

LAS CENIZAS VOLCANICAS DE MONTUFAR

Por JOSE POLIMON

Doctor Ingeniero de C., C. y P.

FERNANDO SANSEGUNDO

Ingeniero de C., C. y P.

JUAN ANTONIO MARIN

Ingeniero de C., C. y P.

1. INTRODUCCION

En el proyecto de la presa de Montúfar, redactado por la sociedad INTECSA para el Gobierno del Ecuador, a través de INECEL (*), se ha tenido ocasión de estudiar el comportamiento de suelos volcánicos como material de construcción de presas. Este artículo se ha redactado en el ánimo de dar una información complementaria sobre el tema del comportamiento de este tipo de suelos que, como es conocido, presentan características muy peculiares.

La presa proyectada está situada a unos 40 Km de Tulcan, capital de la provincia del Carchi. La altitud del lugar de emplazamiento es de 2.750 m. La presa alcanzará una altura de unos 70 m y tendrá una longitud de 350 m en coronación. Esta presa dará lugar a un embalse de 80 Hm³ de capacidad, que permitirá regular las aportaciones del río con vistas a su utilización para producción de energía eléctrica.

A la hora de decidir el perfil tipo de presa los temas esencialmente estudiados fueron: calidad de los terrenos que constituyen la cimentación y disponibilidad de materiales en la zona. Ambos problemas están directamente relacionados con el conocimiento geológico del área en estudio.

En síntesis, la geología de la zona se puede resumir como sigue: la depresión andina, en la cuenca del río Apaqui, ha sido formada por la superposición de los siguientes fenómenos o fases geológicas:

- Plegamientos o movimientos andinos: Fundamentalmente contribuyeron a formar el relieve topográfico básico, poco transformado por las restantes fases geológicas.
- Vulcanismo: Aporta el material que va a rellenar la depresión andina y, posteriormente, contribuirá a la formación de los glaciares.
En una primera fase da lugar a unas coladas andesíticas que constituirán, con más o menos regularidad, el zócalo del resto de los materiales volcánicos que rellenan la depresión andina.
- Glaciaciones e interglaciaciones: Transportan los materiales volcánicos siguiendo una topografía ya

trazada. Las glaciaciones dan lugar a morrenas o conglomerados, materiales finos con bolos gruesos. Durante las interglaciaciones se distribuyen los materiales volcánicos finos (cenizas volcánicas) por medio de "torrentes de barro", principalmente.

En un período postglaciar se efectúa un transporte eólico de cenizas, que son depositadas con gran continuidad en nuestra zona.

En el área donde se ubica la presa el perfil geológico, de arriba abajo, es:

Núm.	Descripción	Espesores medios (m)
1	Cenizas superiores de tipo eólico.	2
2	Cenizas volcánicas	2-25
3	Conglomerado morrénico (constituido por una mezcla de cenizas volcánicas y bolos de basalto)	10-12
4	Brecha (bolos angulosos basálticos dentro de un cemento andesítico)	15
5	Basalto (roca muy dura, compacta y de gran densidad)	Grandes espesores

De todas estas formaciones los terrenos números 3, 4 y 5 no presentan problemas de cimentación, en sus dobles facetas, de resistencia al corte y de asentos.

Los problemas de construcción de la presa están originados por las cualidades geotécnicas de las cenizas volcánicas. Las cenizas volcánicas superiores de tipo eólico (formación número 1) serán eliminadas en la totalidad de la zona de apoyo de la presa.

Dentro de las cenizas volcánicas de la formación número 2 se pueden distinguir dos niveles: un nivel superior de cenizas blandas y bastante meteorizadas y un nivel inferior con cenizas más compactas y menos meteorizadas.

(*) Instituto Ecuatoriano de Electrificación.

En cuanto a las disponibilidades de materiales, en las proximidades del sitio existen canteras con dos tipos de materiales adecuados para la construcción de la presa. Estos materiales son: las cenizas volcánicas (material apto para constituir un núcleo impermeable) y los conglomerados morrénicos (material adecuado para construir con ellos los macizos de apoyo del núcleo).

El perfil tipo de presa proyectado, constituido por un núcleo estanco de cenizas volcánicas, sustentado por macizos de apoyo de conglomerado morrénico, conjuga perfectamente las características geotécnicas de las cenizas volcánicas y las posibilidades de materiales en la zona.

El diseño de la presa se efectuó después de la realización de una amplia campaña de investigaciones de campo y ensayos de laboratorio (*), que tenían por finalidad conocer las propiedades de las cenizas volcánicas. A continuación se exponen estas propiedades:

2. PROPIEDADES DE LAS CENIZAS VOLCANICAS DE MONTUFAR

Los ensayos de laboratorio a que fueron sometidas las cenizas volcánicas pueden agruparse esencialmente en tres grupos:

Grupo 1.

Aquí se incluyen los ensayos efectuados para determinar la composición mineralógica de las cenizas y su estructura.

Para la determinación de la composición mineralógica se efectuaron los siguientes ensayos:

- 1.1. Examen óptico con microscopio.
- 1.2. Análisis con rayos X.
- 1.3. Análisis termodiferencial.

Con el fin de obtener datos sobre la estructura de los materiales, se efectuaron los siguientes ensayos:

- 1.4. Análisis granulométrico electrónico.
- 1.5. Análisis de superficie específica.
- 1.6. Análisis con microscopio electrónico reticulado.

Grupo 2.

Aquí agrupamos los ensayos que sirven para clasificar el material y determinar sus propiedades índice:

- 2.1. Límites de consistencia de Atterberg y límite de retracción.
- 2.2. Análisis granulométrico normal.
- 2.3. Contenido de humedad natural.
- 2.4. Densidad seca.

(*) Con la asesoría del profesor Charles Schaerer para el diseño de la presa, los ensayos se realizaron en el Laboratorio de la Escuela Politécnica Federal de Zurich, en el Laboratorio Geocisa, de Madrid, y en los de las Universidades Central y Pontificia, de Quito.

Grupo 3.

En este grupo se incluyen los ensayos que permiten conocer las propiedades físicas del material tales como: capacidad portante, resistencia al corte y estanqueidad:

- 3.1. Ensayos triaxiales.
- 3.2. Ensayos edométricos.
- 3.3. Ensayos de permeabilidad.

Del estudio de los resultados de los ensayos efectuados puede afirmarse lo siguiente:

a) Composición mineralógica y estructura de las cenizas volcánicas.

En el conjunto de ensayos encaminados a la determinación de la composición mineralógica de las cenizas se observó la existencia de dos tipos de cenizas.

Las muestras de las cenizas de la zona de cimentación de la presa (nivel superior) manifestaban que los elementos de tamaño inferior a dos micras eran *amorfos*, existiendo gran proporción de feldspatos en la fracción superior a dos micras. El examen termoanalítico confirmaba este hecho.

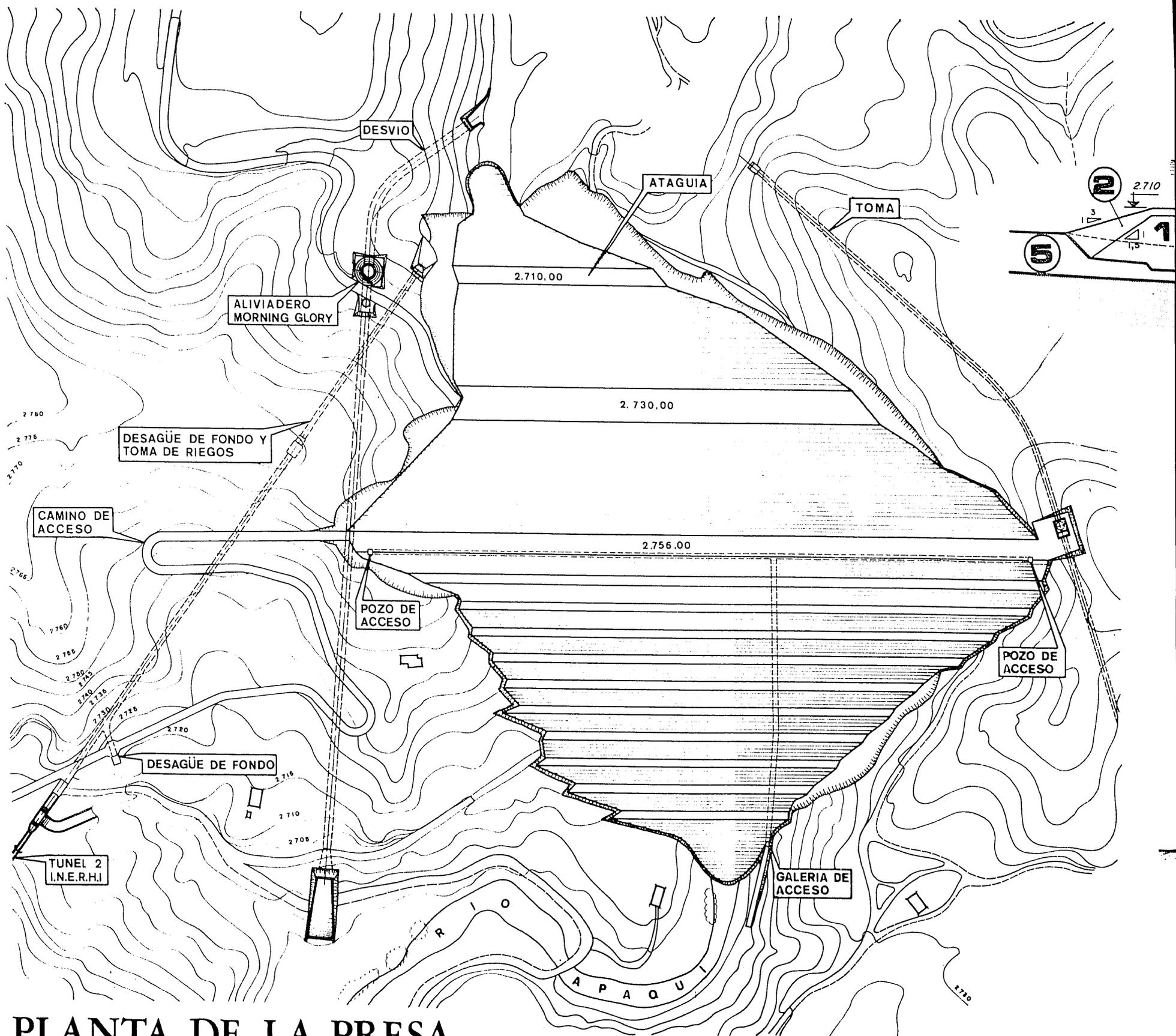
En cambio, las cenizas procedentes de la zona de cantera mostraba gran proporción de *haloisita* (mineral del grupo caolínico, conteniendo agua), en los elementos inferiores a dos micras. El comportamiento termoanalítico de estas cenizas era distinto, manifestando claramente el cambio de fase correspondiente a la pérdida del agua de cristalización de la *haloisita*.

La composición granulométrica de ambos tipos de cenizas era totalmente distinta, pues el porcentaje de partículas inferior a dos micras era del 15 por 100 para las cenizas procedentes del cimientado, y del 95 por 100 para las cenizas procedentes de cantera.

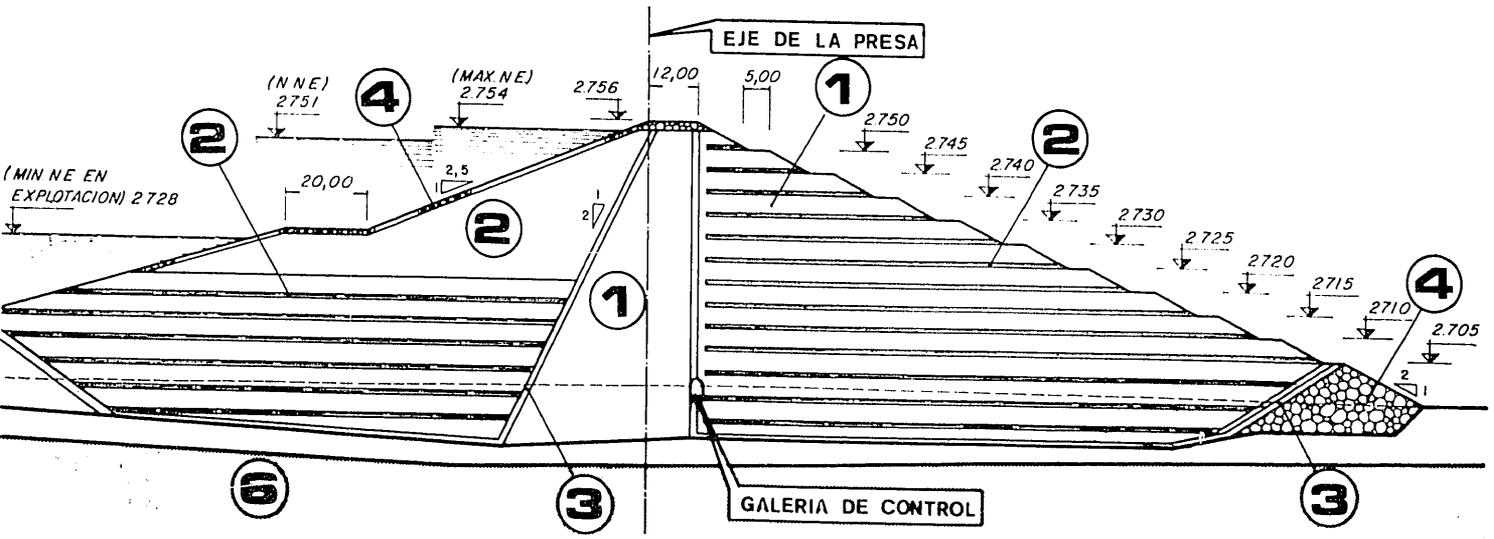
La estructura, observada en el microscopio electrónico, en ambos casos era *esponjosa*, con predominio de granos finos, en la ceniza procedente de cantera. Esta estructura esponjosa, es originada por la forma irregular y la superficie extremadamente rugosa de los granos de estos suelos volcánicos. Estos granos porosos se presentan en forma de racimos con superficies muy rugosas. Los elementos resultantes, tienen una gran porosidad, pero el número de poros interconectados es muy pequeño. Los granos que constituyen estos racimos están extremadamente unidos. Todas estas características deben tenerse en cuenta a la hora de juzgar las propiedades índice y propiedades físicas de estos suelos.

De las opiniones vertidas sobre las propiedades de los suelos volcánicos destacamos las siguientes:

- Terzaghi, K.: "Design and Performance of the Samsun Dam". Harvard Soil Mechanics Series número 5.
- Penta, Croce y Esu: "Engineering properties of volcanic soils". Proceedings de la V Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos. París, 1961, tomo I, págs. 285-291.



PLANTA DE LA PRESA



PERFIL TIPO DE LA PRESA

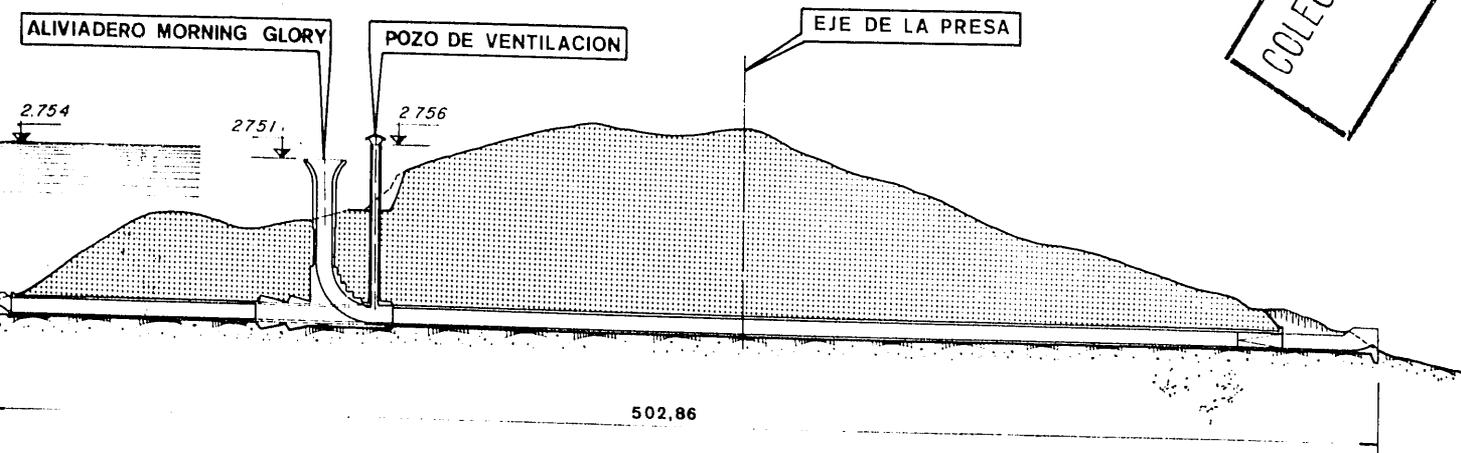
CUERPO DE PRESA

- 1- CENIZAS VOLCANICAS
- 2- MORRENA
- 3- FILTROS
- 4- ESCOLLERA

CIMENTACION

- 5- CENIZAS VOLCANICAS
- 6- MORRENA

COLEGIO INGENIEROS DE CAMINOS
 BIBLIOTECA



ALIVIADERO

P R E S A

Del estudio de estas opiniones y de nuestra experiencia propia parece deducirse que sobre las propiedades de estos suelos tiene mayor influencia la superficie de los granos y su textura que la composición mineralógica de los mismos, pudiendo afirmarse que, a pesar de la distinta procedencia de los diferentes suelos volcánicos, todos ellos tienen propiedades comparables entre sí.

b) *Propiedades índice.*

La representación de estos suelos no sedimentarios en la carta de plasticidad de Casagrande, se produce en la zona denominada "MH". Es decir, estos suelos tienen un alto límite líquido (del orden de 80-100) y un bajo índice de plasticidad (valores oscilando entre 30 y 50), lo que los sitúa por debajo de la línea "A" de Casagrande. En suelos sedimentarios normales estos valores obligarían a desecharlos como materiales para terraplenes.

La densidad seca de estos suelos oscila entre 0,60 y 1,10, lo que nos indica la gran porosidad de este material. La humedad natural es alta (del orden del 90-130 por 100) y los suelos se encuentran próximos a su saturación, pero sin alcanzarla.

La granulometría realizada por medios normales, da valores del orden 5-10 por 100 para la fracción inferior a dos micras y porcentajes del 70-80 por 100 para los elementos que pasan por el tamiz número 200.

c) *Propiedades mecánicas.*

La resistencia al corte de estos suelos es aceptable. Los valores del ángulo de rozamiento interno, en tensiones efectivas, varía entre 25 y 35°. La cohesión es muy pequeña, del orden de 2-4 Tm/m². La explicación de la aparente contradicción de estos valores y la representación de estos suelos en la carta de Casagrande está, sin duda, en la estructura esponjosa de los granos que constituyen estos suelos.

En efecto, las buenas propiedades mecánicas de estos suelos y el bajo índice de plasticidad, son propias de suelos granulosos. Por otra parte, el alto límite líquido de estos suelos se explica porque durante el proceso de secado de la muestra, la cantidad de agua que se evapora es suma de la que hay entre los granos y de la existente dentro de los propios granos.

La compresibilidad de estos suelos no es exagerada, con valores del módulo edométrico variando entre 40 y 70 Kg/cm². La explicación de estos valores es que, a pesar de la gran porosidad de estos suelos, la estructura intergrano es muy firme y los poros internos no son fácilmente puestos en contacto con el exterior.

La impermeabilidad de estos materiales es muy grande, del orden de 10^{-7} - 10^{-8} cm/seg, resultado de su estructura extremadamente fina y sumamente rugosa.

3. COMPORTAMIENTO DE ESTOS SUELOS RESPECTO A LAS PRESIONES INTERSTICIALES

Estos materiales, de origen volcánico, se presentan en su estado natural, según hemos visto en el párrafo anterior, con un contenido de humedad fuerte (humedades próximas al límite líquido, si bien el suelo no está saturado). Este hecho, unido a su muy baja permeabilidad, da lugar a la aparición de fuertes presiones intersticiales.

La creación de estas presiones intersticiales puede hacer disminuir la buena resistencia al corte de estos materiales.

Con objeto de determinar cuál es la cuantía de estas presiones intersticiales se efectuaron en el laboratorio una serie de ensayos para determinación del coeficiente $\bar{B} = \Delta u / \Delta \sigma_1$, siendo Δu las presiones intersticiales y $\Delta \sigma_1$ la presión vertical total.

En el estudio detallado de este ensayo se pueden diferenciar cuatro fases:

Fase 1.ª

La presión vertical se transmite sobre los granos. No se produce presión intersticial.

Fase 2.ª

La presión vertical se transmite sobre los granos y sobre el agua, repartiéndose, según reflejan los valores de B (saturación incompleta).

Fase 3.ª

La presión vertical se transmite en su totalidad al agua y todo incremento de presión produce igual aumento de presión intersticial (estado de saturación).

Fase 4.ª

Deteniendo el aumento de presión vertical a partir del estado de saturación, se produce el drenaje del agua y la muestra consolida, disminuyendo la presión intersticial y aumentando la presión de grano en igual proporción.

Conviene señalar nuevamente que la elevada porosidad de estos suelos es el resultado de unos espacios entre granos (intersticios) y unos poros sin comunicaciones unos con otros (poros internos). Únicamente la parte de agua (generalmente pequeña) que ocupa los intersticios influirá en las propiedades mecánicas de estos suelos.

En los ensayos efectuados, el valor del coeficiente de presiones intersticiales \bar{B} oscila entre 0,25 y 0,35 para las cenizas de cantera y entre 0,50 y 0,70 para las cenizas procedentes del nivel superior de la cimentación. Estos resultados nos hablan de la mayor o menor tendencia a la creación de presiones intersticiales que tienen estas cenizas, según sea su composición mineralógica.

4. POSIBILIDADES DE UTILIZACION DE ESTOS SUELOS EN TERRAPLENES

Las posibilidades de utilización de un determinado material por la construcción de terraplenes depende de la resistencia al corte que presente este material una vez puesto en obra. Esta resistencia al corte está íntimamente ligada con el contenido de humedad natural del suelo y su impermeabilidad.

En suelos sedimentarios, de humedad natural baja, las sobrecargas que se produzcan durante la puesta en obra, no originan presiones intersticiales importantes y en consecuencia casi toda la sobrecarga se transmite a los granos, produciéndose una buena resistencia al corte como consecuencia de esta circunstancia. En los métodos clásicos de compactación según Proctor, lo que se determina es la humedad y la energía de compactación óptimas que producen la máxima densidad seca, pues en esta clase de suelos existe una correspondencia unívoca entre la densidad seca y la resistencia al corte: Esta correspondencia fundamental no es cierta en los suelos volcánicos, como el de Montúfar.

En efecto, compactando estos suelos con las normas Proctor, resulta un material de muy baja resistencia al corte y esto a pesar del buen ángulo de rozamiento que existe entre grano y grano. La explicación de este hecho es la siguiente: como resultado de la compactación con una cantidad de energía excesiva para este tipo de suelos, se rompe la estructura original del material y en consecuencia el agua incluida en los poros internos pasa a encontrarse libre, aumentando el contenido de agua en libertad, convirtiéndose el material en una masa viscosa. Por tanto, la energía de compactación óptima de estos suelos será la que permita su puesta en obra sin romper su estructura inicial.

Los ensayos efectuados en el laboratorio consistieron en realizar ensayos edométricos, en los que, bajo distintas cargas verticales, se calculaba la densidad del material. De esta manera se determinaba cuál era la carga vertical que producía una densidad en el material similar a la densidad natural de éste. Conocida esta carga de compactación estática, se prepararon probetas, en las cuales los terrones del suelo eran compactados, con la

carga así determinada. Estas probetas luego eran ensayadas a corte directo para determinar su resistencia a esfuerzos tangenciales.

En los ensayos efectuados, dado que la densidad natural del material es $1,40 \text{ Tm/m}^3$, la carga de compactación fue de 5 Kg/cm^2 , lo que corresponde a una energía de compactación de 1.060 g.cm/cm^3 (muy inferior a la energía Proctor = 6.050 g.cm/cm^3). En los ensayos de resistencia al corte se obtuvieron valores del ángulo de rozamiento de 30° . De los estudios de laboratorio efectuados se deduce que para la compactación de estos suelos se deberán utilizar rodillos lisos o rodillos de neumáticos, cuya presión no supere 5 Kg/cm^2 .

Las restantes variables tales como espesor de toncadas, número de pasadas, necesidad de aireación, etc., se determinarán mediante pequeños terraplenes experimentales.

Resumiendo, estos suelos pueden utilizarse en la construcción de terraplenes, siempre que con los medios de puesta en obra no se destruya la estructura original del material. La energía de compactación óptima será aquella que devuelva al material del terraplén, la densidad natural que tiene en cantera.

5. EXPERIENCIAS

A pesar de las singularidades de estos terrenos, desde que, en el año 1958, Terzaghi trabajó por primera vez en este tipo de suelos, se ha ido ganando experiencia y hoy día son muy pocas las dudas que se tienen sobre su naturaleza y comportamiento.

Entre las presas construidas con material volcánico, cabe destacar las siguientes:

- Presa de "Tjipanoendgang" (Java), de 36 m de altura.
- Presa de "Kedungulen" (Java), de 15 m de altura.
- Presa de "Lumot" (Filipinas), de 29 m de altura.
- Presa de "Silvan" (Australia), de 47 m de altura.
- Presa de "Sasumua" (Kenia), de 36 m de altura.
- Presa de "Esmeralda" (Colombia), de 40 m de altura.