



# UNIVERSIDAD DE ATACAMA

OPERACION DE TRANQUES DE RELAVES



PROFESOR:

ANGEL ASTORGA FLORES  
Ingeniero Ejecución en Minas  
DEPTO. DE METALURGIA  
FACULTAD INGENIERIA

DIRECCION DE EXTENSION, COMUNICACIONES Y RELACIONES UNIVERSITARIAS  
DEPARTAMENTO DE CAPACITACION  
\*\*\*\*\*

## 1. PROPOSITO

El acelerado desarrollo alcanzado por la tecnología minera en los últimos años ha significado un considerable crecimiento de los equipos mineros y, por consiguiente, de la cantidad de menas procesadas en las plantas.

Lo anterior ha producido un extraordinario aumento en los volúmenes de relaves que deben ser convenientemente almacenadas. Los tranques de relaves han crecido en tamaño incrementándose a la vez la complejidad y número de los problemas de seguridad y operación que deben ser resueltos.

Por otro lado, la preocupación mundial por la preservación del medio ambiente ha introducido un nuevo concepto que debe ser considerado en el diseño.

Conscientes que los tranques y embalses de relaves pueden (o son) un "talón de aquiles" para las plantas de tratamiento y; en razón de lo anteriormente expuesto; nace el propósito de este curso: maximizar su control operacional.



## 2. INTRODUCCION

Al tratar el tema de Tranques de Relaves es conveniente definir el cuerpo que se conoce con este nombre. Significa; la disposición o distribución de almacenamiento de los relaves que cumplan con la función de ubicar la fracción sólida en una estructura estable y disponer, a la vez, de la suspensión parcial de sólidos en líquidos y de una fracción líquida, capaces de mantenerse en condiciones seguras respecto a eventuales rebalses u otras perturbaciones, producidas por agentes externos como por ejemplo; lluvias, movimientos telúricos, avalanchas de quebradas (cuando estos están ubicados en el curso de estas)etc.

Los relaves también llamados "COLAS" son líquidos que contienen sólidos en suspensión. Estos sólidos constituyen la parte estéril de la mena y aquella porción útil de ésta, que por el momento no es económicamente posible tratar de extraer. En Chile existen algo más de 500 plantas mineralúrgicas que depositan anualmente relaves por una cantidad superior a 100 millones de toneladas de sólidos. La disposición de este material reviste una gran importancia ya que viene a constituir la principal producción en volumen de cualquier planta beneficiadora de minerales, pudiéndose aseverar que ésta es del orden siempre superior a un 90% del total del producto beneficiado. En nuestro país, estos son provenientes de plantas beneficiadoras de minerales de oro, plata y cobre sulfurados y también de plantas de lixiviación por agitación, que para lograr su objetivo metalúrgico deben someterse a una o varias etapas de molienda fina.



## 3. ANTECEDENTES

La construcción y operación de tranques de relaves en Chile puede separarse en dos etapas:

a) Aquellas que se extienden desde la creación de las primeras plantas productoras de relaves, cuyos prismas fueron formados por un vaciado que se ejecutaba a través de su periferia por medio de canales, que servían para conducir la pulpa o relave y depositarla en forma tal de llevar o realizar un levante más o menos horizontal, hasta obtener una altura que se prolongará según la magnitud de la planta.

De esta manera, este sistema de depositación producía una clasificación gravitacional poco selectiva, quedando en los bordes parte del material grueso con bastante humedad y para ganar en capacidad se adoptaba una pendiente que alcanzaba hasta  $80^{\circ}$ , obtenido el muro de contención de esta forma las partes más finas o lamas se escurrían hacia el centro llegando a formar por su gran cantidad de agua una laguna, la cual se extraía por diferentes medios, de bombeo, cámara central, rebalse, etc.

Por diferentes motivos, ya sea por su gran altura, paralización de las faenas, etc., fueron abandonados o reemplazados por otros y con la acción del tiempo, se secó en su superficie, dando la apariencia de encontrarse totalmente seco, pero se ha podido comprobar, que después de años (más de 10) al ejecutar excavaciones en el centro de éstos, se ha encontrado con que en su núcleo central aún se encuentra una apreciable cantidad de agua que dado a las rudimentarias condiciones de construcción ejecutados, como se expuso en un comienzo, estos tranques no presentaban ninguna seguridad de estabilidad.



en su construcción. Situación que se agraba en las zonas lluviosas o afectas a movimientos telúricos.

Fue así, como en el terremoto de marzo de 1965 más de diez tranques de relaves en el área situada en el norte de Santiago, fallaron y de ello resultó un daño considerable. El colapso de uno de estos depósitos, que servía a la mina de cobre "EL SOLDADO" y su planta en el mineral "EL COBRE" cercano a Calera, originó un flujo de relave licuado que sepultó al mineral y mató a más de 250 personas.

También puede citarse el tranque de la planta Illapel, que con el terremoto de julio de 1971 cedieron sus paredes vaciándose su interior en un sector que ocupaba un campamento, que por razones de seguridad había sido evacuado no más de dos meses antes. Hágase presente que para esos tiempos se consideraba normal las condiciones de ese tranque, estimándose que no constituían peligro.

b) Como segunda etapa podemos citar la construcción, operación y mantención de los tranques de relaves, regidas por el Reglamento que el Ministerio de Minería por intermedio del Servicio de Minas del Estado, estudió y elaboró para estos fines y el cual fue puesto en vigencia el día 31 de julio de 1970, con su publicación del Decreto N°86, aparecido en el Diario Oficial del día 13 de agosto del mismo año. Reglamento que fue creado para evitar nuevas catástrofes a consecuencia de los deslizamientos producidos por la forma no procedente de construir y mantener en condiciones de seguridad aceptable un tranque de relaves.

Es así como esta Ley enfoca y determina en más de 50 artículos los aspectos necesarios para formar un tranque que



reuna las condiciones de seguridad y de estabilidad que, de ser cumplidas en toda su magnitud no habría que lamentar accidentes como los ya citados anteriormente.

#### 4. DEFINICIONES IMPORTANTES

Para el mejor entendimiento del presente curso, he creído de importancia definir los cuerpos que componen el tranque de relaves.

##### 4.1. Tranque de Relaves.

Disposición de almacenamiento de los relaves, que cumple la función de ubicar la fracción sólida en una estructura estable y disponer a la vez de la suspensión parcial de los sólidos en líquidos y de una fracción líquida, capaces de mantener en condiciones seguras respecto a eventuales rebalses u otras perturbaciones producidas por agentes externos como por ejemplo; lluvias, movimientos telúricos, avalanchas de quebradas (cuando éstos están ubicados en el curso de éstas), etc.

##### 4.2. Relave

Se define como una suspensión de sólidos en líquidos, que se desechan en las plantas de concentración húmedas de especies minerales y estériles que han experimentado una o varias etapas en circuitos de molienda fina, y posterior tratamiento.

##### 4.3. Prisma Resistente

Es la zona periférica del tranque de relaves, estructurada artificialmente, que complementa el perímetro natural



para conformar en su interior la zona lamosa del tranque de relaves y, a la vez, parte o el total de la zona arenosa del mismo.

**4.4. Talud Externo**

Es la superficie externa del prisma soportante.

**4.5. Angulo de Talud**

Es el ángulo de la superficie externa del prisma soportante y el plano horizontal.

**4.6. Granulometría del Relave**

Es la descripción cuantitativa de la repartición de tamaños de los componentes sólidos del relave y referida ya sea al relave completo o una separación previa en fracción arenosa y fracción lamosa.

**4.7. Línea de Coronamiento**

Es la línea horizontal de mayor cota del talud externo o en otros casos, la línea que une los puntos más altos de dicho talud.

**4.8. Berma de Coronamiento**

Es la faja horizontal de mayor cota del talud externo y prisma resistente.

**4.9. Revancha**

Es la diferencia de cota entre la línea de corona-



miento y la superficie inmediatamente vecina de la fracción aguas adentro del tranque, generalmente lamosa o de arena muy fina.

#### 4.10. Acumulación Lamosa

Es la zona del tranque de relaves donde se acumulan los sólidos de granos más finos.

#### 4.11. Pozo de Sedimentación

Es la zona del tranque de relaves, pertenecientes a la acumulación lamosa en donde el gradual procedimiento de sedimentación permite la acumulación de agua clara en la superficie.

#### 4.12. Nivel Freático

Es la cota de los puntos en que el agua de poros tiene presión neutra igual a cero.

#### 4.13. Angulo de Fricción Interna

parámetro de Cálculo que afecta la capacidad resistente al corte y que expresa el roce intergranular interno del macizo homogéneo de relaves y variable de acuerdo a los tamaños de las partículas y su estado de agregación designado  $\phi$ .

#### 4.14. Compactación

Es la acumulación natural o artificialmente lograda y que permite el ajuste de los espacios intergranulares en volumen mínimo incrementando así las densidades.



**4.15. Sistema Drenante**

Es el artificio dispuesto para la recolección del agua clara del tranque de relaves, que se va obteniendo en el pozo de sedimentación y/o para la recolección del agua que es- truja del tranque de relaves a medida que éste se consolida por eliminación del líquido que rellena los espacios intergra- nulares.

**4.16. Sistema Repartidor**

Es el destinado a ubicar el relave completo y/o las fracciones de sus componentes arenosos y lamosos, en condicio- nes de ejecutar un relleno hidráulico.

**4.17. Ciclón**

Clasificador centrifugante que sirve para separar la parte gruesa o arena, de la fracción fina o lamosa.

**4.18. Alimentación del Ciclón**

Es el relave que sale de la planta y es tratado en un ciclón para separar el grueso del fino.

**4.19. Under Flow**

Es la fracción gruesa que entrega el ciclón y sirve para formar el muro de contención.

**4.20. Over Flow**

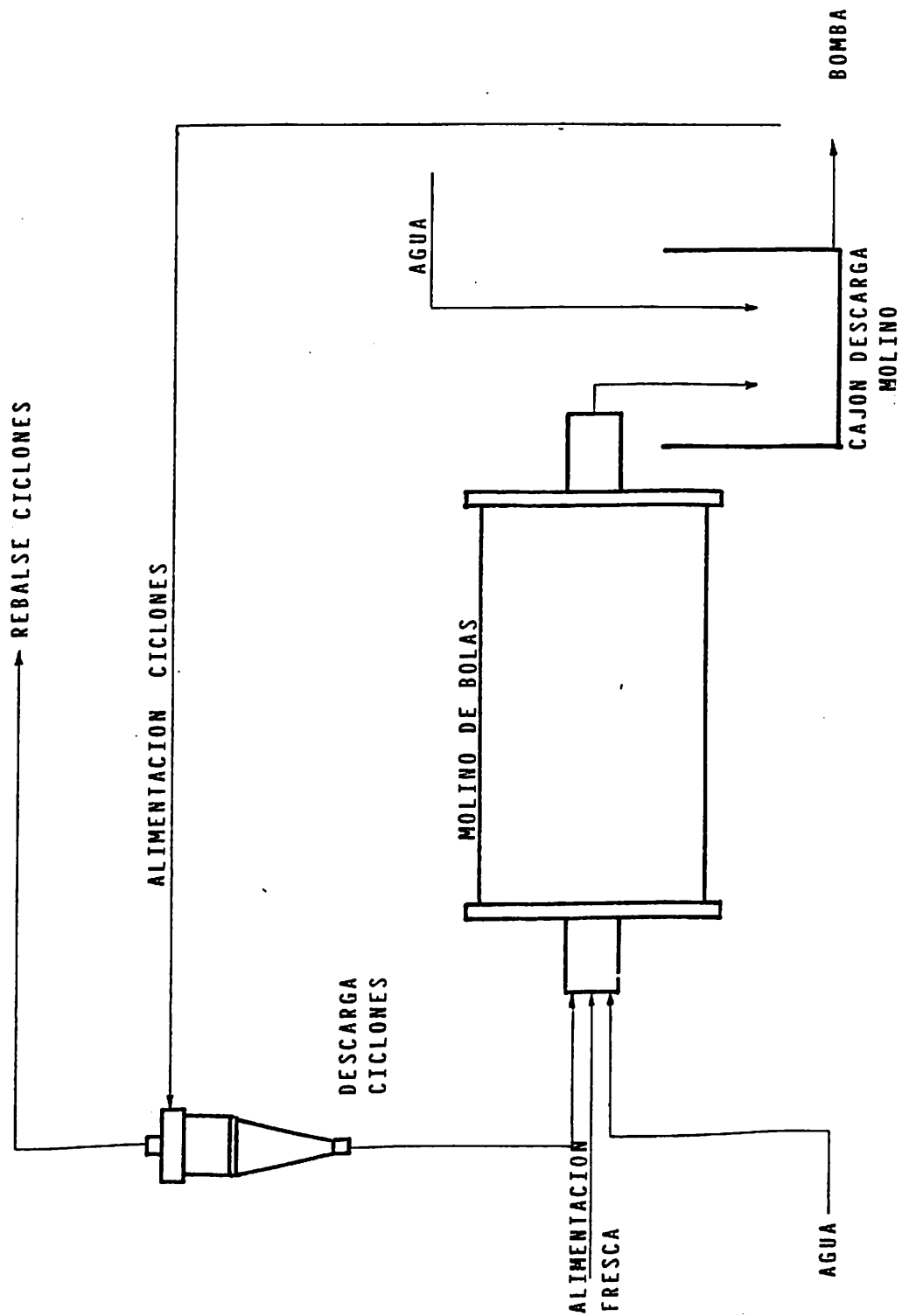
Es la fracción fina que entrega el ciclón y es el que se almacena dentro del tranque mismo.



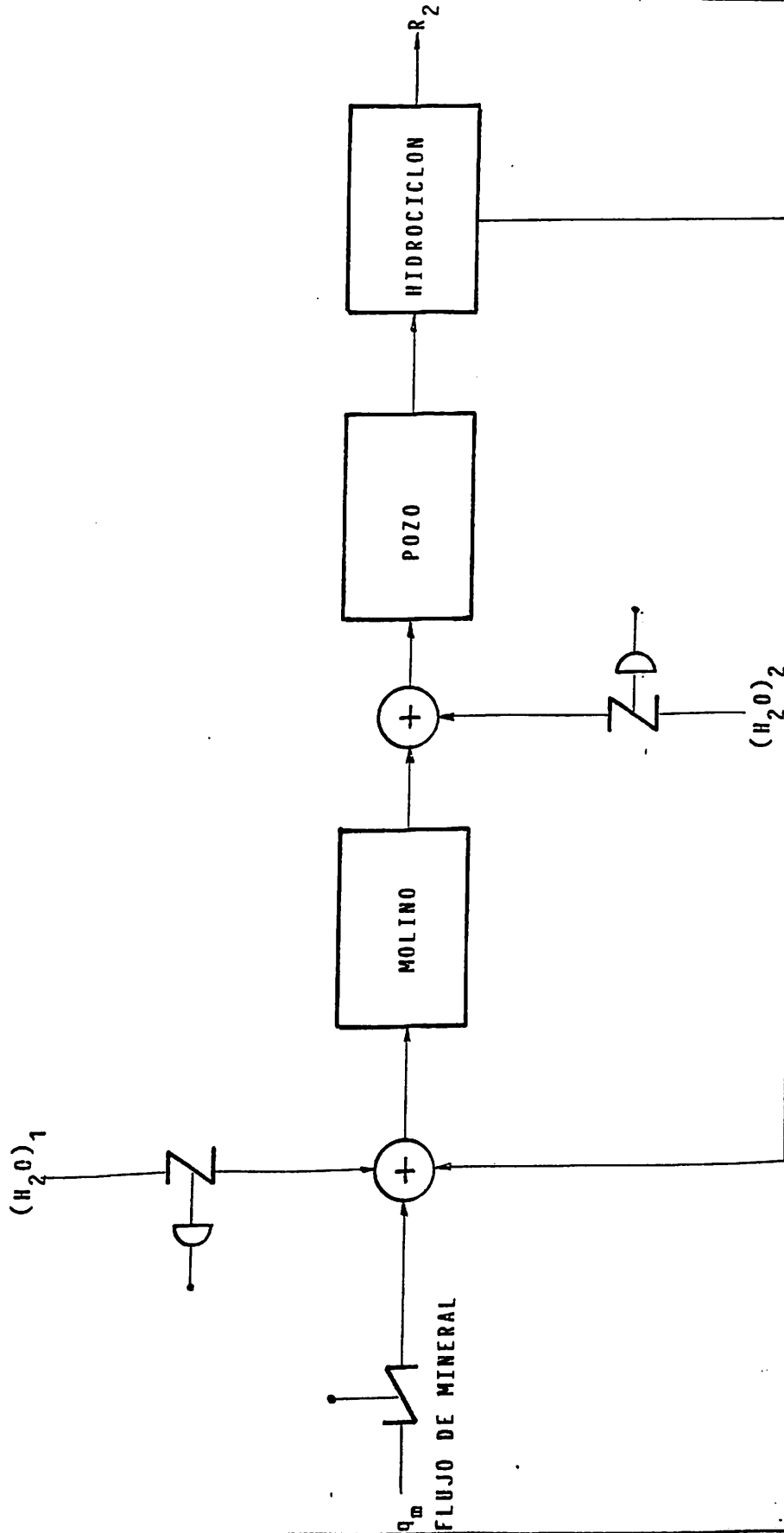
**5. CARTA DE FLUJO**

Se puede definir como: papel escrito en símbolos que denotan un medio de comunicación de la distribución óptima, es decir, el movimiento de cosas líquidas, gaseosas, sólidos o mezclas entre ellas (pulpas), y que, mediante equipos adecuados conforman una operación o proceso mineralúrgico. En este sentido, se utiliza la voz como sinónimo de mapa, esquema o diagrama. Es muy común conocerla, en término anglo-sajón, como Flow-Sheet.

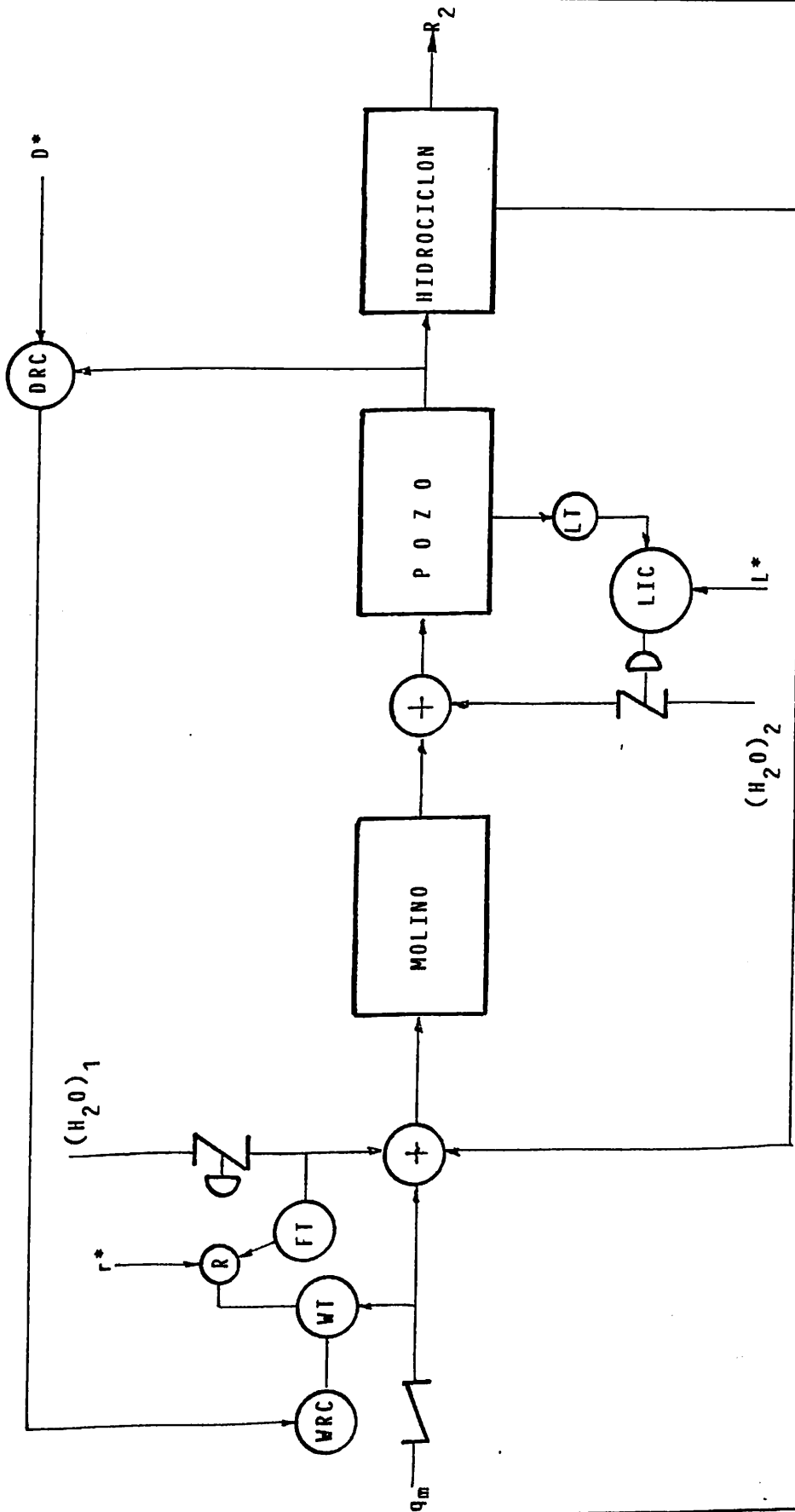




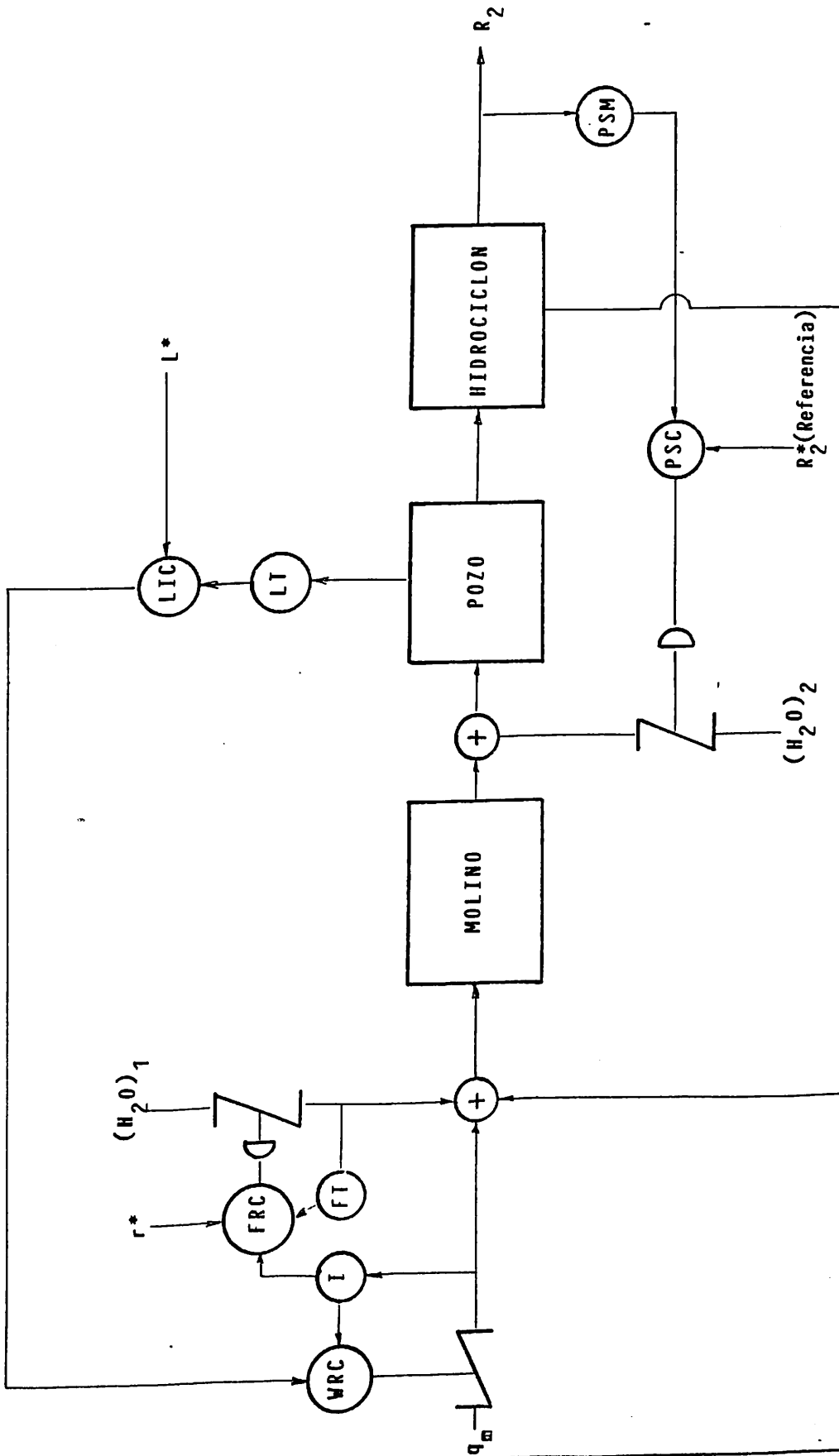
PLANTA DE MOLIENDA



ESQUEMA SECCION MOLIENDA  
SISTEMA DE CONTROL MANUAL



SISTEMA DE CONTROL CON DENSIMETRO



ESQUEMA DE CONTROL AUTOMATICO QUE INCLUYE PSM

## 6. EL HIDROCICLON COMO CLASIFICADOR DE PARTICULAS

Posiblemente el hidrociclón fue inventado por E. Bretney, quien hace 96 años lo patentó como un purificador de agua para la industria de helados en EE.UU. de Norteamérica. Los usos actualmente conocidos del hidrociclón son: Clasificación de partículas sólidas por tamaño, concentración gravitacional, etc. Ellos sólo datan desde el año 1940. Desde esta fecha y en adelante, la aceptación por la industria y el esfuerzo de los ingenieros por comprender y predecir el funcionamiento del aparato, han ido en constante crecimiento.

Estructuralmente el ciclón no puede ser más simple: Un tubo más o menos cónico o cilindro-cónico con un orificio de alimentación tangencial y dos orificios axiales de descarga. Sin embargo, el carácter tridimensional y turbulento del movimiento de la mezcla sólido fluido alimentada al ciclón, ha desafiado hasta hoy una formulación teórica global del funcionamiento (fig. Nº ).

por otra parte, las características de los productos que se obtienen del hidrociclón dependen de numerosas variables, entre las cuales se distinguen dos grupos: Las de DISEÑO, tales como los diámetros del ciclón y sus orificios, y las de OPERACION como son: El flujo, presión, concentración y distribución granulométrica de los sólidos de la alimentación.

## 6.1. Eficiencia de la Clasificación (E)

Es conveniente cuantificar la eficiencia de la clasificación en un hidrociclón por el porcentaje en peso, de cada fracción de tamaño de las partículas de la alimentación que se van al under-flow (producto grueso o descraga). Al tamaño de



las partículas que resultan con una eficiencia de 50% se acostumbra denominarlo  $d_{50}$  o tamaño de corte. El valor de la eficiencia, para partículas más finas, no se anula como sería deseable, sino que tiende a un valor R, mayor que cero.

Este seguramente se debe a que las partículas finas por ser fácilmente arrastrables, son acarreadas por el agua, que necesariamente acompaña al producto grueso. Así, el valor R, denominado "corto circuito", representa al porcentaje del agua de la alimentación que vá al under-flow.

Con el fin de obtener la eficiencia que represente solamente lo que le ocurre a las partículas que son efectivamente clasificadas, se ha propuesto redefinir la eficiencia descontando el peso de cada fracción de tamaño, la proporción correspondiente a las partículas de ese tamaño que van al under-flow debido al cortocircuito.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Peso Under - flow}}{\text{Peso Sedimentación}} \times 100$$

(para un tamaño de partícula igual).

## 6.2. Características de Movimiento en el Interior de un Hidrociclón.

El interior de un hidrociclón puede dividirse (Renner y Cohen) en cuatro regiones caracterizadas por el tipo de distribuciones granulométricas existentes en ellas. (Fig. ). Las regiones A, B y C contienen material con distribuciones de tamaño uniforme en todo el interior de cada región, siendo prácticamente iguales las distribuciones granulométricas en



la región A con la alimentación, las de la región B con la del under-flow y las de la región C con la del over-flow. Solamente la región D, de forma toroidal, presenta un proceso de clasificación en acción.

En esta región se observa una acumulación sustancial de material de tamaños intermedios.

Al mismo tiempo, en esta región las distribuciones granulométricas se hacen más ricas en material fino mientras menor es la distancia al eje del ciclón.

La fig. ilustra trayectorias de partículas de distintas fracciones de tamaño que podrían producir una estructura como la descrita.

### 6.3. La Columna de Aire

La presión en el interior de un ciclón disminuye desde la pared hacia el eje, pudiendo alcanzar el valor de la presión atmosférica. En tal caso, si el hidrociclón tiene sus salidas comunicadas a la atmósfera, en aire al aparato formando una columna a lo largo del eje del ciclón.

El comportamiento de la columna de aire es complejo, y su efecto en el funcionamiento del hidrociclón es bastante importante. Una situación ilustrativa del efecto de la columna de aire es la siguiente:

Cuando un ciclón se alimenta con agua solamente, la columna de aire puede ser de un diámetro tal que cierra completamente el orificio de descarga del under-flow. Si entonces



se agregan sólidos a la alimentación, los gruesos se acumulan en él como ciclón, haciendo decrecer la velocidad de rotación en esa zona. Esto hace disminuir el diámetro de la columna de aire, permitiendo así la descarga del under-flow.

Si la acumulación de gruesos es excesiva, la columna de aire puede interrumpirse o desaparecer completamente. Esto ocurre, por ejemplo, si el diámetro del orificio de salida de los gruesos es muy pequeño o cuando aumenta el contenido de sólido en la alimentación o cuando aumenta el flujo de entrada, disminuyendo el tamaño de parte. La desaparición de la columna de aire dá lugar a una descarga tipo TABULAR, en contraste con la descarga usual tipo SPRAY en forma de paragua.

El peso de descarga tipo spray o tubular ocurre en forma gradual e intermitente. Se puede observar que si el cambio de descarga se logra variando el flujo de entrada, el rango de flujos correspondientes a la descarga de transición es distinto si el proceso ocurre aumentando el flujo que disminuyendolo. La acción del ciclón depende del tipo de descarga por lo tanto, es importante diseñar las instalaciones de hidrociclones de modo que se asegure el funcionamiento en estado estacionario.

El diámetro del orificio de descarga del under-flow debe ser ajustado de manera que no se induzca la acumulación excesiva de gruesos en el cono ni tampoco se produzca más allá que el flujo de gruesos que se desean en el under-flow. De lo contrario, esto último ocasiona la presencia de finos no deseados en el producto grueso. En otras palabras, un hidrociclón deberá entregar una distribución granulométrica lo más cerrada posible, es decir, con menor contenido de finos (disminución de la recuperación).



A continuación se muestran una serie de figuras que complementan y/o facilitan la mejor comprensión del trabajo del clasificador centrífugo.



## 7. FUNCIONES DEL TRANQUE DE RELAVES

La disposición de almacenamiento de los relaves, cumple las funciones siguientes:

7.1. Ubicar la fracción sólida en una estructura que se consolida en forma estable.

7.2. Permite disponer de la fracción líquida para reemplazo o, para eliminación por descartes y/o evaporación y/o adsorción.

7.3. Permite disponer de las fracciones arenosas y lamosas en una disposición de estructuras estables.

7.4. El almacenamiento de los relaves de acuerdo a la función primera es teórica y prácticamente posible con o sin empleo de materiales ajenos al relave.

7.5. La disposición de la fracción líquida según la segunda función, puede corresponder a:

A) Relaves de plantas cuyo ph de trabajo es neutro o básico y en que el reemplazo puede ser total en la fracción recuperable. No existen en este caso en forma general, elementos básicos o químicos limitadores de la capacidad de carga circulante entre la planta y el tranque. El balance de líquidos puede tener mayor significación en su rendimiento cuando hay escasez de agua, es el caso de las plantas de flotación en zonas áridas.

En la flotación de minerales de cobre, interesa la pirita lo cual supone un ph de trabajo mayores de 7. Los



derrames de estos volúmenes no son nocivos para la agricultura.

El balance de aguas cubre:

- a) Pérdidas por evaporación.
- b) Pérdidas por filtración del piso.
- c) Pérdidas por humedad remanente.
- d) Aprovechamiento de agua con el sistema de drenes y bombeo.

B) Relaves de plantas cuyo ph de trabajo es ácido y por el reemplazo de los líquidos resulta de una conveniencia eventual y no, ya por su contenido arenoso si no por los valores metálicos solubles que los líquidos contienen. Estos tranques tendrán un control de derrames y contaminaciones que aseguran la operación normal de las labores agropecuarias vecinas ya que por su composición ácida y salina son tóxicos para la vida vegetal y animal.

Los suelos tienen en Chile una reacción básica, lo cual resulta compatible con su filtración en el piso siempre que el caudal subterráneo tenga un curso suficientemente largo como para alcanzar la neutralización total.

7.6. La tercera función que hace mención de disponer separadamente de las fracciones arenosas y lamosas en estructuras estables, se consigue con adecuado sistema repartidor. El sistema aplicable ha de incluir una disposición de clasificación tal como cicloneo, cuyos gruesos son de por sí capaces de engendrar un prisma frontal resistente en la zona periférica del tranque en complementación con el perímetro natural para conformar en su interior la zona lamosa del tranque.



## 8. DRENADO DE TRANQUES

La recolección de líquidos claros es consecuente con su decantación gradual de arenas gruesas, arenas finas, lamas y separación de líquidos claros.

Normalmente la decantación hidráulica de las pulpas de relaves son interrumpidas en la alimentación misma por un cicloneo u otro sistema clasificador que separa dos fracciones que referidas a ciclón serán:

- a) Arena gruesa y fina por el Apex del ciclón.
- b) Arena fina y lama por el Vortex-finder del ciclón.

Las dos fracciones separadas contienen líquido que en la fracción arenosa puede ser 40% a 60% y en la fracción lamosa 75% a 90%. La recolección del líquido claro puede ser obtenible mediante el empleo de torres colectores cuya periferia superior contiene un sistema de vertedero de cota variable y que conectan el rebalse obtenido por su interior con un dren que permite acumular el líquido claro captado en un colector de carga del sistema de bombeo. La necesidad de abrir el colector fuera del tranque es consecuente con la operación de bombeo.

El dren asísmico más conveniente es un canal de impermeabilización con polietileno, con relleno de guijarros de 150 mm., que lleva una cubierta con capas menores de 30 mm. - 6 mm.-1,2 mm. y arena o material del tranque. Los drenes de entubación sufren desalineamiento y fracturas en los movimientos sísmicos.



No importa donde se ubica el dren en la periferia del tranque, pero si importa que la zona del líquido claro pueda mantenerse alejada del prisma resistente artificial.

Los tranques que recuperan líquido se diseñan según principios diferentes, según la necesidad preferencial como sigue:

- 1) Cuando interesa la recuperación elevada del agua no debe evaporarse en superficie de la laguna de operación para evitar las pérdidas por evaporación siendo además conveniente consultar una adecuada ordenación del dren colector.
- 2) Cuando interesa la concentración de posibles soluciones lixiviantes con valores metálicos solubles debe favorecerse el empleo de la mayor superficie posible, para ayudarse con la evaporación y además emplear un buen dren.
- 3) Cuando no interesa el líquido claro, si no sólo la decantación satisfactoria porque se incorporan los derrames, ya sea a otros pozos de evaporación solar o al suelo mismo, ha de consultarse solo un soporte adecuado.



## 9. UBICACION DE TRANQUES DE RELAVES

## 9.1. Geomorfología

-Elección del sitio: Una selección preliminar de uno o más sitios puede realizarse con planos topográficos o aerofotogeométricos.

Es recomendable que el sitio elegido quede aguas abajo de la Planta, para aprovechar el desnivel en el transporte del material, y lo más próximo posible del concentrador para abaratar el transporte.

La capacidad de producción de relaves y su granulometría es fundamental para la selección del lugar; esto último para tranques tradicionales.

-Reconocimiento de fundaciones: Riesgos sísmicos. Seleccionado el sitio debe efectuarse un mapeo geológico superficial y efectuar investigaciones mediante pozos y sondajes (estudio geológico) asociado con un estudio de riesgos sísmicos.

-Estudio hidráulico-hidrológico: Varias son las condiciones hidrológicas-hidráulicas a considerar: gasto de la hoya afluente propia del embalse; gasto de las esteras, quebradas o ríos cuando la presa cierra el cauce de éstos, aguas subterráneas, napa freática; infiltraciones; recirculación del afluente, etc.

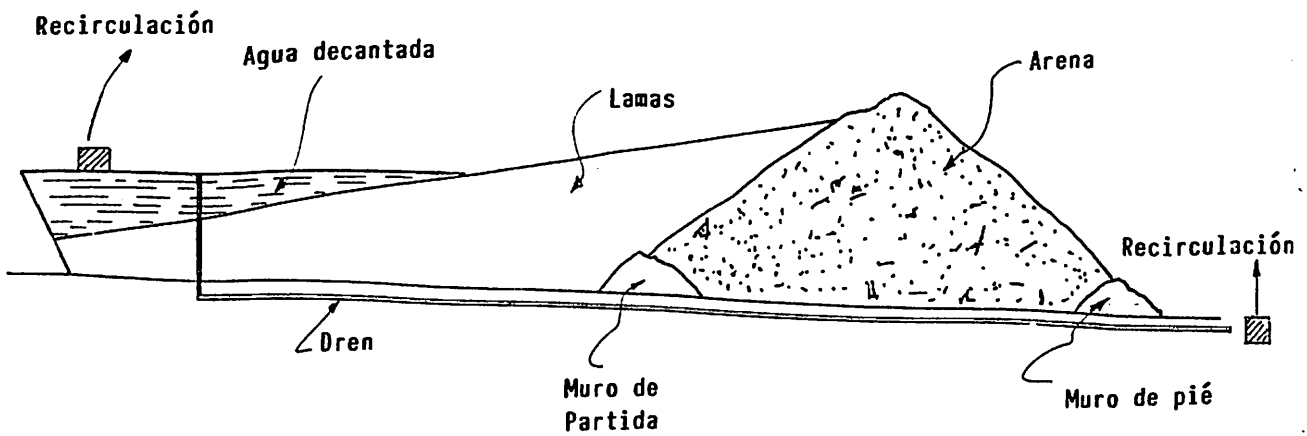
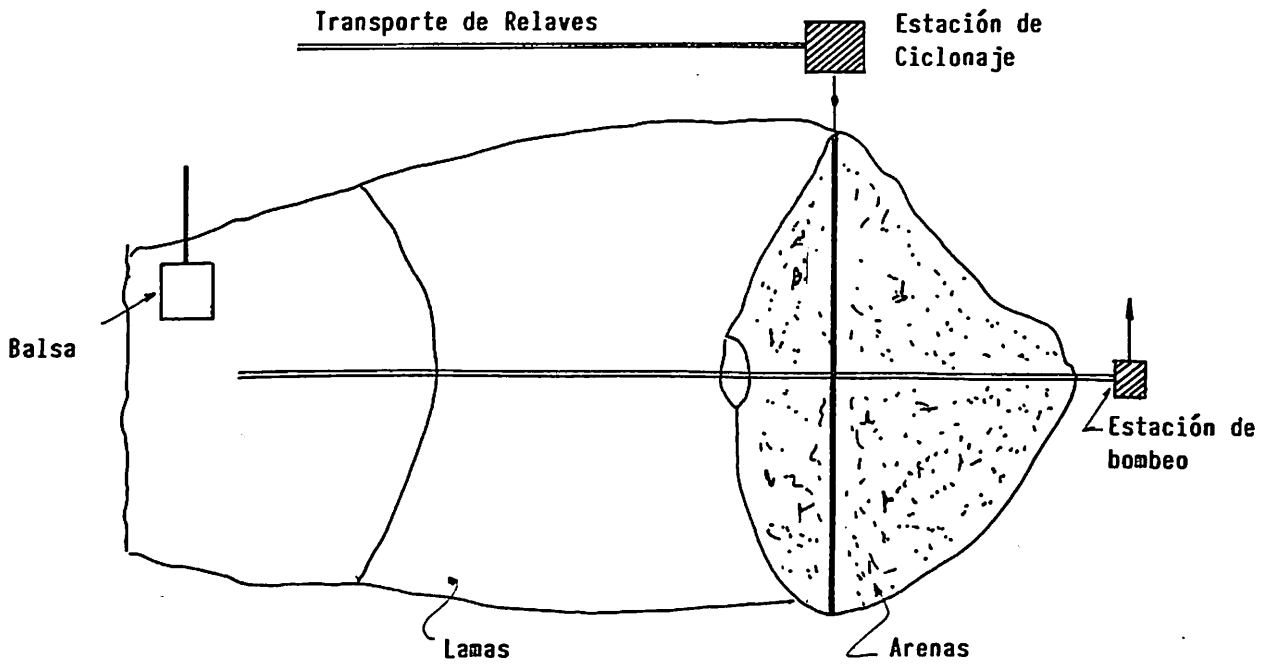
El estudio hidrológico junto con la permeabilidad de los materiales de construcción, como asimismo, fundaciones y subsuelo, permitirán proyectar filtros, drenes, estructuras



recolectoras que permitan un adecuado control de la napa freática al interior del muro de contención, fundamental para la estabilidad de la presa.

#### 10. CUBETA Y CUBICACION

Se define como "cubeta" a la depresión más o menos circular de un terreno que dará cabida al relave procedente de planta y que, junto a la pendiente longitudinal que determina la altura del prisma, conforman el volumen necesario de almacenamiento de dicho relave. El siguiente esquema muestra, en forma generalizada, la conformación geométrica del tranque.



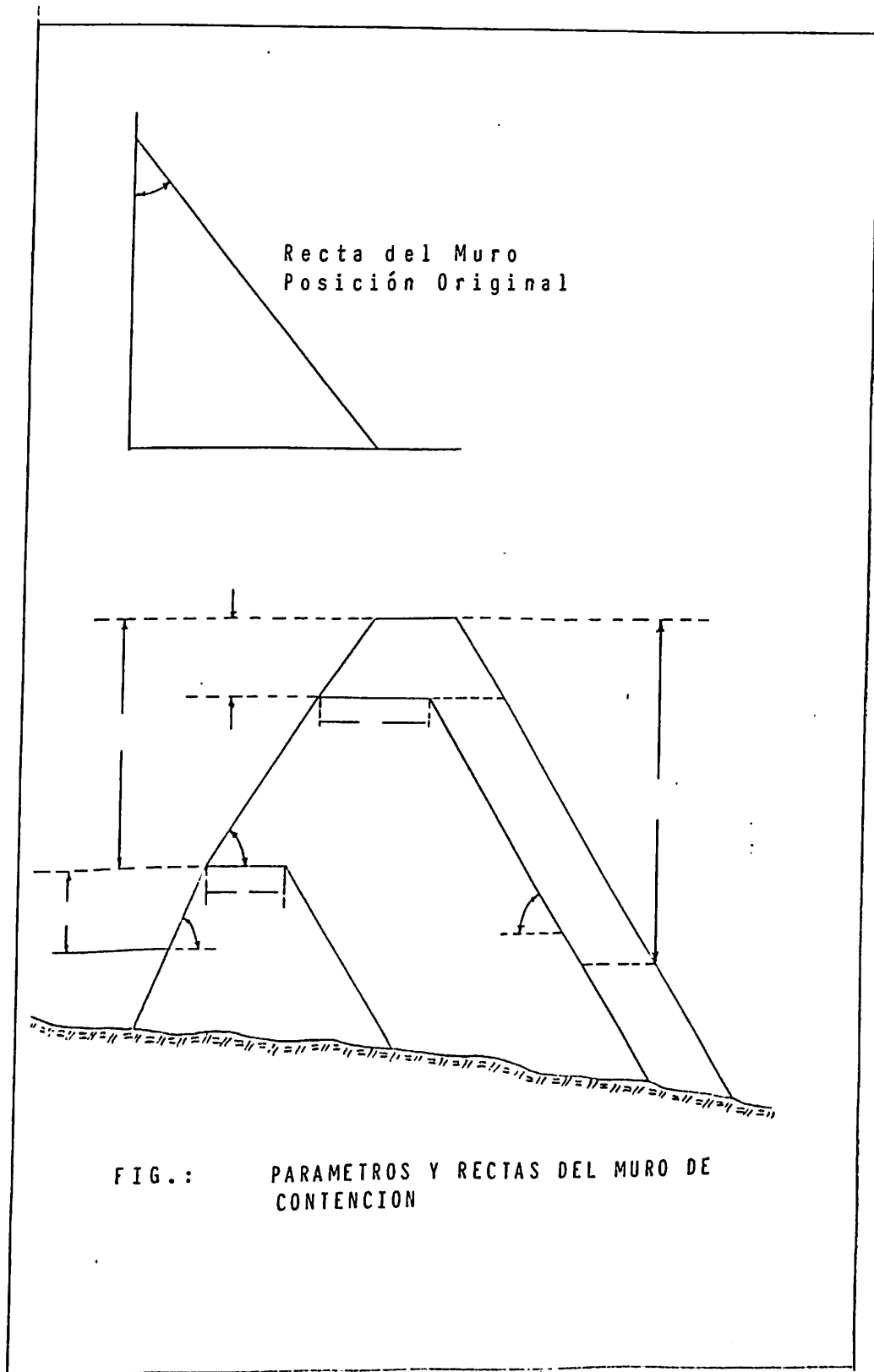
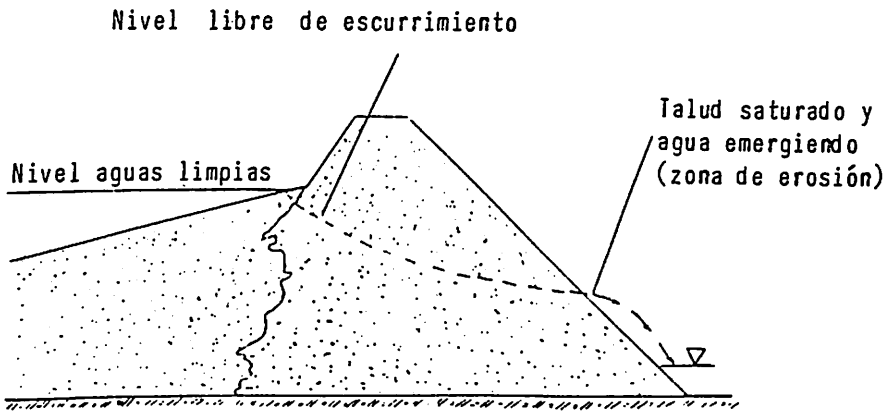


FIG.: PARAMETROS Y RECTAS DEL MURO DE CONTENCION

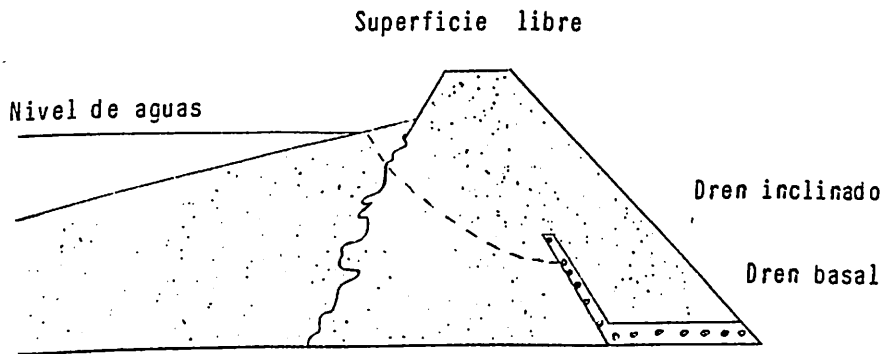
**CURSO:**

**"OPERACION DE TRANQUES DE RELAVES"**

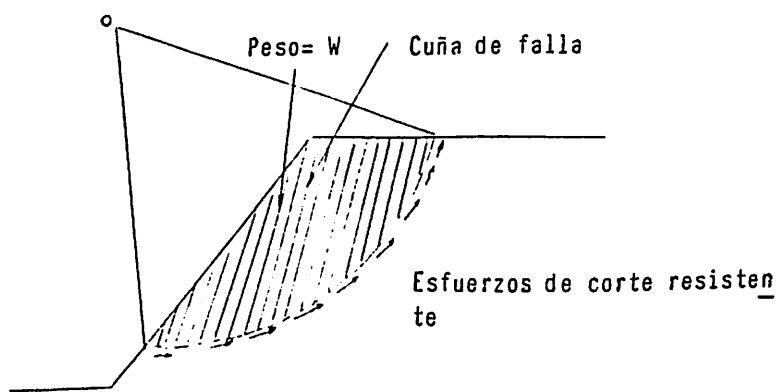




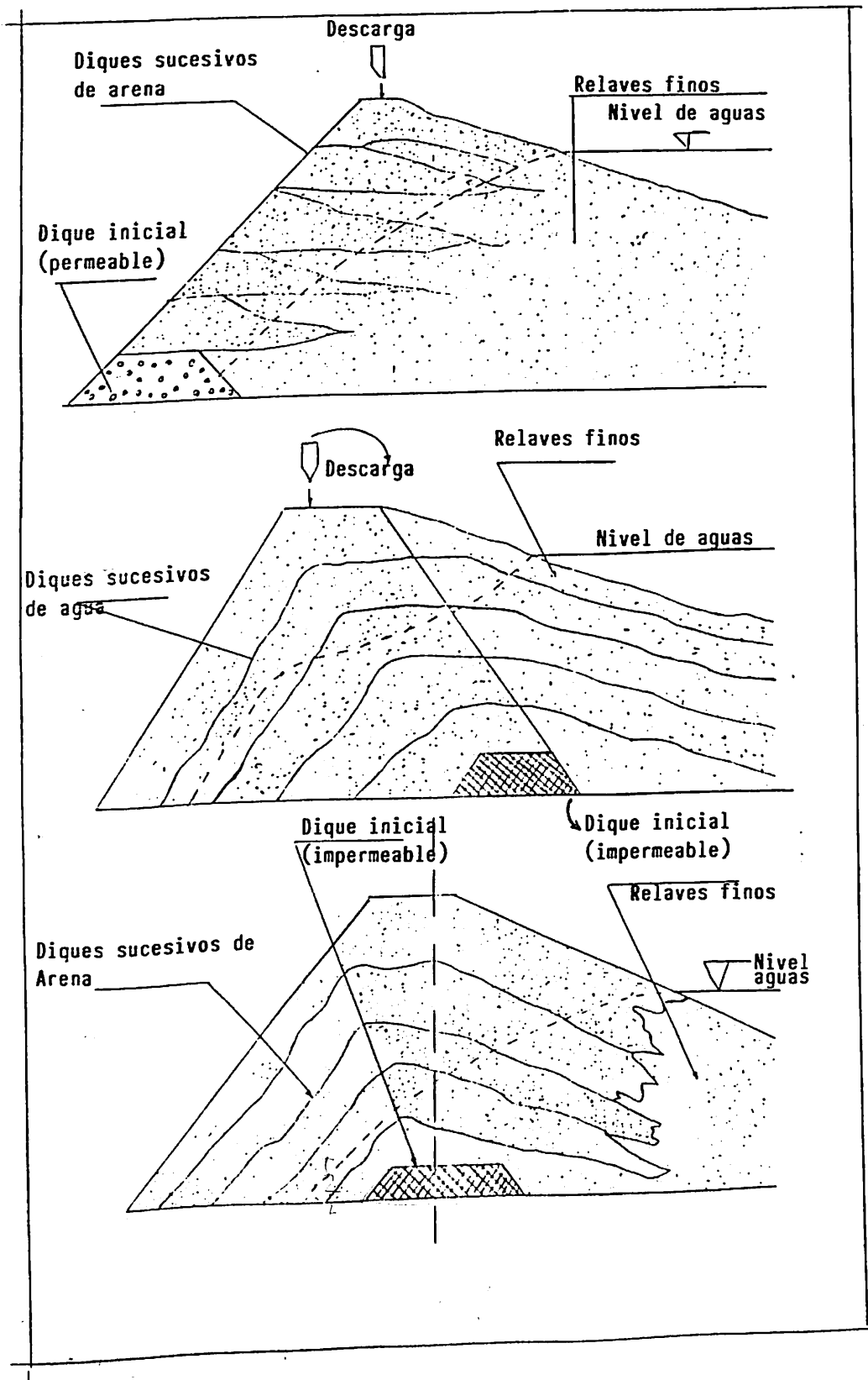
a) Situación no deseable

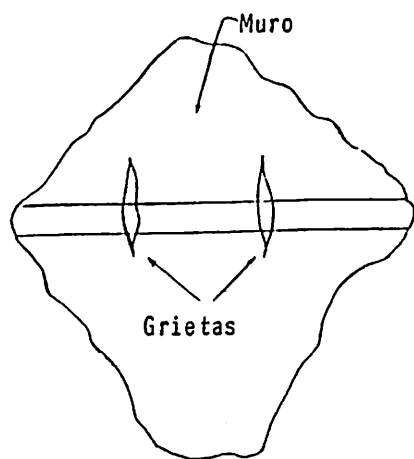
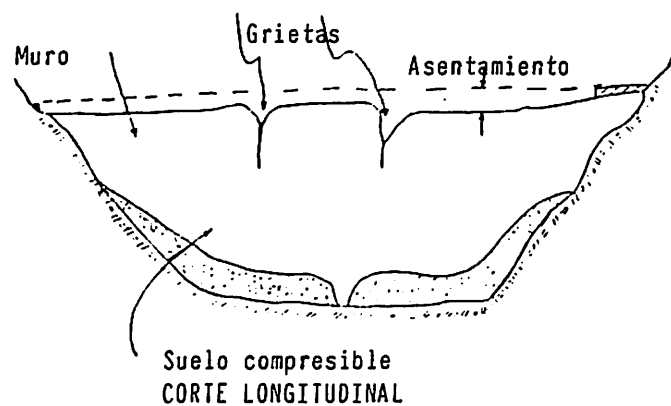


b) Solución

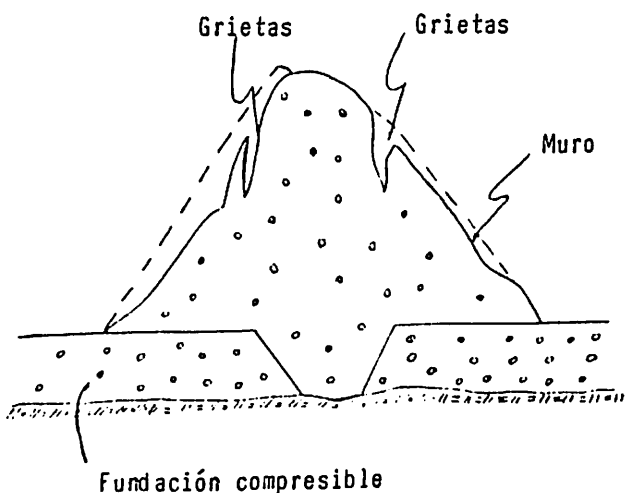


a) Superficie de falla circular

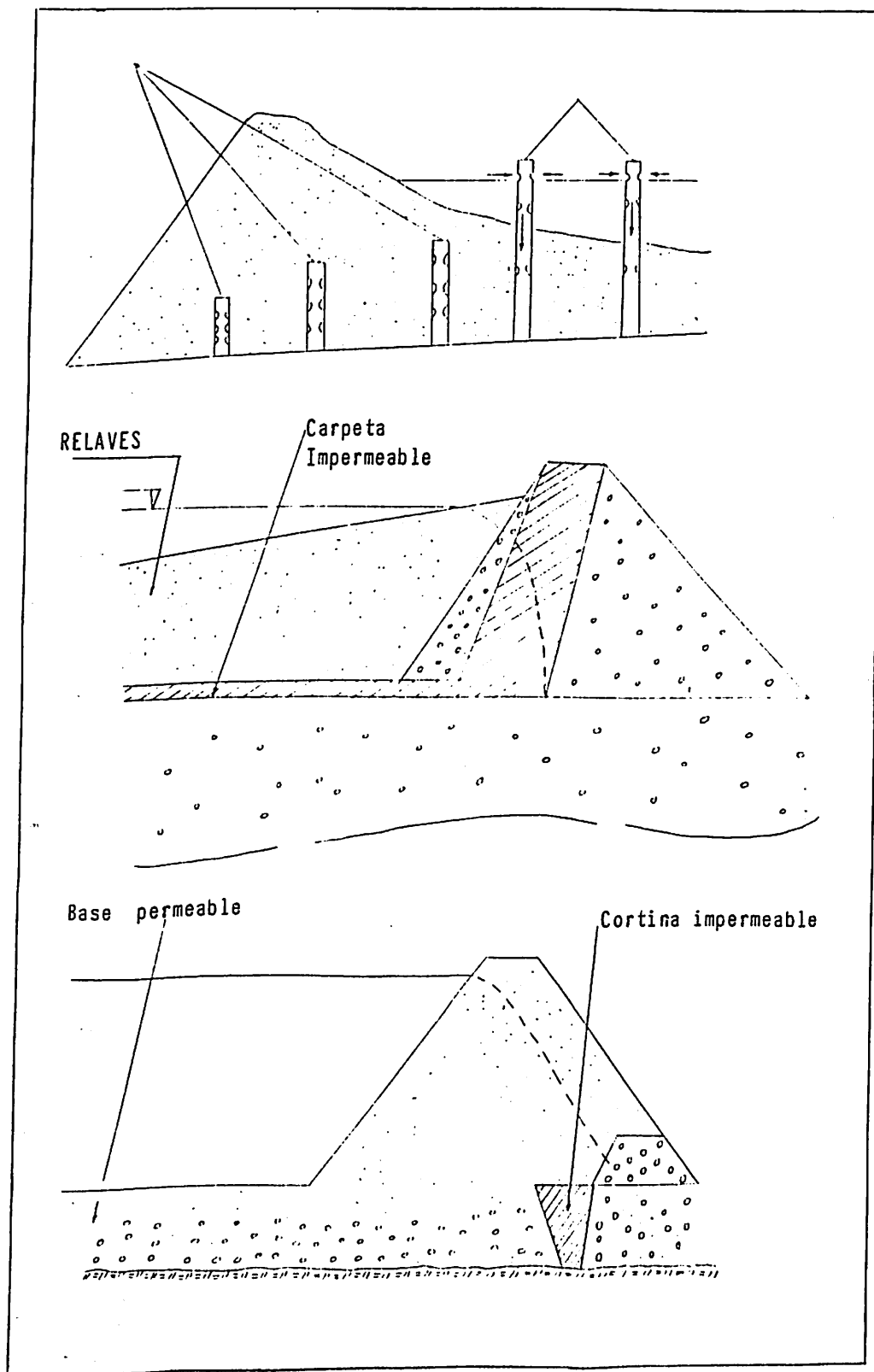


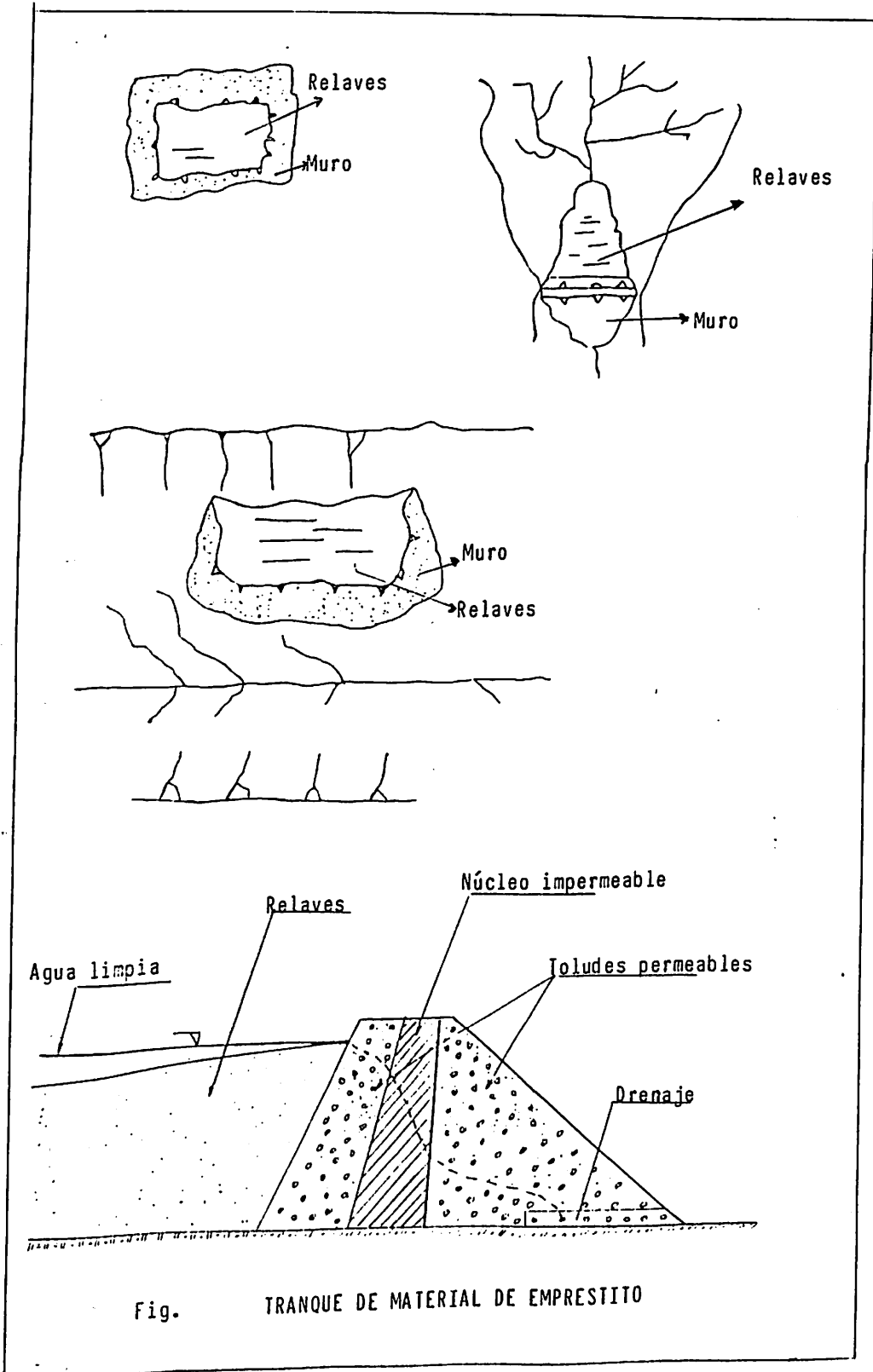


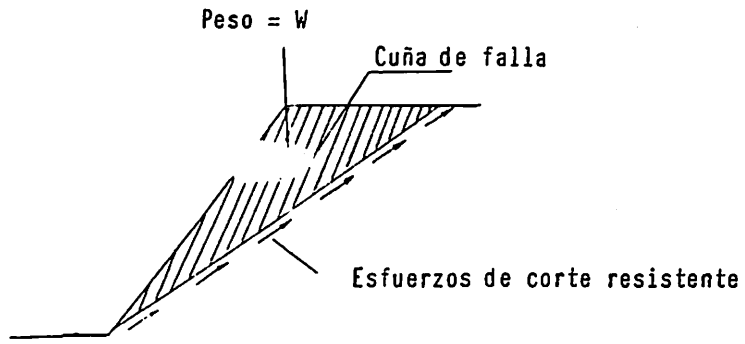
a) Grietas transversales



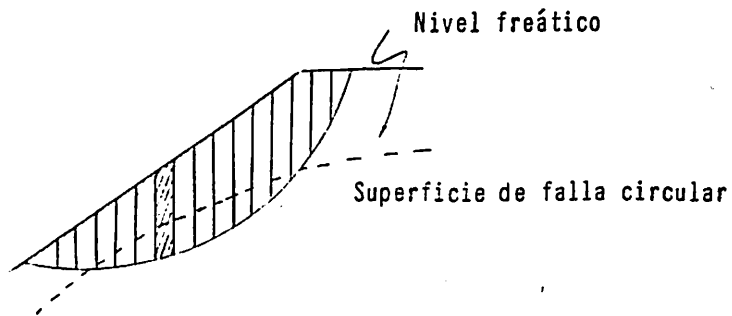
b) Grietas longitudinales



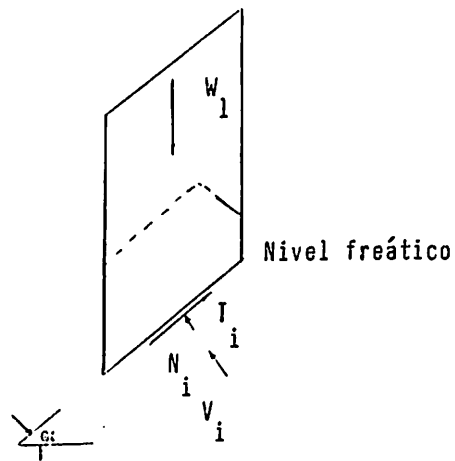




b) Superficie de falla plana



a) División de la cuña en "n" rebanadas verticales

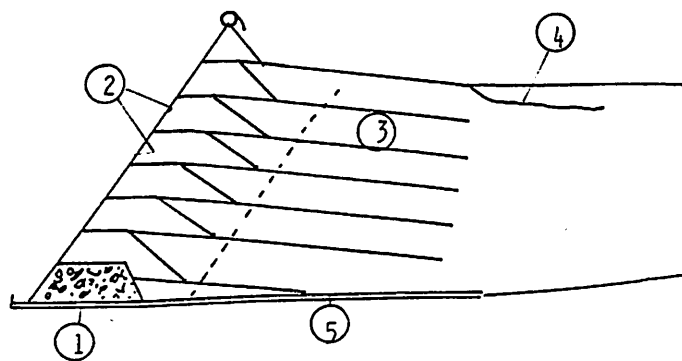


b) Equilibrio de la rebanada de "i"

## 11. UBICACION DE PRISMAS Y CUBICACION

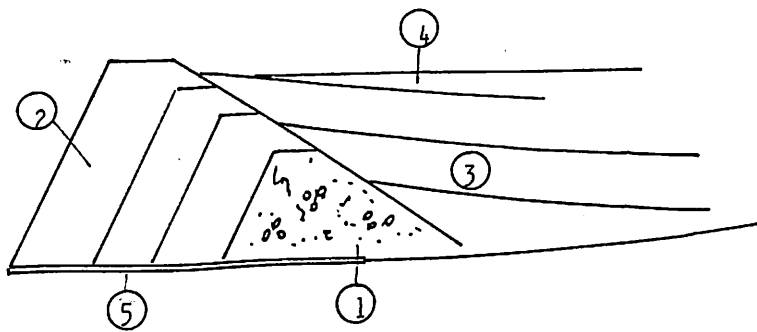
A partir de un tranque de relave tradicional y de acuerdo a su método de construcción ellos pueden clasificarse en:

- Método aguas arriba.
- Método aguas abajo, y
- Método línea central.

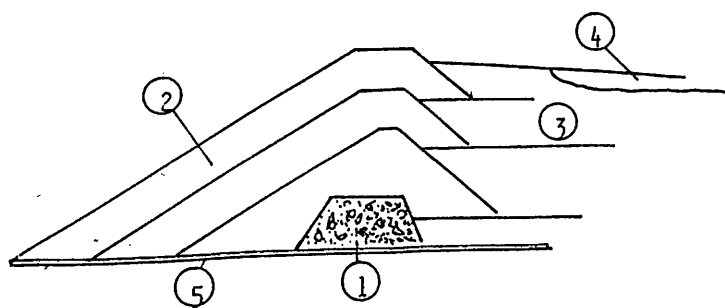


METODO AGUAS ARRIBA

1. Muro de partida.
2. Muro de arenas.
3. Lamas.
4. Agua de decantación.
5. Dren.



METODO AGUAS ABAJO



METODO LINEA CENTRAL

De los tres métodos constructivos enunciados anteriormente (esquema), el de aguas abajo es el que normalmente conduce a mayores factores de seguridad para solicitaciones sísmicas.

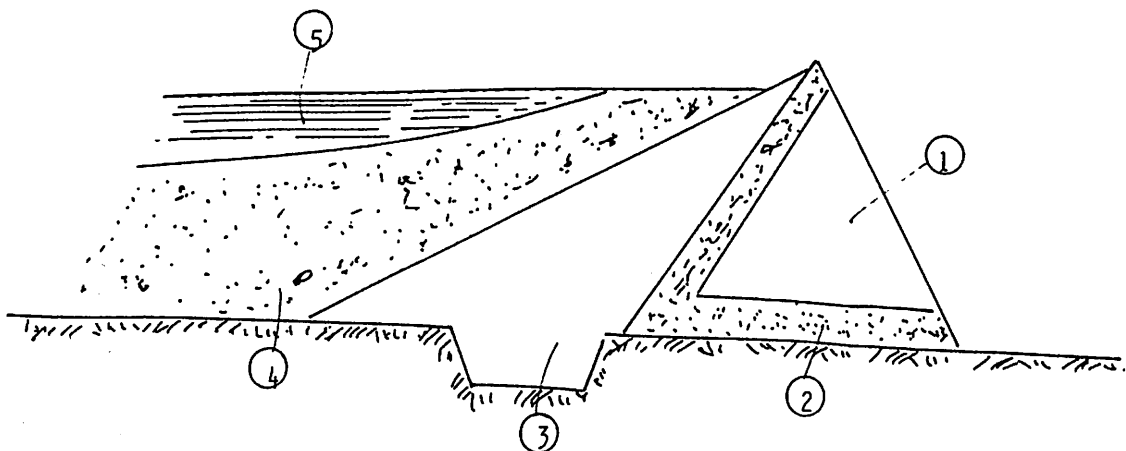
## 12. VOLUMEN DE CONSOLIDACION

Se define como un volumen (muro) de materia gruesa que dé firmeza y solidez al volumen de pulpa que se desea depositar; asegurando así los posibles deslizamientos de dicha pulpa almacenada, debido a movimientos sísmicos, principalmente, que producen el corte de los suelos.

Este volumen de consolidación depende, principalmente, del tipo del "muro de contención" y que, de acuerdo a su material de construcción se clasifican :

- Muro de contención convencional.
- Muro de contención tradicional.

Muro de contención convencional: En la fig. se esquematiza un tranque de relaves cuyo muro de contención es de tierra (tipo convencional). Aguas arriba de él se deposita el relave directamente sin ciclonearlo.



- 1) Zona resistente.
- 2) Filtro.
- 3) Zona Impermeable.
- 4) Relaves.
- 5) Agua decantada.

Muro de Contención tradicional: Siendo el relave sometido a una clasificación en hidrociclones, él se separa en materiales grueso y finos.

Con la fracción gruesa se construye el muro de contención y la parte fina, denominadas "lamas" se deposita aguas arriba.

### 13. VIDA UTIL DEL TRANQUE

Para la vida útil del tranque debe tenerse presente la altura máxima de coronación, talud aguas abajo y arriba, capacidad de lamas, capacidad de arenas, densidad de arenas y lamas y proporción en peso de arenas y lamas; todo lo último de acuerdo a capacidad de diseño y tiempo (años) de trabajo de la Planta Concentradora.

Ejemplo: Planta 200 T/D y 10 años de trabajo.

- Cota coronamiento.....:	
- Talud aguas abajo y arriba.....:	3.5:1 (H/V)
- Capacidad de lamas .....	m <sup>3</sup> .....: 310.800
.....	ton.....: 432.000
- Capacidad de arenas.....	m <sup>3</sup> .....: 207.194
.....	ton.....: 288.000



- Densidad arenas=densidad de lamas.....: 1.39 T/m<sup>3</sup>
- Proporción en peso arenas ≠ lamas .....: 40 : 60

Esquema:



Uno de los factores importantes, para la vida útil del tranque es la REVANCHA ya definida. Una revancha defectuosa de menos 5 metros dado por D.S. 86, se debe a que la razón o proporción en peso de arenas y lamas no permita levantar el prisma adecuadamente sin el aporte de material de empréstito.

#### 14. CONTROLES SISTEMATICOS

De acuerdo a lo establecido en el Reglamento de construcción y operación de tranques de relaves, dictado por el Servicio de Minas del Estado, veremos a continuación los principales controles sistemáticos que se debe hacer a un tranque de relaves para establecer un buen funcionamiento de éste.

Se explicará la forma más correcta de llevarlos a cabo, y se adjuntarán experiencias prácticas para aquellos controles que fueran posibles de realizar en el Tranque.

##### 14.1. Muestreo diario de los productos que se emplean en la construcción del Tranque

- a) Alimentación del ciclón.
- b) Under-flow.
- c) Over-flow.

El objeto de esta operación es de obtener al final de mes una muestra representativa de los elementos que forman el tranque y al efectuar los muestreos correspondientes a cada uno de los productos, obtener elementos de juicio para juzgar si el trabajo de acumulación está siendo llevado en la forma requerida por las exigencias de una buena depositación de los



relaves y del buen trabajo de los ciclones en la separación de los productos.

En el depósito de relaves de Cobre se considera una buena separación del ciclón cuando se obtiene un porcentaje igual o mayor a un 80% de arenas de una granulometría mayor de 80 micrones en el Under-flow y de un porcentaje mayor de 80% de una granulometría menor de 80 micrones en el Over-flow.

De esta prueba se obtuvieron los siguientes resultados que a continuación se exponen:

Ejemplo:

CUADRO 1:

ANALISIS GRANULOMETRICO MES

MALLAS TYLER	ALIMENTACION		OVER-FLOW		UNDER-FLOW	
	PESO %	ACUMULADO	PESO %	ACUMULADO	PESO %	ACUMULADO
48	15,0	15,0	0,5	0,5	12,0	12,0
65	15,0	30,0	1,0	1,5	17,8	29,8
100	15,0	45,0	1,5	3,0	20,8	50,6
150	11,0	56,0	9,5	12,5	15,8	66,4
200	16,0	72,0	8,2	20,7	14,7	81,1
-200	28,0	100,0	79,3	100,0	18,9	100,0

CUADRO 2:

ANALISIS GRANULOMETRICO MES

MALLAS TYLER	ALIMENTACION		OVER-FLOW		UNDER-FLOW	
	PESO% ACUMULADO		PESO% ACUMULADO		PESO% ACUMULADO	
48	17,0	17,0	1,5	1,5	10,0	10,0
65	16,0	33,0	1,8	3,3	22,6	32,6
100	14,0	47,0	2,3	5,6	14,7	47,3
150	10,0	57,0	8,2	13,8	28,9	76,2
200	16,0	73,0	12,7	26,5	8,0	84,2
-200	27,0	100,0	73,5	100,0	15,8	100,0

15. **CONTROLES SISTEMATICOS DIARIOS DE LAS DENSIDADES DE LOS PRODUCTOS QUE SE EMPLEAN**

- a) Densidad de la Alimentación del ciclón.
- b) Densidad del Under-flow del ciclón.
- c) Densidad del over-flow del ciclón.

Esta operación tiene por objeto principal acumular datos a través del mes para calcular el porcentaje de corte del trabajo del ciclón y saber casi en forma exacta la cantidad en toneladas de material de relaves que se deposita en la construcción del muro y en el interior del tranqué mismo. Para esta prueba se ocupó la balanza Marcy porque dá directamente la densidad y el porcentaje de sólidos de la pulpa. También se puede hacer uso de la balanza Denver, pero se sugiere la primera por ser más completa.



Para esto, se explicará la forma de efectuar los cálculos y se adjuntarán los balances obtenidos.

### 15.1. Cálculo del Balance de Cicloneo

Para realizar los cálculos se conoce solamente la densidad y el porcentaje de sólidos. Primeramente se calculan los Grs./lts., para cada uno de los productos de la siguiente manera:

$$\text{Grs./Lts} = \frac{\text{Dens. (Grs/cc)} \times 1000 \text{ cc.} \times \% \text{ Sol.}}{100}$$

El siguiente es el cálculo del % de pulpa repartida, y se obtiene de la siguiente manera:

Sean:

Z : El material entrado al hidrociclón o alimentación.

Vpz : El volumen ocupado por el material alimentado.

Pmz : El peso de la muestra alimentada al hidrociclón.

X : El material que sale por el Vortex Finder (Over-Flow).

Vpx : El volumen ocupado por el material contenido en el Over.

Pmx : El peso de la muestra del Over-Flow.

Y : El material que sale por el Apex (Under-flow).

Vpy : El volumen ocupado por el material del Under-flow.

Pmy : El peso de la muestra contenida en el Under-flow.

$$\text{Entonces: } Vpz = Vpx + Vpy \quad \text{y} \quad Pmz = Pmx + Pmy$$

$$Vpz \cdot \% \text{ Sol.} \cdot dz = Vpx \cdot \% \text{ Sol.} \cdot dx + Vpy \cdot \% \text{ Sol.} \cdot dy$$



Tendríamos que:

$$V_{pz} \cdot \% \text{ Sol} \cdot dz = x \cdot \% \text{ Sol} \cdot dx + y \cdot \% \text{ Sol} \cdot dy$$

Al reemplazar el valor de  $x$  ó  $y$  en la fórmula, sabiendo que  $100 = x + Y$  obtendríamos los valores correspondientes al porcentaje de pulpa repartida.

Conocidos estos valores, se procede a calcular el relave repartido de cada uno de los productos, es decir; alimentación, Under-flow y Over-flow.

$$\text{Relave repartido} = \frac{\text{Grs./Lts.} \times \% \text{ Pulpa repartida}}{100}$$

Conocida la cantidad de relave que se reparte hacia el Under-flow y Over-flow, se calculan que porcentajes representan del total alimentado, esto es lo que se denomina porcentaje de corte.

$$\% \text{ de Corte} = \frac{\text{Relave Repartido}}{\text{Relave Alimentado}} \times 100$$

por último, una vez conocido el porcentaje de corte del hidrociclón basta con saber el tonelaje de relaves que llega al tranque para poder calcular y conocer el tonelaje de arenas que se deposita en el muro y la cantidad de finos que se depositan en el interior de él. Estos valores se obtienen de la siguiente manera:

$$\text{Tonelaje de Arenas} = \text{Total del Relave} \times \% \text{ corte del Under}$$

$$\text{Tonelaje de Finos} = \text{Total del Relave} \times \% \text{ corte del Over}$$



En los cuadros que se presentan a continuación están hechos estos mismos cálculos para cada uno de los balances efectuados mensualmente.

CUADRO 3 :

BALANCE DE CICLONAJE MES

PRODUCTO	DENSIDAD	% DE SOL.	GRS/LTS	% PULPA REPAR.	RELAVE REPART.	% DE CORTE
ALIMENT.	1,28	34,0	435,2	100,0	435,2	100,0
UNDER-F.	1,82	70,00	1.274,0	16,33	288,04	47,80
OVER-F.	1,18	23,0	271,4	83,67	227,08	52,20

TONELAJE DE RELAVES = 7.177,337 TONELADAS

TONELADAS DE ARENAS =  $7.177,337 \times 47,8 = 3.430,767$   
TONELADAS

TONELADAS DE FINOS =  $7.177,337 \times 52,2 = 3.746,57$   
TONELADAS

## 16. CALCULO DEL GASTO EFECTIVO DEL CICLON MEDIANTE ABACO

El diseño de ábaco, para la resolución del problema de cicloneo que exige un sistema de cálculos largos y complicados, simplificará los cálculos, especialmente si se limita el diseño al llamado "CICLON NORMAL". Definiendo como "NORMAL" a un ciclón de las características que se detallan más adelante, se expone un ejemplo real, con datos de la planta, que demuestra la simplificación de los cálculos.

En un ciclón normal, se tiene que:

- a) El diámetro del Vortex Finder mide entre  $1/4$  y  $1/3$  del diámetro del ciclón.
- b) La sección del tubo alimentador alcanza hasta un 60 a 70% del área del Vortex Finder, en forma rectangular. La dimensión mayor se establece según el eje del ciclón e introduciendo el flujo en forma suave.
- c) La parte cilíndrica del ciclón debe ser de un largo entre 1 y 1,5 veces el diámetro del ciclón.
- d) El ángulo en el cono es menor en los diámetros más chicos, fructuación que varía entre  $10^{\circ}$  y  $20^{\circ}$ .
- e) La superficie interna debe ser suave, resistente a la abrasión y concéntrica con el eje de rotación.

La capacidad del ciclón, así definido varía con el diámetro de él, en términos de un factor hidráulico básico y dos factores operativos. Los factores operativos son: el factor presión y el factor porcentaje de sólidos por volumen.



En el ábaco de cálculo que se publica, se han diseñado los resultados de la aplicación que se ilustra con el ejemplo siguiente:

**PROBLEMA:**

Calcular el gasto efectivo  $Q$  de un ciclón de diámetro 175 mm. sabiendo que la presión de trabajo será  $0.6 \text{ Kg/cm}^2$  y que la pulpa tendrá 35% de sólido por volumen.

**SOLUCIÓN:**

Se une el polo a la marca 175 mm. del eje de diámetro. La traza prolongada determina en el eje OQ el punto a. Se une el polo P con la marca .6 del eje, se determina así el punto g. en el eje RB. se une el polo P con la marca 35% del eje K. se determina así el punto h, se traza por g y por h, paralelas a OQ, una horizontal, paralela al eje RB pasando por a, determina b en gb una paralela a la directriz CB, determina c en OQ, una paralela a RB determina d en hd una paralela a CB determina e en OQ con lectura respuesta de 6.2 Lt/seg.

Para un ciclón de las características ya señaladas con una presión de trabajo de  $0.6 \text{ Kg/cm}^2$ . y un 35% de sólidos, tendríamos un gasto efectivo mediante cálculo de ábaco de 6.2 Lt/seg.



**17. MEDIDAS PERIODICAS DEL NIVEL FREATICO DEL TRANQUE POR MEDIO DE LOS PIEZOMETROS****17.1. Fabricación de los Piezómetros**

Se toma una cañería corriente de un metro de largo y 1" diámetro interior, se tapa en un extremo con un flange ciego y se perfora a partir del flange con orificios de 2 cms. de diámetro en un largo de 30 cms.

**17.2. Colocación de los piezómetros**

a) Se hace en el lugar donde será colocado una perforación de 80 cms. de profundidad y 80 cms. por lado del cuadrado.

b) Se coloca en la perforación hecha el piezómetro preparado.

c) Se coloca una primera capa de 30 cms. de grava que tiene dimensiones fluctuantes entre 25 y 50 mm.

d) Se coloca una segunda capa de 30 cms. de gravilla que tiene dimensiones que fluctúan entre 3 y 25 mm.

e) Se coloca una tercera y última capa de 20 cms. de arena gruesa de ciclón.

**17.3. Forma de controlar el Piezómetro**

Se usa un miliamperímetro y una extensión de alambre eléctrico que en una punta va conectada al miliamperímetro y en la otra lleva una pequeña sonda que se introduce en el



piezómetro. Esta sonda está constituida principalmente por un cable eléctrico marcado claramente metro a metro, uno de sus extremos como ya se dijo está conectado a un miliamperímetro que funciona con dos pilas de 1,5 volts. Sus polos están desunidos, los que al hacer contacto con el agua cierran el circuito y acusan claramente en la aguja del miliamperímetro.

Con este procedimiento se detecta con exactitud y rapidez la napa de agua. Antes de hacer las medidas es conveniente comprobar si el piezómetro está en condiciones de trabajo.

La manera más sencilla de comprobar el piezómetro es agregando agua al interior de éste y tomar el tiempo de filtración; si éste es rápido y no logramos llenar el tubo, comprobaremos fehacientemente que el aparato de medición del nivel freático (piezómetro) está en condiciones normales de trabajo.

#### 17.4. Lugar de colocación de los Piezómetros :

Para controlar el nivel freático es necesario colocar varios piezómetros en una línea recta, distantes más o menos 25 metros uno de otro tratando que algunos queden en el interior del tranque (finos) y los otros en el interior del muro de contención (gruesos).

#### 17.5. Objetivos de los Piezómetros

El objetivo de los piezómetros es poder establecer el nivel freático del tranque. El nivel freático es muy importante de controlar porque nos indica si la napa de agua está baja o en su defecto tuviéramos el nivel de la napa alto; si



ésto sucediera nos obligaría a tomar medidas inmediatas para subsanar el problema ya que el muro estaría en serio peligro de saturarse de agua, por lo tanto reblandecería el muro de contención lo que haría peligrar la estabilidad del tranque.

**PIEZOMETRO**

18. TOMA DE DENSIDADES IN-SITU EN DIFERENTES PARTES DEL SECTOR EXTERNO DEL TALUD DEL MURO DE CONTENCIÓN

Para esta prueba se describirán dos métodos para llevarlos a cabo, el primero es un medidor de volumen Soiltest Modelo CN 980 que es un instrumento de lectura directa que permite efectuar mediciones de densidad In-situ de suelos, ya sea en terreno o en laboratorio.

Y un segundo método que nos permite obtener la densidad In-Situ del terreno al contar con una serie de elementos, que posteriormente se describirán.

18.1. Método A

Descripción del aparato para medir volumen:

Consta de un cilindro graduado que va montado a presión en un base que tiene una perforación en el centro por donde cae el globo que se introduce en la cavidad hecha de antemano en el suelo que se va a medir la densidad; esta base también tiene una válvula por donde se insufla aire para efectuar la medición, el aire llega al tubo por una varilla respiradero de bronce que alcanza hasta el tope del tubo calibrado. El aire es insuflado por una bomba de goma de doble efecto que se acopla en la válvula. Este aparato se coloca sobre una placa base que va colocada en posición nivelada sobre el material que se va a ensayar, esta placa tiene una abertura en el centro por donde se hace la excavación para efectuar la medición.



## 18.2. Calibración del Volúmetro

a) Colocar la placa base en una superficie plana. Instalar el volúmetro en dicha placa base. Instalar la bomba de goma en su acoplamiento respectivo de tal modo que se produzca presión en el cilindro al actuar.

b) Abrir la válvula de control y bombear con la bomba de goma hasta que el nivel de agua en el cilindro graduado haya alcanzado su punto más inferior. El volúmetro debe ser sujetado firmemente, presionando hacia abajo durante esta operación. Anotar el volumen indicado en el cilindro graduado; ésta es la lectura base inicial.

c) Quitar la bomba de goma, girando el collarín en su acoplamiento. Invertir la posición de la bomba en  $180^{\circ}$  e introducir el extremo del vacío en el acoplamiento. Bombear el globo dentro del cilindro y cerrar la válvula de control. El volúmetro está listo para efectuar medidas de densidad.

## 18.3. Forma de efectuar la medición

a) Se nivela el lugar donde va a ser medida la densidad.

b) Se coloca la placa en posición nivelada sobre el material que va a ser ensayado, excavar a través de la abertura de la placa hasta una profundidad deseada, se guarda el material extraído en un depósito hermético para evitar la pérdida de humedad.

c) Instalar el volúmetro en la placa base; abrir la



válvula de control y bombear el globo dentro de la cavidad manteniendo firme y presionando el volúmetro mientras se bombea. Anotar el nivel inferior alcanzado por el agua en el cilindro.

d) Invertir la bomba y bombear el globo dentro del cilindro.

e) Hacer la diferencia entre la lectura base inicial y la lectura final. Este es el volumen de la cavidad expresado en centímetros cúbicos o pies cúbicos.

f) Pesar la muestra de arena extraída y después secarla; tendremos entonces un peso de la muestra húmeda y un peso de la muestra seca, lo que nos dará la oportunidad de saber la humedad en el momento de efectuar la medición.

g) Efectuar los cálculos de densidad basándose en el volumen de la cavidad y en el peso seco o húmedo según se requiera del material extraído.

h) Este aparato sólo sirve para suelos o materiales finos y blandos, especialmente en arenas de depositación.

#### 18.4. Ejemplo de Cálculo

Volumen de Medición	:	488,5 cc
Volumen de calibración	:	283,5 cc
Volumen de la cavidad	:	205,0 cc

#### 18.5. Pesos de la Muestra

Peso Húmedo	:	317 grs.
-------------	---	----------



Peso Seco	:	295 grs.
Peso Humedad	:	22 grs.
% de Humedad	:	6,94 grs.

### 18.6. Cálculo de la Densidad

El peso del material que se usa para calcular la densidad In-Situ es el peso seco.

$$\text{DENSIDAD} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}}$$

$$\text{DENSIDAD} = \frac{295 \text{ grs.}}{200 \text{ cc.}}$$

$$\text{DENSIDAD IN-SITU} = 1,44 \text{ grs/cc}$$

### 18.7. Método B

Se suministran los siguientes elementos:

a) Una cuchara de té.

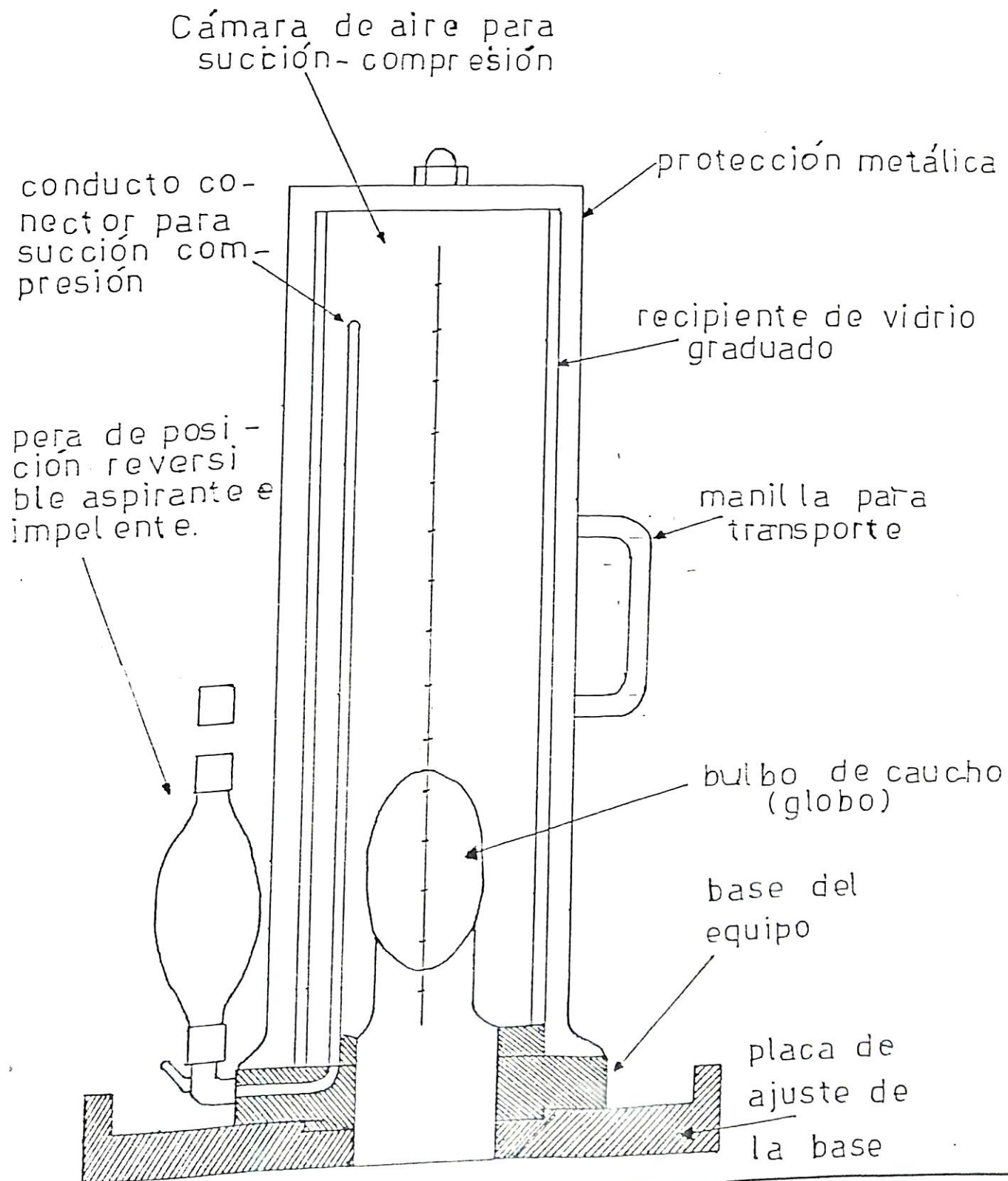
b) Un recipiente metálico de 400 cc. de capacidad y peso seco conocido (un tarro vacío de café instantáneo, mediano).

c) Una huincha metálica de medir.

d) Una hoja de papel de 20 x 20 cm. en cuyo centro ha sido extraído un disco de 4 cm. de radio.



MEDIDOR DE DENSIDAD IN-SITU SOIL-TEST:



e) Una probeta de un litro, graduado y que contenga 1000 cc. de arena totalmente bajo 48 mallas y totalmente sobre 60 mallas o alternativamente totalmente bajo 12 mallas y totalmente sobre 48 mallas.

f) Un embudo de punta de descarga con aproximadamente 1 cm de diámetro.

g) Un aro metálico de 15 cm de diámetro en fierro redondo de 1/4".

h) Una espátula.

#### 18.8. Desarrollo de la Prueba

1. Se aplica la hoja de papel en una superficie del talud suficientemente lisa para generar un razonable contacto con el papel, fijando los bordes con el peso del aro metálico de 15 cm. de diámetro centrado con el centro de la hoja de perforación central arriba descrita.

2. Se raspa cuidadosamente para calar un cilindro de la medida que da el papel (8 cm. de diámetro), rematando el calado en forma esférica y dando al cuerpo cilindro-esférico engendrado un alto total al centro de aproximadamente 10 cm. Todo el material que se saque se coloca en el interior del tarro, se tapa este recipiente y se etiqueta con la designación del punto en estudio.

3. Se llena el hueco practicado con la arena de la probeta graduada, que inicialmente contenía 1000 cc. de arena. Esta operación emplea el embudo suministrado más arriba, con la precaución de no tocar ningún costado del hoyo, a medida que



éste se llena.

4. Se completa raspando con espátula la superficie del talud empleando arena adicional de la probeta o devolviendo el exceso de arena a la probeta.

5. Se nivela la arena en la probeta y se lee una lectura final. Como la lectura inicial corresponde a 1000 cc. se determinaría con la diferencia el volumen exacto del hoyo practicado.

#### 18.9. Objetivos del Proceso

a) Conocer la densidad de depositación de las arenas gruesas en la formación del muro de contención.

b) Poder efectuar una comparación o relación con respecto a la prueba de densidad máxima y mínima para efectuar el cálculo de densidad relativa.

c) Para efectuar la relación con respecto a la prueba Proctor-Standard y poder calcular el porcentaje proctor.

#### 18.10. Resultados de esta prueba

Las experiencias que a continuación se exponen fueron realizadas usando el segundo método, y todas ellas practicadas a 1/3 de altura del muro resistente que conforma el tranque de relaves.

Cabe hacer notar que de esta prueba se llevó un control mensual, obteniéndose los siguientes resultados:



18.11. Primer punto en estudio, ubicado en la ladera sureste del prisma resistente

Volumen Original	: 1000 cc
Segundo Volumen	: 600 cc
Volumen In-Situ	: 400 cc
Peso volumen In-Situ	: 706 grs.
Peso Seco In-Situ	: 701 grs.
Peso Humedad	: 5,0 grs.
Porcentaje humedad	: 0,708 %
Densidad In-Situ humeda	: 1,765 gr/cc
Densidad In-Situ Seca	: 1,752 gr/cc

18.12. Segundo punto en estudio, ubicado a 100 mts. de distancia del anterior

Volumen original	: 1000 cc
Segundo volumen	: 540 cc
Volumen In-Situ	: 460 cc.
Peso volumen In-Situ	: 796 grs.
Peso seco In-Situ	: 793 grs.
Peso humedad	: 3,0 grs.
Porcentaje humedad	: 0,376 %
Densidad In-Situ humeda	: 1,730 gr/cc
Densidad In-Situ seca	: 1,723 gr/cc.

18.13. Tercer punto en estudio, ubicado a 100 mts. de distancia del segundo siguiendo la línea de coronamiento

Volumen original	: 1000 cc.
Segundo volumen	: 542 cc.
Volumen In-Situ	: 458 cc.



Peso volumen In-Situ	:	790 grs.
Peso seco In-Situ	:	786 grs.
Peso humedad	:	4,0 grs.
Porcentaje de humedad	:	0,506 %
Densidad In-Situ humeda	:	1,784 gr/cc.
Densidad In-Situ seca	:	1,716 gr/cc

18.14.

Cuarto punto en estudio, ubicado a 100 mts. de distancia del anterior siguiendo la línea de coronamiento.

Volumen original	:	1000 cc.
Segundo volumen	:	580 cc.
Volumen In-Situ	:	420 cc.
Peso volumen In-Situ	:	750 grs.
Peso seco In-Situ	:	740 grs.
Peso humedad	:	10,0 grs.
Porcentaje de humedad	:	1,33%
Densidad In-Situ humeda	:	1,785 gr/cc.
Densidad In-Situ seca	:	1,761 gr/cc.



19. Toma de muestras en los mismos puntos de la densidad In-Situ para efectuar las siguientes pruebas de laboratorio.
- 19.1. Prueba de densidad mínima y densidad máxima
- 19.2. Prueba proctor standard 628 Método A
- 19.3. Equipo para efectuar la prueba
- a) Recipiente cilíndrico de volumen conocido.
  - b) Cuchara corriente (de comida).
  - c) Compactador.
- 19.4. Forma de efectuar prueba de densidad mínima
- a) Se sacan más o menos 12 a 15 kgs. de muestra en el mismo lugar donde se efectuó la medición de densidad In-Situ
  - b) Se seca la muestra y se disgrega tratando de eliminar los terrones que se forman al secarla.
  - c) Con la cuchara se echa lentamente la arena al cilindro hasta llenarlo tratando de ocupar la menos cantidad de arena posible; como su nombre lo indica hay que tratar de obtener la densidad mínima posible.
  - d) Se saca la muestra del cilindro y se pesa; se divide el resultado del peso por el volumen conocido del cilindro (1.057,57) obteniéndose con esta operación el resultado de densidad mínima.



e) Esta prueba se efectúa dos o tres veces para obtener un promedio de las densidades y llegar a un resultado lo más acercado a la realidad.

#### 19.5. Forma de efectuar prueba de densidad máxima

a) Se ocupa la misma muestra usada en la prueba de densidad mínima.

b) Se echa la arena al cilindro en dos o tres capas compactando cada una de ellas hasta llenar el aparato, la compactación se puede hacer con un peso o émbolo golpeando la arena para producir un agolpamiento de los granos y conseguir depositar el máximo posible de arena en el cilindro.

c) Se saca la muestra del cilindro y se pesa. El peso obtenido se divide por el volumen conocido del cilindro obteniéndose con esta operación el resultado de la densidad máxima.

d) Esta operación se efectúa dos o tres veces para obtener un promedio de la densidad y evitar con esto posibles errores.

#### 19.6. Objetivos del Proceso

a) Obtener los datos para efectuar el cálculo de la densidad relativa.

b) La densidad relativa tiene por objeto señalar una relación entre la densidad máxima que se puede obtener con una compactación artificial seca y la densidad In-Situ natural de depositación de las arenas gruesas en el muro de contención.



19.7. Fórmula para calcular la densidad relativa

$$DR = \frac{D_{MAX} (D_{IN-SITU} - D_{MIN})}{D_{IN-SITU} (D_{MAX} - D_{MIN})} \times 100$$

donde:

DR : Densidad Relativa  
 DMAX : Densidad Máxima  
 DMIN : Densidad Mínima

Para esta prueba se considera una densidad relativa aceptable cuando los resultados nos dan un porcentaje mayor de 60% de densidad relativa.

Este resultado nos hace pensar que el muro de contención en cuanto a su compactación natural da seguridad de firmeza y no se necesitaría de agentes mecánicos para efectuar una compactación artificial posterior para asegurar la eficiencia del muro de contención.

19.8. Desarrollo de estas experiencias

Usando un cilindro de volumen 1.057,57 cc. y basándose nos en las densidades In-Situ obtenidas en la prueba anterior, para efectuar los cálculos de la densidad relativa; los resultados son los siguientes:

$$\text{PRIMERA EXPERIENCIA DENSIDAD MIN} = \frac{1524}{1.057,57} = 1,441 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{SEGUNDA EXPERIENCIA DENSIDAD MIN} = \frac{1557}{1.057,57} = 1,472 \text{ gr/cc.}$$



$$\text{TERCERA EXPERIENCIA DENSIDAD MIN} = \frac{1524}{1.057,57} = 1.458 \text{ gr/cc.}$$

Promediando estas densidades tendremos que:

$$\text{DENSIDAD MINIMA} = 1,457 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{PRIMERA EXPERIENCIA DENSIDAD MAX} = \frac{1925}{1.057,57} = 1.820 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{SEGUNDA EXPERIENCIA DENSIDAD MAX} = \frac{1947}{1.057,57} = 1,841 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{TERCERA EXPERIENCIA DENSIDAD MAX} = \frac{1935}{1.057,57} = 1.830 \text{ gr/cc.}$$

Promediando estas densidades tendremos que:

$$\text{DENSIDAD MAXIMA} = 1,830 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{DR} = \frac{1,830 (1,765 - 1,457)}{1,765 (1,830 - 1,457)} \times 100$$

$$\text{DR} = 85,6 \%$$

Sabiendo que la densidad In-Situ del terreno del primer punto en estudio es de 1,765 gr/cc., tendríamos entonces una densidad relativa para ese mismo punto de 85,6%.



## 19.9. Experiencias del segundo punto en estudio

$$\text{PRIMERA EXPERIENCIA DENSIDAD MIN} = \frac{1450}{1.057,57} = 1,371 \text{ gr/cc}$$

$$\text{SEGUNDA EXPERIENCIA DENSIDAD MIN} = \frac{1473}{1.057,57} = 1,392 \text{ gr/cc}$$

$$\text{TERCERA EXPERIENCIA DENSIDAD MIN} = \frac{1466,8}{1.057,57} = 1,387 \text{ gr/cc}$$

Promediando estas densidades tendremos que:

$$\text{DENSIDAD MINIMA} = 1,383 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{PRIMERA EXPERIENCIA DENSIDAD MAX} = \frac{1960}{1.057,57} = 1,853 \text{ gr/cc}$$

$$\text{SEGUNDA EXPERIENCIA DENSIDAD MAX} = \frac{1958}{1.057,57} = 1,851 \text{ gr/cc}$$

$$\text{TERCERA EXPERIENCIA DENSIDAD MAX} = \frac{1908}{1.057,57} = 1,804 \text{ gr/cc.}$$

Promediando estas densidades tendremos que:

$$\text{DENSIDAD MAXIMA} = 1,836 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{DR} = \frac{1,836 (1,730 - 1,383)}{1,730 (1,836 - 1,383)} \times 100$$

$$\text{DR} = 81 \%$$



Tendremos entonces para el segundo punto en estudio una densidad relativa de 81%.

#### 19.10. Experiencias del tercer punto en estudio

$$\text{PRIMERA EXPERIENCIA DENSIDAD MIN} = \frac{1520}{1.057,57} = 1,43 \text{ gr/cc}$$

$$\text{SEGUNDA EXPERIENCIA DENSIDAD MIN} = \frac{1526}{1.057,57} = 1,44 \text{ gr/cc}$$

$$\text{TERCERA EXPERIENCIA DENSIDAD MIN} = \frac{1518}{1.057,57} = 1,43 \text{ gr/cc}$$

Promediando estas densidades tendremos que:

$$\text{DENSIDAD MINIMA} = 1,43 \text{ gr/cc}$$

$$\text{PRIMERA EXPERIENCIA DENSIDAD MAX} = \frac{1910}{1.057,57} = 1,80 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{SEGUNDA EXPERIENCIA DENSIDAD MAX} = \frac{1900}{1.057,57} = 1,79 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{TERCERA EXPERIENCIA MAX} = \frac{1880}{1.057,57} = 1,77 \text{ gr/cc.}$$

Promediando estas densidades tendremos que:

$$\text{DENSIDAD MAXIMA} = 1,78 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{DR} = \frac{1,78 (1,780 - 1,43)}{1,780 (1,78 - 1,43)} \times 100$$



$$DR = 100 \%$$

Tendremos entonces para el tercer punto en estudio una densidad relativa de 100%.

### 19.11. Experiencias del cuarto punto en estudio

$$\text{PRIMERA EXPERIENCIA DENSIDAD MIN} = \frac{1516}{1.057,57} = 1,43 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{SEGUNDA EXPERIENCIA DENSIDAD MIN} = \frac{1517}{1.057,57} = 1,43 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{TERCERA EXPERIENCIA DENSIDAD MIN} = \frac{1498}{1.057,57} = 1,41 \text{ gr/cc.}$$

Promediando estas densidades tendremos que:

$$\text{DENSIDAD MINIMA} = 1,42 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{PRIMERA EXPERIENCIA DENSIDAD MAX} = \frac{1941}{1.057,57} = 1,83 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{SEGUNDA EXPERIENCIA DENSIDAD MAX} = \frac{1989}{1.057,57} = 1,88 \text{ gr/cc.}$$

$$\text{TERCERA EXPERIENCIA DENSIDAD MAX} = \frac{1927}{1.057,57} = 1,82 \text{ gr/cc.}$$

Promediando estas densidades tendremos que:

$$\text{DENSIDAD MAXIMA} = 1,84 \text{ gr/cc.}$$

$$DR = \frac{1,84 (1,785 - 1,42)}{1,785 (1,84 - 1,42)} \times 100$$



$$DR = 89,58\%$$

Sabiendo que la densidad In-Situ del terreno del cuarto punto en estudio es de 1,785 gr/cc., tenemos entonces una densidad relativa para este mismo punto 89,58%.

19.12. Prueba Proctor Standard 628 Método A.

19.13. Equipo para efectuar la prueba

a) Un cilindro de volumen conocido (1057,57 cc.) tapado en un extremo con una tapa desarmable.

b) Un sobre-cilindro que se acopla al primero.

c) Un compactador cuya cabeza de golpe tiene 2,57 kg. y cuya carrera es de 30,5 cm.

La tapa lleva dos varillas con hilos que permiten fijar por medio de mariposas el cilindro y el sobre-cilindro dejando el aparato en condiciones de efectuar la prueba.

19.14. Modo de efectuar la prueba

a) Se sacan más o menos 15 a 20 kgs. de arena del mismo lugar donde se efectuó la medición de densidad In-Situ.

b) Se divide la muestra en porciones de 2,5 kg. y se depositan en palanganas; deben ocuparse 6 a 7 porciones para efectuar la prueba.

c) Se toma la primera palangana y se le agrega una cantidad conocida de agua.



d) Se revuelve bien la arena con el agua.

e) Se vacia un poco de arena más o menos  $1/3$  del volumen del cilindro, dentro del mismo.

f) Se compacta la muestra dándole 25 golpes de caída libre con la cabeza del compactador.

g) Se vacia otra porción de arena hasta completar más o menos  $2/3$  del volumen del cilindro y sobre-cilindro.

h) Se vuelve a compactar en la misma forma que la anterior.

i) Se vacia la tercera porción de arena hasta completar casi el volumen del cilindro y sobre-cilindro.

j) Se saca el sobre-cilindro.

k) Se elimina la arena que quede demás sobre el cilindro dejando éste enrasado con la boca superior del cilindro.

l) Se saca la arena compactada que queda en el cilindro; se pesa la muestra y se anota su resultado.

m) Se coloca la muestra a secar y se pesa después de secada.

n) Con estos datos de peso húmedo y peso seco de la muestra podemos calcular la humedad de trabajo de la compactación.

Esta operación se repite 5 a 6 veces agregando en



cada oportunidad más agua que la anterior hasta encontrar un punto en que la densidad húmeda en vez de subir, baje lo que nos indicará que la arena ha sido compactada con una humedad óptima y que al agregar más agua se produciría una saturación de la arena que haría bajar de inmediato la densidad de compactación.

Este tipo de control de las arenas tiene como objeto principal al igual que en la prueba de densidad mínima y máxima hacer una relación entre la densidad In-Situ natural del terreno y la densidad máxima que se puede conseguir con una compactación artificial. Esta relación se expresa en porcentajes y se efectúa de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\% \text{ PROCTOR} = \frac{\text{DENSIDAD IN-SITU}}{\text{DENSIDAD MAX PROCTOR}} \times 100$$

Desarrollo de esta Prueba:

Una vez pesadas las porciones en sus respectivas palanganas o bandejas se agregan las siguientes proporciones de agua a cada palangana.

Palangana Nº 1	2,5 Kilos de arena más 75 cc de agua.
Palangana Nº 2	2,5 Kilos de arena más 150 cc de agua.
Palangana Nº 3	2,5 Kilos de arena más 300 cc de agua.
Palangana Nº 4	2,5 Kilos de arena más 600 cc de agua.



## 19.15. Primera Prueba Proctor

MUESTRA N°1:

	Pesos del volumen de 1.057,57	Densidad directa
1ª Palangana:		
Peso húmedo	1.948 grs.	1.84 gr/cc.
Peso seco	1.879 grs.	1,77 gr/cc.
Peso Humedad	69,0 grs.	-----
% Humedad	3,54 %	3,54 %
2ª Palangana:		
Peso húmedo	2049 grs.	1,93 gr/cc.
Peso seco	1922 grs.	1,81 gr/cc.
Peso Humedad	127,0 grs.	-----
% Humedad	6,19 %	6,19 %
3ª Palangana:		
Peso húmedo	2149 grs.	2,032 gr/cc.
Peso seco	1929 grs.	1,82 gr/cc.
Peso humedad	220,0 grs.	-----
% humedad	10,23 %	10,23 %
4ª Palangana:		
Peso húmedo	2142 grs.	2,025 gr/cc.
Peso seco	1770 grs.	1,67 gr/cc.
Peso humedad	372,0 grs.	-----
% humedad	17,36	17,36

Si se comparan estos resultados veremos que en la palangana N°3 con una humedad de 10,23% obtenemos una densidad máxima de compactación seca de 1,82 gr/cc. y que al agregar



más agua en la cuarta palangana la densidad húmeda baja inmediatamente lo que nos indica que en la tercera palangana nos estamos acercando a los valores máximos que buscamos.

Tendremos para este caso un % Proctor de:

$$\% \text{ Proctor} = \frac{1,752}{1,82} \times 100$$

$$\% \text{ Proctor} = 96,26 \%$$

Recordando que la densidad In-Situ obtenida en el primer punto de estudio es de 1,752 gr/cc., el porcentaje Proctor por lo tanto para ese mismo punto será de 96,26%.

### 19.16. Segunda Prueba Proctor

#### MUESTRA Nº2:

#### 1ª Palangana:

Pesos del Volumen  
de 1.057,57

Densidad directa

Peso húmedo	1937 grs.	1,83 gr/cc.
Peso seco	1884 grs.	1,78 gr/cc.
Peso humedad	53,0 grs.	-----
% humedad	2,73 %	2,73 %

#### 2ª Palangana:

Peso húmedo	2033 grs.	1,922 gr/cc.
Peso seco	1920 grs.	1,815 gr/cc.
Peso humedad	113,0 grs.	-----
% humedad	5,55 %	5,55%



## 3ª Palangana:

Peso Húmedo	2143 grs.	2,026 gr/cc.
Peso seco	1922 grs.	1,817 grs.
Peso humedad	221,0 grs.	-----
% humedad	10,31 %	10,31 %

## 4ª Palangana:

Peso húmedo	2140 grs.	2,023 gr/cc.
Peso seco	1880 grs.	1,77 gr/cc.
Peso humedad	260,0 grs.	-----
% humedad	12,14 %	12,14 %

Al igual que en la prueba anterior vemos que los valores máximos buscados corresponden a la tercera bandeja y que al agregar más agua a la cuarta palangana estos bajan de inmediato.

De acuerdo a la segunda densidad In-Situ obtenida tendremos para esta segunda prueba un porcentaje Proctor de:

$$\% \text{ PROCTOR} = \frac{1,72}{1,817} \times 100$$

$$\% \text{ PROCTOR} = 94,66 \%$$

## 19.17. Tercera Prueba Proctor

MUESTRA N°3:

## 1ª Palangana:

	Pesos del Volumen de 1.057,57	Densidad directa
Peso húmedo	1930 grs.	1,824 gr/cc.



Peso seco	1876 grs.	1,77 gr/cc.
Peso humedad	54,0 grs.	-----
% humedad	2,79 %	2,79 %
2ª Palangana:		
Peso húmedo	2028 grs.	1,917 gr/cc.
Peso seco	1918 grs.	1,813 gr/cc.
Peso humedad	110,0 grs.	-----
% humedad	5,42 %	5,42 %
3ª Palangana:		
Peso húmedo	2140 grs.	2,02 gr/cc.
Peso seco	1922 grs.	1,917 gr/cc.
Peso humedad	218,0 grs.	-----
% humedad	10,18 %	10,18 %
4ª Palangana:		
Peso húmedo	2130 grs.	2,01 gr/cc.
Peso seco	1867 grs.	1,76 gr/cc.
Peso humedad	263 grs.	-----
% humedad	12,34 %	12,34 %

Si comparamos los resultados de esta tercera prueba veremos que en la palangana Nº3 con una humedad de 10,18% obtenemos una densidad máxima de compactación húmeda de 2,02 gr/cc. Y que al agregar más agua en la 4ª palangana podemos ver que la densidad húmeda baja inmediatamente lo que nos indica que en la tercera palangana hemos encontrado los valores máximos que buscamos.



De acuerdo a la densidad In/situ del terreno del tercer punto en estudio, tendremos que para esta prueba el siguiente % Proctor.

$$\% \text{ Proctor} = \frac{1,71}{1,817} \times 100$$

$$\% \text{ Proctor} = 94,11 \%$$

### 19.18. Cuarta Prueba Proctor

#### Muestra N°4:

##### 1ª Palangana:

	Pesos del volumen de 1.057,57	Densidad directa
Peso húmedo	1970 grs.	1,862 gr/cc.
Peso seco	1884 grs.	1,781 gr/cc.
Peso humedad	86,0 grs.	-----
% humedad	4,36 %	4,36 %

##### 2ª Palangana:

Peso húmedo	2110 grs.	1,90 gr/cc.
Peso seco	1891 grs.	1,78 gr/cc.
Peso humedad	191 grs.	-----
% humedad	9,50 %	9,5 %

##### 3ª Palangana:

Peso húmedo	2143 grs.	2,026 gr/cc.
Peso seco	1922 grs.	1,817 gr/cc.
Peso humedad	243 grs.	-----
% humedad	11,39 %	11,39 %



## 4ª Palangana:

Peso húmedo	2088 grs.	1,97 gr/cc.
Peso seco	1699 grs.	1,60 gr/cc.
Peso humedad	389 grs.	-----
% humedad	18,63 %	18,63%

Al igual que las pruebas anteriores podemos ver que en esta cuarta prueba, los valores máximos buscados se encuentran en la palangana N°3. Con la densidad In-Situ del terreno del cuarto punto en estudio tendremos un % Proctor:

$$\% \text{ Proctor} = \frac{1,76}{1,817} \times 100$$

$$\% \text{ Proctor} = 96,86\%$$

Según el Servicio de Minas del Estado, el porcentaje favorable del Proctor debe ser superior a 93%. Esta cifra nos daría una tranquilidad en cuanto a la operación del tranque.

