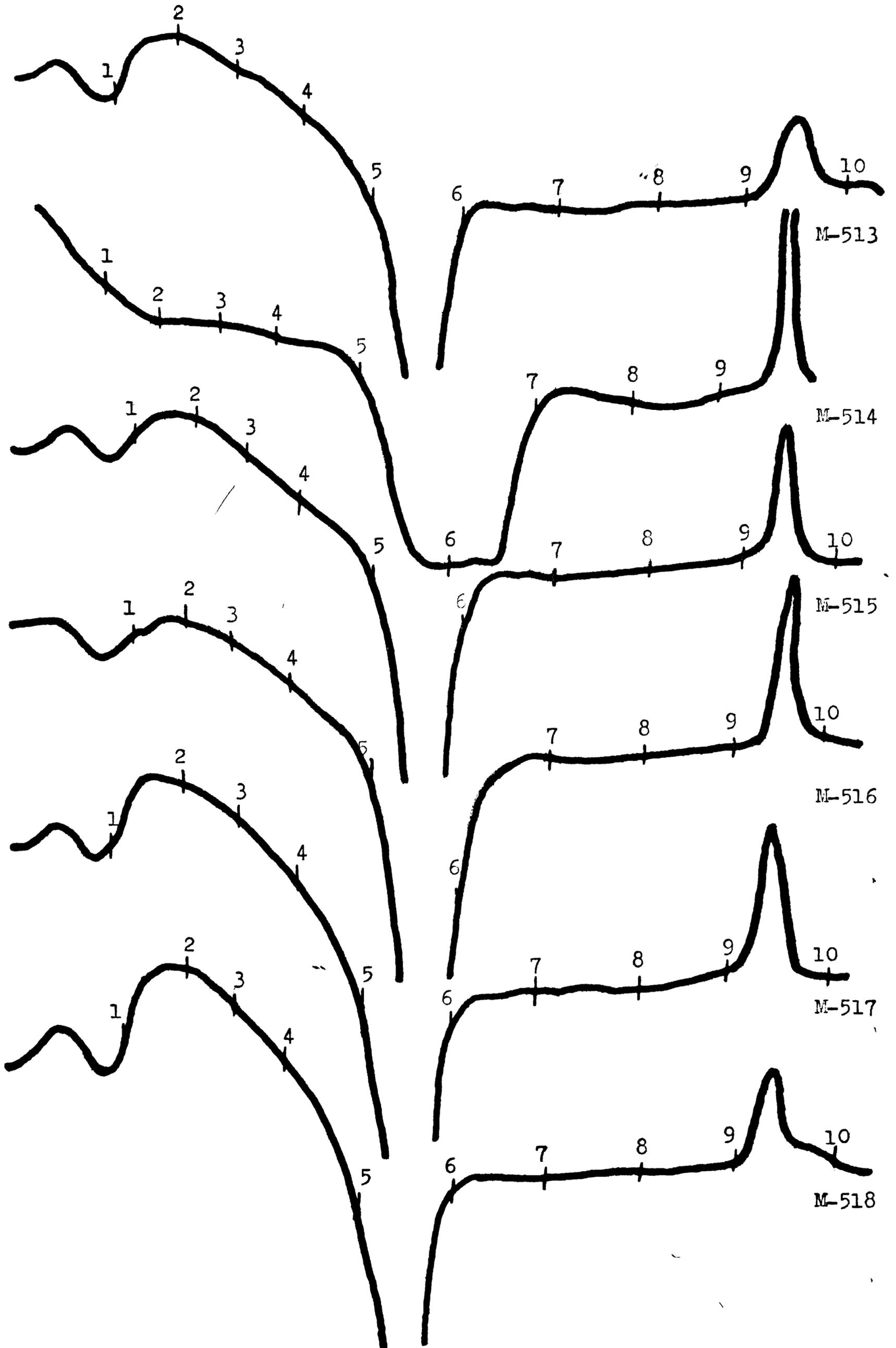
TERMOGRAMAS OBTENIDOS MEDIANTE
ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL - I



TERMOGRAMAS OBTENIDOS MEDIANTE
ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL - II

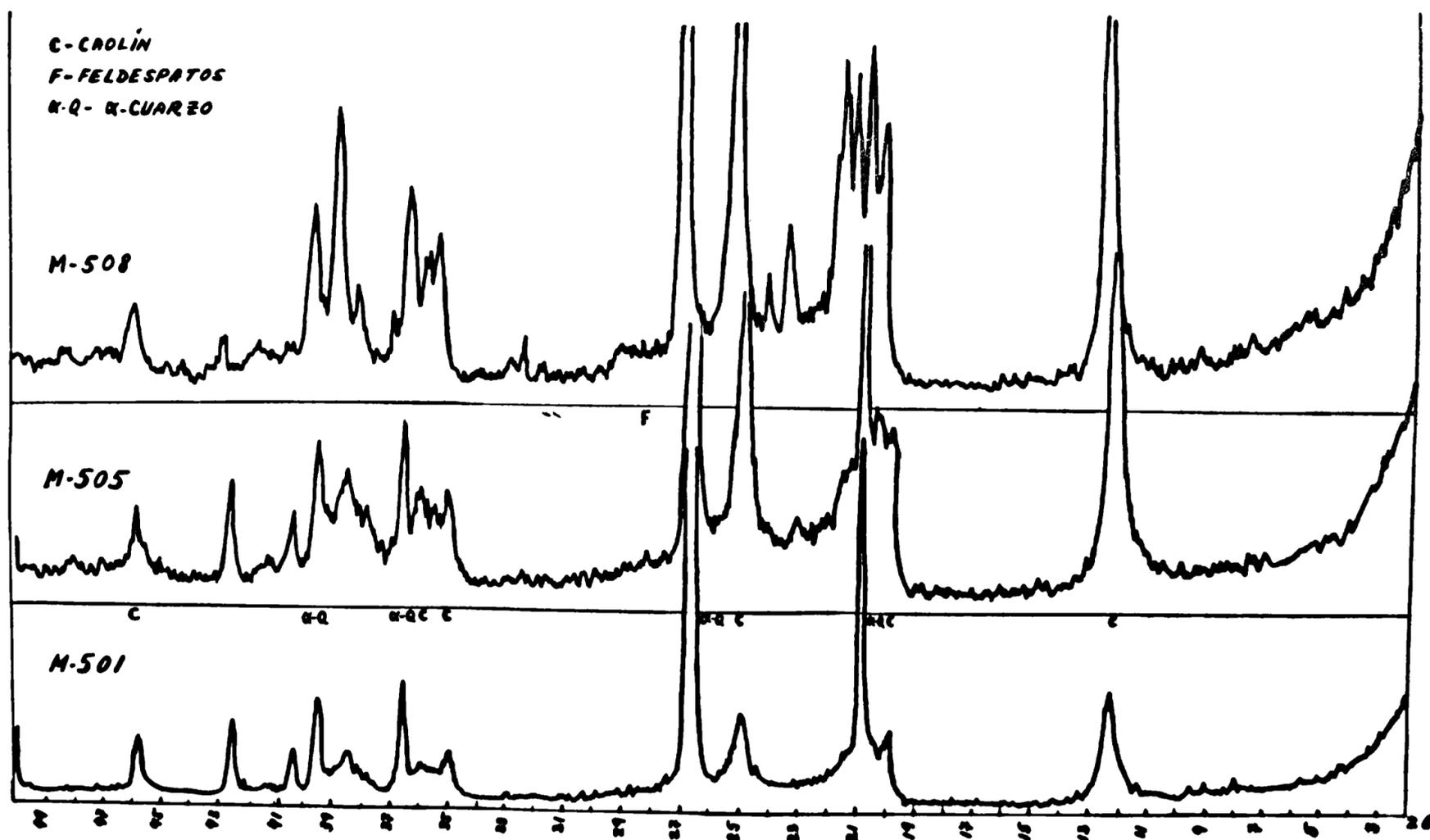
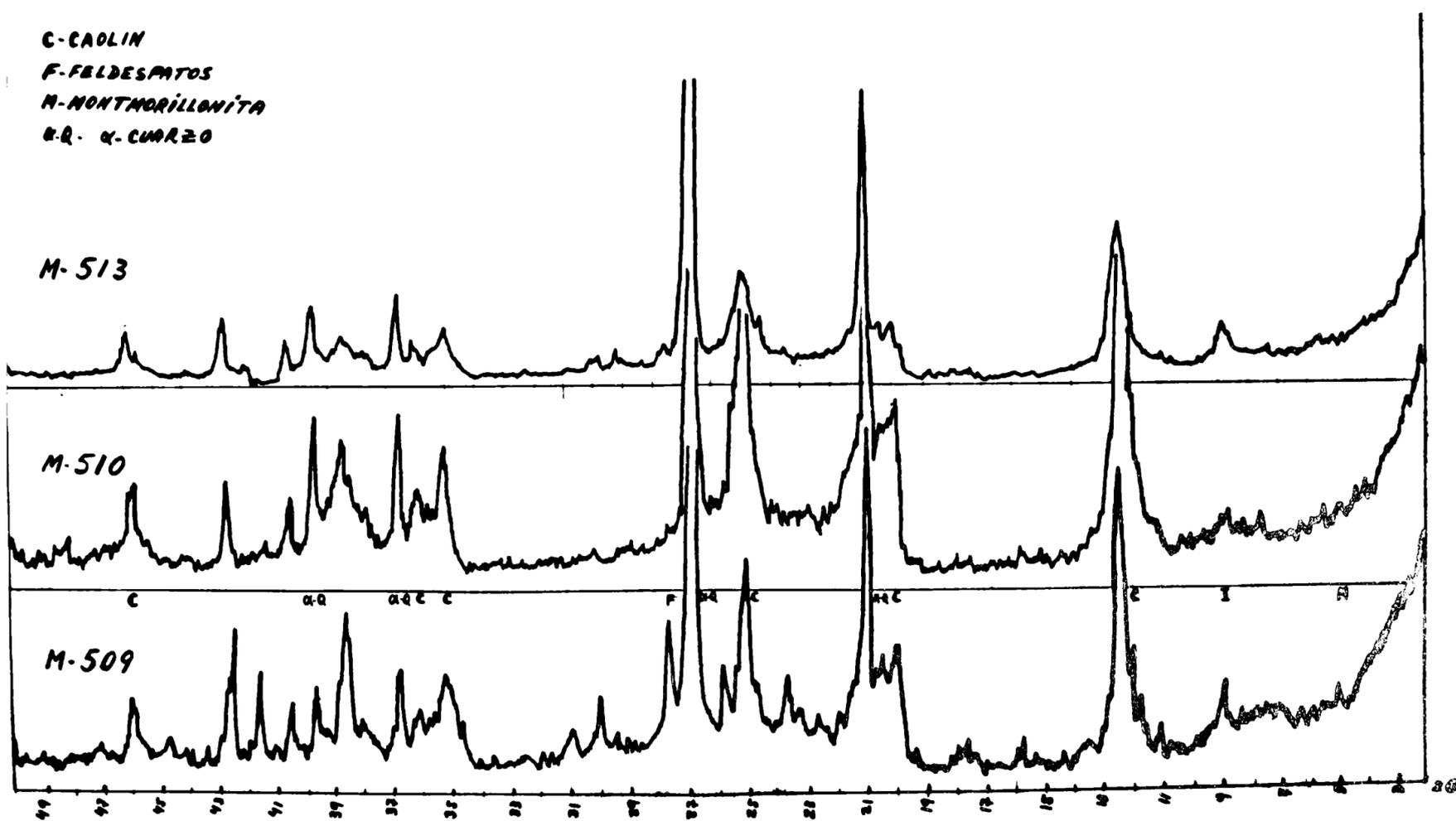


TERMOGRAMAS OBTENIDOS MEDIANTE
ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL - III



DIFRACTOGRAMAS CORRESPONDIENTES A LAS MUESTRAS
SELECCIONADAS - I

C-CAOLIN
F-FELDSPATOS
M-MONTMORILLONITA
R-Q- α -CUARZO



DIFRACTOGRAMAS CORRESPONDIENTES A LAS MUESTRAS

SELECCIONADAS-II

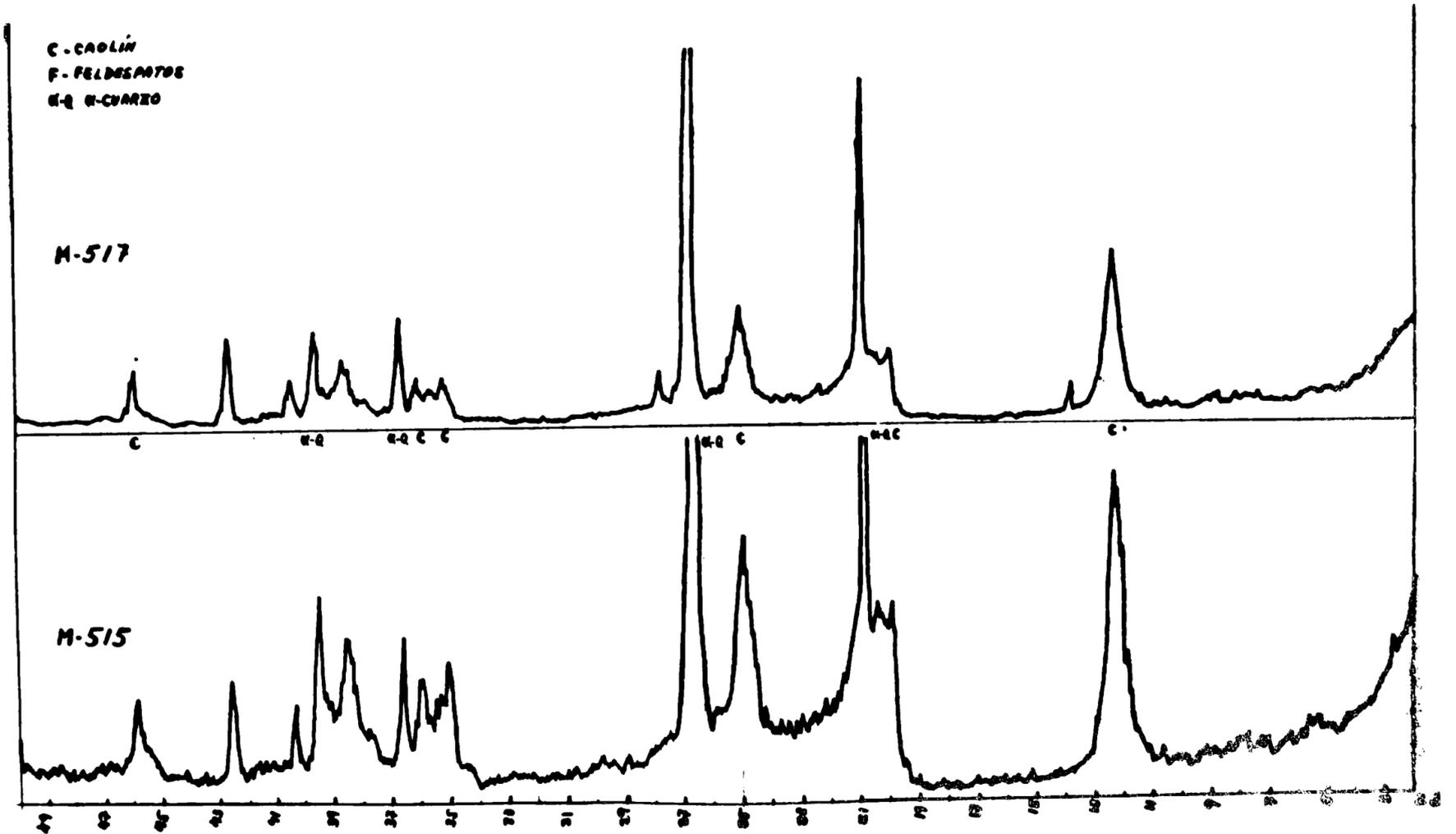


TABLA I
CALCULOS CORRESPONDIENTES A LOS ENSAYOS PARA DETERMINACION DE
INDICES DE PLASTICIDAD DE ARCILLAS NACIONALES SEGUN PFEFFERKORN

ENSAYO Nº	MUESTRA	H _o /H	PESO HUMEDA	PESO SECA	DIFE- RENCIA	% H ₂ O	VALOR PARA 3,3
1	501	2,00	63,60	48,20	15,40	24,2	26,6
2	501	1,43	65,65	51,30	14,35	21,8	26,6
3	501	5,48	58,80	42,25	16,59	28,2	26,6
4	502	2,35	59,20	41,00	18,20	30,6	31,9
5	502	1,45	60,50	43,20	17,30	28,6	31,9
6	502	1,27	62,00	45,50	16,50	26,6	31,9
7	502	4,65	55,10	37,00	26,60	32,8	31,9
8	502	1,36	61,00	44,40	32,80	27,2	31,9
9	503	2,52	56,75	37,50	19,25	33,9	35,0
10	503	1,65	58,60	40,00	18,60	31,7	35,0
11	503	1,32	60,70	43,05	17,65	29,0	35,0
12	503	5,25	52,70	33,20	19,50	37,0	35,0
13	504	1,51	60,60	43,85	16,75	27,6	31,5
14	504	1,36	61,75	45,50	16,25	26,3	31,5
15	504	1,57	60,15	43,25	16,90	28,1	31,5
16	504	7,15	49,10	31,40	17,70	36,0	31,5
17	504	2,66	58,25	40,50	17,75	30,5	31,5
18	504	2,05	59,55	42,00	17,55	29,5	31,5
19	505	2,22	62,95	48,20	14,75	23,4	24,5
20	505	1,35	65,45	51,40	14,05	21,5	24,5
21	505	1,20	66,65	52,80	13,70	20,6	24,5
22	505	5,00	59,95	44,80	15,15	25,3	24,5
23	506	1,42	65,50	49,97	15,53	23,7	28,0
24	506	1,29	65,70	50,55	15,15	23,1	28,0
25	506	5,45	59,15	41,50	17,65	29,8	28,0
26	506	1,74	63,75	47,70	16,05	25,2	28,0
27	507	2,95	46,50	26,20	20,30	43,7	44,3
28	507	10,00	41,05	16,00	25,05	61,0	44,3
29	507	5,88	45,55	19,55	26,00	57,1	44,3
30	507	4,44	47,30	21,30	26,00	55,0	44,3
31	508	1,21	68,00	58,50	9,50	14,0	19,4
32	508	3,33	66,35	53,40	12,95	19,5	19,4
33	508	2,00	68,50	56,80	11,70	17,1	19,4
34	508	1,56	70,30	59,35	10,95	15,6	19,4

TABLA II

ENSAYO Nº	MUESTRA	H _o /H	PESO HUMEDA	PESO SECA	DIFE- RENCIA	% H ₂ O	VALOR PARA 3,3
35	509	2,49	62,20	45,70	16,50	26,5	27,9
36	509	1,48	65,00	49,80	15,20	23,4	27,9
37	509	1,35	65,75	50,95	14,90	22,7	27,9
38	509	2,10	62,00	45,95	16,05	25,9	27,9
39	509	4,72	58,70	41,30	17,40	29,6	27,9
40	510	6,68	61,90	46,20	15,70	25,1	21,1
41	510	4,20	64,60	50,20	14,40	22,3	21,1
42	510	1,70	66,55	53,95	12,60	18,9	21,1
43	511	5,00	59,25	42,20	17,05	28,4	26,6
44	511	2,41	61,50	45,95	15,55	25,3	26,6
45	511	1,78	63,35	48,05	15,30	24,2	26,6
46	512	3,61	58,95	42,00	16,95	28,8	28,4
47	512	2,41	60,75	44,20	16,55	27,2	28,4
48	512	1,54	62,55	47,10	15,45	24,7	28,4
49	513	7,20	48,00	30,50	17,50	36,5	31,6
50	513	1,95	60,50	43,30	17,20	28,4	31,6
51	513	1,48	62,15	45,80	16,35	26,3	31,6
52	514	4,45	63,00	47,00	16,00	25,4	25,3
53	514	1,95	63,85	48,40	15,45	24,2	25,3
54	514	1,48	64,00	49,65	14,35	22,4	25,3
55	515	6,35	53,50	34,05	19,45	36,4	30,9
56	515	2,05	59,95	44,25	15,70	26,2	30,9
57	515	1,90	58,95	44,60	14,35	24,3	30,9
58	516	4,62	63,80	49,00	14,80	23,2	21,8
59	516	1,78	68,20	55,20	13,00	19,1	21,8
60	516	1,14	69,25	57,00	12,25	17,7	21,8
61	517	3,80	60,60	44,15	16,45	27,1	26,6
62	517	1,94	63,60	47,95	15,65	24,6	26,6
63	517	1,35	65,70	51,45	14,25	21,7	26,6
64	518	7,28	57,50	41,35	16,15	28,1	25,0
65	518	2,47	62,70	47,15	14,55	23,2	25,0
66	518	4,22	60,40	44,50	15,90	26,3	25,0
67	518	2,14	64,20	50,00	14,20	22,1	25,0

TABLA III

CALCULO DE INDICES DE ATTERBERG

MUESTRA	LIMITE PLASTICO SUPERIOR (A)			LIMITE PLASTICO INFERIOR (B)			Índice de Atterberg
	Peso hf- meda (g)	Peso se- ca (g)	Dife- rencia H ₂ O	Peso hf- meda (g)	Peso se- ca (g)	Dife- rencia H ₂ O	
501	17,740	12,587	5,153	2,491	2,002	0,489	19,6
505	9,238	6,823	2,415	4,384	3,614	0,770	17,6
508	20,763	16,603	4,160	4,094	3,522	0,572	16,2
509	14,319	10,025	4,294	4,021	3,285	0,736	18,3
510	12,429	9,285	3,144	4,309	3,566	0,743	17,2
513	8,361	5,536	2,825	4,165	3,176	0,989	23,7
515	15,017	9,642	5,375	3,063	2,419	0,644	21,0
517	16,864	12,168	4,696	5,737	4,798	0,939	16,4

REPRODUCCION DE VALORES OBTENIDOS CON EL PLASTICIMETRO 403

Los valores reproducidos en las páginas A10, A11 y A12, corresponden a cada una de las determinaciones individuales con el plasticímetro 403, que luego fueron promediadas y aparecen en las páginas A13 y A14. Es interesante tener una idea de la dispersión de los datos, que existiría en caso de representar en un diagrama de tracción/extrusión en función del contenido de agua, los valores individuales, antes de sacar los promedios respectivos. Un gráfico que representa esta relación, para cada una de las muestras ensayadas, aparece en la página A15 de este apéndice.

CONFECCION DEL DIAGRAMA TRIANGULAR

Para la confección del diagrama triangular se utilizó el siguiente procedimiento: dado que el valor correspondiente a tracción es muy bajo, con respecto a los de extrusión y humedad, el eje que representa los valores de tracción, indica valores entre 0 y 5, mientras que los correspondientes a extrusión y humedad, se representan entre 0 y 100. De este modo los valores graficados son 20 veces mayores que los obtenidos, en lo que respecta al ensayo de tracción. Una vez anotados estos tres valores, se halla la proporción a 100 de los mismos, dado que la suma de las distancias de cada punto a cada uno de los tres ejes, debe sumar 100. De este modo se han calculado los valores que se reproducen en las tablas VII y VIII, con los cuales se confeccionó el diagrama triangular respectivo.

TABLA IV
PLASTICIMETRO 405. VALORES OBTENIDOS Y CALCULADOS.

ENSAYO N°	MUES- TRA	TRAC CION (kg/cm ²)	EXTRU- SION (kg/cm ²)	TRAC/EXTR x 1000 -	PESO HUMEDA (g)	PESO SECA (g)	DI FEREN CIA (g)	% H ₂ O
51	501	0,44	8	55	7,412	5,483	1,929	26,0
52	501	0,44	8	55	8,317	6,166	2,151	25,9
53	501	0,45	7	64	9,283	6,829	2,454	26,4
54	501	0,50	8	62	7,796	5,808	1,988	25,5
55	501	0,60	12	50	9,388	7,154	2,234	23,8
56	501	0,64	13	49	9,053	6,892	2,161	23,9
57	501	0,61	13	47	9,300	7,089	2,211	23,8
58	501	0,82	12	68	9,089	6,941	2,148	23,6
59	501	0,87	13	67	11,419	8,739	2,680	23,5
60	501	0,92	13	71	8,351	6,307	2,044	24,5
61	501	0,83	13	64	10,406	7,909	2,497	24,0
66	501	3,26	37	88	6,030	4,847	1,183	19,6
67	501	3,54	37	96	4,743	3,804	0,939	19,8
68	501	3,52	37	95	7,151	5,763	1,388	19,4
69	505	0,40	8	50	4,644	3,507	1,137	24,5
70	505	0,39	9	43	4,849	3,672	1,177	24,3
71	505	0,38	7	54	6,251	4,732	1,519	24,3
72	505	0,38	8	48	4,686	3,541	1,145	24,4
73	505	1,54	24	64	5,314	4,201	1,113	20,9
76	505	1,60	23	70	5,864	4,632	1,232	21,0
79	505	2,60	34	76	5,364	4,278	1,086	20,2
82	505	2,26	33	68	4,794	3,805	0,989	20,6
84	505	2,56	32	80	5,113	4,070	1,043	20,4
35	508	0,22	5	44	6,507	5,194	1,313	20,2
36	508	0,23	7	33	9,655	7,807	1,848	19,1
37	508	0,23	7	33	10,528	8,438	2,090	19,8
38	508	0,24	18	13	5,817	4,819	0,998	17,2
39	508	0,38	16	15	9,681	8,027	1,654	17,1
40	508	0,38	17	22	10,085	8,410	1,675	16,6
46	508	1,37	65	21,	9,927	8,463	1,464	14,8
47	508	1,98	64	31	12,015	10,242	1,773	14,8
48	508	1,50	62	24	11,690	9,961	1,729	14,8
49	508	1,48	63	23	9,002	7,674	1,328	14,8
50	508	1,61	63	26	9,892	8,382	1,510	15,3
208	508	0,21	9	23	6,574	5,398	1,176	17,9
209	508	0,28	11	25	7,413	6,047	1,366	18,4
210	508	0,25	11	23	5,368	4,366	1,002	18,7
211	508	0,28	10	28	4,693	3,808	0,885	18,9
212	508	0,30	11	27	3,195	2,583	0,612	19,2

TABLA V
PLASTICIMETRO 405. VALORES OBTENIDOS Y CALCULADOS

ENSAYO N°	MUES TRA	TRAC CION (kg/cm ²)	EXTRU SION (kg/cm ²)	TRAC/EXTR x 1000 -	PESO HUMEDA (g)	PESO SECA (g)	DI FEREN CIA (g)	% H ₂ O
4	509	0,54	7	77	7,367	5,430	1,937	26,3
7	509	0,49	7	70	8,427	6,213	2,214	26,3
9	509	0,63	8	79	8,580	6,333	2,247	26,2
19	509	1,04	13	80	9,577	7,360	2,217	23,2
20	509	1,14	14	81	7,681	5,937	1,744	22,7
21	509	1,12	14	80	9,063	7,007	2,056	22,7
22	509	1,40	16	88	7,979	6,189	1,790	22,4
25	509	1,75	19	92	9,921	7,780	2,131	21,5
26	509	1,94	19	102	8,458	6,633	1,825	21,6
28	509	1,76	18	98	8,149	6,389	1,760	21,6
29	509	1,68	18	93	8,018	6,316	1,702	21,2
90	510	1,56	16	98	5,417	4,343	1,074	19,8
91	510	1,71	18	95	5,127	4,123	1,004	19,6
92	510	1,79	18	99	4,633	3,737	0,896	19,3
94	510	1,82	19	96	5,471	4,413	1,058	19,3
95	510	2,38	28	85	3,314	2,688	0,626	18,9
96	510	2,20	25	88	4,066	3,304	0,762	18,7
97	510	2,50	27	92	4,721	3,836	0,885	18,8
98	510	2,30	28	82	4,552	3,701	0,851	18,7
151	510	1,56	17	92	6,548	5,251	1,297	19,8
152	510	1,56	20	78	6,284	5,077	1,207	19,2
153	510	1,54	18	86	5,897	4,745	1,152	19,5
154	510	1,52	18	84	6,470	5,203	1,267	19,6
163	510	0,66	10	66	4,577	3,560	1,017	22,2
164	510	0,62	9	69	5,686	4,432	1,254	22,0
165	510	0,60	9	67	4,953	3,860	1,093	22,1
169	510	1,26	14	90	5,484	4,411	1,073	19,6
170	510	1,36	15	91	6,553	5,269	1,284	19,6
171	510	1,24	15	83	6,455	5,194	1,261	19,5
172	510	1,46	16	91	6,954	5,590	1,364	19,6
176	510	3,52	35	101	4,953	4,075	0,878	17,7
177	510	3,50	38	92	3,428	2,833	0,595	17,4
178	510	3,56	36	99	6,968	5,742	1,226	17,6
194	510	0,80	10	80	5,652	4,438	1,214	21,5
195	510	0,87	10	87	5,846	4,598	1,248	21,3
196	510	0,98	12	82	6,794	5,360	1,434	21,1
197	510	1,14	12	95	6,456	5,110	1,346	20,8
198	510	1,13	13	87	5,627	4,469	1,158	20,6
199	510	1,20	13	92	6,646	5,279	1,370	20,6
203	510	0,71	10	71	6,728	5,238	1,490	22,1
204	510	0,66	9	73	6,651	5,182	1,469	22,1
205	510	0,70	9	70	6,698	5,229	1,469	21,9
206	510	0,58	8	72	6,379	4,960	1,419	22,2
207	510	0,62	9	69	6,418	4,977	1,441	22,4

TABLA VI
PLASTICIMETRO 405. VALORES OBTENIDOS Y CALCULADOS

ENSAYO N°	MUES- TRA	TRAC CION (kg/cm ²)	EXTRU- SION (kg/cm ²)	TRAC/EXTR x 1000 -	PESO HUMEDA (g)	PESO SECA (g)	DIFEREN CIA (g)	% H ₂ O
99	513	0,55	8	69	4,005	2,744	1,211	30,2
102	513	0,52	10	52	4,849	3,372	1,477	30,5
103	513	0,50	10	50	6,198	4,319	1,879	30,3
104	513	1,59	21	76	4,094	3,064	1,030	25,2
105	513	1,42	20	71	3,772	2,784	0,988	26,2
106	513	1,28	18	71	4,974	3,681	1,293	26,0
107	513	1,48	21	70	5,376	4,027	1,349	25,1
110	513	2,82	35	81	3,979	3,069	0,910	22,9
111	513	2,62	33	79	4,494	3,468	1,026	22,8
112	513	2,55	33	77	6,833	5,293	1,540	22,5
113	515	0,50	9	56	4,623	3,184	1,439	31,1
114	515	0,42	10	42	5,103	3,539	1,564	30,6
116	515	0,46	9	51	4,675	3,249	1,426	30,5
117	515	0,85	16	53	6,079	4,388	1,691	27,8
118	515	0,92	17	54	5,893	4,250	1,643	27,9
119	515	0,90	17	53	6,912	5,000	1,912	27,7
158	515	1,53	24	64	6,651	4,970	1,681	25,3
159	515	1,66	26	64	5,776	4,328	1,448	25,1
160	515	1,54	24	64	5,082	3,792	1,290	25,4
161	515	2,56	35	73	6,683	5,108	1,575	23,6
162	515	2,42	36	67	7,537	5,790	1,747	23,2
141	517	0,57	8	71	5,496	4,129	1,367	24,9
142	517	0,62	10	62	5,011	3,783	1,228	24,5
143	517	0,52	9	57	6,205	4,664	1,541	24,8
144	517	1,80	25	72	6,678	5,233	1,445	21,6
145	517	1,62	25	65	6,428	5,055	1,373	21,4
146	517	1,55	23	67	6,710	5,271	1,439	21,4
147	517	1,57	24	65	6,869	5,399	1,470	21,4
148	517	1,39	20	70	6,203	4,840	1,363	22,0
149	517	1,19	20	60	5,781	4,509	1,272	22,0
150	517	1,27	20	64	7,894	6,172	1,722	21,8

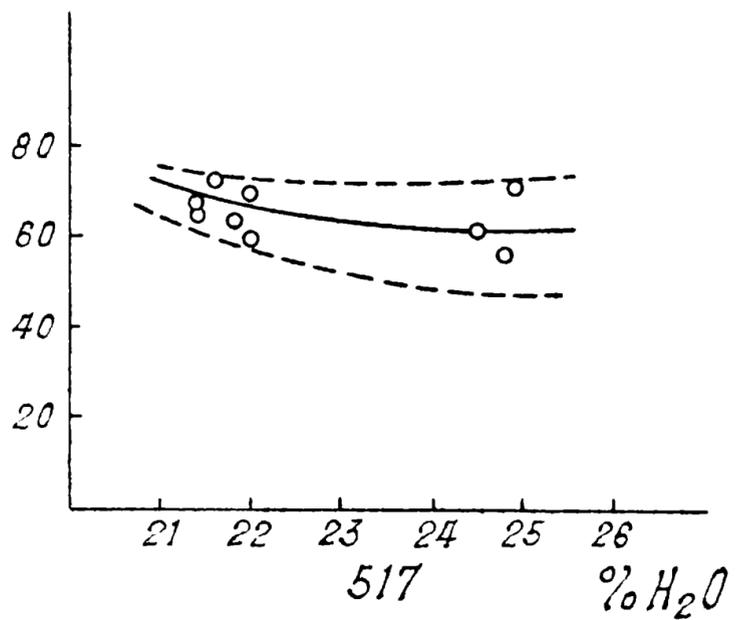
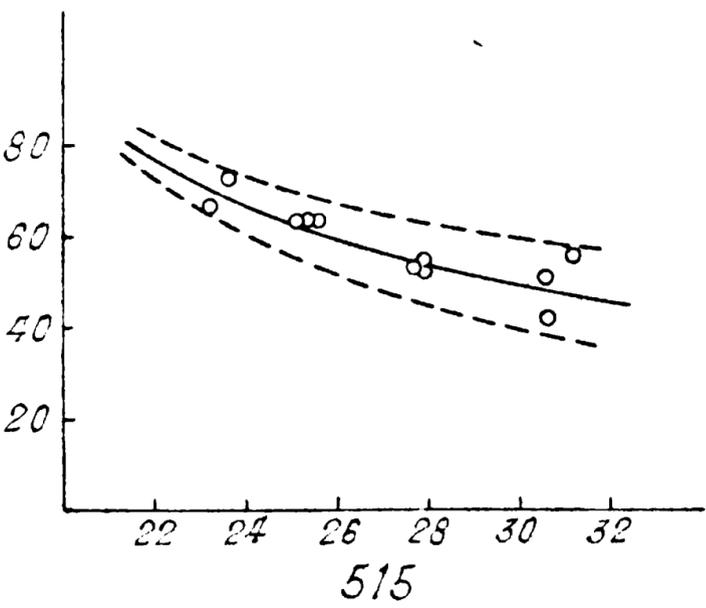
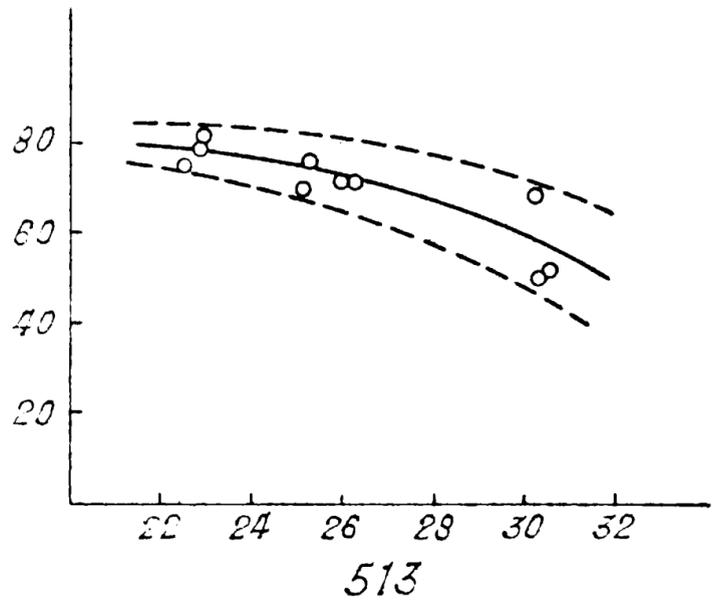
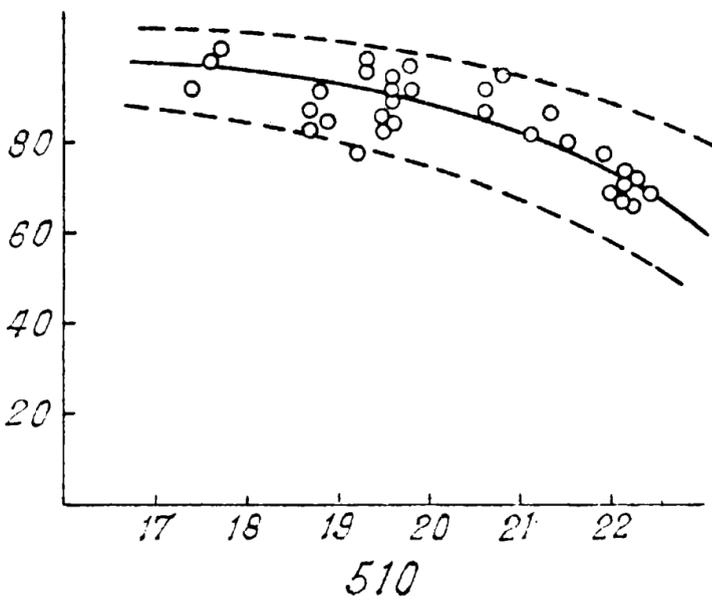
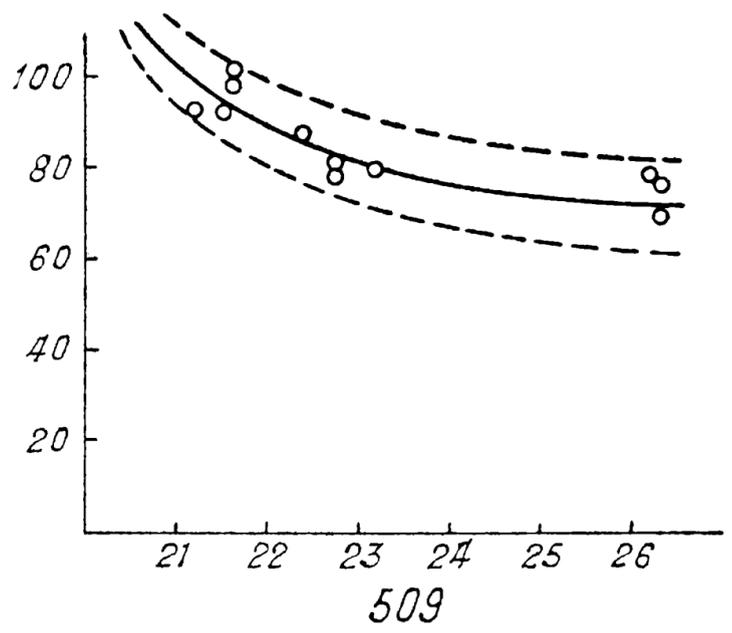
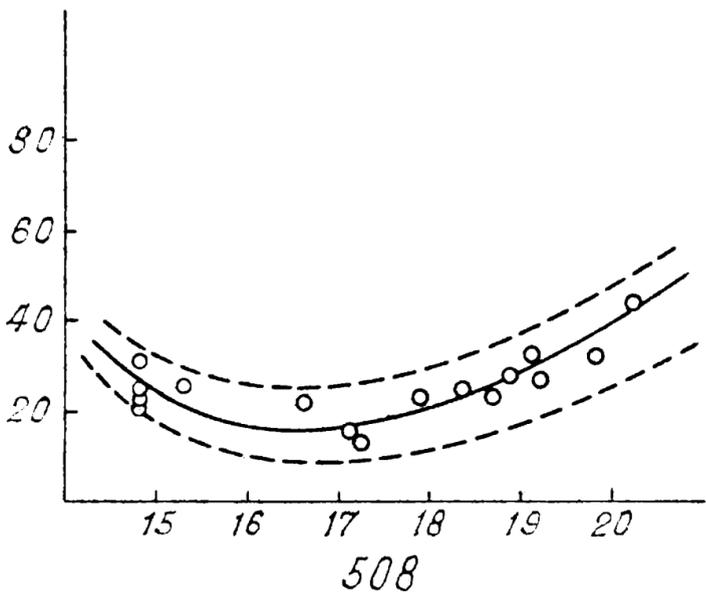
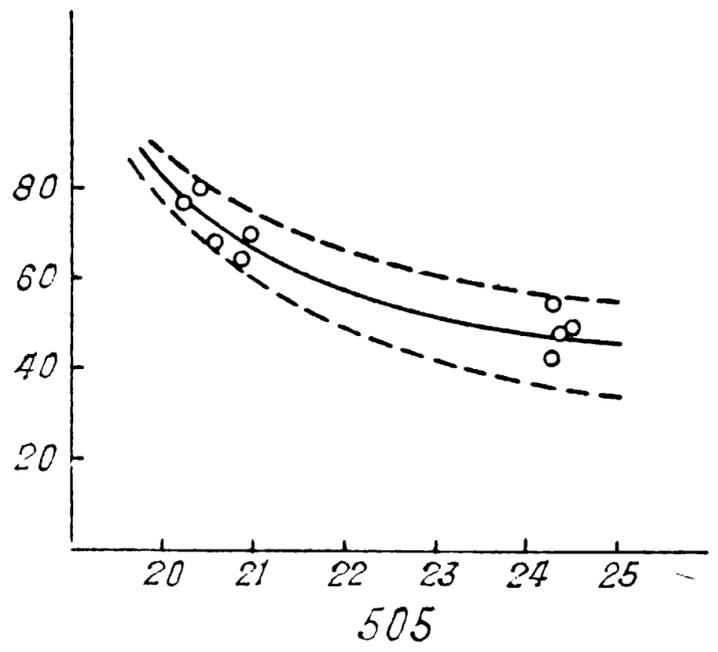
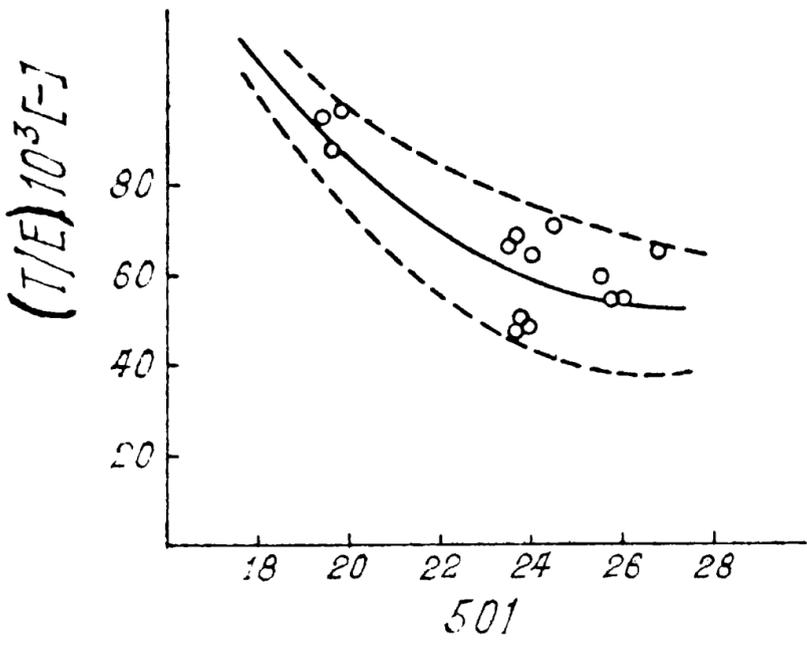
TABLA VII

MUESTRA	ENSAYOS N°	VALORES PROMEDIO			DIAGR. TRIANG.			DIAGR. TRIANG. (proporc. a 100)			
		TRAC. EXTR.	T/E $\times 10^3$	% H ₂ O	TRAC. EXTR.	HUM.		TRAC. EXTR.	HUM.		
501	51-52-53-54	0,46	7,9	58	26,0	9,2	7,9	26,0	21,3	18,3	60,4
501	55-56-57-58 59-60-61	0,76	13,0	58	23,9	15,2	13,0	23,9	29,2	25,0	45,8
501	66-67-68	3,44	37,0	93	19,6	68,8	37,0	19,6	54,9	29,5	15,6
505	69-70-71-72	0,39	8,0	49	24,4	7,8	8,0	24,4	19,4	19,9	60,7
505	73-76	1,57	23,5	67	21,0	31,4	23,5	21,0	41,4	31,0	27,6
505	79-82-84	2,47	33,0	75	20,4	49,4	33,0	20,4	48,0	32,1	19,9
508	35-36-37-38	0,23	6,0	38	19,7	4,6	6,0	19,7	15,2	19,8	65,0
508	38-39-40	0,33	17,0	19	17,0	6,6	17,0	17,0	16,2	41,9	41,9
508	46-47-48-49 50	1,59	63,0	25	14,9	31,8	63,0	14,9	29,0	57,4	13,6
508	208-209-210 211-212	0,26	10,4	25	18,6	5,2	10,4	18,6	15,2	30,3	54,5
509	4 - 7 - 9	0,55	7,3	75	26,3	11,0	7,3	26,3	24,6	16,4	60,0
509	19-20-21-22	1,18	14,2	83	22,8	23,6	14,2	22,8	38,9	23,4	37,7
509	25-26-28-29	1,78	18,5	96	21,5	35,6	18,5	21,5	47,1	24,5	27,4
510	90-91-92-94	1,72	17,8	97	19,5	34,4	17,8	19,5	48,0	24,8	27,2
510	95-96-97-98	2,34	27,0	87	18,8	46,8	27,0	18,8	50,3	29,0	20,7
510	151-152-153- 154	1,54	18,2	85	19,5	30,8	18,2	19,5	45,0	26,6	28,4
510	163-164-165	0,63	9,7	65	22,1	12,6	9,7	22,1	28,4	21,8	49,8
510	169-170-171 172	1,33	15,0	89	19,6	26,6	15,0	19,6	43,5	24,5	32,0
510	176-177-178	3,53	36,3	97	17,6	70,6	36,3	17,6	56,8	29,1	14,1
510	194-195-196	0,88	10,7	82	21,3	17,6	10,7	21,3	35,5	21,5	43,0
510	197-198-199	1,16	12,7	91	20,7	23,2	12,7	20,7	41,0	22,4	36,6
510	203-204-205 206-207	0,65	9,0	72	22,1	13,0	9,0	22,1	29,3	20,9	49,8

TABLA VIII

MUES TRA	ENSAYOS N°	VALORES PROMEDIO				DIAGR. TRIANG.			DIAGR. TRIANG. (proporc. a 100)		
		TRAC. EXTR.	T/E $\times 10^3$	% H ₂ O		TRAC. EXTR. HUM.			TRAC. EXTR. HUM.		
513	99-102-103	0,52	9,0	58	30,3	10,4	9,0	30,3	20,9	18,1	61,0
513	104-105-106 107	1,44	20,0	72	25,6	28,8	20,0	25,6	38,7	26,9	34,4
513	110-111-112	2,66	33,7	79	22,8	53,2	33,7	22,8	48,5	30,7	20,8
515	113-114-116	0,46	9,3	49	30,7	9,2	9,3	30,7	18,7	18,9	62,4
515	117-118-119	0,89	16,7	53	27,8	17,8	16,7	27,8	28,6	26,8	44,6
515	158-159-160	1,58	24,7	64	25,3	31,6	24,7	25,3	38,7	30,3	31,0
515	161-162	2,49	35,5	70	23,4	49,8	35,5	23,4	45,8	32,7	21,5
517	141-142-143	0,57	9,0	63	24,7	11,4	9,0	24,7	25,3	19,9	54,8
517	144-145-146 147	1,64	24,2	68	21,4	32,8	24,2	21,4	41,8	30,9	27,3
517	148-149-150	1,28	20,0	64	21,9	25,6	20,0	21,9	37,9	29,6	32,5

Datos Individuales de Tracción/Extrusión vs el Contenido de Agua



DEDUCCION DE LA RELACION ENTRE LA FUERZA Y EL VALOR DE FRECUENCIA
DE COMPRESION

Si se considera un cuerpo de radio inicial R_0 y altura final H_0 , deformado de modo tal que la altura y el radio se hagan cierta función del tiempo: $h(t)$, $r(t)$. Por la condición de incompresibilidad es

$$r^2 h = R_0^2 H_0 \quad (1)$$

En un sistema de coordenadas cilíndricas (r, θ, z) , suponiendo que el esfuerzo se realiza en forma normal a la cara superior del cilindro, los componentes del tensor esfuerzo serán: $2 \frac{v_z}{z}$, $-\frac{v_z}{z}$, $-\frac{v_z}{z}$. Para un plástico de Bingham (12):

$$\tau = - \left[\eta - \frac{\gamma}{\sqrt{\frac{1}{2}(\Delta:\Delta)}} \right] \Delta \quad (2)$$

donde $\mathbf{I} = (\Delta:\Delta) = \sum_i \sum_j \Delta_{ij} \Delta_{ji} = \sum_i \sum_j \Delta_{ij}^2$

$$\mathbf{I} = \left(\frac{v_z}{z}\right)^2 + \left(\frac{v_z}{z}\right)^2 + 4\left(\frac{v_z}{z}\right)^2 = 6\left(\frac{v_z}{z}\right)^2$$

$$\tau = \tau_{zz} + p = - \left[\eta - \frac{\gamma}{\sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{v_z}{z}\right)^2}} \right] 2 \frac{v_z}{z}$$

$$\tau_{zz} = -p - \frac{2\eta v_z}{z} + \frac{2\gamma}{\sqrt{3}}$$

$$\tau_{zz} = \frac{1}{3} \tau_{zz} - 2\eta \frac{v_z}{z} + \frac{2\gamma}{\sqrt{3}}$$

$$\tau_{zz} = \frac{2}{3} \tau_{zz} = -2\eta \frac{v_z}{z} + \frac{2\gamma}{\sqrt{3}}$$

$$\tau_{zz} = -3\eta \frac{v_z}{z} + \sqrt{3} \gamma$$

como el primer término de la derecha es despreciable, tendremos

$$F = \tau_{zz} \pi R^2 = \sqrt{3} \gamma \pi R^2 = \sqrt{3} \gamma A$$

por lo tanto, la presión $F/A = \sqrt{3} \gamma$. Ver Capris (14), (15).

REOMETRO DE EXTRUSION DURRILL-SILVERSVALORES EXPERIMENTALES Y CALCULADOS

TABLA IX

ENSAYO N°	TIEMPO (seg)	LONGITUD (cm)	VELOCIDAD (cm/seg)	PRESION ₂ (lb/pulg ²)	PROMEDIOS		Al ₂ O ₃
					VELOCIDAD	PRESION	
1	45	1	0,022	89			
2	35	1	0,029	89	0,025	89,0	23,8
3	82	2	0,024	89			
4	60	0,5	0,008	86	0,008	86,0	"
5	114	1	0,009	86			
6	30	0,5	0,017	87,5	0,016	87,5	"
7	72	1	0,014	87,5			
8	13	1	0,077	93	0,084	93,0	"
9	22	2	0,091	93			
10	10	1	0,100	95	0,106	95,0	"
11	25	2	0,112	95			
12	6	1	0,166	98	0,150	98,0	"
13	13	2	0,153	98			
14	22	1	0,045	76	0,047	76,0	25,5
15	41	2	0,049	76			
16	18	1	0,056	76	0,056	76,0	"
17	36	2	0,056	76			
18	60	1	0,017	67	0,018	67,0	"
19	49	1	0,020	67			
20	70	1	0,014	66	0,013	66,0	"
21	160	2	0,012	66			
22	40	1	0,025	73	0,027	73,0	"
23	70	2	0,029	73			
24	37	1	0,027	72	0,026	72,0	"
25	40	1	0,025	72			
26	11	1	0,091	78	0,080	77,3	"
27	26	2	0,077	77			
28	14	1	0,071	77			
29	52	1	0,019	55			
30	95	2	0,021	55	0,019	55,0	26,3
31	57	1	0,018	55			
32	90	0,5	0,006	51	0,006	51,0	"
33	190	1	0,005	51			
34	55	0,5	0,009	52	0,008	52,0	"
35	125	1	0,008	52			
36	40	1	0,025	61			
37	35	1	0,029	60	0,027	60,3	"
38	72	2	0,028	60			
39	10	1	0,100	65	0,096	65,0	"
40	22	2	0,091	65			

REOMILTRO DE EXTRUSION BUNELL-SEVLERS

VALORES EXPERIMENTALES Y CALCULADOS

TABLA X

ENSAYO N°	TIEMPO (seg)	LONGITUD (ca)	VELOCIDAD (cm/seg)	PRESION ₂ (lb/pulg ²)	PROMEDIOS		H ₂ O
					VELOCIDAD	PRESION	
41	10	2	0,270	71	0,225	71,0	26,3
42	8	2	0,250	71			
43	30	1	0,033	51	0,033	51,0	27,1
44	30	1	0,033	51			
45	20	1	0,050	52	0,050	52,0	"
46	40	2	0,050	52			
47	80	1	0,012	47	0,012	47,0	"
48	86	1	0,012	47			
49	5	1	0,200	56	0,220	56,0	"
50	12	2	0,240	56			
51	37	1	0,026	46	0,031	46,5	27,6
52	28	1	0,036	47			
53	12	1	0,083	51	0,080	51,0	"
54	11	1	0,091	51			
55	26	2	0,077	51	0,042	49,0	"
56	24	1	0,042	49			
57	24	1	0,042	49	0,035	47,0	"
58	37	1	0,026	47			
59	23	1	0,044	47	0,185	54,0	"
60	5	1	0,200	54			
61	12	2	0,170	54	0,018	44,0	"
62	54	1	0,018	44			
63	60	1	0,017	44	0,014	43,0	"
64	75	1	0,013	43			
65	70	1	0,014	43	0,016	16,0	31,7
66	60	1	0,017	16			
67	66	1	0,015	16	0,017	16,0	"
68	62	1	0,016	16			
69	54	1	0,018	16	0,008	15,0	"
70	55	0,5	0,009	15			
71	75	0,5	0,007	15	0,087	18,0	"
72	10	1	0,100	18			
73	10	1	0,100	18	0,062	18	"
74	8	0,5	0,062	18			
75	4	1	0,250	25	0,270	25,0	"
76	3,5	1	0,290	25			
77	12	1	0,120	20	0,125	20,0	"
78	13	1	0,130	20			

CALCULO DE HUMEDAD DE LAS MUESTRAS PROCESADAS CON ELMETODO DE EXTRUSION BULLIET-SEVIERE

TABLA XI

ENSAYO N°	CURVA N°	PESO MUESTRA HUMEDA (g)	PESO MUESTRA SECA (g)	DIFEREN- CIA (g)	% H ₂ O	% H ₂ O PROMEDIO
1	1	1,610	1,226	0,384	23,9	
2	1	2,596	1,981	0,615	23,7	23,8
3	2	1,592	1,187	0,405	25,4	
4	2	2,733	2,031	0,702	25,7	25,5
5	2	2,182	1,628	0,554	25,4	
6	3	2,562	1,887	0,675	26,3	
7	3	4,174	3,076	1,098	26,3	26,3
8	4	2,000	1,455	0,545	27,2	
9	4	1,982	1,447	0,535	27,0	27,1
10	5	1,657	1,199	0,458	27,6	
11	5	2,159	1,561	0,598	27,7	27,6
12	5	3,605	2,618	0,987	27,4	
13	6	1,568	1,061	0,507	31,9	
14	6	1,861	1,274	0,587	31,5	31,7

VALORES EXPERIMENTALES Y CALCULO DEL VALOR DE FLUENCIA PARA

LOS ENSAYOS DE DETERMINACION DE LA PLASTICIDAD POR EL METODO

DE PEREPIKORE, DE LA MUESTRA 509

Para los ensayos 1 a 9: $\sqrt{3}\pi R_0^2 H_0 = A = 60,17$ $w = 1192$ g

h (carrera total de peso deformante) = 18,6 - deformación

Para ensayos 6 a 18: $A = 48,88$ $w = 1151$ g $h = 16,5$ - deformación

TABLA XII

ENSAYO No	H_0/H	$\ln(\frac{H_0}{H})$	h (cm)	$h w$	$A \cdot \ln(\frac{H_0}{H})$	$\% H_2O$	$\frac{Y}{cm^2}$ (kg/cm ²)	$\frac{Y}{lb/pulg^2}$
1	2,49	0,911	17,00	20260	54,81	26,5	0,370	5,4
2	1,48	0,391	15,90	18950	23,53	23,4	0,805	11,8
3	1,35	0,299	15,60	18600	17,99	22,5	1,034	15,2
4	2,10	0,741	16,70	19910	44,59	25,9	0,447	6,6
5	4,72	1,550	17,75	21160	93,26	29,6	0,227	3,3
6	5,33	1,672	15,75	18130	81,73	29,4	0,222	3,3
7	4,71	1,550	15,65	18010	75,76	29,1	0,238	3,5
8	2,96	1,083	15,15	17440	52,94	26,9	0,330	4,8
9	2,01	0,697	14,51	16700	34,07	25,1	0,490	7,2
10	7,14	1,964	15,94	18350	96,00	30,7	0,191	2,8
11	6,56	1,879	15,89	18290	91,85	30,5	0,199	2,9
12	6,45	1,863	15,88	18280	91,06	30,2	0,201	3,0
13	4,04	1,394	15,51	17850	68,14	28,0	0,262	3,9
14	5,97	1,785	15,83	18220	87,25	29,8	0,209	3,1
15	2,33	0,844	14,78	17010	41,25	25,6	0,412	6,0
16	3,03	1,106	15,18	17470	54,06	27,0	0,323	4,7
17	1,89	0,635	14,38	16550	31,04	24,7	0,533	7,8
18	2,06	0,722	14,56	16760	35,29	24,8	0,475	7,0

DEDUCCION DE LA RELACION ENTRE CONTENIDO DE AGUA BASADO EN EL PESO DE LA MUESTRA HUMEDA Y EN EL PESO DE LA MUESTRA SECA

Si H = peso real de la muestra húmeda

S = peso real de la muestra seca

$$D = H - S$$

H_s = humedad percentual en base a la muestra seca

H_h = humedad percentual en base a la muestra húmeda

tendremos que

$$(H/S) \times 100 = H_s$$

por lo tanto

$$\frac{(H - S) \cdot 100}{S} = H_h$$

$$\frac{H - S}{S} = \frac{H_h}{100}$$

$$\frac{H}{S} - \frac{S}{S} = \frac{H_h}{100}$$

$$S = \frac{H}{\frac{H_h}{100} + 1} \quad (1)$$

podemos considerar a $H = 100$ (ya que es posible tener cualquier valor para H); entonces, como $H - S = D$; para nuestro caso particular será

$$100 - S = H_h$$

$$S = 100 - H_h$$

reemplazando S en (1) y despejando H_h , nos quedará

$$H_h = 100 - \frac{100}{1 + \frac{H_h}{100}}$$

DEFINICION DE LOS COEFICIENTES μ Y η DE LA FORMULA DE CARRIZ

Para fluidos incompresibles newtonianos (12):

$$\tau = -\mu \Delta \quad (1)$$

donde τ = tensor de esfuerzo

Δ = tensor de velocidad de deformación

μ = viscosidad

Para materiales no newtonianos no existe un tipo de relación tan simple. Para algunos casos sencillos de flujo

$$\tau = -\eta \Delta \quad (2)$$

donde la viscosidad no newtoniana η , un escalar, es una función de Δ (o de τ), así como también la temperatura y la presión. El modelo descrito por la ecuación 2, representa la suposición de una función empírica que describe la variación de η con Δ (o con τ).

Para que η sea una función escalar del tensor Δ , es preciso que dependa solamente de los invariantes de Δ , que se transforman como escalares en una rotación del sistema coordenado:

$$\begin{aligned} I_1 &= (\Delta : \delta) = \sum_i \Delta_{ii} \\ I_2 &= (\Delta : \Delta) = \sum_i \sum_j \Delta_{ij} \Delta_{ji} \\ I_3 &= \det \Delta = \sum_i \sum_j \sum_k \epsilon_{ijk} \Delta_{1i} \Delta_{2j} \Delta_{3k} \end{aligned} \quad (3)$$

donde δ es un tensor unidad (adimensional), y ϵ_{ijk} es el tensor alternante unidad.

El primer invariante, que corresponde a $(2 \nabla \cdot v)$, donde v es volumen, es cero para un fluido incompresible. Por lo tanto

$$\eta = \eta (I_2, I_3)$$

Para muchos flujos sencillos (flujo axial en un tubo, flujo

tangencial entre cilindros concéntricos), el tercer invariante se anula, y para otros tipos de flujo se admite que no es muy importante. De acuerdo con esto, se puede considerar a γ como una función de $(\Delta:\Delta)$. Teniendo esto en cuenta, para el modelo de Bingham:

$$\tau = -\left(\gamma - \frac{\gamma}{-\sqrt{\frac{1}{2}(\Delta:\Delta)}}\right)\Delta \quad \text{para } \frac{1}{2}(\tau:\tau) > \tau^2$$

donde γ es el valor de fluencia.

Para un caso general, Δ es

$$\Delta = \begin{bmatrix} 2 \frac{dv_x}{dx} & \frac{dv_x}{dy} + \frac{dv_y}{dx} & \frac{dv_x}{dz} + \frac{dv_z}{dx} \\ \frac{dv_y}{dx} + \frac{dv_x}{dy} & 2 \frac{dv_y}{dy} & \frac{dv_y}{dz} + \frac{dv_z}{dy} \\ \frac{dv_z}{dx} + \frac{dv_x}{dz} & \frac{dv_z}{dy} + \frac{dv_y}{dz} & 2 \frac{dv_z}{dz} \end{bmatrix}$$

La relación entre los esfuerzos de corte y las velocidades de deformación, para el caso general, con tres esfuerzos normales es

$$\begin{bmatrix} \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\sigma} \end{bmatrix} \left\{ \left[\gamma - \frac{\gamma}{-\sqrt{\frac{1}{2}(\Delta:\Delta)}} \right] \Delta \right\} \quad (5)$$

Para un solo esfuerzo normal, se reduce a

$$\sigma_{rr} = \bar{\sigma} \left\{ \left[\gamma - \frac{\gamma}{-\sqrt{\frac{1}{2}(\Delta:\Delta)}} \right] \Delta \right\} \quad (6)$$

Si se considera el fluido ideal (sin fricción), todos los esfuerzos de corte desaparecen, menos los normales, y estos son iguales. El valor negativo de cada uno se define como la presión, en el punto x, y, z del fluido:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} &= 0 \\ \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z &= -p \end{aligned}$$

Pero en el caso de un fluido viscoso, es conveniente introducir $\bar{\sigma}$, la media aritmética de los tres esfuerzos normales. La

denominada la presión en el fluido y tiene la propiedad de ser invariante con respecto a las transformaciones del sistema de coordenadas; dado que es un invariante del tensor de esfuerzos, y se define como:

$$\frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \bar{\sigma} = -p$$

reemplazando en la ecuación (6):

$$\sigma_{rr} = -p + \left[\eta - \frac{\gamma}{\sqrt{2}(\Delta:\Delta)} \right] \Delta \quad (7)$$

considerando el segundo invariante en las ecuaciones (3):

$$I_2 = (\Delta, \Delta) = \sum_i \sum_j \Delta_{ij} \Delta_{ji}$$

donde $\Delta = \frac{2dv_x}{dz} = 2 \dot{\gamma}_x$

$\dot{\gamma}_x$ es el tensor de velocidad de deformación normal en la dirección x, y además:

$$(\Delta, \Delta) = \Delta^2 = 4 \dot{\gamma}_x^2$$

al reemplazarlo en la ecuación(7):

$$\begin{aligned} \tau &= - \left[\eta - \frac{\gamma}{\sqrt{2} \dot{\gamma}_x^2} \right] 2 \dot{\gamma}_x \\ \dot{\gamma}_x &= -\frac{1}{2} \eta (\tau + \sqrt{2} \gamma) \end{aligned} \quad (8)$$

Caso particular de una boquilla cónica

Se supone que el cuerpo se deforma en sus paredes sin fricción. La velocidad es un vector que tiene la dirección hacia el eje O del cono y que varía en magnitud como la inversa del cuadrado de la distancia r desde O.

De la ecuación de continuidad, surge que para preservar el volumen será

$$v = -B/r^2 \quad (9)$$

donde B es una constante positiva.

En un sistema de coordenadas esféricas $(0, r, \phi, \theta)$, los principales componentes de la velocidad de deformación son (11):
 $(2 \frac{\partial v_F}{\partial r}, 2 \frac{v_F}{r}, 2 \frac{v_F}{r})$

y, según (9) será:

$$2 \frac{\partial v_F}{\partial r} = 2 \dot{\gamma}_r = \frac{4B}{r^3} \quad (10)$$

$$2 \frac{v_F}{r} = 2 \dot{\gamma}_\phi = 2 \dot{\gamma}_\theta = - \frac{2B}{r^3} \quad (11)$$

Para este caso, tenemos para Δ_{ij} otra matriz donde, amales de los componentes que no sean los de dirección radial, tendremos:

$$\Delta_{ij} = 2 \frac{dv_F}{dr} + 2 \frac{v_F}{r} + 2 \frac{v_F}{r}$$

como $\Delta_{ij} = \Delta_{ji}$

$$I = \sum_i \sum_j \Delta_{ij} \Delta_{ji} = 4 \left(\frac{dv_F}{dr} \right)^2 + 4 \frac{v_F^2}{r^2} + 4 \frac{v_F^2}{r^2}$$

$$I = \frac{16B^2}{r^6} + \frac{4B^2}{r^6} + \frac{4B^2}{r^6} - \frac{24B^2}{r^6} \quad (12)$$

De acuerdo con la definición del esfuerzo normal medio:

$$\bar{\sigma} = -p = \frac{1}{3} \sum_i \sigma_i = \frac{1}{3} (\sigma_{rr} + \sigma_{\phi\phi} + \sigma_{\theta\theta}) \quad (13)$$

y el esfuerzo de corte será:

$$\sigma_{rr} = -\tau_{rr} = p \quad (14)$$

reemplazando en (7):

$$\sigma_{rr} + p = \left(\eta - \frac{\gamma}{\sqrt{\frac{1}{2} I}} \right) 2 \frac{dv_F}{dr}$$

$$\sigma_{rr} = -p + \left(\eta - \frac{\gamma}{\sqrt{\frac{1}{2} \frac{24B^2}{r^6}}} \right) \frac{4B}{r^3} \quad (15)$$

para los otros dos esfuerzos normales:

$$\sigma_{\phi\phi} = -p + \left(\eta + \frac{\gamma}{\sqrt{\frac{1}{2} I}} \right) 2 \frac{v_F}{r}$$

$$\sigma_{rr} = -p + \left(\eta + \frac{\gamma}{\sqrt{\frac{1}{2} \frac{3\gamma \dot{\theta}^2}{r^3}}} \right) - \frac{2\beta}{r^3}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\phi\phi} = -p - \frac{2\beta\gamma}{r^3} - \frac{\gamma}{r^3}$$

(16)

La presión p se puede determinar de una condición de equilibrio para flujo en una región cónica anular, de radio medio r , espesor $r \, d\theta$, y altura dr .

La ecuación de movimiento en coordenadas esféricas $(0, r, \theta, \phi)$

(10) para el componente r , para un fluido incompresible es:

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{v_\phi}{r \sin \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} - \frac{v_\theta^2 + v_\phi^2}{r} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} - \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \tau_{rr})}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial (\tau_{r\theta} \sin \theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \tau_{r\phi}}{\partial \phi} - \frac{\tau_{\theta\theta} + \tau_{\phi\phi}}{r} \right] + \rho g_r \quad (17)$$

donde el término de la izquierda corresponde a las fuerzas de inercia que en este caso son cero (pues se parte de un estado de reposo), y el último término de la derecha corresponde a la presión que ejerce el peso del cuerpo, que se desprecia pues es muy pequeño en comparación con la presión resultante de las fuerzas viscosas. De este modo, la ecuación (17) se reduce a:

$$0 = - \frac{\partial p}{\partial r} - \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \tau_{rr})}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial (\tau_{r\theta} \sin \theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \tau_{r\phi}}{\partial \phi} - \frac{\tau_{\theta\theta} + \tau_{\phi\phi}}{r} \right] \quad (18)$$

Si consideramos solo los esfuerzos normales:

$$\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{r\theta} \sin \theta) = 0$$

$$\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \tau_{r\phi}}{\partial \phi} = 0$$

y la ecuación (18) se reduce a:

$$0 = - \frac{dp}{dr} - \left[\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 \tau_{rr}) - \frac{\tau_{\theta\theta} + \tau_{\phi\phi}}{r} \right]$$

$$0 = -\frac{dp}{dr} - \frac{d\tau_{rr}}{dr} - \frac{2\tau_{rr} + \tau_{\theta\theta} + \tau_{\phi\phi}}{r}$$

$$-\frac{dp}{dr} = \frac{d\tau_{rr}}{dr} + \frac{2\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta} - \tau_{\phi\phi}}{r}$$
(19)

de acuerdo con las ecuaciones (14) y (15):

$$\tau_{rr} - p - \sigma_{rr} = -p + p - \frac{4B\eta}{r^3} - \frac{2\gamma}{\sqrt{3}}$$

$$\tau_{\theta\theta} = \tau_{\phi\phi} = -p - \sigma_{\theta\theta} = -p + p + \frac{2B\eta}{r^3} + \frac{\gamma}{\sqrt{3}}$$

reemplazando en (19):

$$-\frac{dp}{dr} = \frac{12B\eta}{r^4} - \frac{8B\eta}{r^4} - \frac{4\gamma}{\sqrt{3}r} - \frac{4B\eta}{r^4} - \frac{2\gamma}{\sqrt{3}r}$$

$$\frac{dp}{dr} = \frac{6\gamma}{\sqrt{3}r} = \frac{2\sqrt{3}\gamma}{r}$$
(20)

Si llamamos A , a una sección transversal de la boquilla en x

$$A = \pi r^2$$

$$dA = 2\pi r dr$$

de la ecuación (20), dividiendo por $2\pi r$:

$$\frac{dp}{2\pi r dr} = \frac{\sqrt{3}\gamma}{\pi r^2}$$

$$\frac{dp}{dA} = \frac{\sqrt{3}\gamma}{A} \quad (21) \quad \text{como} \quad \frac{dp}{dx} = \frac{dp}{dA} \frac{dA}{dx}$$

también: $\frac{dp}{dA} = \frac{\sqrt{3}\gamma}{A} \frac{dA}{dx}$ (22)

Flujo de pasta en el cilindro y en la parte recta de la boquilla

Para el caso de flujo de pasta en la parte cilíndrica de la boquilla de radio R_1 , y en el cilindro de prueba, de radio R_2 , se considera que el flujo descarrollado es de tipo pistón, y se supone que el flujo se realiza entre cilindros coaxiales de radios R_1 y R_2 , y que la pasta forma un pistón de radio externo r_p , que se desplaza en una dirección x , a través de una distancia L . Para este ca-

se, la relación entre la velocidad de flujo volumétrica q y el gradiente G , o sea dp/dL , está dada por la fórmula de Fredricksen y Bird (19):

$$q = \frac{\pi R_2^3 G}{8\eta} \left[1 - \frac{R_1^4}{R_2^4} - 2\sqrt{\frac{2\gamma}{6R_2}} \sqrt{1 - \frac{R_1^2}{R_2^2}} - \frac{8}{3} \left(1 + \frac{R_1^2}{R_2^2} \right) \frac{\gamma}{6R_2} + \frac{16}{3} \left(\frac{\gamma}{6R_2} \right)^2 \frac{\gamma}{6R_2} \right] \quad (23)$$

esta fórmula no es completamente explícita, dado que aparece r_2 , radio externo del pistón rígido (que no se conoce), además de los radios de los cilindros. Para flujos lentos, cuando el gradiente apenas excede el valor mínimo $2\gamma (R_2 - R_1)$, se puede poner

$$G = \frac{2\gamma}{R_2 - R_1} (1 + \beta) \quad (24)$$

donde β es un pequeño valor positivo. En este caso, se puede expresar a r_2 como

$$r_2 = R_2 \left[1 - \frac{\beta}{1 + \beta} \left(1 + \frac{R_1^2}{R_2^2} \right) \right] \quad (25)$$

porque en este caso el pistón rígido llena casi completamente el espacio entre los cilindros. Para estas condiciones especiales, la ecuación (23) se puede simplificar mucho, siempre que a β se le asigne la significación dada por la ecuación (24), y se tome ahora el número de Saint Venant como

$$S = \frac{\gamma R_2^3}{Q\eta} \left[\frac{1 - (R_1/R_2)^2}{1 + (R_1/R_2)^2} \right] \quad (26)$$

explícitamente, la fórmula (24) aparece ahora, para flujos lentos,

$$G = \frac{2\gamma}{R_2 - R_1} \left(1 + \frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \sqrt{\frac{2Q\eta}{\pi\gamma}} \right) \quad (27)$$

reduciéndola aún más, cuando el número de Saint Venant es muy grande

$$G = \frac{2\gamma}{R_2 - R_1} \quad (28)$$

Si se considera el flujo lento estacionario, en una bequilla vertical, sin lubricación, axialmente simétrica, y se desea calcular la presión media $P(x)$ en el cuerpo sobre una sección transversal elemental, a una distancia x de la boca, se deben tener en cuenta los principales factores que afectan a P , a saber:

- (a) fuerzas que actúan sobre el cuerpo que fluye, a través de las capas límites altamente sometidas a esfuerzos de corte,
- (b) esfuerzos generados en el mismo cuerpo debido al cambio de área de la sección transversal.

Los factores señalados han sido evaluados separadamente, en las ecuaciones (22) y (27), y aquí se verifican, con la única diferencia de que en este caso aparecen simultáneamente. Si suponemos a estas influencias simplemente aditivas, tendremos que el gradiente de presión estará dado por

$$\frac{dp}{dx} = -\rho g + \frac{\sqrt{3}\gamma}{A(x)} \frac{dA}{dx} + \frac{2\gamma}{R_2 - R_1} \left(1 + \frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \sqrt{\frac{2Q\eta}{\pi\gamma}} \right) \quad (29)$$

donde el primer término tiene en cuenta el peso del cuerpo en la bequilla vertical (ρ densidad); g aceleración de la gravedad).

Integrando

$$P(x) = \rho g x + \sqrt{3}\gamma \ln \frac{A(x)}{A(0)} + 2\gamma \int_0^x \frac{dx}{R_2(x) - R_1(x)} + 2\gamma \sqrt{\frac{Q\eta}{\pi\gamma}} \frac{R_2^2(x) + R_1^2(x)}{[R_2(x) - R_1(x)]^2 - [R_2(0) - R_1(0)]^2} dx \quad (30)$$

En forma general:

$$\frac{P(x) + \rho g x}{\gamma} = C(x) + \sqrt{\frac{Q\eta}{\gamma R_2^3(0)}} D(x) \quad (31)$$

donde $C(x)$ y $D(x)$ dependen solo de la forma de la bequilla. Si se considera una bequilla cónica, de apertura 2α , se tiene:

$$C(x) = \frac{1}{\tan \alpha} + \left[\sqrt{3} \ln \frac{A(x)}{A(0)} \right] \quad (32)$$

$$D(x) = \frac{g}{3\sqrt{2} \pi \tan \alpha} \left(\frac{R_2(l)}{R_2(c)} \right)^{3/2} \left\{ 1 - \left(\frac{R_2(c)}{R_2(l)} \right)^{3/2} \right\} \quad (33)$$

Si se considera que la presión ejercida sobre la pasta, para que esta fluya a través de la boquilla, fuera efectuada por un pistón (caso semejante al real), suponiendo al tubo con muestra homogéneamente disuelta, sin burbujas, se tendrá para una boquilla de longitud l , una presión P , en la base del tubo, dada por

$$P = -\rho g l + \gamma [C(l) + \sqrt{\frac{Q\eta}{\gamma R^3(l)}} D(l)] \quad (34)$$

en esta fórmula, el valor de $\rho g l$ es despreciable en comparación con los otros términos. $C(l)$ y $D(l)$, son los coeficientes a y b de la fórmula de Capriz (ver página 51):

$$a = C(l) = 6,05 \quad b = D(l) = 8,48$$

por lo tanto, considerando los valores anteriores, correspondientes a la geometría del sistema usado, la fórmula de Capriz es:

$$P = \gamma (6,05 + 8,48 \sqrt{\frac{Q\eta}{\gamma R^3}}) \quad (35)$$

TABLA XIII

CALCULO PIDE A LOS PARA TAPAR LA CUBA PROPIA. DE ACUERDO CON LA FIGURA 10.04.012

$$S = \text{número de Saint Venant } s' = \frac{0.7}{y^2 R^3} = \left[\frac{(P/Y) - 6.05}{0.48} \right]^2$$

PUNTO N°	P/Y	$\frac{(P/Y) - 6.05}{0.48}$	s'	$s' \times 10^2$
1	0	0	0	0
2	7	0,212	0,012	1,2
3	8	0,230	0,053	5,3
4	9	0,348	0,252	12,1
5	10	0,466	0,217	21,7
6	11	0,584	0,341	34,1
7	12	0,702	0,493	49,3
8	13	0,820	0,671	67,1

CALCULO DE LA VELOCIDAD EN UNO Y DOS PUNTOS DE CADA UNO DE LOS VALORES DE LA TABLA DE EXPERIMENTOS

N°	CAUDAL /seg	VALOR DE CANTIDAD	PROMEDIO	S-I	EXPERIMENTAL
1	0,0078	0,35	0,329	10,8 x 10 ⁻²	4,32 x 10 ⁻²
1	0,0115	0,096	0,04	33,60 x 10 ⁻⁴	8,75 x 10 ⁻²
1	0,0154	0,05	0,04	33,60 x 10 ⁻⁴	13,07 x 10 ⁻²
1		0,05	0,04	33,60 x 10 ⁻⁴	17,50 x 10 ⁻²

TABLA XIV

No	CUB-PRESION VA 1b/ pulg ² cm ² /seg	CAUDAL PROMEDIO	PRESION P PROMEDIO	PROY (P DIPLO/Y)-6.05 3.48	S ⁻¹ PROMEDIO	VISCALIDAD PROMEDIO (001568)	S ⁻¹ EXPERIMENTAL
2	64.7	0.0038	6.5	9.95			
2	70.0	0.0077	1b/pulg ²	10.77			
2	73.2	0.0115	4.47x10 ⁻²	11.26			
2	75.0	0.0154	6.1na/cm ²	11.54			
3	52.5	0.0038	5.25	10.00			
3	55.8	0.0077	1b/pulg ²	10.63			
3	58.5	0.0115	3.61x10 ⁻²	11.14			
3	60.2	0.0154	6.1na/cm ²	11.47			
4	45.8	0.0038	4.50	10.40			
4	49.0	0.0077	1b/pulg ²	10.89			
4	51.2	0.0115	3.1x10 ⁻²	11.38			
4	52.0	0.0154	6.1na/cm ²	11.56			
5	42.0	0.0038	4.0	10.50			
5	45.0	0.0077	1b/pulg ²	11.25			
5	46.5	0.0115	2.76x10 ⁻²	11.62			
5	48.2	0.0154	6.1na/cm ²	12.05			
6	15.2	0.0038	2.4	6.33			
6	16.0	0.0077	1b/pulg ²	6.67			
6	16.5	0.0115	1.55x10 ⁻²	6.88			
6	16.8	0.0154	6.1na/cm ²	7.00			

FE DE ERRATAS

En la página 51, línea 16, debe decir:

$$a = (1 + 1,73) 2,3 \times 1,27 = 7,97$$

En la página 51, línea 25, debe decir 7,97 en vez de 6,05.

En la página 52, línea 7 debe decir 8 en vez de 6.

En la página 53, en la fórmula 11, debe decir 7,97 en vez de 6,05.

En la página 53, en la fórmula 12, debe decir 7,97 en vez de 6,05.

El gráfico de la página 54, debe sustituirse por el que se agrega a continuación.

La tabla de la página 55 debe reemplazarse por la tabla VII que se adjunta a continuación.

En la página A29, la fórmula 32 se debe escribir:

$$C(x) = \left[\frac{1}{\tan \alpha} + \sqrt{3} \right] \ln \frac{A(x)}{A(0)}$$

En la página A30, línea 11, debe decir 7,97 en vez de 6,05.

En la página A30, en la fórmula 35, debe decir 7,97 en vez de 6,05.

Las tablas de las páginas A31 y A32 deben ser reemplazadas por las tablas XIII y XIV, que se agregan a continuación.

CURVA TEORICA Y VALORES EXPERIMENTALES PARA FLUJO

LENTO, CALCULADOS SEGUN CAPRIZ

Referencias

- Curva teórica
- Curva n°1
- ⊙ Curva n°2
- ⊖ Curva n°3
- ⊕ Curva n°4
- ⊗ Curva n°5

$$\left(\frac{Q \eta}{\gamma R^3}\right) \times 10^2$$

[-]

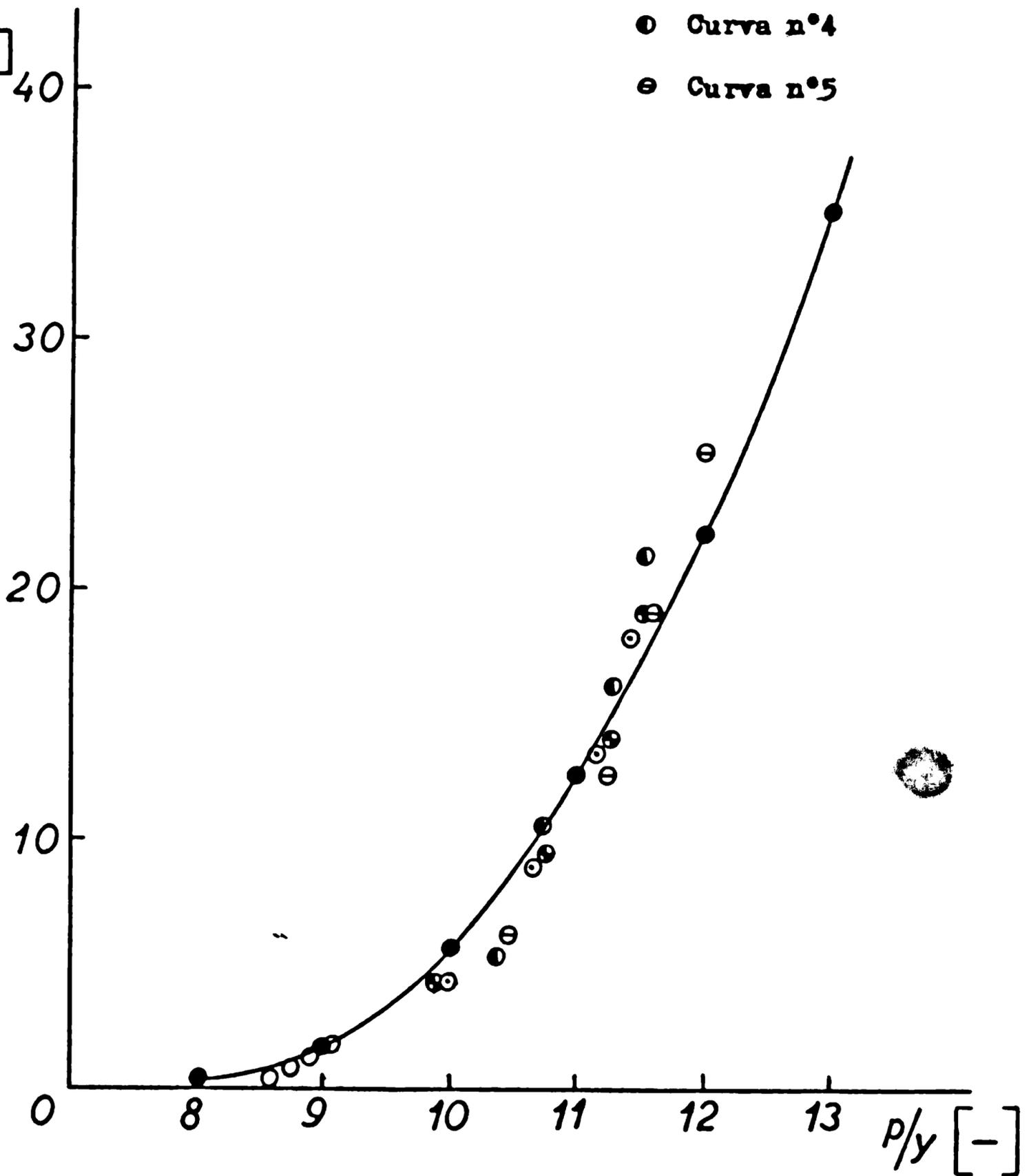


TABLA VII

<u>Nº</u>	<u>P/Y</u>	<u>s⁻¹</u>	<u>Nº</u>	<u>P/Y</u>	<u>s⁻¹</u>
1	8,60	0,43 x 10 ⁻²	11	11,14	13,53 x 10 ⁻²
2	8,75	0,87 x 10 ⁻²	12	11,47	18,12 x 10 ⁻²
3	8,95	1,29 x 10 ⁻²	13	10,40	5,21 x 10 ⁻²
4	9,05	1,74 x 10 ⁻²	14	10,89	10,75 x 10 ⁻²
5	9,95	4,67 x 10 ⁻²	15	11,38	15,06 x 10 ⁻²
6	10,77	9,46 x 10 ⁻²	16	11,56	21,50 x 10 ⁻²
7	11,26	14,12 x 10 ⁻²	17	10,50	6,29 x 10 ⁻²
8	11,54	18,91 x 10 ⁻²	18	11,25	12,75 x 10 ⁻²
9	10,00	4,47 x 10 ⁻²	19	11,62	19,04 x 10 ⁻²
10	10,63	9,06 x 10 ⁻²	20	12,05	25,51 x 10 ⁻²

TABLA XIII

CALCULOS NECESARIOS PARA TRAZAR LA CURVA TEORICA, DE ACUERDO CON LA FORMULA DE CAPRIZ

$$S = \text{Número de Saint Venant}; S^{-1} = \frac{Q \cdot \eta}{Y R^3} = \left[\frac{(P/Y) - 7,97}{8,48} \right]^2$$

PUNTO N°	P/Y	$\frac{(P/Y) - 7,97}{8,48}$	S^{-1}	$S^{-1} \times 10^2$
1	0	0	0	0
2	8	0,004	0,002	0,2
3	9	0,121	0,015	1,5
4	10	0,239	0,057	5,7
5	11	0,357	0,127	12,7
6	12	0,475	0,225	22,5
7	13	0,593	0,352	35,2

CALCULO DE LA VISCOSIDAD PROMEDIO Y DEL NUMERO DE SAINT VENANT A PARTIR DE LOS VALORES EXPERIMENTALES DE EXTRUSION

CURVA N°	PRESION lb/pulg ²	CAUDAL VALOR DE FLUENCIA Y	P/Y	PROMEDIO P	P _{prom} /Y	$\frac{(P_{prom}/Y) - 7,97}{8,48}$	S ⁻¹	PROMEDIO P (poises)	VISCOSIDAD EXPERIMENTAL X 10 ²
1	86,0	0,0038	10	8,60					0,43
1	87,5	0,0077	10	8,75					0,87
1	89,5	0,0115	6,89x10 ²	8,95	0,0096	88,4	8,84	0,102	1,29
1	90,5	0,0154	4100/cm	9,05					1,74
								1,04x10 ⁻²	3,34x10 ⁴

TABLA XIV

CURVA N°	PRESION lb/pulg ²	CAUDAL cm ³ /seg	VALOR DE FLUENCIA Y	P/Y	CAUDAL PROMEDIO	PRESION P _{prom} /Y	$\frac{(P_{prom}/Y) - 7,97}{8,48}$	S ⁻¹ PROMEDIO	VISCOSIDAD S ⁻¹ x 10 ²	
									PROMEDIO	EXPERIMENTAL
2	64,7	0,0038	6,50 ²	9,95						4,67
2	70,0	0,0077	1b/pulg ⁵	10,77	0,0096	10,88	0,343	11,8x10 ⁻²	23,57x10 ⁴	9,46
2	73,2	0,0115	4,47x10 ²	11,26						14,12
2	75,0	0,0154	dina/cm ²	11,54						18,91
3	52,5	0,0038	5,25 ²	10,00						4,47
3	55,8	0,0077	1b/pulg ⁵	10,63	0,0096	10,82	0,336	11,3x10 ⁻²	18,23x10 ⁴	9,06
3	58,5	0,0115	3,61x10 ²	11,14						13,53
3	60,2	0,0154	dina/cm ²	11,47						18,12
4	46,8	0,0038	4,50 ²	10,40						5,31
4	49,0	0,0077	1b/pulg ⁵	10,89	0,0096	11,07	0,366	13,4x10 ⁻²	18,56x10 ⁴	10,75
4	51,2	0,0115	3,1x10 ²	11,38						16,06
4	52,0	0,0154	dina/cm ²	11,56						21,50
5	42,0	0,0038	4,00 ²	10,50						6,29
5	45,0	0,0077	1b/pulg ⁵	11,25	0,0096	11,35	0,399	15,9x10 ⁻²	19,61x10 ⁴	12,75
5	46,5	0,0115	2,76x10 ²	11,62						19,04
5	48,2	0,0154	dina/cm ²	12,05						25,51
6	15,2	0,0038	2,40	6,33						-
6	16,0	0,0077	1b/pulg ⁵	6,67	0,0096	6,71	-	-	-	-
6	16,5	0,0115	1,65x10 ²	6,88						-
6	16,8	0,0154	dina/cm ²	7,00						-