

EFFECTOS DEL SISMO DE MARZO DE 1965 EN LOS TRANQUES DE RELAVES DE EL COBRE*

Ricardo DOBRY**

RESUMEN

Se explica qué es y cómo se construye usualmente un tranque de relaves de cobre. Se describe en particular la historia de los tranques Relave Viejo, Relave Chico y Relave Nuevo, en el pueblo de El Cobre, aprovechando fotografías aéreas y otros materiales gráficos, que muestran la situación antes y después de la falla producida por el sismo. Se plantean las hipótesis de falla más probables para el Relave Viejo, y se explica el estudio de Mecánica de Suelos realizado para determinar los parámetros necesarios. Se calculan los factores de seguridad de los mecanismos de falla propuestos, y se discuten: se concluye que la falla se produjo debido a un deslizamiento o serie de deslizamientos del talud frontal, lo que permitió el vaciamiento del relave no consolidado que ocupaba la parte central del depósito. Se discute el problema de la estabilidad sísmica de los tranques de relaves, y se hacen algunas proposiciones.

INTRODUCCION

EL DOMINGO 28 DE MARZO de este año, poco después de mediodía, se produjo a 127 km al noroeste de Santiago (cerca de La Ligua), un sismo que afectó principalmente las provincias de Aconcagua, Valparaíso y Santiago. En la mina El Soldado, situada a unos 30 km del epicentro, dos de los tres tranques de relaves cedieron, vaciando su contenido y arrasando parte del pueblo El Cobre,

**Charla dictada el 23 de julio de 1965 en la ciudad de Concepción.

**Ricardo Dobry. Jefe Sección Mecánica de Suelos Laboratorio Zonal IDIEM Concepción. Ingeniero Civil, Maestro en Ingeniería (Mecánica de Suelos).

que se encontraba al pie del mayor de los tranques.

Posteriormente, el material llegó en algunos minutos a la Carretera Panamericana, 12 km valle abajo, lo que demuestra su gran fluidez. En total se derrumbaron 2.400.000 toneladas¹.

El número de víctimas fue de más de 200 personas.

La intensidad del movimiento en el lugar fue² algo mayor de VIII en la escala internacional de 12 grados (Mercalli Modificada) y su duración alcanzó unos 100 segundos.

Aparte de los ya mencionados, fallaron otros tranques de relaves en la zona (no sólo de cobre; también de zinc, manganeso, calizas; etc.). Se sabe del derrumbe de 8 tranques más (mina El Diablo, mina La Patagua, mina Los Maquis, mina El Cerrado, planta Bellavista, mina Hierro Viejo, mina La Africana, mina Ramayana).

Se conocen tres tranques que sufrieron sólo agrietamientos (mina Cerro Blanco; tranque El Sauce y planta Dos Amigos).^{3,4}

Si agregamos los tres depósitos de El Cobre, el balance total, con la información que disponemos, es: 10 tranques que fallaron y 4 que resistieron.

Sin embargo, y como los desbordes de material en El Cobre fueron los mayores, y los que causaron más daños, el Gobierno se preocupó especialmente de ellos. Nombró al efecto una Comisión Investigadora, la que se hizo asesorar en los aspectos técnicos por varios organismos. La parte de Mecánica de Suelos fue encargada a IDIEM.

Otras instituciones que han aportado al estudio del problema son: Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), Servicio de Minas del Estado, Instituto de Geofísica y Sismología, Instituto de Investigaciones Geológicas, Fuerza Aérea de Chile (FACH). Parte de la información a que haremos referencia hoy, así como algunas de las fotos, provienen de esas fuentes.

El propósito de esta charla es doble. Por una parte queremos describirles a Uds. cómo se construyeron, cómo eran y qué pasó con los tranques de relave de El Cobre. Como ejemplo de aplicación de los métodos de Mecánica de Suelos, vamos a explicarles la forma en qué hicimos el estudio y a qué conclusiones hemos llegado hasta ahora.

LOS TRANQUES DE RELAVES

En una explotación de cobre, el metal es una fracción muy pequeña del mineral que se extrae (en El Soldado la ley es menor del 1%). Para separar el cobre se usa el método de flotación, en que los trozos de roca pasan primero por molinos que los reducen al tamaño de limos y arenas. Después se agrega abundante agua con reactivos químicos apropiados, y se logra una suspensión

en que el material inerte se va al fondo, y el cobre flota formando una espuma. Esta espuma es barrida hacia otros recipientes mediante un sistema de paletas. La roca molida restante se conoce con el nombre de relave y constituye normalmente un desperdicio inutilizable.

En El Soldado, había que botar en alguna parte unas 2.000 toneladas diarias de relaves. No se podía vaciarlas en los esteros, por dañar los suelos agrícolas (la ley lo prohíbe expresamente). Había que acumular el material, y además instalar un sistema que permitiera recuperar por lo menos parte del agua para reiniciar el proceso de flotación (el agua es escasa en esta zona).

Este problema, que es general en explotaciones mineras, ha tenido como solución los tranques de relaves, que se emplean tanto en Chile como en el extranjero. En nuestro país el sistema se utiliza desde comienzos de siglo.

Entonces, un tranque de relaves es un montón de desperdicios de roca molida, los que se depositan mediante ciertas técnicas. Estas persiguen dos objetivos básicos: recuperar el agua y asegurar la estabilidad del depósito. El nombre de "tranque" es inadecuado y ha producido bastante confusión; si lo continuamos usando es sólo porque se ha convertido en denominación usual. En lo que sigue preferiremos decir "Relave", expresión ésta de uso común en las minas y plantas.

El relave se deposita por el método hidráulico, convertido en un verdadero barro que corre por tuberías y canaletas, y va a caer cerca de los bordes del depósito. Se busca asegurar así que las arenas más gruesas y secas queden en la parte de afuera, y los suelos más finos y húmedos sean arrastrados hacia el centro; se da a la superficie la inclinación apropiada para tal fin. En la parte central se forma entonces un charco en el que sedimentan los materiales finos (Fig. 6). De este charco se desagua parte del agua con un sistema de cámaras o chimeneas (Fig. 12). En el Relave Viejo de El Cobre se recuperaba así alrededor del 60% del agua.

En la Fig. 1 se puede apreciar cómo se construían el Relave Viejo y el

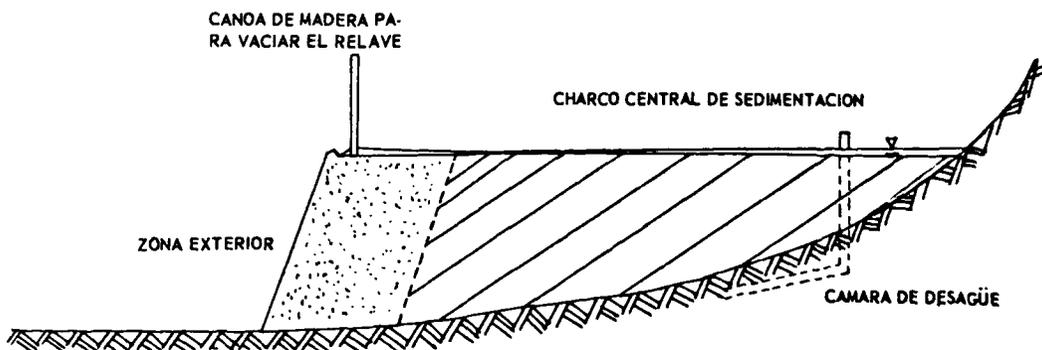


Fig. 1. Forma de construcción de los Relaves Viejo y Chico.

Relave Chico, en El Cobre. A lo largo del borde y a cierta altura sobre él, corría una canoa de madera con agujeros en su fondo que permitían la caída del relave. Se puede apreciar también la separación entre la zona más seca y el charco central. Es esta zona más seca, comprendida entre el borde y el charco, la que hace las veces de muro de contención del material interior.

Según otras técnicas más modernas, el relave pasa, antes de depositarse, por centrifugadores llamados ciclones, los que separan la arena gruesa de los materiales finos; el vaciamiento se hace también por separado, en la forma que indica la Fig. 2. Así se construía (y se construye) el Relave Nuevo en El Cobre.

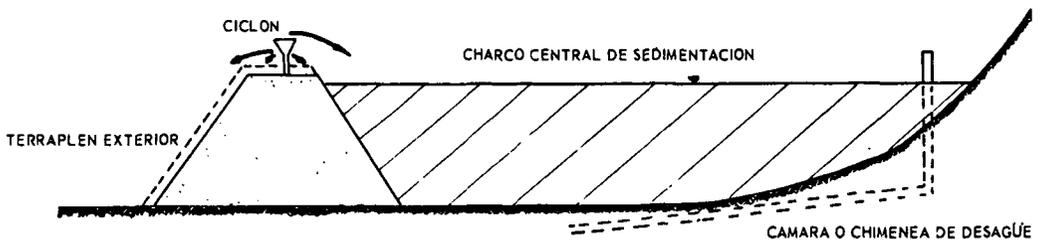


Fig. 2. Forma de construcción del Relave Nuevo.

En El Cobre fallaron el Relave Viejo y el Relave Nuevo. No lo hizo el Relave Chico, que sólo sufrió deslizamientos locales.

Antes de entrar en materia, permítanme agregar dos antecedentes más.

No es ésta la primera catástrofe producida en Chile por la falla sísmica de un tranque de relaves. En 1928, el tranque Barahona, de la mina El Teniente, se rompió después de un temblor, vaciando 4.000.000 de toneladas sobre el valle, y causando la muerte de 54 personas⁵.

El otro antecedente es que hay una estructura de tierra que se parece mucho a los tranques de relaves. Se trata de las presas de relleno hidráulico. Estas presas, cuyo objeto es embalsar agua, se forman también por el método hidráulico; hay durante la construcción un charco central en el que se depositan los materiales que constituirán el núcleo impermeable. En los primeros

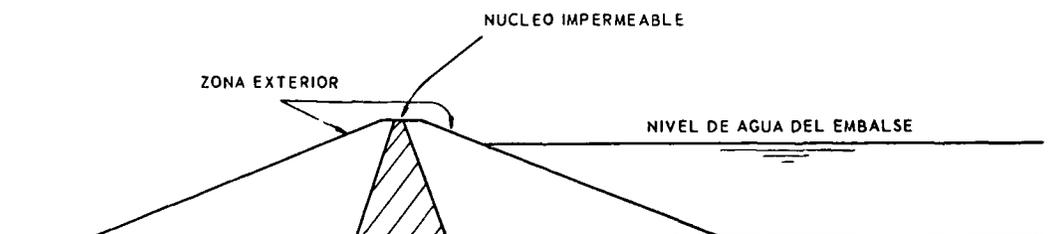


Fig. 3. Presa de relleno hidráulico.

años después de construida, las zonas exteriores de la presa deben ser capaces de contener este núcleo no consolidado que presiona sobre ellas. Se tiene bastante experiencia sobre el comportamiento de las presas de relleno hidráulico^{6,7} y ella puede extrapolarse — con el debido criterio — al caso de los Relaves (Fig. 3).

LAS FALLAS EN EL COBRE

La depositación de desperdicios minerales comenzó en El Cobre en los años 1928-30. El ritmo de esta acumulación se puede apreciar en la Fig. 4, en que

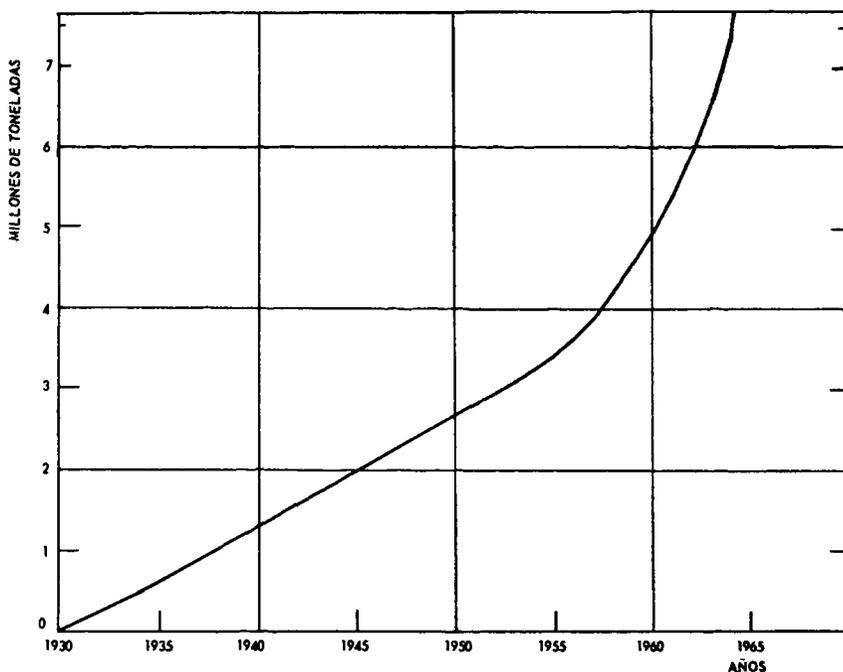


Fig. 4. Producción de relaves en El Cobre: años 1930 - 1965.

aparece la producción de relaves hasta el momento del sismo, de acuerdo a datos entregados por la Compañía. Se ve ahí el rápido aumento habido en los últimos años, lo que da como resultado que un elevado porcentaje del material existente tuviera pocos años de colocado.

En las Figs. 5, 6 y 7 se han ordenado tres fotos aéreas, que muestran gráficamente el desarrollo de los Relaves. En la Fig. 5, del año 1943, se aprecian cuatro bloques principales y algunas terrazas más bajas, los que contenían el material acumulado hasta la fecha; cada uno de estos bloques tenía su sistema de canoas independiente, lo que permitía depositar en uno u otro, según las necesidades de la producción. En la Fig. 6, del año 1961, los tres

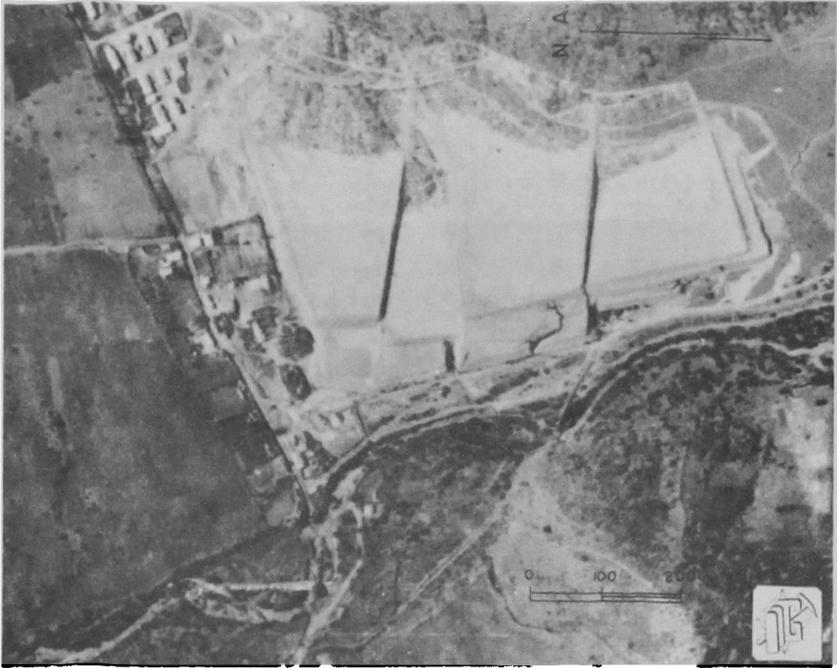


Fig. 5. Foto aérea de los Relaves de El Cobre, tomada en 1943¹⁰.

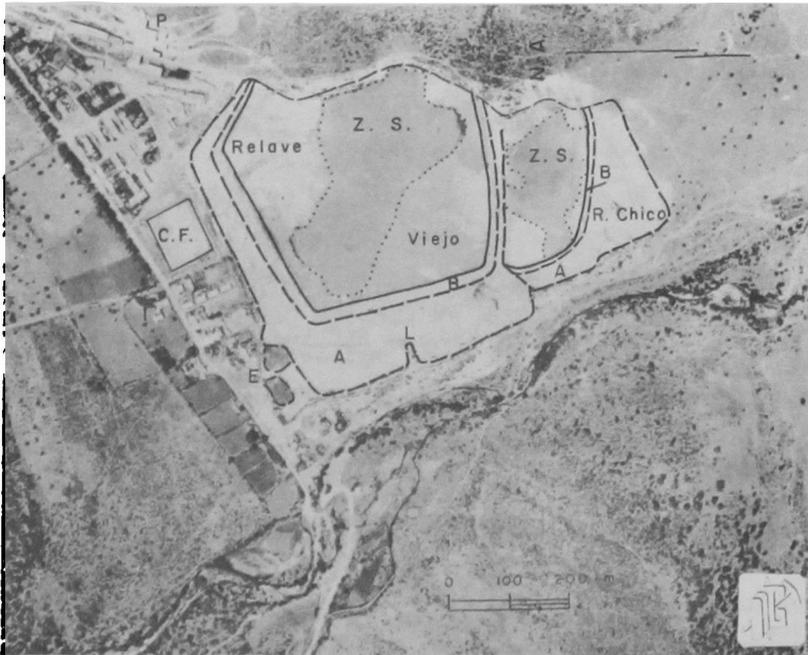
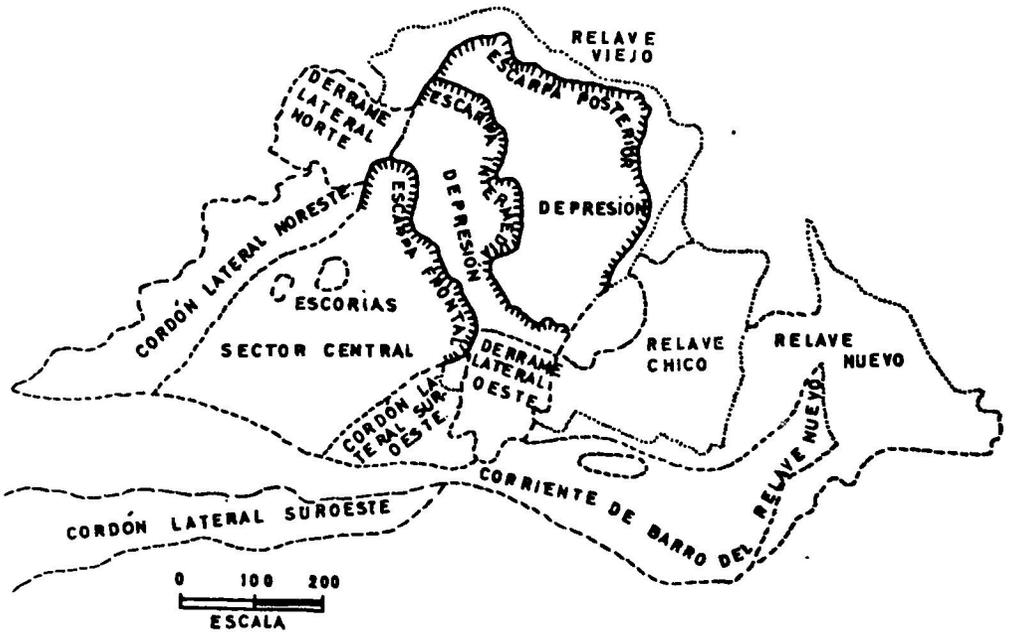


Fig. 6. Foto aérea tomada en 1961¹⁰. P, planta de concentración de minerales; C.F., cancha de fútbol; I, Iglesia; E, escoria; A, Terraza; B, parte superior del Relave; ZS, charco central; L, separación entre las dos terrazas del Relave.



Fig. 7. Foto aérea tomada el 30 de marzo de 1965¹⁰ y esquema correspondiente.



bloques – de la izquierda en la foto anterior – se han juntado para formar el Relave Viejo, y el bloque de la derecha (Relave Chico) ha crecido independientemente.

En esta foto de 1961 han aparecido ya las casas de El Cobre, al pie del talud Norte del Relave Viejo; como no se construyeron más habitaciones entre 1961 y 1965, esta fotografía reproduce bien la situación del pueblo en el instante del sismo. Bajo el Relave Viejo se unían los esteros El Sauce y El Cobre, y su curso después de la unión indica la dirección del valle.

En marzo de 1965, la superficie superior del Relave Viejo se podía asimilar a un cuadrado de 350x350 metros, con una altura máxima sobre el valle de 32-35 metros, desarrollada en taludes escalonados que daban lugar a terrazas intermedias. En diciembre de 1963 se comenzó a construir el Relave Nuevo, quedando el Relave Viejo como depósito auxiliar, y abandonándose prácticamente el Relave Chico (el día del terremoto el Relave Viejo estaba en uso, y tenía su charco central).

En la Fig. 7 aparece la situación final después del terremoto. Las casas están cubiertas hasta la cancha de fútbol, y el barro (color gris claro) vaciado por el Relave Viejo se ha juntado con el proveniente del Relave Nuevo (triángulo a la derecha) para llenar el valle. En el Relave Viejo ha desaparecido una de las dos terrazas, con el retroceso consiguiente del talud frontal, y se ha vaciado toda la parte superior; del nivel inicial más elevado queda sólo una herradura, que sirve de contorno – por atrás y por los lados – a un gran

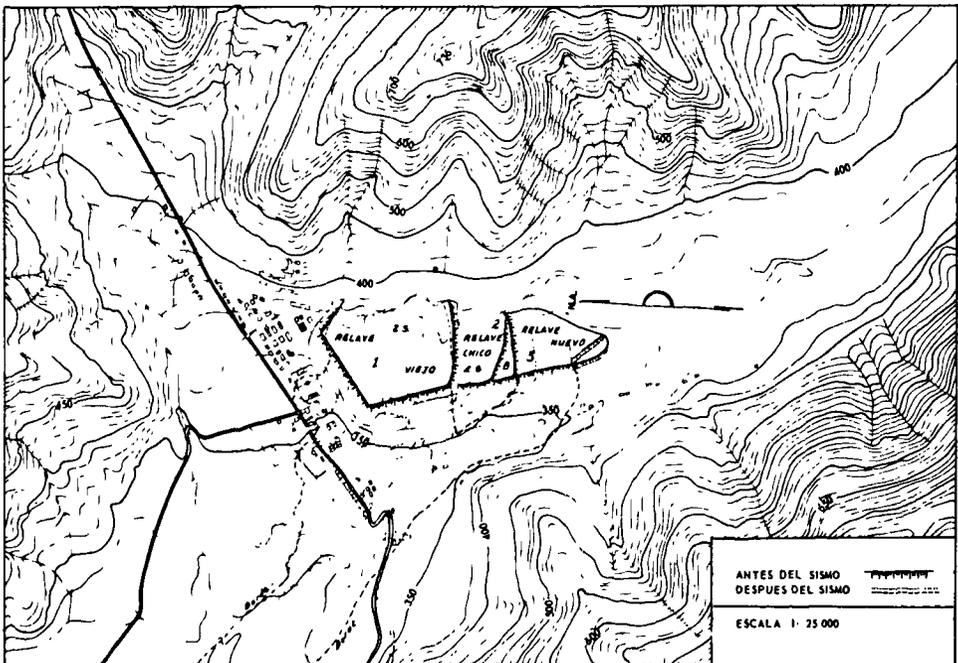


Fig. 8. Tranques de relaves. Mina El Cobre. Esquema topográfico general.³

vacío central dejado por el material que fluyó. El Relave Chico aparece intacto.

En el plano topográfico de la Fig. 8, aparece esquematizada la misma situación. La zona ocupada por el relave se ha teñido con un tono más oscuro.

La Fig. 9 muestra el Relave Viejo desde el cerro de atrás. Se ve claramente la herradura de contorno, el vacío central, y el valle cubierto de relave hasta donde alcanza la vista.



Fig. 9. Relave Viejo desde el cerro de atrás.

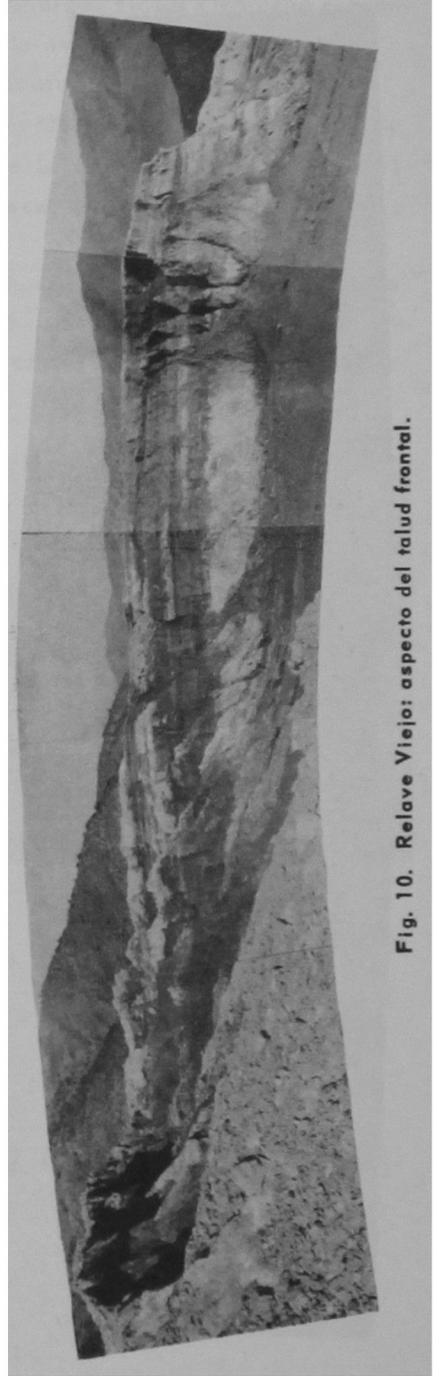


Fig. 10. Relave Viejo: aspecto del talud frontal.

En la Fig. 10 está la fotografía de una parte del talud frontal tal como quedó. Nótese la verticalidad de las paredes, así como su disposición en forma de anfiteatro.

Durante el trabajo de terreno, entramos varias veces al hueco central ya que



Fig. 11. Sistema de mesetas del Relave Viejo.

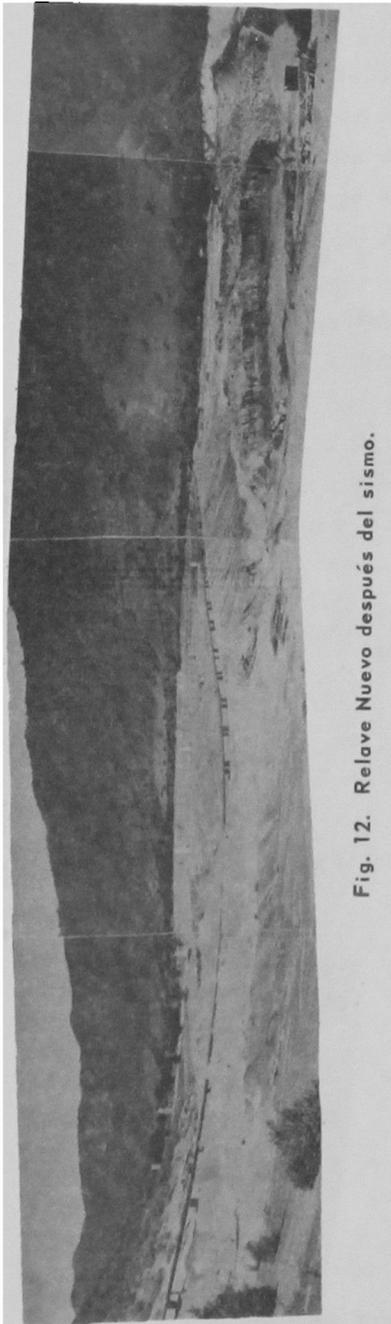


Fig. 12. Relave Nuevo después del sismo.

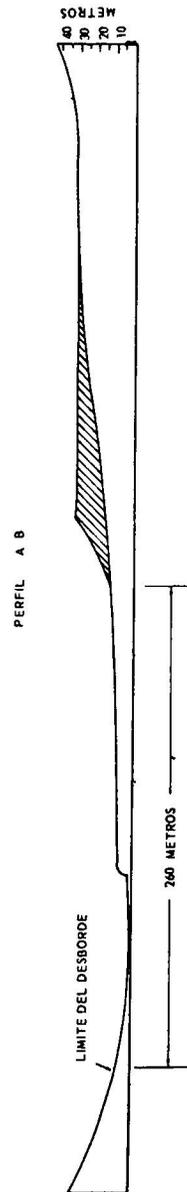


Fig. 13. Perfil del Relave Nuevo.

20 días después del sismo el piso había adquirido cierta consistencia. Lo formaban varias mesetas prácticamente horizontales (con una pequeña inclinación hacia el valle del 2%), que se iban escalonando hacia el valle (Fig. 8). En la Fig. 11, tomada de frente al cerro, se puede apreciar parte del sistema de mesetas.

En las Figs. 12 y 13 se muestra la situación en el Relave Nuevo. En la foto puede verse el sistema de chimeneas de recuperación de agua. El terraplén de contorno es posterior al terremoto, sin embargo, su localización reproduce bien la del terraplén original arrasado por la avalancha.

La Fig. 13 es un perfil obtenido del levantamiento topográfico.

En la Fig. 14 se ha fotografiado el contacto del relave y el valle, muy cerca del pie del Relave Viejo. Puede apreciarse la verticalidad del borde; el material era en esta zona arena más gruesa y seca, proveniente de las partes exteriores del tranque.

Entre los Relaves Nuevo y Viejo había un puente de madera que permitía el cruce sobre el estero El Sauce. En la Fig. 15 se ve el estado en que quedó después de la avalancha. Apilados contra el cerro se distinguen el tablero y otros restos.

Fig. 14. Límite del relave en el valle.

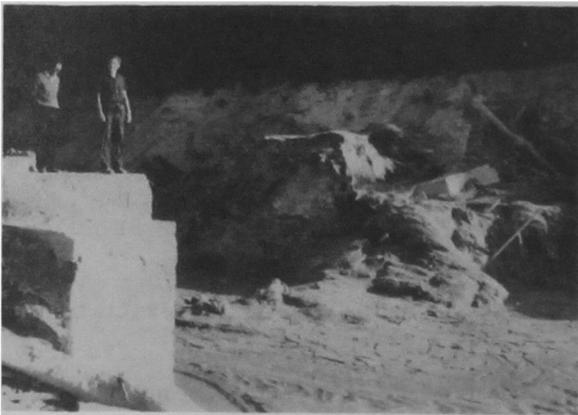


Fig. 15. Restos del puente destruido por el relave.

Fig. 16. Sistema de terrazas del Relave Chico.



Finalmente, en la Fig. 16 está la foto del sistema de taludes y terrazas del Relave Chico. En la cúspide se alcanza a ver la canoa de depositación.

ESTUDIO E INTERPRETACION

Con esto ya tienen Uds, una idea de lo que pasó en El Cobre. El problema es: ¿por qué pasó? ¿por qué fallaron el Relave Viejo y el Nuevo? ¿por qué no falló el Relave Chico? Para el futuro, ¿es posible estudiar y definir el grado de estabilidad sísmica de un depósito de este tipo?.

Comencemos por el Relave Nuevo. Es el caso más sencillo, ya que hubo varios testigos presenciales. Se trataba de material de menos de un año y medio de depositación, no consolidado y muy húmedo. Las vibraciones y los impactos poseen la propiedad de licuar estos suelos, con lo que ellos pasan al estado de líquido viscoso. Este fenómeno se produjo en el Relave Nuevo, con el aumento consiguiente de la presión sobre el terraplén exterior de arena. Tal presión, se superpuso a las aceleraciones sísmicas horizontales, y quizás se sumó al impacto de olas que el mismo temblor puede haber inducido en la laguna de relave licuado; todo esto rompió el terraplén, abriendo un boquete en el vértice del triángulo (Fig. 7). Por esta brecha se precipitó el barro, el que escaló 8 metros de altura en el cerro de enfrente, rebotó en él y siguió valle abajo. La erosión y la presión del líquido ampliaron rápidamente el boquete, con lo que todo el relave terminó por irse (500.000 toneladas).

Todo sucedió durante el temblor mismo.

Respecto a la formación de olas, un testigo afirmó haber visto saltar columnas de líquido a algunos metros de altura.

En el Relave Viejo, el problema no es tan simple. Nadie vio exactamente lo que pasó, debido a que el movimiento levantó gran cantidad de polvo seco de la costra superior, y la visibilidad se interrumpió temporalmente. Lo que

sí está claro es que todo se produjo, tal como en el Nuevo, durante el terremoto o inmediatamente después de él.

Pero dada la forma en que quedó el Relave, lo que sabemos sobre su historia y las declaraciones de testigos de aspectos parciales, fue posible elegir un número razonablemente limitado de hipótesis de falla, y trabajar con ellas.

En la Fig. 17 aparecen las hipótesis. En A) se supone que las fuerzas sísmicas de inercia provocaron un deslizamiento en el talud frontal, el que se propagó hacia atrás a través de una serie de deslizamientos, hasta cortar la zona no consolidada (achurada en la figura). La hipótesis B) supone que la presión del material interior, licuado por el sismo, se agregó a la fuerza de inercia para cizallar horizontalmente el talud. La hipótesis C) supone un deslizamiento hacia adentro de las arenas resistentes, por licuación del material

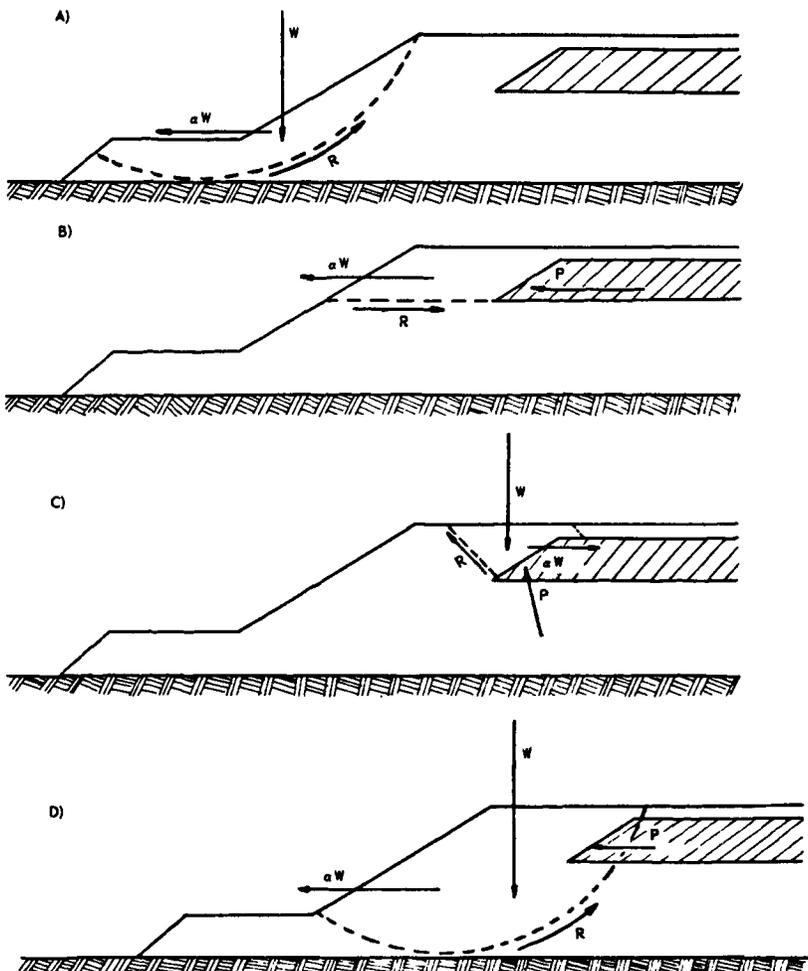


Fig. 17. Hipótesis de falla. αW , fuerza sísmica de inercia; W , peso; P , presión del relave licuado; R , resistencia al cizalle.

no consolidado; ésta no es propiamente una hipótesis de falla, pero no hay duda que un deslizamiento de este tipo habría facilitado la acción de otros mecanismos, posibilitando el vaciamiento del contenido. La hipótesis D) es la misma A), pero suponiendo que hubo un solo deslizamiento, el que alcanzó a la zona no consolidada.

Dejemos para más adelante una discusión sobre la aplicabilidad de estos modelos. Es previa la presentación de algunos datos, que obtuvimos de una serie de muestreos y pruebas de laboratorio. Estudiamos no sólo el Relave Viejo, que había desaparecido en parte, sino sobre todo el Relave Chico, basándonos en que la historia de ambos depósitos era muy similar.

El estudio de terreno incluyó:

- 3 sondajes: 1 en el Relave Viejo (S-1), y 2 en el Relave Chico (S-2 cerca del borde, S-3 en el centro).
- Toma de muestras en las escarpas de la herradura y en las mesetas interiores del Relave Viejo.
- Toma de muestras a poca profundidad en el Relave Chico, en pozos excavados en la costra superior, y a distancias variables del borde.

A las muestras se les hizo:

- Pruebas de clasificación, incluso de granulometría fina.
- Mediciones de su densidad de colocación y densidad relativa.
- Pruebas de consolidación.
- Pruebas de permeabilidad, incluso al material del cerro.
- Ensayes de compresión simple y

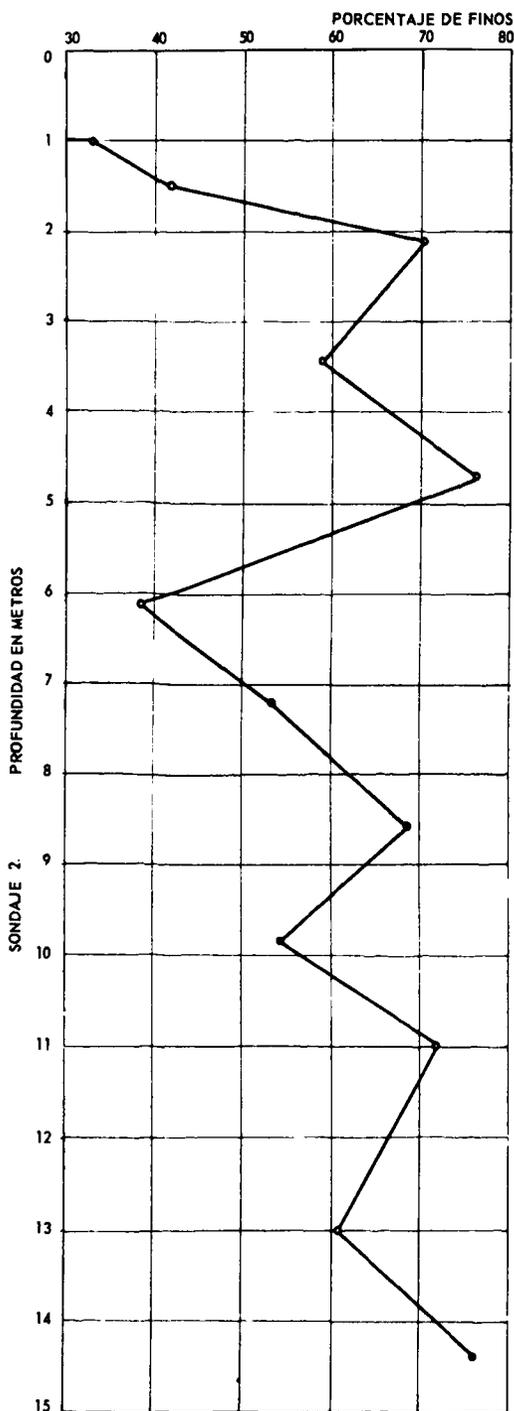


Fig. 18 Variación del % de partículas menores que 0,074 mm, con la profundidad. Sondaje 2.

triaxial, esta última para conocer la cohesión y el ángulo de fricción interna de la zona exterior resistente.

En la Fig. 18 se ve la variación con la profundidad del porcentaje de partículas de tamaño menor que 0,074 mm, en las muestras de S-2.

En la Fig. 19 se han dibujado las capas detectadas por S-3 (Relave Chi-

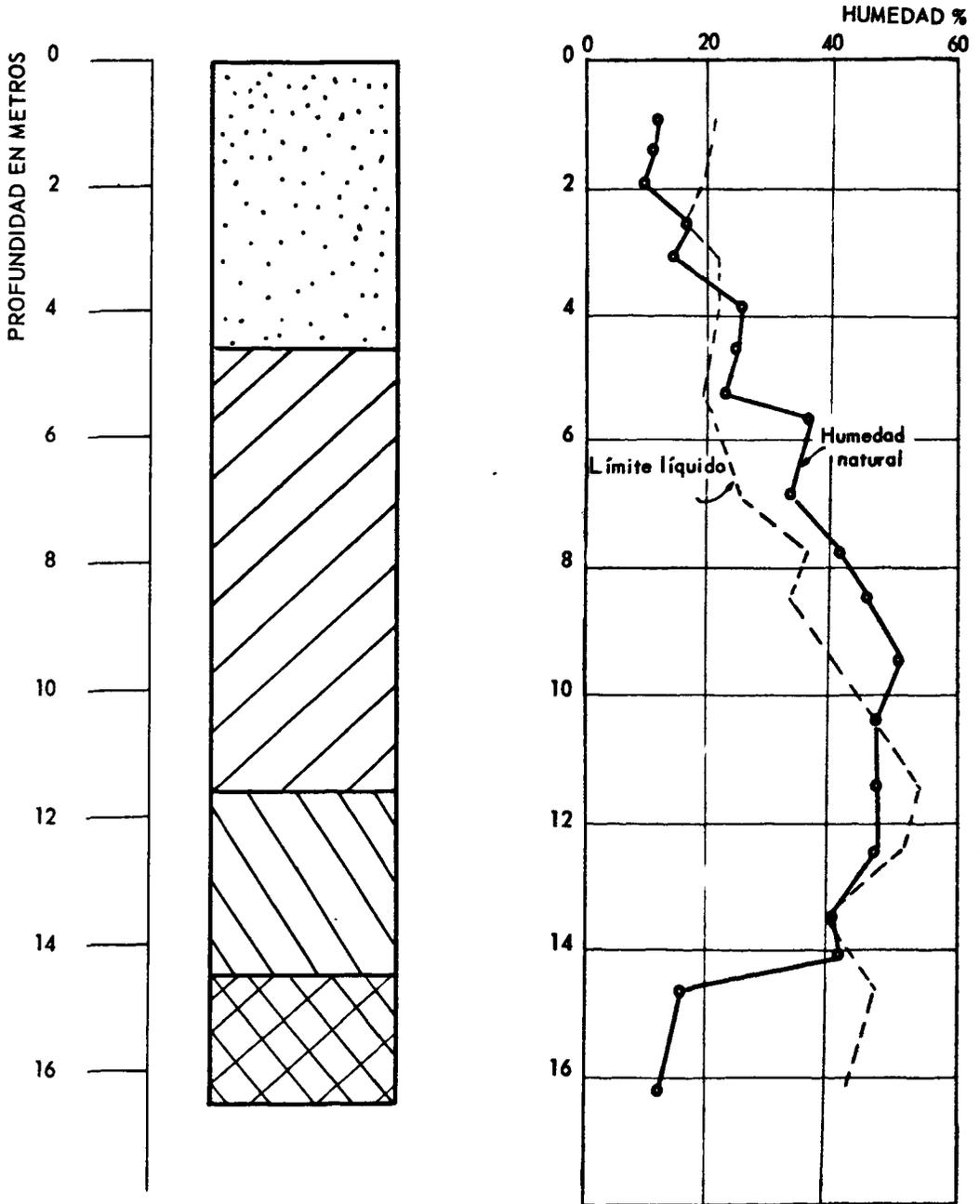


Fig. 19. Estratos detectados por el Sondaje 3 (izquierda). Humedad natural y límite líquido a distintas profundidades (derecha).

co). Hasta los 4,60 m hay una costra de relave duro y reseco; después, hasta los 11,60 m, encontramos el relave poco consolidado; entre los 11,60 y los 14,45 está el relave más antiguo, ya totalmente consolidado por el peso de los estratos superiores; y, finalmente, bajo los 14,45 m aparece la grava arcillosa del cerro. A la derecha de la misma figura se compara la humedad de las muestras (línea llena) con su límite líquido (línea de trazos).

En el Relave Chico, entonces, el estrato poco consolidado tenía un espesor de 7 m. En el Relave Viejo, a partir de la profundidad del vacío central dejado por el material, le podemos suponer un espesor de unos 10 m, que adoptamos como valor de cálculo. Fue esta capa la que se licuó (quizás sólo en parte antes de la falla, y totalmente durante ella), y se vació sobre el valle, arrastrando sobre sí los pedazos de la costra reseca superior. Hay una cantidad de manifestaciones de este proceso de licuación, que muestran como el relave "hirvió" (en sentido figurado), al liberar las grandes presiones de poro acumuladas en su interior. Las fotografías de las Figs. 20, 21 y 22 son elocuentes en ese sentido.

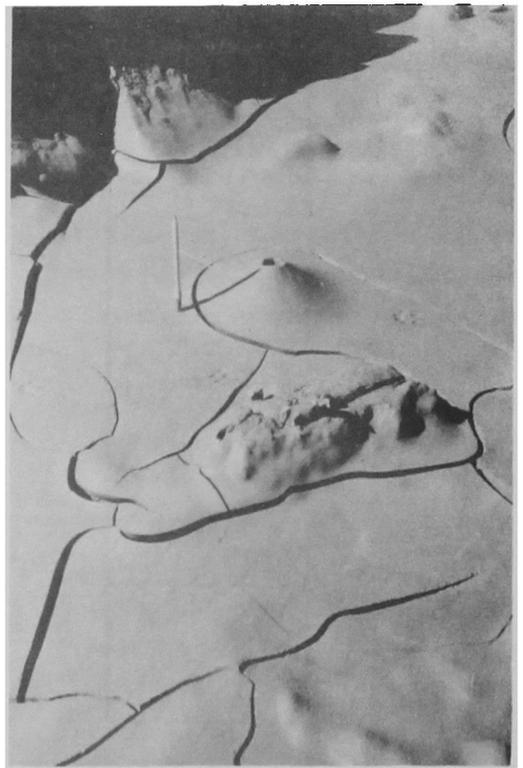


Fig. 20. Manifestaciones de licuación en las mesetas del Relave Viejo.

Fig. 21. Manifestaciones de licuación en las mesetas del Relave Viejo.

En la Fig. 23 se ha dibujado la variación del porcentaje de partículas arcillosas (menores que 0,005 mm) con la distancia al borde del Relave Chico Se

lo que nos reduciría el factor de seguridad a la mitad, en caso que la superficie potencial de falla coincidiera con una capa de este limo. Si observamos la Fig. 27 captaremos hasta qué punto la estratificación horizontal era una característica de la masa del tranque. Estas capas, de espesores muy variables, fueron producto de la forma de depositación y de las discontinuidades del proceso.

Otro dato que debemos definir es la presión del material central, sobre las arenas exteriores. La asimilamos a una presión de suelos activa, en que el ϕ del material que presiona puede variar entre 0 (licuación total) y 28° (este último valor, elegido por el número de golpes de cuchara normal registrado durante S-3, y por coincidir bien con las presiones medidas en núcleos de presas de relleno hidráulico⁶). En los factores de seguridad de la Tabla I, se ha supuesto licuación total.

En cuanto a la aceleración sísmica horizontal de cálculo, el Instituto de Geofísica y Sismología registró en Santiago un valor máximo de 0,18g. Considerando que El Cobre estaba mucho más cerca del epicentro, nos pareció que 0,2g y 0,3g eran estimaciones razonables.

En la Tabla I se resumen los factores de seguridad calculados para cada hipótesis de falla. Estos factores de seguridad no son los mínimos posibles, ya que en las hipótesis A) y D) no se efectuaron varios tanteos; simplemente se eligió un arco de circunferencia y se calculó con él, usando el método sueco⁶. Los valores de ϕ son los obtenidos de las pruebas triaxiales, ya que se sabe, por las experiencias independientes de Savchenko y Mogami, que su magnitud no varía mayormente dentro del rango de aceleraciones considerado⁶.

TABLA I

FACTORES DE SEGURIDAD PARA LAS HIPOTESIS DE FALLA DE LA FIGURA 17

Hipótesis	A)	B)		D)
		$\phi = 40,3^\circ$	$\phi = 18,6^\circ$	
$\alpha = 0$ (caso estático)	2,2	4,5	1,76	2,2
$\alpha = 0,2$	1,45	2,17	0,86	1,40
$\alpha = 0,3$	1,25	1,79	0,71	1,19

Del examen de la Tabla I, vemos que el mecanismo B) habría podido provocar la falla si hubiera existido una capa limosa de debilidad que cruzara toda la zona resistente (35 m). Ello me parece muy difícil; creo sí que era posible tal capa limosa, ocupando una fracción de la longitud total de la superficie de cizalle. En este último caso las tres hipótesis nos darían factores de seguridad

similares entre sí, y cercanos a la unidad, siendo algo mayores los de la hipótesis B). Entonces la Tabla I no nos da una respuesta definitiva. Nos dice, sí, que cualquiera de los mecanismos propuestos pudo haber provocado la falla, siendo el B) más improbable.

Pienso que la falla se produjo por un deslizamiento del talud en la forma indicada por las hipótesis A) o D). Confirman esta idea otros hechos:

- a) El estudio de la morfología final del relave en el valle lleva a suponer que primero se fue todo el talud y después el material licuado más fino, y no al revés⁹.
- b) No hay nada en la hipótesis B que nos explique por qué el Relave Chico no se fue. En cambio, en las otras dos hipótesis tenemos diferencias decisivas en: la mayor altura del Relave Viejo, y la menor altura de su terraza intermedia.
- c) El deslizamiento del talud frontal parece ser un mecanismo usual de falla sísmica de los Relaves. En los otros tranques que sufrieron el sismo de marzo, varios fallaron evidentemente en esta forma, y las grietas en El Sauce indicaban el comienzo de una rotura similar. De los tranques que no fallaron, uno tenía un muro de contención de enrocamiento (Cerro Blanco), otro tenía terrazas altas que lo defendían (Relave Chico de El Cobre) y el tercero era de pequeña altura (Dos Amigos)⁴.

La idea del deslizamiento del talud frontal fue enunciada originalmente por los Sres. Aliste y Moraga, del Instituto de Investigaciones Geológicas¹⁰.

La hipótesis C) no es calculable, y pienso puede haberse producido como factor accesorio de la falla. Que no se trata de una especulación teórica, lo demuestran los casos de la presa de relleno hidráulico Fort Peck¹¹, y del Relave Barahona⁵.

La discusión anterior tiene, desde luego, varias deficiencias. Aparte de aquéllas inherentes a trabajar con análisis estáticos, no hemos considerado el posible aumento de las presiones de poro en la superficie de falla, y la eventual existencia de debilidades cerca del pie del talud.

Sin desconocer éstas y otras imprecisiones, creo que era la única forma simple y numérica de acercarnos al problema. Por lo demás, casi todos los supuestos hechos, incluso el haber usado el mayor valor de ϕ que daban los ensayos, nos han conducido a valores que son cotas superiores de los factores de seguridad reales.

LA ESTABILIDAD SISMICA DE LOS TRANQUES DE RELAVES

A la luz de la experiencia del Relave Barahona, y de los Relaves afectados

por el sismo de marzo, lo más probable es que los tranques existentes sigan fallando con los temblores fuertes. La posibilidad de estudiar y garantizar la estabilidad sísmica de un Relave existente es remota, por una razón: incluso un estudio completo de Mecánica de Suelos podría no detectar detalles menores de construcción capaces de causar la falla (capa horizontal de debilidad, zona débil al pie del talud, etc.). A lo que sí puede ayudar un estudio de esta naturaleza es a estimar la peligrosidad de una falla eventual, al descubrir las dimensiones y características de la capa no consolidada.

Una cuestión interesante que está planteada es el tiempo durante el cual un Relave abandonado sigue siendo susceptible de licuarse, y fluir distancias grandes. En el Relave Chico de El Cobre había material depositado por lo menos 7 años atrás, y que no se consolidaba todavía.

Lo más recomendable para los Relaves existentes, es definir una "zona crítica" a su pie y hasta una cierta distancia valle abajo, y evacuar de ahí toda vivienda humana. La extensión de esta "zona crítica", que estaría determinada por las dimensiones, granulometría y humedad del relave no consolidado, así como por la topografía del valle, podría calcularse aprovechando los datos de El Cobre, Barahona y otros tranques, y por la realización de algunos estudios y experiencias destinadas a tal fin (p.ej. usando modelos).

Otra cosa son los Relaves que aún no han comenzado a construirse, y que parece se seguirán construyendo a falta de otra solución económica. Hay ciertas recomendaciones que parecen desprenderse de la experiencia disponible:

a) Debe haber una separación clara entre la parte exterior resistente, y el núcleo no consolidado. La zona resistente será normalmente un terraplén, diseñado de modo que pueda resistir la presión del núcleo totalmente licuado. Para la construcción de esta zona resistente puede usarse parte del mismo relave.

b) La parte resistente debe construirse tomando precauciones especiales que impidan la formación de superficies de debilidad.

c) La parte resistente debe quedar en todos sus puntos sobre la napa de agua. Si no, se corre el peligro de licuación, o a lo menos de elevación de la presión de poro durante el movimiento.

d) La compactación de la parte resistente es altamente recomendable, aunque no parece ser realizable en forma económica.

Las precauciones anteriores no aseguran la estabilidad sísmica del Relave, pero disminuyen su probabilidad de falla. A este respecto, no debemos olvidar que los embalses de tierra han tenido buen comportamiento ante los sismos, siendo el número de desastres sorprendentemente bajo¹²; esto a pesar de que las presas se diseñan con factores de seguridad pequeños (1,5). Si la parte resistente de un Relave es un terraplén, este jugará respecto al material

licuado el mismo papel que el embalse respecto al agua; la única diferencia estará en las diversas densidades de ambos líquidos.

Las consideraciones anteriores no buscan de modo alguno reemplazar un estudio a fondo de estos problemas. Desde luego, es imprescindible aprovechar al máximo la experiencia de este sismo, estudiando con más detalle el comportamiento de todos los Relaves de la zona*.

Además, no hay que olvidar que lo sucedido en El Cobre es un problema de Dinámica de Suelos. En Chile tenemos muchos problemas de Dinámica de Suelos, que afloran espectacularmente cada vez que hay un terremoto. Todos ellos están relacionados entre sí, y los tranques de relaves no son una excepción. Asimilar lo que se sabe en el extranjero sobre estos temas, y, sobre todo, investigar aquí, es una tarea inmediata.

AGRADECIMIENTO

Agradezco especialmente su colaboración al Sr. Leonardo Alvarez, Geólogo del Instituto de Investigaciones Geológicas, con quien discutimos gran parte de las ideas contenidas en este trabajo.

REFERENCIAS

- 1.- ARBULU, J. Informe a la Comisión Investigadora de las fallas de El Cobre.
- 2.- INSTITUTO DE GEOFISICA Y SISMOLOGIA DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE. Comunicación verbal.
- 3.- GARCIA, H. Informe a la Comisión Investigadora de las fallas de El Cobre.
- 4.- ALVAREZ, L. Comunicación verbal.
- 5.- AGUERO, G. "Formación de depósitos de relaves en el Mineral del Teniente". Anales del Instituto de Ingenieros de Chile, Año XXIX nº 5. Santiago, (1929).
- 6.- JUSTIN. HINDS. & CREAGER. "Engineering for Dams". John Wiley & Sons. New York, 1945.
- 7.- GILBOY, G. "Mechanics of Hydraulic-Fill Dams". Journal of the Boston-Society of Civil Engineers, vol. XXI, nº 3. Boston (1934).
- 8.- DOBRY, R. "Desarrollo y estado actual de las ideas sobre el problema de la licuación espontánea de los suelos granulares". México, 1964.
- 9.- ALISTE, N. y MORAGA, A. Comunicación verbal.
- 10.- ALISTE, N. y MORAGA, A. "Efectos del terremoto de marzo de 1965 en los Relaves de la Mina El Soldado". Informe del Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, 1965.
- 11.- TSCHEBOTARIOFF, G. P. "Mecánica del Suelo". Aguilar, Madrid, 1960.
- 12.- ESTEVA, L; SANCHEZ, R; y ROSENBLUETH, E. "Consideraciones sobre el diseño sísmico de presas de tierra y entrocamiento". Revista Ingeniería, México, abril, 1961

*El Sr. Leonardo Alvarez, Geólogo del Instituto de Investigaciones Geológicas, está preparando un trabajo al respecto.

**EFFECT OF THE EARTHQUAKE OF MARCH 1965 IN THE
TAILINGS DAMS AT EL COBRE, CHILE****SUMMARY:**

It is explained how a tailings dam (Relave) is built. The histories of Relave Viejo, Relave Chico and Relave Nuevo are presented through aerial photographs and drawings showing how they were before the earthquake and what became of them afterwards. The more likely failure hypothesis are stated for Relave Viejo and the safety factors for each of them are figured out and discussed: the conclusion is that the failure was due to a simple or progressive slides of the front slope allowing the unconsolidated residues located at the center of the embankment to outflow. Finally the stability of this type of fill with regard to seismic motion is analysed and some propositions are made.