

REFLEXIONES ACERCA DEL PROBLEMA DE ARCILLAS DISPERSIVAS EN EL DISEÑO DE PRESAS

Hemyr OBILINOVIC*

RESUMEN

En relación al fenómeno de dispersión en arcillas compactadas se presenta una síntesis del problema y un análisis crítico respecto a las relaciones propuestas actualmente para su identificación en la ingeniería práctica. Durante las primeras etapas de las investigaciones geotécnicas para el emplazamiento de una presa se propone utilizar la geología como una herramienta primaria para obtener las indicaciones preliminares de amplia escala en la identificación de las arcillas dispersivas. Finalmente, a fin de utilizar estos materiales potencialmente dispersivos en la construcción de presas, se presentan diversas secciones tipos como solución a este problema.

INTRODUCCION

A partir de las primeras investigaciones pioneras de los ingenieros australianos, en relación al problema de arcillas dispersivas en pequeñas presas (en zonas áridas) que fallaron por *piping*, en la última década ha habido importantes avances en la comprensión del fenómeno de dispersión o defloculación, a pesar de que todavía existen controversias sobre su mecanismo.

Este tipo de problema cae fuera de los padrones normales con los cuales el ingeniero geotécnico está habituado a trabajar. Debido a la peculiaridad del

* Ingeniero Civil, M. Sc. Universidad de Chile. Especialista en Geotecnia.

fenómeno, las investigaciones han intentado, en una primera etapa, abordar el problema desde diferentes ángulos y a partir de ella se han hecho extrapolaciones prematuras y afirmaciones de carácter especulativo, que pueden desorientar a los profesionales no familiarizados con este problema poco común, haciéndoles ver problemas donde realmente no existen. Una de estas líneas de investigación, de carácter esencialmente práctico, es intentar obtener correlaciones simples a través de los ensayos geotécnicos de rutina, para poder identificar los suelos dispersivos; sin embargo, esta excelente idea no ha sido debidamente utilizada, ya que no se ha hecho un análisis ponderado en relación a lo que representan estos ensayos respecto al origen y naturaleza del fenómeno de dispersión, habiéndose propuesto prematuramente correlaciones discutibles, que en algunos casos conducen en dirección contraria al objetivo prefijado.

TUBIFICACION EN ARCILLAS DISPERSIVAS

En la naturaleza existen ciertos tipos de arcillas que son incluso más erosionables que los limos y arenas finas, las cuales se denominan arcillas dispersivas. Estas arcillas son erosionadas por el proceso denominado dispersión (o defloculación), generando de esta forma el fenómeno de tubificación, *pipíng*. La dispersión aparece cuando las fuerzas eléctricas de carácter repulsivo entre las partículas individuales de arcilla, son mayores que las atractivas (van der Waals), de modo que cuando el suelo entra en contacto con el agua, las partículas individuales son progresivamente desligadas y puestas en suspensión, siendo transportadas en el caso de existir flujo de agua^{1*}. Las fuerzas atractivas no polares de van der Waals dependen de la distancia entre partículas y generalmente son independientes de las características de éstas y del electrolito^{3,13}; sin embargo, las repulsivas dependen de las propiedades químicas del líquido y de su potencial eléctrico, y disminuyen con el aumento de la concentración iónica del electrolito. Estas fuerzas repulsivas pueden ser provocadas por la hidratación del ión o de los minerales, o como resultado de la presión osmótica causada por la superposición de las superficies de las dobles capas de adsorción durante la compresión. Todo esto puede ser expresado en términos energéticos diciendo que la energía de repulsión es sensible a los cambios de la concentración electrolítica, valencia de los cationes, constante dieléctrica y pH, mientras que la energía de atracción es sensible solamente a los cambios en la constante dieléctrica y temperatura¹³.

La mayoría de las investigaciones^{1, 2, 17, 18} han concluído que existe una íntima relación entre el fenómeno de defloculación en arcillas dispersivas y la presencia del catión sodio intercambiable presente en el agua absorbida del suelo, especialmente en los casos donde el agua del embalse posee bajo contenido

de sales solubles.

En realidad, el sodio actúa incrementando el espesor de la doble capa difusa (ésta es mayor para cationes de menor valencia) aumentando de esta forma las fuerzas repulsivas entre las partículas y facilitando el proceso de su separación de la masa de suelo. Es conveniente llamar la atención a que un suelo susceptible a la defloculación y clasificado como dispersivo en laboratorio, podría en la práctica no sufrir defloculación, en el caso que el agua del embalse contenga concentraciones electrolíticas importantes (digamos del orden de 50 miliequivalentes/litro, meq/l).

Además del fenómeno de arcilla dispersiva, una serie de otros factores incidieron favorablemente al desarrollo de *piping* en las presas que fallaron en las regiones áridas de Australia. Entre estos factores está el haber compactado los materiales excesivamente del lado seco de la curva de compactación, lo que implica una mayor rigidez del suelo y, por consiguiente, una mayor potencialidad de agrietamiento frente a los asentamientos diferenciales; además de esto, se agrega la condición climática seca que favorece la formación de fisuras, entre las capas compactadas y la aparición de las grietas por secamiento. A todo lo anterior hay que agregar la incorporación casi inmediata de las aguas meteóricas (con cantidades importantes de CO_2) y llenado rápido del embalse.

La compactación de un suelo esencialmente arcilloso, en el lado seco de la curva de compactación, desarrolla una estructura más abierta, de bajo grado de orientación de las partículas (estructura floculenta), en la cual los sólidos (inertes) que constituyen la estructura secundaria, se sitúan en posiciones débilmente unidas a la estructura primaria del suelo; para esta condición el suelo posee una permeabilidad relativamente alta y la cantidad de agua de compactación no sería suficiente para desarrollar la doble capa de todas las partículas individuales.

En el caso de suelos con concentraciones apreciables de cationes de sodio, una vez que se inicia el flujo de agua con bajo contenido salino (digamos 1 meq/l), las partículas unidas débilmente a la estructura primaria son desligadas y transportadas, dando inicio a la vez a la transferencia o disolución del sodio hacia el agua en movimiento; de esta manera se modifica rápidamente la condición química de la estructura primaria del suelo, aumentando las fuerzas repulsivas (disminuye la concentración iónica del agua absorbida), e *ipso facto* se inicia la separación de las partículas del esqueleto primario, las que son llevadas por el agua, generando de esta forma el inicio del fenómeno de tubificación. En el caso de existir una barrera estereométrica (filtro) la fracción inerte podrá ser retenida y, dependiendo de su cantidad en relación al material tamaño arcilla, podrá servir a su vez de filtro para el material de tamaño coloidal; pero, probablemente, el suelo colapsará debido al debilitamiento de las uniones químicas por la disolución del sodio¹².

Sherard¹⁹, mostró experimentalmente a través del ensayo denominado *pinhole-test* que para suelos dispersivos de presas que sufrieron tubificación, el

fenómeno de defloculación se genera prácticamente sin carga hidráulica (del orden de 5 cm); el grado de compactación en suelos francamente dispersivos y en los no dispersivos tienen poca influencia en su resistencia a la erosión, no sucediendo lo mismo para suelos medianamente dispersivos.

En la opinión del autor de este trabajo, las dos condiciones primarias para el desarrollo de la defloculación en arcillas francamente dispersivas serían:

- alta concentración de sodio en relación a los demás cationes del suelo,
- minerales arcillosos con gran superficie específica y capacidad de intercambio catiónico.

y los factores que contribuirían en un segundo grado de importancia serían:

- contenido de agua de compactación en el lado seco de la curva de compactación (< límite plástico, suelo poco plástico)
- grietas de retracción y climas esencialmente secos
- baja concentración salina del agua del embalse (también aguas meteóricas),
- llenado rápido del embalse (no da tiempo suficiente para el cierre de grietas por asentamientos diferenciales o retracción, en caso que éstas se hubieran producido).

GENESIS DE LAS ARCILLAS DISPERSIVAS

Generalidades

Como la mayoría de las investigaciones han coincidido en indicar que existe una importante correlación entre la probabilidad de rotura de presas y la presencia de suelos con altos porcentajes de cationes intercambiables de sodio, especialmente en los casos en que el agua del embalse tiene un bajo contenido de sales solubles, nace de inmediato la pregunta: ¿cómo utilizar la geología para identificar en una primera aproximación la existencia de estos tipos de suelos en cada proyecto en estudio?

Haciendo un análisis retrospectivo del problema de arcillas dispersivas se observa que inicialmente este fenómeno era restringido a arcillas de climas áridos, semi-áridos y depósitos marinos desérticos; en efecto, las presas de arcillas francamente dispersivas que fallaron por tubificación en Australia^{1,2,10}, se sitúan en regiones de climas áridos o semi-áridos del oeste (gran desierto de Victoria) y, en U.S.A. corresponden a suelos con influencia marina, con importante contenido sódico. Es opinión del autor que estas peculiaridades geológicas fueron dejándose de lado, para finalmente dar la impresión engañosa de que las arcillas dispersivas pueden existir en las más diversas condiciones geológicas, creándose de esta forma una preocupación en muchos casos en que, por las características geológicas, su existencia sería altamente improbable.

Suelos con alto contenido de sodio

Para analizar a fondo el problema, es necesario referirse a la formación de los

suelos con alto contenido de sodio en la naturaleza. La fuente principal del sodio es el agua de mar y, por ende, los sedimentos de origen marino. En la Tabla I se indican las proporciones medias de los principales minerales que componen el agua de mar y a título comparativo, se incluyen las de agua de río. Por otra parte, el contenido salino⁸ del agua de mar es del orden de 3.44% de su peso, o sea que por cada m³ de agua a ser evaporada se depositarían 34.4 kg de sales.

TABLA I
CONTENIDO SALINO DEL AGUA DE MAR Y RÍO⁸

Elemento	%	
	Agua de mar	Agua de río
Na	30.59	5.79
K	1.11	2.12
Mg	3.72	3.41
Ca	1.19	20.39
SiO ₃	~0	11.67
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	0	2.75
Radical CO ₃	0.21	35.15
Radical SO ₄	7.70	12.14
Radical Cl	55.48	5.69
Radical NO ₃	0	0.9

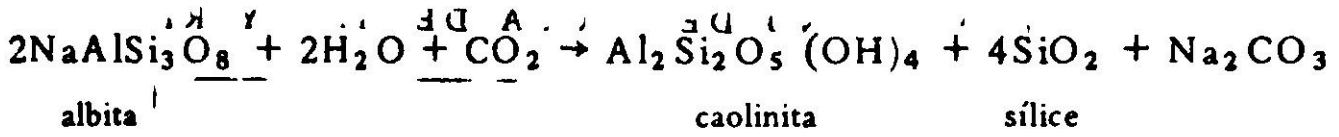
Cuando el agua de mar se evapora, las sales menos solubles se precipitan en primer lugar ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \rightarrow \text{NaCl} \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{KCl}$), y las más solubles son llevadas por las aguas lluvias, a menos que horizontes superficiales arcillosos lo impidan. Estos depósitos salinos no son raros en zonas de tipo desértico, siendo un caso típico de esta formación el Golfo de Karabugaz al Este del Mar Caspio⁸.

En las regiones desérticas prevalecen condiciones bien peculiares en relación a la formación de suelos, producto de la descomposición *in situ* de la roca madre. El agua retenida por capilaridad es empujada hacia la superficie por el diferencial térmico existente, evaporándose y dejando concentraciones salinas en dirección de la superficie; por otro lado, estas soluciones reaccionan con los componentes de las rocas y tienden a descomponerlas, quebrándolas y destruyéndolas a través de un proceso cíclico. Debido a las evaporaciones excesivas, las sales solubles de Na, Ca, Mg se presentan generalmente en los horizontes superficiales, ocurriendo de preferencia en las zonas planas, donde permanecen, por no haber agua para su transporte⁸.

Descomposición de feldespatos

Una segunda fuente de sodio en las arcillas, pero de menor importancia que la citada anteriormente, es la descomposición de la albita. De hecho, unos de los minerales más comunes que componen las rocas son los feldespatos

(constituyen prácticamente la mitad de los componentes de las rocas); éstos se subdividen en tres tipos, ortoclusas, plagioclasas y microlinos. La serie de las plagioclasas se compone a su vez, de anortita y albíta, siendo esta última el principal compuesto de la familia de los feldespatos que posee sodio. La albíta se origina por la fijación del sodio en la estructura básica del feldespato (AlSi_3O_8) y su descomposición produce carbonato sódico, el cual puede ser fácilmente llevado por las aguas debido a su elevada solubilidad:

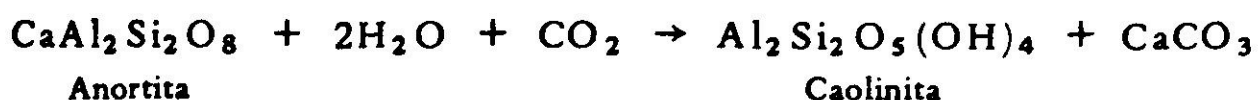


Las albítas (también anortitas, microlinos y ortoclusas) son minerales asociados a un grado de meteorización relativamente bajo y los suelos compuestos por estos minerales en su fracción de limo y arcilla son geológicamente jóvenes y se encuentran principalmente en regiones desérticas donde por la escasez de agua la meteorización química se encuentra reducida a un mínimo.

Como criterio general se puede establecer que, salvo excepciones, la proporción del catión sodio en el total de los componentes químicos de las rocas y en consecuencia de los suelos originados por ella es de poca importancia. Esto se debe, principalmente, al hecho de que sólo la albíta posee cantidades relativamente importantes de sodio y, en caso de existir en los minerales principales que componen las rocas, es sólo en forma secundaria. Sílice SiO_2 ; piroxenos ($\text{Mg, Fe, Ca, Al, Si, O}$); anfíbolitas (Mg, Fe, Si, O); mica (K, Al, Si, O); feldespatos (Ca, Mg, Al, Si, O); cuarzo (Si, O); óxidos ($\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{MgO}$); sulfatos ($\text{MgSO}_4, \text{Fe}_2\text{SO}_4$); fosfatos ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2, \text{K}_2\text{Mg}_2\text{Fe}_2(\text{OH})_2\text{F}_6$); etc. En un caso digno de mención es el de las arenas dispersivas de Illinois, cuya formación fue el resultado de la elevación de depósitos de arena donde la desintegración de los feldespatos produjo un exceso de cationes de sodio y, como fue visto anteriormente, no respondería específicamente a la descomposición de albíta. Ahora bien, el loess es un sedimento eólico que proviene fundamentalmente de abrigos glaciales, desecados, planicies fluviales y zonas desérticas y su estructura consiste principalmente de partículas de tamaño limo y arcillas finas uniformes con pequeñas cantidades de arcilla (usualmente montmorillonita) y también como componentes, sus características varían de una región a otra dependiendo de los aspectos peculiares regionales de su formación. El origen del loess es característico de climas semi-áridos o desérticos, factor condicionante para su transporte eólico y, como se vio anteriormente, en este tipo de clima existen grandes posibilidades de encontrar cationes sódicos, que serían una fuente adicional de sodio en estos suelos, cuya importancia dependerá de la geología regional (por ej. el loess de Europa y Rusia se formó en condiciones de bajas temperaturas y climas secos de estepas áridas y semi-desérticas, durante el período glacial del pleistoceno, Denisov).

Descomposición del basalto

Otro caso interesante y práctico, que nos muestra cómo la geología puede ser utilizada con gran provecho en la identificación de arcillas dispersivas, es el de los suelos residuales originados por la descomposición del basalto, que como se verá más adelante, no son dispersivos y son resistentes al *piping*. El basalto está compuesto principalmente de feldespato plagioclasa con mucho calcio (anortita), unido a piroxeno y olivino (silicatos de Fe, Ca, Mg, Al), y los productos de su descomposición comprenden arcillas, cantidades importantes de hematitas (Fe_2O_3) y limonitas ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) y una cantidad apreciable de calcio, magnesio, sodio y sílice solubles⁶. Las arcillas originarias del basalto son esencialmente caoliníticas y en el conjunto de minerales que la componen, el sodio es despreciable:



Importancia de la geología

De lo expuesto anteriormente se puede establecer que la geología y su interpretación desde el punto de vista de ingeniería civil es de gran importancia en la obtención de indicadores preliminares de amplia escala para la identificación de las arcillas dispersivas, de modo que, durante las primeras campañas geológicas para el emplazamiento de una presa, se las podrá excluir o no del universo de factores que influyen significativamente en el proyecto. En la opinión del autor, en vez de establecer que los suelos dispersivos no son raros en la naturaleza, que existen en diversas regiones del mundo con diferentes condiciones climáticas y diferentes tipos de suelo etc., desorientando a los ingenieros no familiarizados con este tipo de problema, se debería establecer que el problema de arcillas dispersivas se presenta fundamentalmente en suelos de climas áridos o semi-áridos (tipo desérticos) o en suelos sedimentarios marinos. En el resto de los suelos difícilmente se presenta, salvo en aquellos originados por la descomposición de rocas con importantes cantidades de albita (plagioclasa, familia de los feldespatos). No es extraño entonces, que el Prof. Peck¹⁴ haya expresado: *Geology should be used to greater advantage. We deal with geological materials, yet geological techniques, geological reasoning, and the implications of geology are rarely utilized to maximum advantage.*

ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA IDENTIFICACION DE ARCILLAS DISPERSIVAS

Fundamentalmente, tres ensayos han sido utilizados para identificar arcillas dispersivas^{19, 17, 18}.

Pinhole - test. Se hace pasar agua destilada por un orificio (1 mm de diámetro) practicado en una probeta de suelo compactado; en arcillas dispersivas el agua sale turbia y el orificio es erosionado y en arcillas no dispersivas el agua sale limpia y el orificio no sufre erosión.

Sales solubles en el extracto de saturación. En este ensayo químico se mezcla una porción de suelo con agua destilada a un contenido cercano al límite líquido, dejándolo reposar por un tiempo para permitir el intercambio catiónico del complejo suelo-agua. Posteriormente se extrae una porción de esta agua de los poros, que se denomina *extracto de saturación*, y se determina la cantidad de los cuatro cationes metálicos Na, K, Mg y Ca de la solución, en miliequivalentes por litros, meq/l. Se define como total de sales disueltas (TDS) al total de estos cuatro cationes y, como porcentaje de sodio a la razón entre la cantidad de sodio y el TDS, ambos en meq/l.

Ensayo hidrométrico doble. Se basa en la ejecución de dos ensayos hidrométricos utilizando en un caso el mejor dispersante químico (ensayo clásico convencional) y en el otro, agua en lo posible similar a la que se embalsa; se define como porcentaje de dispersión a la razón en peso, de las partículas tamaño arcilla entre los dos ensayos según se ilustra en la Fig. 1.

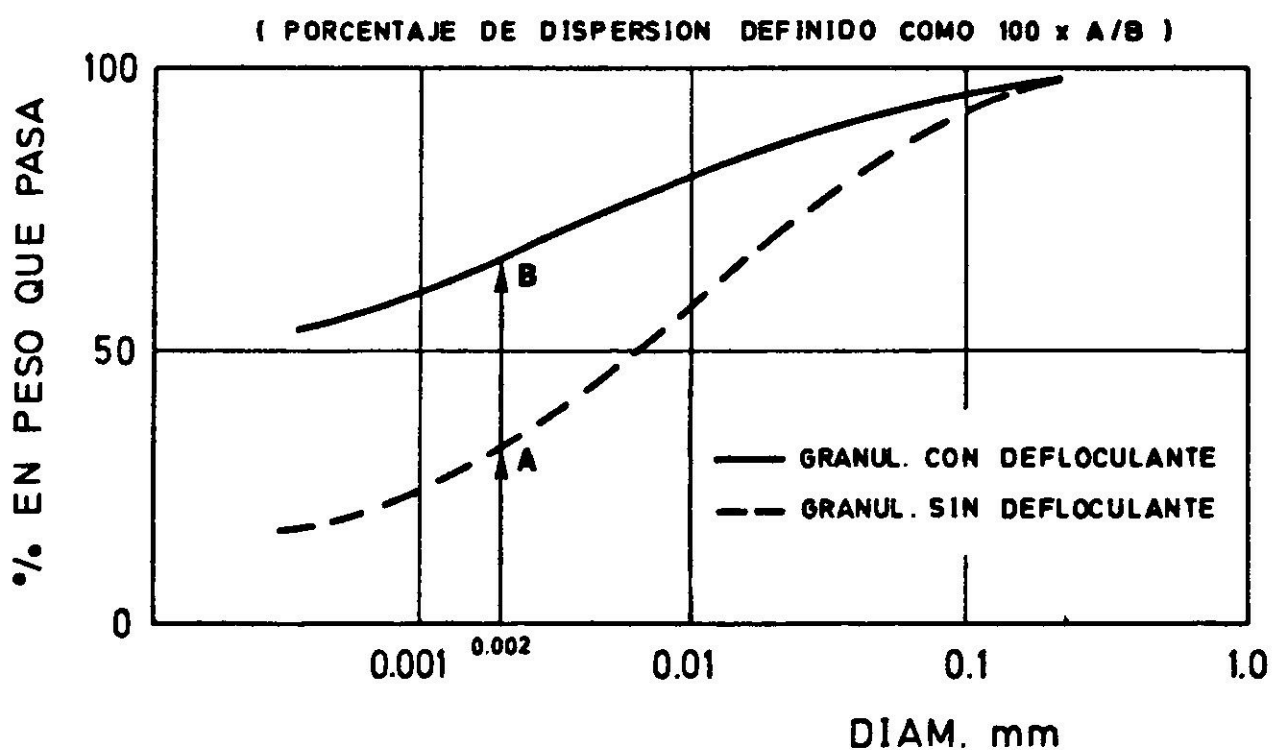


Fig. 1. Curvas granulométricas del ensayo hidrométrico doble en suelos dispersivos.

El ensayo hidrométrico posee varias limitaciones. En primer lugar, la defloculación depende del agente dispersor utilizado y no existe una normalización para la determinación de la granulometría sin defloculante; en segundo lugar, al definir un índice éste debería aumentar en la dirección de la propiedad respectiva y en consecuencia sería más correcto definir, en vez de porcentaje de dispersión, el índice de dispersividad' como B/A o $B - A$. En realidad, en forma análoga al problema de corrosión de estructuras enterradas, lo que interesa es el potencial del fenómeno (dispersividad), o sea la susceptibilidad de un material a ser disperso, y no la dispersión, que corresponde a un estado ya alcanzado.

La incorporación, por Sherard¹⁹, del *pinhole-test*, ha sido de gran importancia para la mejor visualización y cuantificación del problema de dispersión, si bien la esencia del fenómeno dista de estar totalmente entendida. Sherard¹⁹ investigó el fenómeno de dispersión en arcillas, a través del *pinhole-test* y del TDS en 195 muestras de suelo de varios lugares del mundo, de las cuales 80 correspondían a suelos de presas que tuvieron problemas de defloculación. A partir de este análisis propuso una correlación entre el TDS y el porcentaje de sodio, que se muestra en la Fig. 2, en la cual se definen las zonas A, B y C que permitirían identificar los suelos potencialmente dispersivos; en esta misma figura se incluye con líneas de trazos la antigua correlación propuesta en 1972. Es conveniente citar que seis de los tipos de suelos ensayados sufrieron dispersión a pesar de que su contenido de sodio fue menor que 40%, y no hubo una explicación satisfactoria para esta excepción.

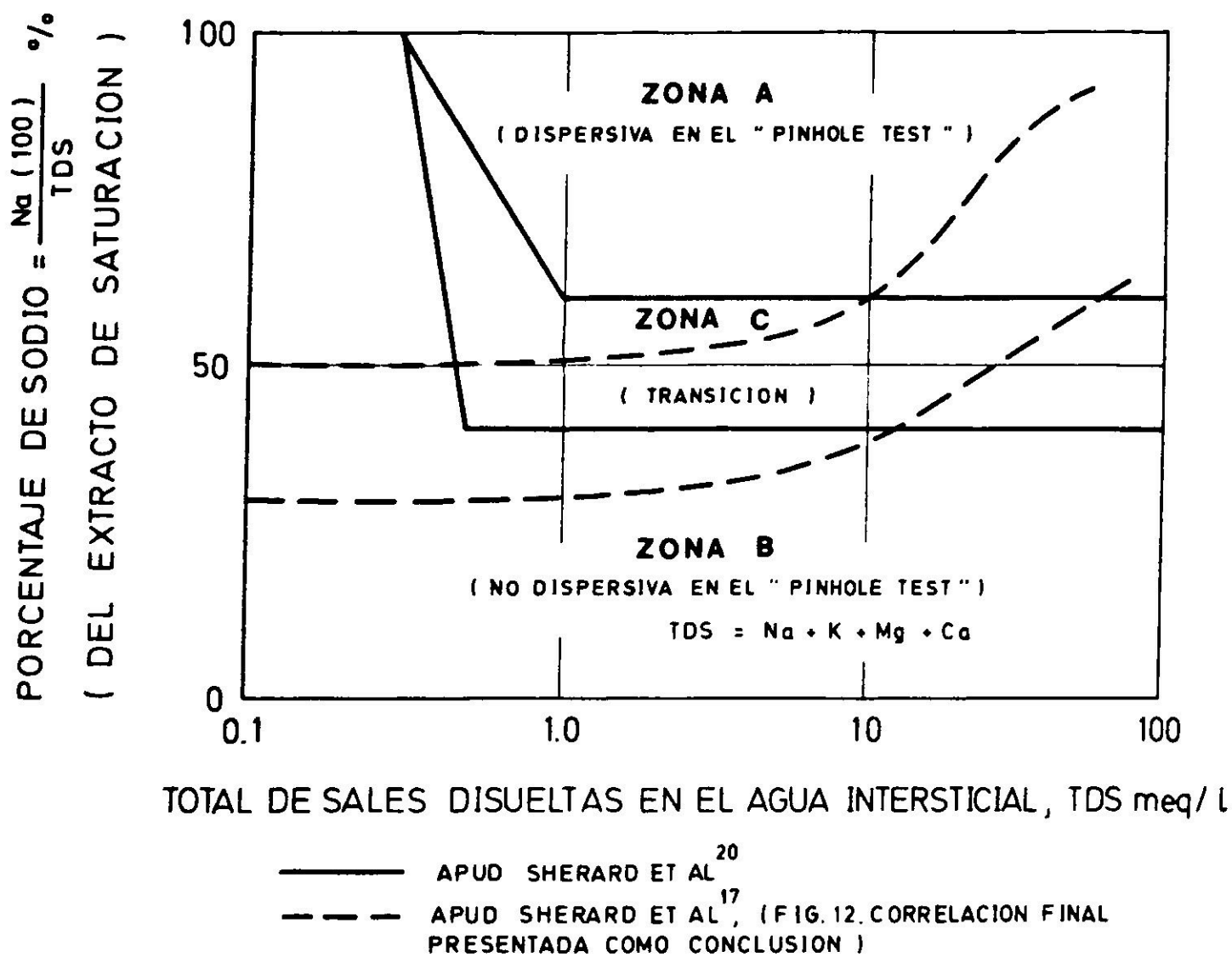


Fig. 2. Relación entre la dispersión y el contenido de sales del agua intersticial para suelos compactados en laboratorio según el pinhole-test.

Las propiedades de una arcilla y, en consecuencia su comportamiento, son altamente dependientes de sus características mineralógicas, por lo que, cualquier correlación que se establezca en relación al fenómeno dispersión, deberá incorporar un minucioso y detallado análisis de la influencia de sus minerales. El hecho de haber ensayado un gran número de muestras de diferentes partes del mundo no es suficiente (por problemas estadísticos) para establecer una correlación

de validez universal, pues nada impide que frente a nuevos datos (por ej. combinaciones de minerales diferentes a los ensayados, ensayos que consideren el efecto tixotrópico de los materiales, etc) la tendencia se desdoble en otras, mostrando que los conocimientos eran incompletos, y frente a nuevos datos el ciclo se repetiría hasta alcanzar, por aproximaciones sucesivas, *ad infinitum* el "conocimiento completo" (por ej. ver en la Fig. 2 el cambio significativo entre las correlaciones propuestas por Sherard en 1972 y 1976).

La aplicación de la relación presentada en la Fig. 3, en la opinión del autor, no debe ser adoptada prematuramente como algo totalmente comprobado y, en caso de ser utilizada se recomienda cautela; esto se debe al hecho de que su validez no fue claramente establecida en relación a la influencia de los tipos de minerales arcillosos (el autor solo citó *en passant*, que se usaron diferentes combinaciones mineralógicas sin haber resaltado su incidencia en el fenómeno).

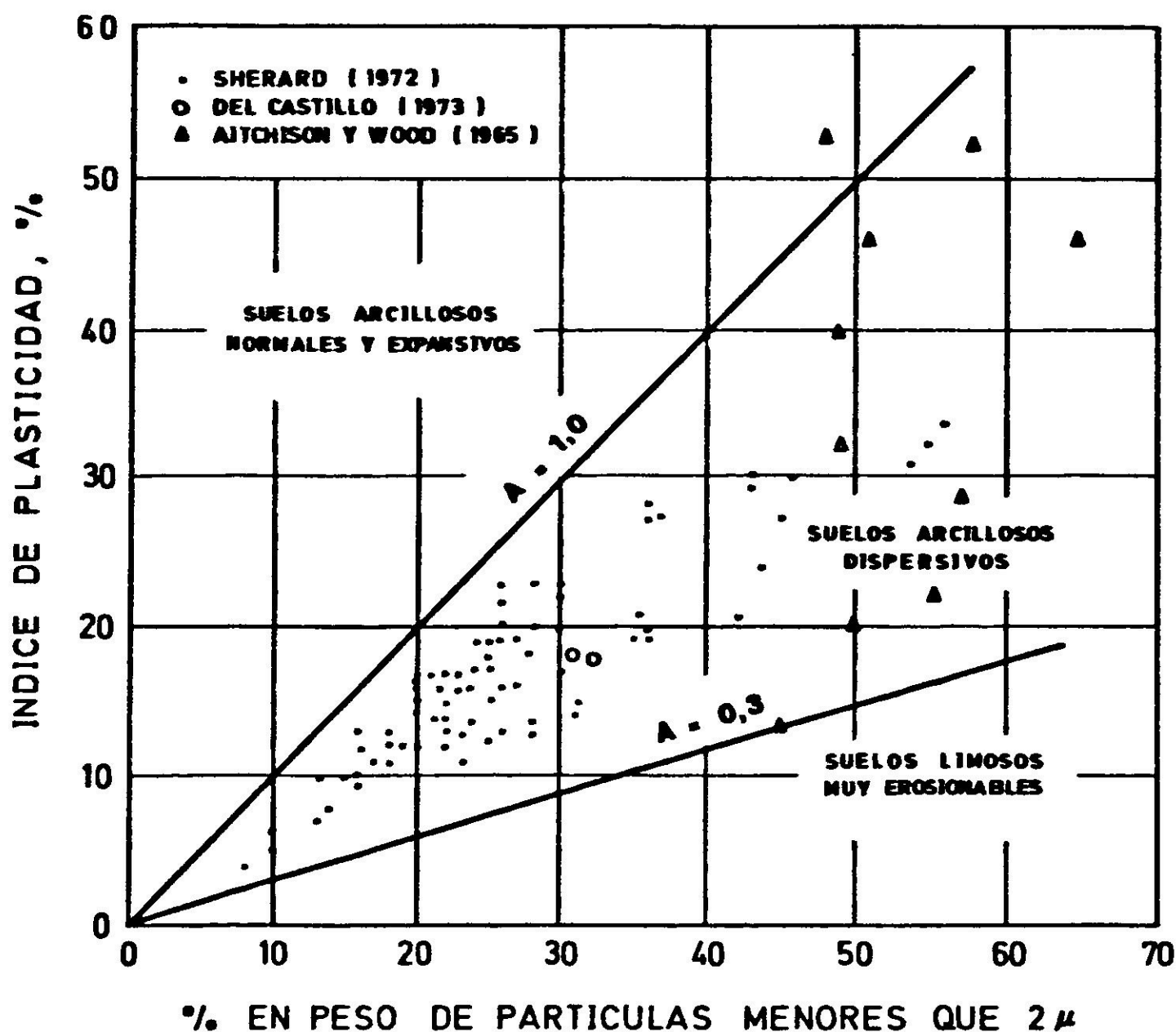


Fig. 3. Correlación entre actividad y dispersividad en suelos de presas de tierra que sufrieron piping. Apud Reséndiz¹⁶.

Es conveniente recalcar que la composición mineralógica es de gran importancia en la identificación de las arcillas dispersivas, existiendo actualmente controversias al respecto, como se verá más adelante.

Por las razones expuestas, para la identificación de las arcillas dispersivas a través de los ensayos citados, es necesario una interpretación adecuada de los

resultados, utilizando un amplio criterio personal. Aun más, si se adopta, como solución para el problema el uso de filtro (solución física), en la opinión del autor además del ensayo hidrométrico doble para su dimensionamiento sería conveniente ejecutar ensayos de filtro en laboratorio que representen las condiciones más desfavorables *in situ*; o sea probetas de arcilla compactada, acanaladas en su parte central o, en su defecto, con un orificio central de diámetro del orden de 3 mm, en contacto con filtros de diferentes granulometrías, sujetas a una carga de agua destilada, con la finalidad de observar y determinar si se produce realmente erosión interna o si efectivamente el filtro retiene las partículas coloidales.

PROPIEDADES INDICES COMO UN INDICADOR DEL POTENCIAL DISPERSIVO DE LAS ARCILLAS

En la mentalidad práctica de los ingenieros geotécnicos, es lógica y justificada la tendencia de intentar correlacionar las propiedades índices de una arcilla con su potencial dispersivo con el propósito de obtener relaciones que permitan la identificación del problema en forma simple y rápida.

Reséndiz¹⁶ correlacionó la actividad coloidal de las arcillas con su potencial dispersivo utilizando los resultados de presas que sufrieron fallas por erosión interna y estableció, como se muestra en la Fig. 3, que la zona comprendida entre las rectas de actividad 0.3 y 1.0 corresponden a suelos dispersivos. Además, afirma este mismo autor, que esta conclusión es congruente con las observaciones de que los finos de la mayoría de los suelos que se comportan como dispersivos tienen una composición mineralógica en que predominan las ilitas y caolinitas. En el más reciente State-of-the-art report of embankment-dams²², se cita esta correlación, en forma que deja la impresión de ser en principio aceptada o por lo menos de ser una relación con futuro. En la opinión del autor del presente trabajo, su adopción en la práctica profesional podrá conducir a conclusiones no del todo correctas, como se discute a continuación.

Antes de plantear correlaciones se debe hacer un análisis para determinar qué representan los ensayos a ser utilizados en relación al fenómeno de dispersión y si será posible a través de ellos cuantificarlo. Cualquier correlación entre los límites de Atterberg o la actividad coloidal con la susceptibilidad a la dispersión, no será compatible *in totum* pues ambos son de naturaleza diferente. La dispersión es un fenómeno íntimamente ligado a las características físico-químicas de las arcillas en el que interviene un flujo; a pesar que el comportamiento mecánico de las arcillas es influenciado por estas características, no es un indicador adecuado para inferir defloculación, ya que los ensayos de Atterberg miden fundamentalmente resistencias. En efecto, el ensayo del límite líquido (*LL*) es un ensayo de corte dinámico no drenado y cuya resisten-

cia en los suelos remoldeados es del orden de 0.25 t/m^2 ; de la misma forma el límite plástico, también corresponde a una resistencia al esfuerzo de cizalle para la condición cercana a la de pérdida de plasticidad.

Examinando más a fondo el problema, y teniendo en cuenta las propias fuentes de error de los ensayos de Atterberg, la probable presencia de impurezas y, las variaciones de la estructura cristalina en muchas arcillas, se puede establecer que los valores de los límites de Atterberg representan tan sólo la cantidad relativa de agua adsorbida por las superficies de las partículas de cada tipo de mineral durante el breve tiempo de ejecución del ensayo³. De esto se desprende que el límite plástico estaría relacionado directamente con la superficie específica e indirectamente con el tamaño de la partícula.

Debido a la gran semejanza de estructura cristalina entre los diferentes minerales, es común y no sorprendente que existan interestratificaciones de dos o más tipos de capas de diferentes minerales arcillosos en una misma partícula¹²; aun más, para un mismo mineral existen amplias variaciones de su estructura cristalina^{3, 13}: Como el tamaño de las partículas es dependiente de la perfección cristalina del mineral, entonces es lógico suponer que existirá una gran dispersión de los valores de los límites de Atterberg para minerales con los mismos iones intercambiables. En efecto, en las Figs. 4 y 5 se presentan los valores típicos de los límites de Atterberg con sus respectivas fajas de variación, para los minerales arcillosos de mayor interés geotécnico: caolinita, ilita y montmorillonita. Se observa que la variación de los límites de Atterberg para un mismo mineral con un ión específico, es extremadamente amplia y, que prácticamente se superponen para los diferentes cationes intercambiables; aun más, las propias fajas de las caolinitas e ilitas se llegan a superponer (esto será más notorio para las arcillas formadas por ambos minerales, cosa común en la naturaleza). Los citados minerales se ubican en la carta de plasticidad en función creciente de intercambio catiónico.

El límite plástico en las montmorillonitas, especialmente sódica, es distorsionado por las propiedades tixotrópicas del sistema agua-arcilla. Por este mismo efecto, el *LL* para algunas montmorillonitas casi no tiene sentido; en particular, para arcillas altamente tixotrópicas (bentonitas) el *LL* es casi totalmente dependiente del tiempo, debido al aumento de resistencia con este último. Las arcillas bentónicas usualmente corresponden a montmorillonita con alto contenido de catión sodio. Pequeñas cantidades de montmorillonita (posee una alta capacidad de adsorción de agua), pueden alterar fuertemente la capacidad de adsorción de un suelo arcilloso en especial en minerales caolínicos y cuando existen iones intercambiables de baja valencia, por ej. Na, K etc. Es conveniente recordar lo mencionado al comienzo de este trabajo, que las investigaciones han mostrado una estrecha relación entre el potencial dispersivo y la presencia del catión sodio intercambiable en el suelo.

En la Fig. 6 se presentan los resultados de los límites de Atterberg obtenidos por Sherard²⁰ en suelos dispersivos y no dispersivos; en ellos se observa

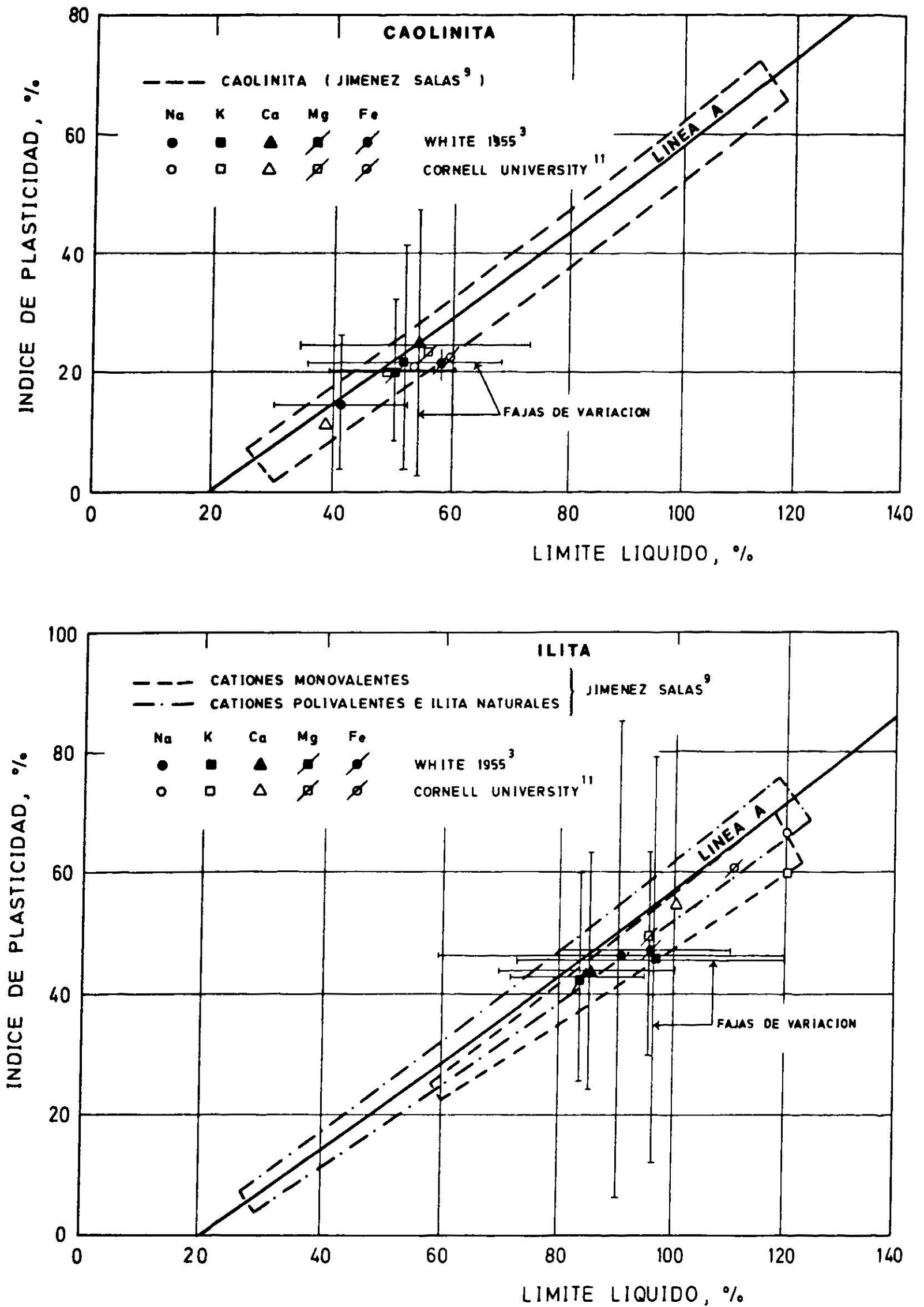


Fig. 4. Fajas de variación de los límites de Atterberg para caolinitas e ilitas.

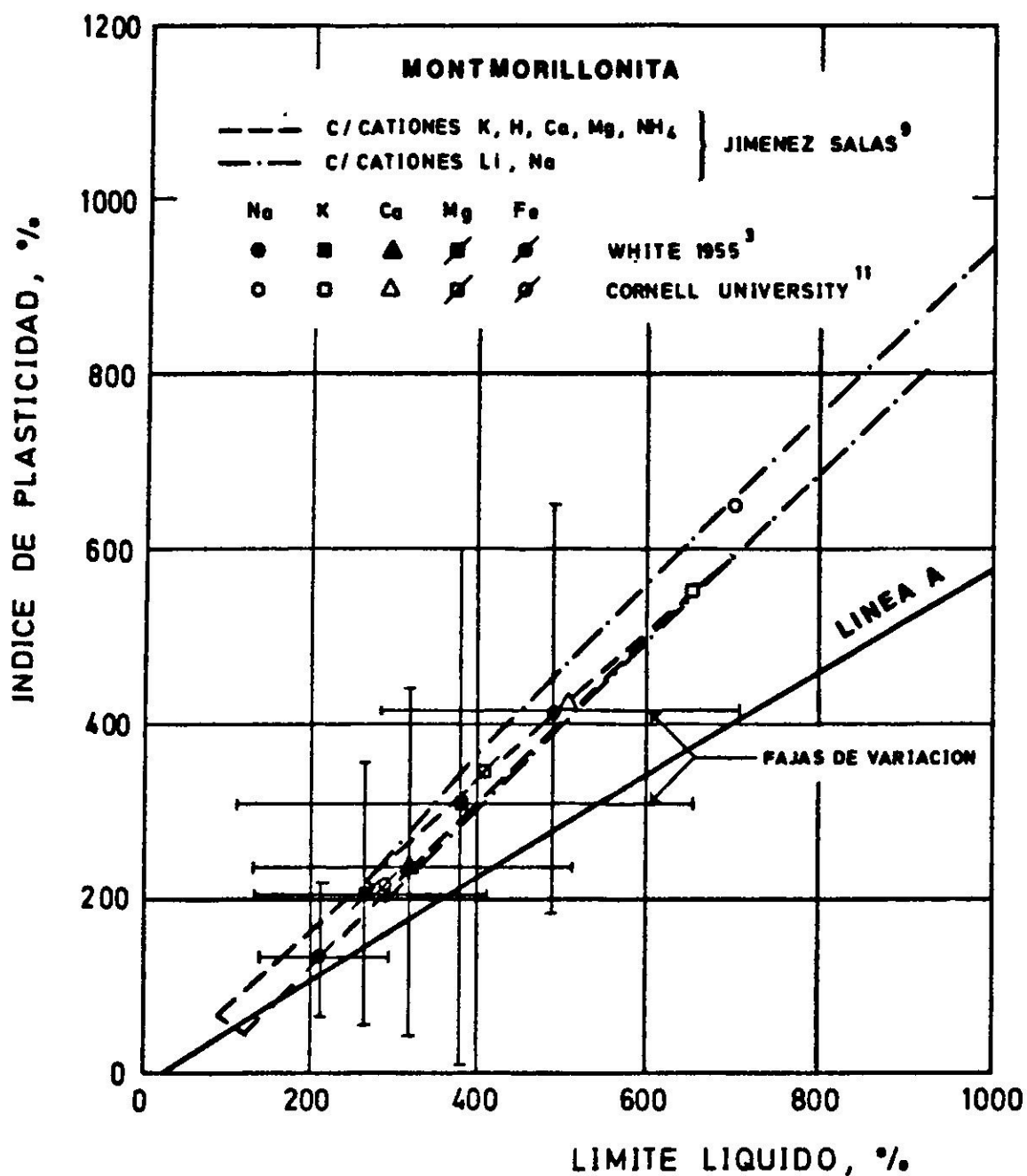


Fig. 5. Fajas de variación de los límites de Atterberg para montmorillonitas.

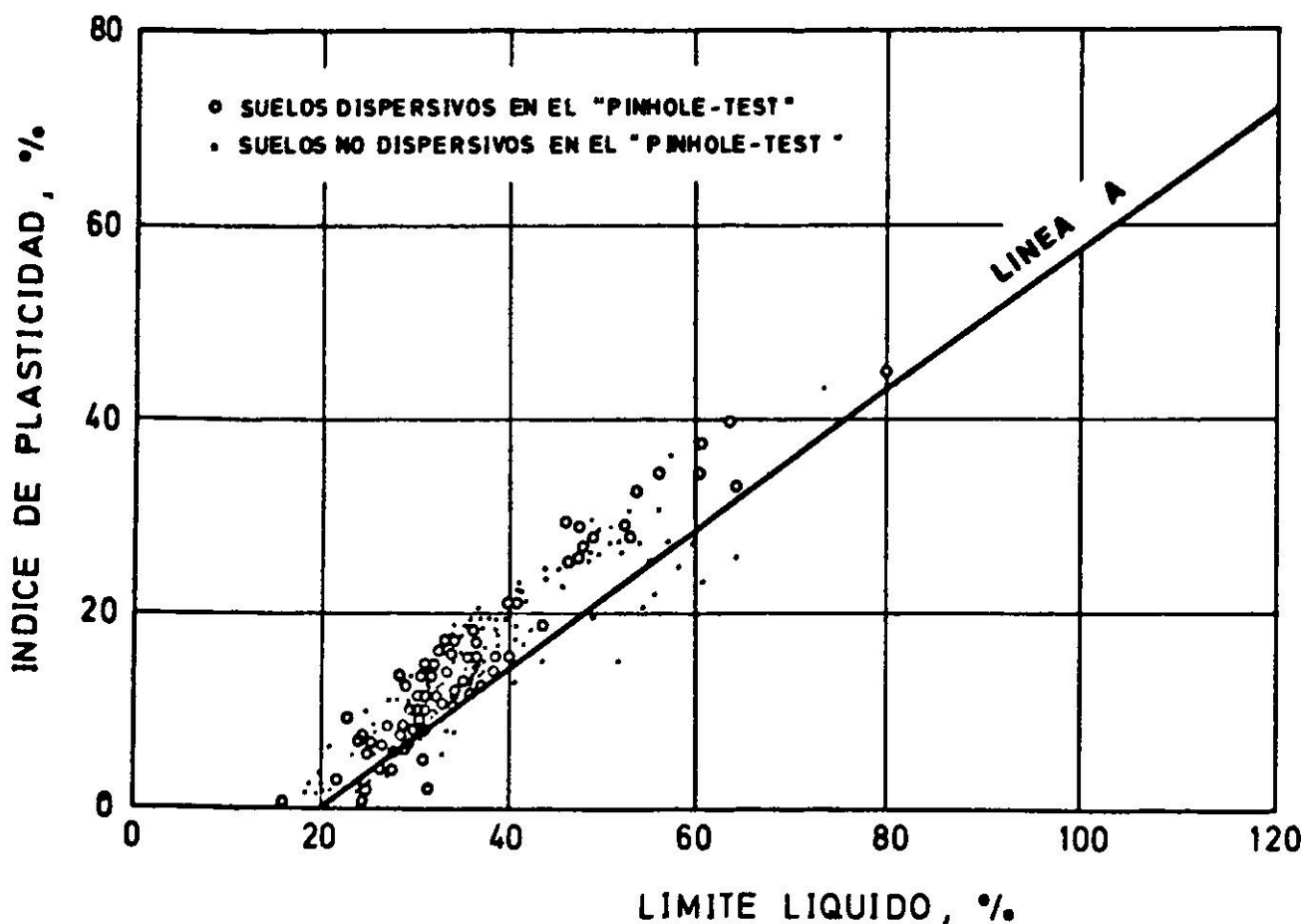


Fig. 6. Relación entre dispersión y límites de Atterberg según Sherard²⁰.

que no existe una diferencia de ubicación en la carta de plasticidad entre ambos tipos de suelo.

Sherard¹⁹ estableció que la mayoría de los suelos residuales tropicales, productos de la descomposición de basalto, diorita y gneiss, clasificados frecuentemente como MH y ML-MH, se han comportado como no dispersivos en el Pinhole-test. Los suelos que forman la cuenca sedimentaria del río Paraná (formación *Serra Geral*, Brasil), utilizados en la construcción de varias presas de esa región (N.O. del estado de São Paulo) corresponden básicamente a suelos residuales basálticos. En la Fig. 7 se han graficado los límites de Atterberg de esta arcilla basáltica, proveniente de 4 empréstitos ($\sim 1,5 \text{ km}^2$, cada una) de la zona del Bajo Río Turvo, cuya clasificación corresponde a MH-ML; como comparación se incluye la faja de ubicación de los suelos dispersivos de la Fig. 6. Se observa que efectivamente los suelos residuales de basalto no se sitúan en la faja de suelos dispersivos, lo que efectivamente correspondería a la realidad ya que las presas construídas en esta área no han mostrado problemas de defloculación. Estos suelos residuales de basalto, de acuerdo a su ubicación en la carta de plasticidad (ver Fig. 4), tendrían predominancia de minerales de caolinita y menor cantidad de ilita. Al hacer un parangón entre estos resultados de laboratorio y la explicación geológica presentada anteriormente para los suelos residuales de basalto, se puede observar que ambas son congruentes.

En la Fig. 8 se presenta la actividad coloidal de esta arcilla basáltica, junto a la de los principales minerales arcillosos en la ingeniería de suelos y a la faja de arcillas dispersivas propuesta por Reséndiz¹⁶. Estos resultados ponen de manifiesto la limitación de la correlación propuesta por este autor, ya que las arcillas en análisis no son dispersivas.

Como complemento es conveniente citar que en el inicio de las primeras investigaciones de los australianos en suelos dispersivos^{1, 2}, éstos establecieron que los suelos que experimentaron *piping* poseían una importante fracción de montmorillonita, que existían ilitas altamente dispersivas, pero que raramente lo eran las caolinitas. Sin embargo, Sherard¹⁷, tanto para los suelos dispersivos y no dispersivos estudiados en ese entonces, no encontró diferencias mineralógicas entre estos tipos de suelo, e informó que la composición de ambos era de 30 a 50% de montmorillonita, 10 a 25% de ilita y 10 a 25% de caolinita; el mismo autor¹⁹, en su última investigación, no concluye nada respecto a la composición mineralógica. Reséndiz¹⁶, observa que la mayoría de los suelos que se comportan como dispersivos tendrían una composición mineralógica de ilita y caolinita, y aduce que los suelos con actividad coloidal mayor que 1 (caso de las montmorillonitas) son inmunes a la tubificación. Esto nos muestra que con el conocimiento actual no es posible establecer una relación entre la composición mineralógica y el potencial dispersivo de un suelo.

Como conclusión, se puede establecer que basándose en el nivel actual del conocimiento no es posible establecer correlaciones fidedignas entre el potencial dispersivo de un suelo y las propiedades índices de éstos y que las diversas tendencias sugeridas tienen carácter especulativo.

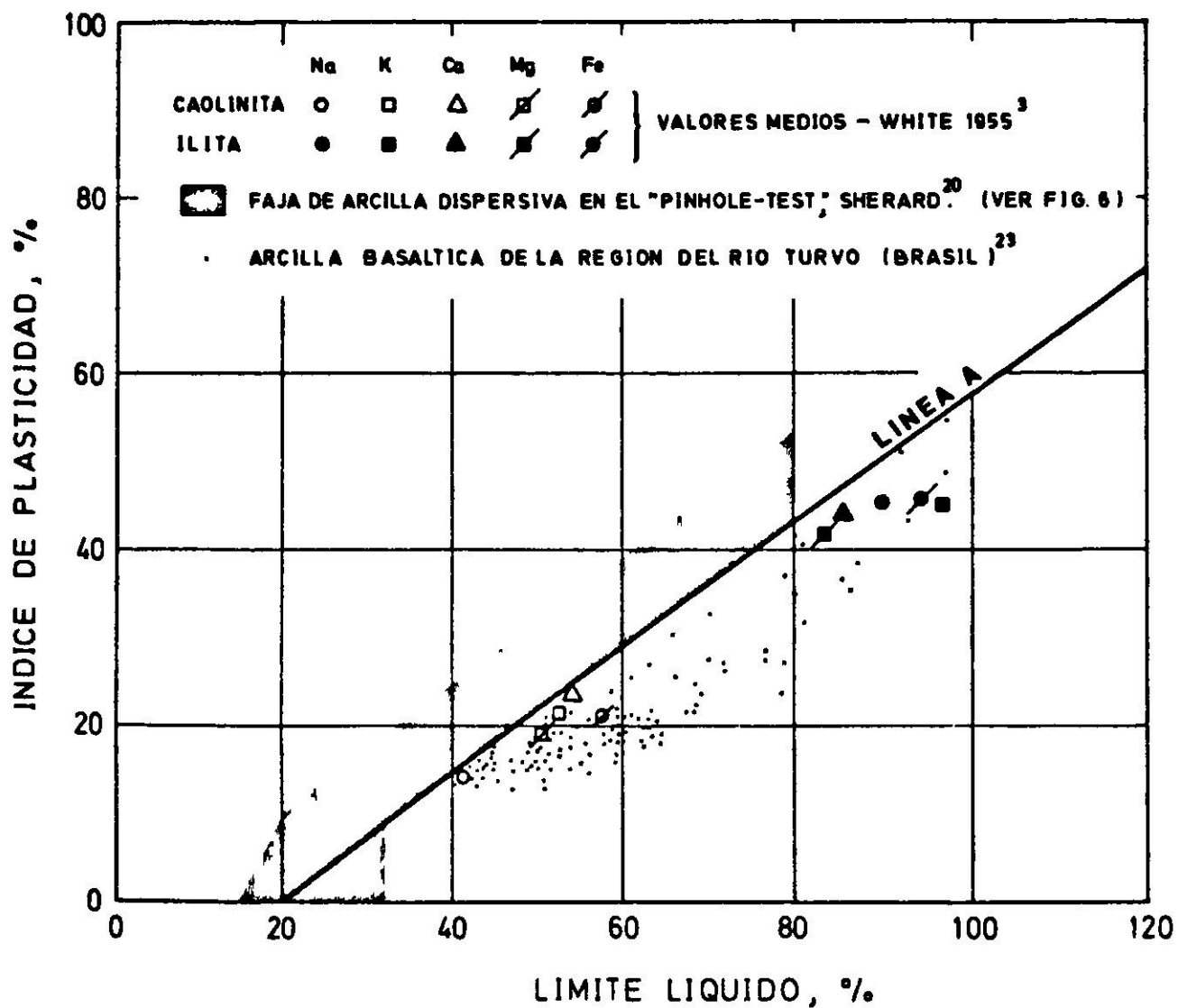


Fig. 7. Límites de Atterberg para arcilla originada por la descomposición de basalto.

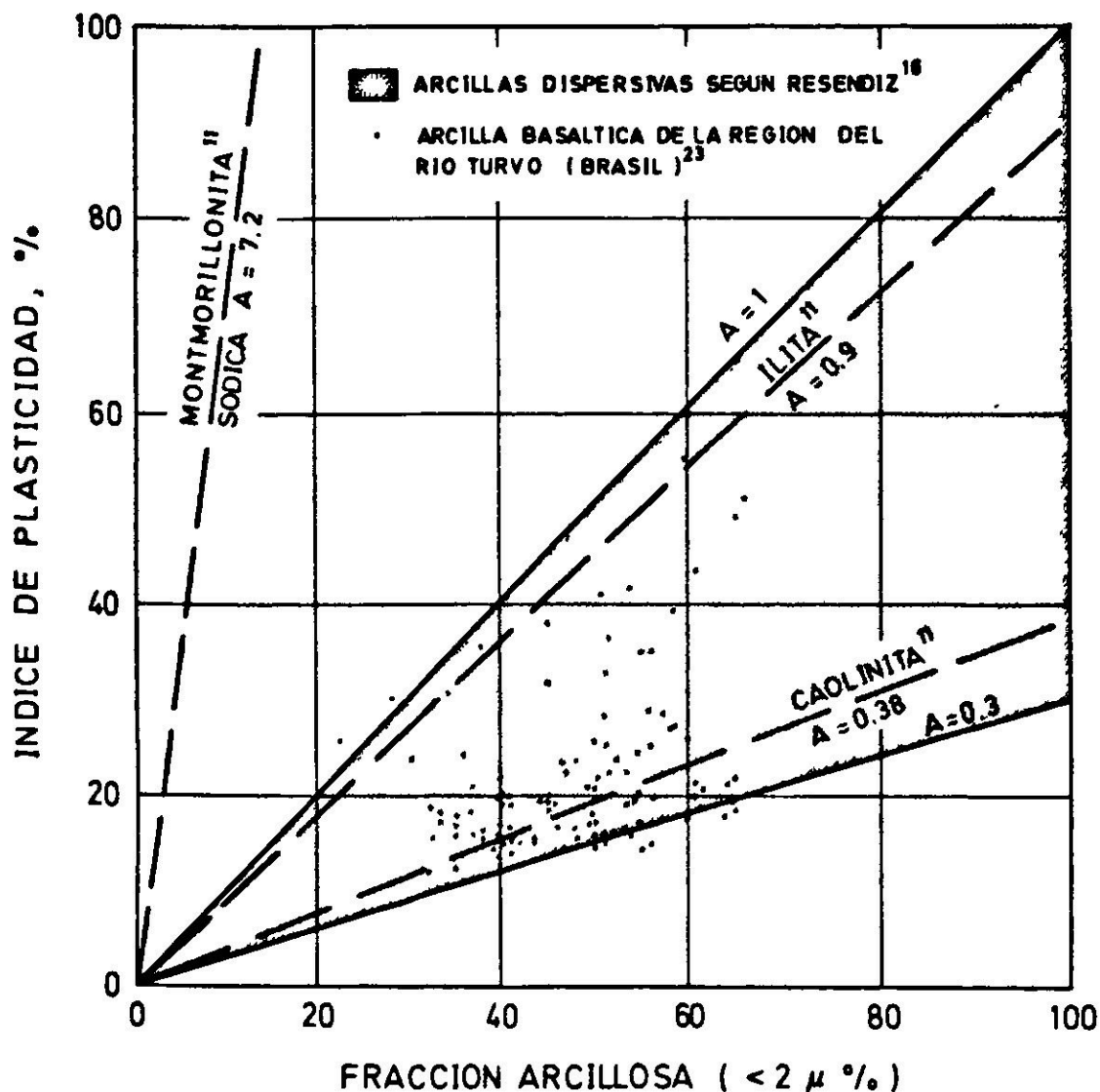


Fig. 8. Actividad coloidal para diferentes minerales arcillosos.

SOLUCIONES CONTRA LA TUBIFICACION EN PRESAS DE ARCILLAS POTENCIALMENTE DISPERSIVAS

Existen dos tipos de solución para el control de la defloculación en arcillas dispersivas: química y física.

La solución química consiste en incorporar al suelo cationes polivalentes ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, etc.) a través del agua de compactación o mezclándolos directamente con él a fin de producir un intercambio catiónico (cambio de propiedades) más favorables, disminuyendo de esta forma la concentración de sodio a niveles tales que garanticen la no defloculación de la arcilla compactada*; este caso corresponde al tratamiento del suelo contra los efectos futuros del agua. Inicialmente esta solución fue aplicada con éxito por los australianos^{1, 2, 21} y, posteriormente, en U.S.A. en la reparación de presas de suelos dispersivos que fueron afectados por tubificación. En laboratorio (Pinhole-test) se confirmó que los suelos dispersivos se transforman en no dispersivos por medio de tratamiento con cal¹⁹. Sin embargo, el proyectista deberá tener en cuenta que la aplicación de este procedimiento modificará las propiedades del material, disminuyendo su densidad y aumentando tanto su contenido de agua en el óptimo de compactación como su permeabilidad, lo cual en circunstancias especiales podría incidir negativamente en el comportamiento de una presa.

La solución física consiste en el uso del principio de barrera esterométrica. Ella conduce a adoptar filtros chimenea con materiales bien graduados compatibles en la distribución granulométrica (con ensayos granulométricos dobles) del material a ser protegido^{6, 12, 20}, lo cual constituiría una barrera perfecta contra el *piping*.

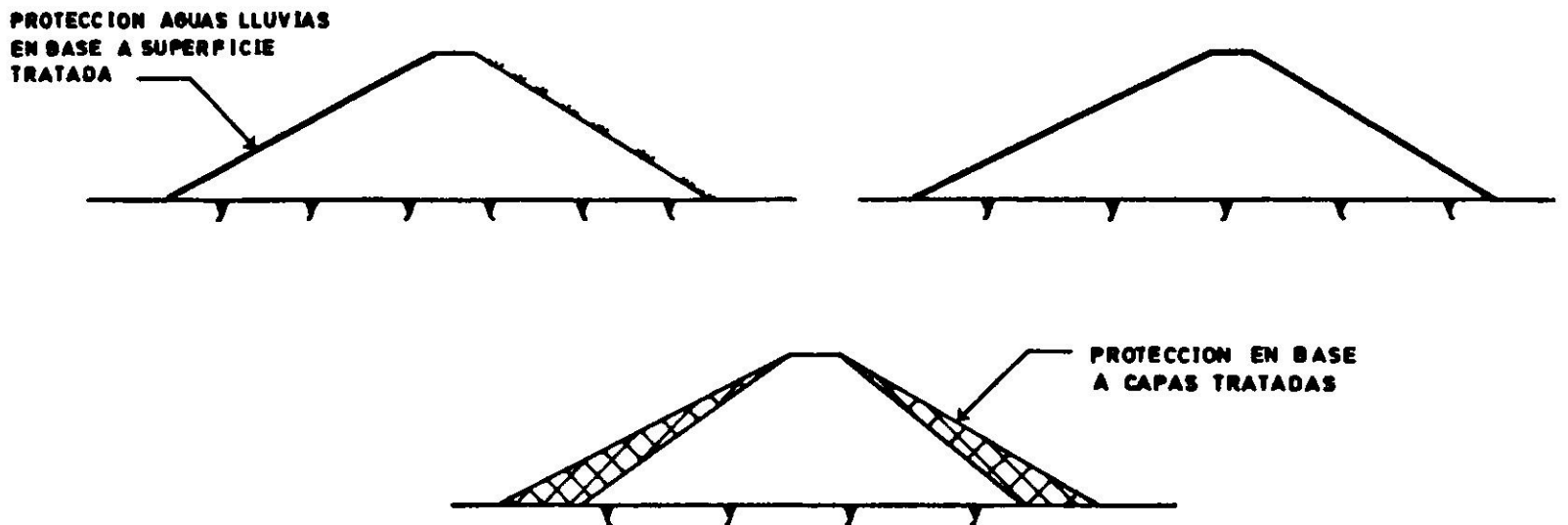
La defloculación en arcillas dispersivas constituye efectivamente un problema de estadística de extremos y su solución a nivel de ingeniería se debe basar en la aplicación del segundo principio de un buen proyecto⁶: utilizar elementos dominantes. En arcillas dispersivas el tamaño de las partículas erosionadas (medidas en terreno y en laboratorio) son menores que 1μ y, para retenerlas estereométricamente sería necesario un filtro de limo, lo cual obviamente no será una buena solución. Sin embargo la gran mayoría de los suelos arcillosos presentes en la naturaleza poseen un porcentaje de limo tal que hace que el propio material, junto al filtro, sea autofiltrante, no permitiendo el paso de las partículas del suelo defloculado. La excepción a lo anterior la constituirían los suelos francamente arcillosos dispersivos sin partículas tamaño limo, lo cual no es común en la naturaleza y, para esta excepción sería más adecuado el uso de la solución química.

En la opinión del autor, en arcillas dispersivas, para presas homogéneas de pequeña altura, la solución química sería la más conveniente de acuerdo

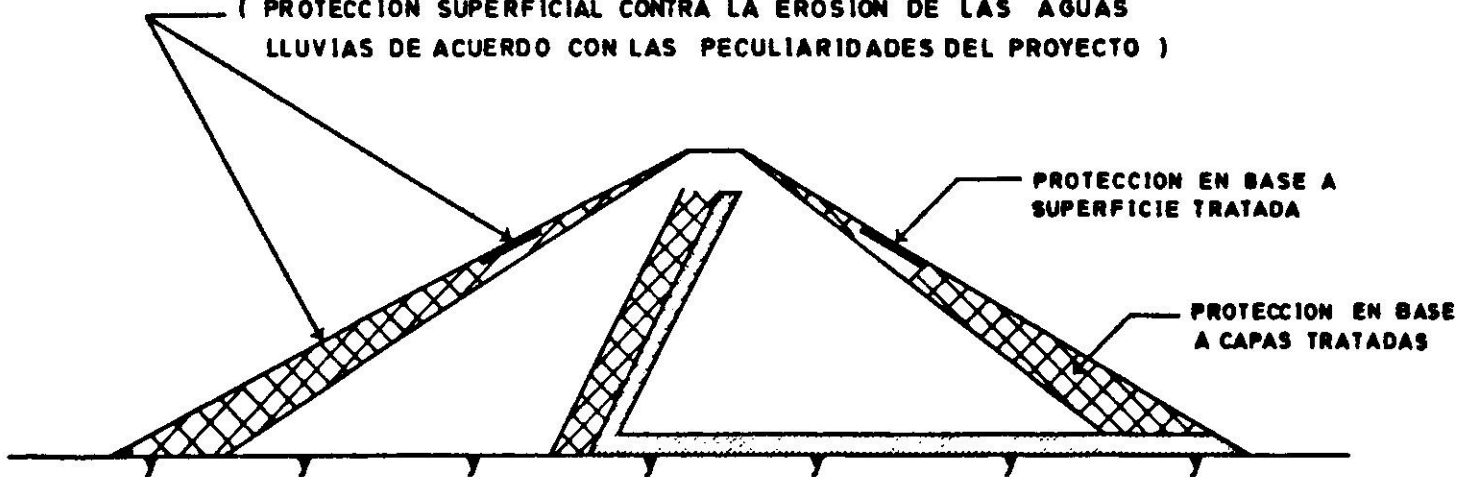
* Comúnmente se han utilizado porcentajes en peso del orden del 1 a 3%.

con los esquemas indicados en la Fig. 9; para mayores alturas, utilizando el principio del profesor Casagrande *belt and suspenders*¹⁵, sería conveniente usar concomitantemente el tratamiento químico (compatible con la concentración catiónica del agua del embalse) y el filtro chimenea inclinado hacia aguas arriba.

PRESAS HOMOGENEAS DE PEQUEÑA ALTURA
(USO DE FILTRO CHIMENEA SEGUN PECULIARIDADES DEL PROYECTO)



PRESAS HOMOGENEAS DE MEDIANA Y GRAN ALTURA
(PROTECCION SUPERFICIAL CONTRA LA EROSION DE LAS AGUAS LLUVIAS DE ACUERDO CON LAS PECULIARIDADES DEL PROYECTO)



LEYENDA

- SUPERFICIE TRATADA CON UNA PELICULA FINA DE PRODUCTO QUIMICO POLIVALENTE (CAL, SULFATO DE ALUMINIO, ETC)
- ▣ SUELO ARCILLOSO TRATADO CON PRODUCTO QUIMICO POLIVALENTE (SOLUCION O POLVO INCORPORADO)
- ▨ FILTRO CONVENCIONAL DE ARENA

Fig. 9. Secciones tipo propuestas como solución para presas homogéneas de arcilla dispersiva.

En el caso de presas de enrocado con núcleo impermeable de arcilla, su núcleo representa el *talón de Aquiles*, y por lo tanto se deben tomar las precauciones para evitar problemas con las arcillas dispersivas, en especial en zonas sísmicas. Para presas de pequeña altura la solución basada en el concepto de barrera estereométrica sería más adecuada y para alturas mayores, usar simultáneamente con esta, la solución de tratamiento químico de acuerdo a lo indicado en la Fig. 10. Sin embargo, en el proyecto no se debe descartar

del análisis técnico-económico, la alternativa de modificar este tipo de sección por una de enrocado con un paramento impermeable de concreto o similar aguas arriba, pues esta última solución presenta un sin número de ventajas.

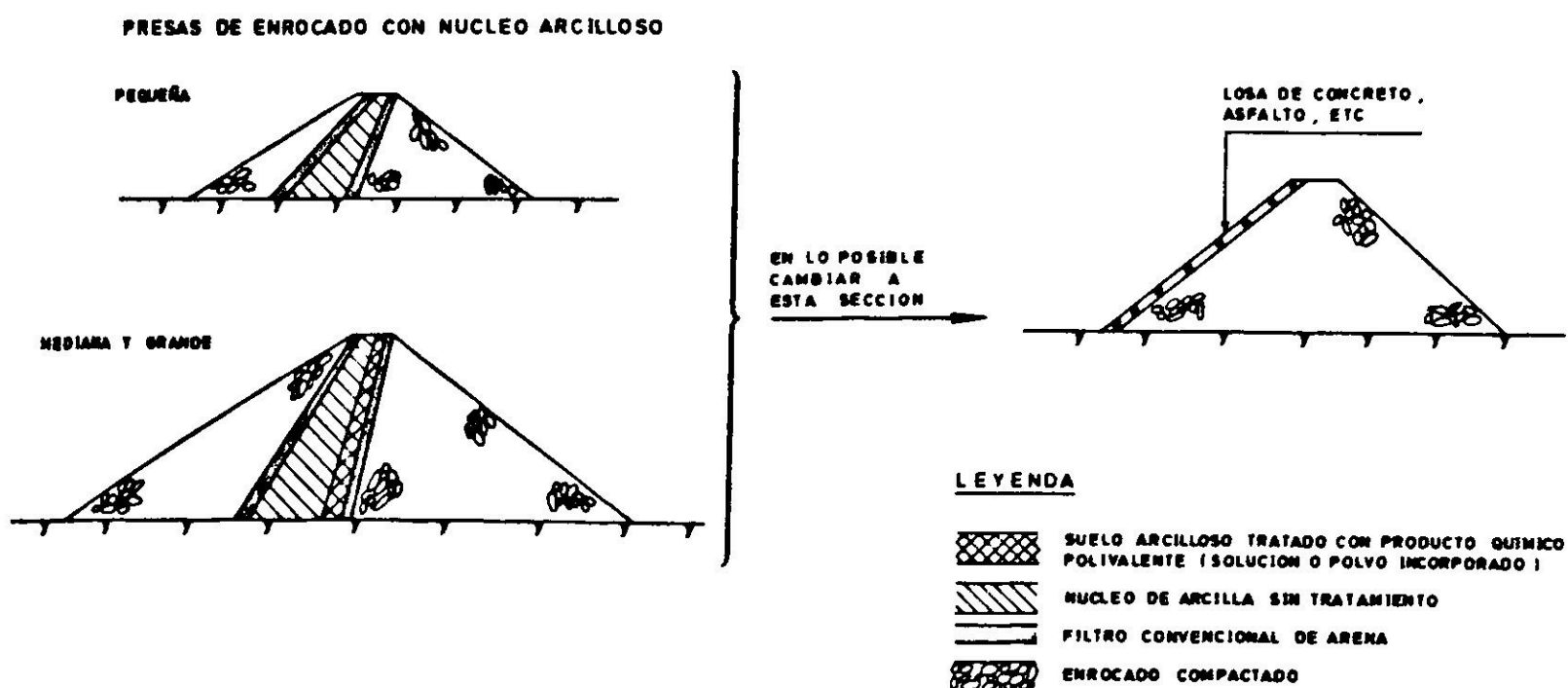


Fig. 10. Secciones tipo propuestas como solución para presas de enrocado con núcleo de arcilla dispersiva.

CONCLUSIONES

Basado en el nivel actual de los conocimientos en relación al problema de arcillas dispersivas en el diseño de presas, en opinión del autor se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- La geología y su interpretación desde el punto de vista de la ingeniería civil es de gran importancia en la obtención de indicadores preliminares de amplia escala para la identificación de las arcillas dispersivas de modo que, durante las primeras campañas de investigaciones geológicas, se podrá excluir o no este fenómeno del universo de factores que influirán significativamente en el proyecto.
- La interpretación de los resultados de los ensayos especiales de laboratorio para la identificación de arcillas dispersivas y su aplicación a la práctica profesional requiere de un amplio criterio y juicio personal aliado al buen conocimiento de las limitaciones de cada ensayo. En particular, cuando se opte por la barrera estereométrica como solución del fenómeno de defloculación, además de los ensayos especiales pertinentes de laboratorio, se recomienda la ejecución de ensayos de filtro que representen las condiciones más desfavorables de la obra, para verificar la eficiencia del filtro contra la erosión interna del suelo.
- En la actualidad no existen correlaciones fidedignas entre el potencial dispersivo de una arcilla y sus propiedades índices (límites de Atterberg, actividad coloidal, etc). Las tendencias actualmente sugeridas tienen ca-

racter especulativo y por el momento debe evitarse su uso en la práctica profesional como elementos de decisión.

Dependiendo de las características de la presa y especialmente del tipo de sección, la solución que se adopte frente al problema de arcillas dispersivas podrá ser la física y/o la química. En las Figs. 9 y 10 se presentan las diversas soluciones recomendadas para cada caso en cuestión.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su gratitud al Prof. Victor de Mello por la crítica al manuscrito del trabajo, y a los ingenieros Guillermo Noguera, Pedro Ortigosa y Ernesto Gómez por sus sugerencias para la mejor presentación del mismo. Se resalta que las conclusiones de la publicación son de total y exclusiva responsabilidad del autor. Finalmente a Eliana, quien ha hecho que todo sea más fácil.

REFERENCIAS

1. AITCHISON, G.D.; INGLES, O.G. y WOOD, C.C. Post-construction defloculation as a contributory factor in the failure of earth dams. *Fourth Australia-New Zeland Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1963, p. 275.
2. AITCHISON, G.D. y WOOD, C.C. Some interactions of compaction, permeability and post-construction defloculation affecting the probability of piping failures in small dams. *Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, vol. 2, 1965, p. 442.
3. ATTEWELL, P.B. y FARMER, I.W. *Principles of engineering geology* Chapman and Hall Inc. London, 1979.
4. CEDERGREN, H.R. Seepage control in earth dams. *Embankment-Dam Engineering* (Casagrande Volume), John Wiley and Sons, 1973, p. 21.
5. DE MELLO, V.F.B. Acidentes em barragens. *Terceiro Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos*, Belo Horizonte, 1966, p. V-54.
6. DE MELLO, V.F.B. Seventeenth Rankine lecture: Reflections on design decisions of practical significance to embankment dams. *Geotechnique* 27, nº 3, 1977, p. 279.
7. DE MELLO, V.F.B. *Apostilas de Aula do Curso: Barragens de Enrocamento e Diversas*, Universidades de São Paulo, 1980.
8. EMMONS, W.H.; ALLISON, J.S.; STAUFFER, C.R. y THIEL, G.A. *Geología: Principios y Procesos*, Mc Graw Hill Inc. Madrid, 1963.
9. JIMENEZ SALAS, J.A. y DE JUSTO ALPAÑES, J.L. *Geotecnia y Cimientos*, Editorial Rueda, Madrid, 1971.

10. JUAREZ BADILLO, E. y RICO, A.R. *Mecánica de Suelos*, Tomo I, México, 1969.
11. LAMBE, T.W. y WHITMAN, R.V. *Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, Inc. N.Y. 1969.
12. MARSAL, R.J. Análisis de conocimientos sobre suelos cohesivos compactados, State-of-the-art report, *Proceeding of the Sixth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Lima, vol. I, 1979, p. 143.
13. MITCHELL, J.K. *Fundamentals of soil behavior*, John Wiley and Sons, Inc, N.Y. 1976.
14. PECK, R.P. Presidential address. *Proceedings of the Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscú, vol. 4 1973, p. 156.
15. PECK, R.P. *The Fifth Laurits Bjerrum lecture: Where has all the judgment gone?*. The Norwegian Geotechnical Institute, 1980.
16. RESENDIZ, D.N. Propiedades de los suelos finos compactados capítulo 9 del libro *Presas de Tierra y Enrocamiento*, de Marsal R.J. y Reséndiz D.N. Editorial Limusa, México.
17. SHERARD, J.L.; DECKER, R.S. y RYKER, N.L. Piping in earth dams of dispersive clays. *Proceedings of the Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Structures*, New York, ASCE, vol. I, Part 1, 1972, p. 589.
18. SHERARD, J.L. Embankment dam craking, *Embankment-Dam Engineering* (Casagrande Volume), John Wiley and Sons. 1973, p. 271.
19. SHERARD, J.L.; DUNNIGAN, L.P.; DECKER, R.S. y STEELE, E.F. Pinhole test for identifying dispersive soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Proceeding ASCE, vol. 102, n° GT1, enero 1976, p. 69.
20. SHERARD, J.L.; DUNNIGAN, L.P. y DECKER, R.S. Identification and Nature of Dispersive Soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. Proceeding ASCE, vol. 102, n° GT4, abril 1976, p. 287.
21. THOMAS, H.H. *The engineering of large dams*, Part 2, John Wiley and Sons, Sydney, 1976.
22. WILSON, S.D. y MARSAL, R.J. Current trends in design and construction of embankment dams, presented to the International Comision on Large Dams (ICOLD) Conference in New Delhi, and published by the *Geotechnical Division*, ASCE, 1979.
23. ———, *Relatorios S-42 e 48/80, Estudos geotécnicos preliminares das áreas de empréstimo dos eixos Talhado e Bijui, Aproveitamento Hidreléctrico da Bacia Sedimentar do Río Turvo, Companhia Energética de Sao Paulo, CESP, Brasil 1980.*

REFLECTIONS ABOUT THE PROBLEM OF DISPERSIVE CLAYS ON THE DESIGN OF EMBANKMENT DAMS

S U M A R Y

A synthesis and critical review about the up-to-day correlations for the identification of dispersive clays in engineering practice are presented. It is proposed the use of geology as a primary tool in order to get preliminary indications for the identification of dispersive soils. Typical sections of embankment and rockfill dams are presented as solution for this problem.