

**Universidad Nacional de Ingeniería**

**PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA GEOLOGICA,**

**MINERA Y METALURGIA**



**APLICACION DE OPERACIONES METALURGICAS  
PARA RELLENO HIDRAULICO**

**T E S I S**

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE

**INGENIERO METALURGISTA**

**FERREOL ROJAS MOROTE**

**PROMOCION 1967**

**LIMA ★ PERU ★ 1975**

## S U M A R I O

Págs.

INTRODUCCION

CAPITULO I

GENERALIDADES

Ubicación, Características Geológicas de la Mina, Desarrollo, Métodos de Minado, Tratamiento del Mineral, Descripción, Ventajas y Desventajas del Relleno Hidráulico.

6

CAPITULO II

CARACTERISTICAS DEL RELAVE

Relave disponible para el Relleno Hidráulico, Determinación de los Pesos específicos de los Sólidos, Densidad de Pulpa, Porcentajes de Sólidos al Volúmen, Porcentajes de Sólidos al Peso, Cálculos del Tonelaje de Sólido en el Relave, Volúmen de Agua en el Relave, Peso de la Pulpa del Relave, Volúmen de los Sólidos y de la Pulpa del Relave.

22

CAPITULO III

CARACTERISTICAS DEL RELAVE  
(CONTINUACION)

Granulometría, Tamizado, Clasificación Granulométrica por Sedimentación. Composición mineralógica del Relave, Pruebas de Percolación.

30

CAPITULO IV

CLASIFICACION EN HIDROCICLON

52

CAPITULO V

CUBICACION DE LA MINA Y CANTIDAD DE RELLENO REQUERIDO

67

Cubicación de la Mina, Cantidad de Relleno Hidráulico requerido

		Págs.
	Determinación de la gravedad Es pecífica del Mineral In-situ.	
CAPITULO VI	SELECCION, CAPACIDAD MAXIMA E - INSTALACION DEL HIDROCICLON Selección, Cálculo de la Capaci dad Máxima, Instalación, Cálcu lo del Caudal de Alimentación - pra la nueva altura.	74
CAPITULO VII	APLICACION DE LA ECUACION DE - FUERZA DEL CONO Procedimiento para determinar - los diámetros del apex y Vortex	81
CAPITULO VIII	PRUEBAS DE SELECCION DEL APEX A PROPIADO PARA EL HIDROCICLON Pruebas con Apex de 2 pulgadas de diámetro, Pruebas con Apex - de 1 1/2 pulgadas de diámetro, Aplicación de las Curvas Gaudin- Schumman para el Hidrociclón, - Cálculo de Recuperaciones-Rep resentación de las Curvas Trompo o de eficiencia de un Hidrociclón.	91
CAPITULO IX	EVALUACION DE LA CALIDAD DEL RE LLENO Coeficiente de Uniformidad, Den sidad In-situ de un Relleno, De terminación Experimental, Razón de Poros de un Relleno, Angulo de fricción interna y Cohesión de un Relleno.	125
CAPITULO X	TRANSPORTE DE RELLENO HIDRAULI- CO Pruebas de Velocidad Crítica, -	159

**Procedimiento de la prueba.**

<b>CAPITULO XI</b>	<b>DETERMINACION TEORICA DE LA - DENSIDAD IN-SITU DE UN RELLENO</b>	<b>176</b>
<b>CAPITULO XII</b>	<b>SIMULACION DEL RELLENO</b>	<b>180</b>
<b>CONCLUSION</b>		<b>186</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>191</b>



## INTRODUCCION

Dentro de la Minería Nacional, son varios los centros mineros que vienen utilizando progresivamente como material de relleno de sus explotaciones mineras, el Relleno Hidráulico, como sustituto del clásico Relleno de Grava seca.

En el sistema de Relleno Hidráulico, tal como en la actividad desarrollada se puede apreciar que requiere de la asistencia de estudios experimentales, incluyendo conocimientos científico-técnicos que permitan transformar esta actividad minera, en una disciplina de carácter científico, con sus propios enunciados de validez general.

Nuestro Instituto contemplando tal situación, mediante su dirección de Investigación y Desarrollo y dentro de la Actividad de Investigaciones Fundamentales, ha considerado el programa de Mecánica de Fluidos y siendo parte de ella - los estudios de orden experimental sobre Relleno Hidráulico.

Para traducir en obra lo planeado, se confeccionó y firmó el Convenio entre INCITEMI y la COMPAÑIA MINERA ATACUCHA, para quien el estudio experimental de la calidad y cantidad de relleno es de suma importancia. El lugar de experimentación de este trabajo, es el Campamento de Chicrín, usando el material de los relaves de la Planta Concentradora No. 2.

He aquí, la presente exposición del informe, cabal resultado de la valiosa colaboración del personal de la Compañía Minera Atacocha y de los esfuerzos desplegados por el personal de INCITEMI.

## CAPITULO I

### GENERALIDADES

#### 1.1.0. UBICACION GEOGRAFICA DE LA MINA

La Compañía Minera Atacocha S.A., tiene sus minas en el Distrito de Yanacancha, provincia de Pasco, Departamento de Pasco; abarcando un área de 30 Kilómetros cuadrados y a unos 15 kilómetros al Nor-Este de la ciudad de Cerro de Pasco, a una latitud de 4,000 metros sobre el nivel del mar y es accesible por la carretera central.

La ubicación geográfica es:

Longitud	76° 14' W
Latitud	10° 35' S

Esta ubicación muestra en el mapa de la Figura No. 1

#### 1.1.1. VIAS DE ACCESO

A la ciudad de Cerro de Pasco se puede llegar por ferrocarril o por carreteras; la Central y la que pasa por Canta uniendo ésta a la primera en Ricrán.

Para llegar a las propiedades de la Compañía, se parte de Cerro de Pasco, siguiendo las carreteras que van a Huánuco ya sea por la carretera antigua que desciende por la Quebrada de Pucayacu o por el nuevo trazo. Ambas carreteras se unen en la Quinua; antes de llegar a Chicrín que dista, por la antigua 18 Km. y por la nueva que no ingresa a Cerro de Pasco 23 Km.; siguiendo ésta hacia Huánuco, a 9 Km.; de Chicrín se encuentra Chaprin; para llegar a la mina Atacocha de Chicrín, se sube por la Quebrada de Chicrín, distan-

te 7 Kms.; o por la carretera antigua, que a la altura del Kilómetro 338 (San Miguel), hay un desvío hacia la mina, distante 15 Kms.

### 1.1.2. CAMPAMENTOS

1.1.2.1. Chicrín.- Es el sitio donde se encuentra la Concentradora No. 1 y No. 2 y Oficina de la Superintendencia; contando ésta también con personal necesario, Campamento, Talleres, etc. Este campamento se encuentra en una cota sobre el nivel del mar de 3,500 mts.

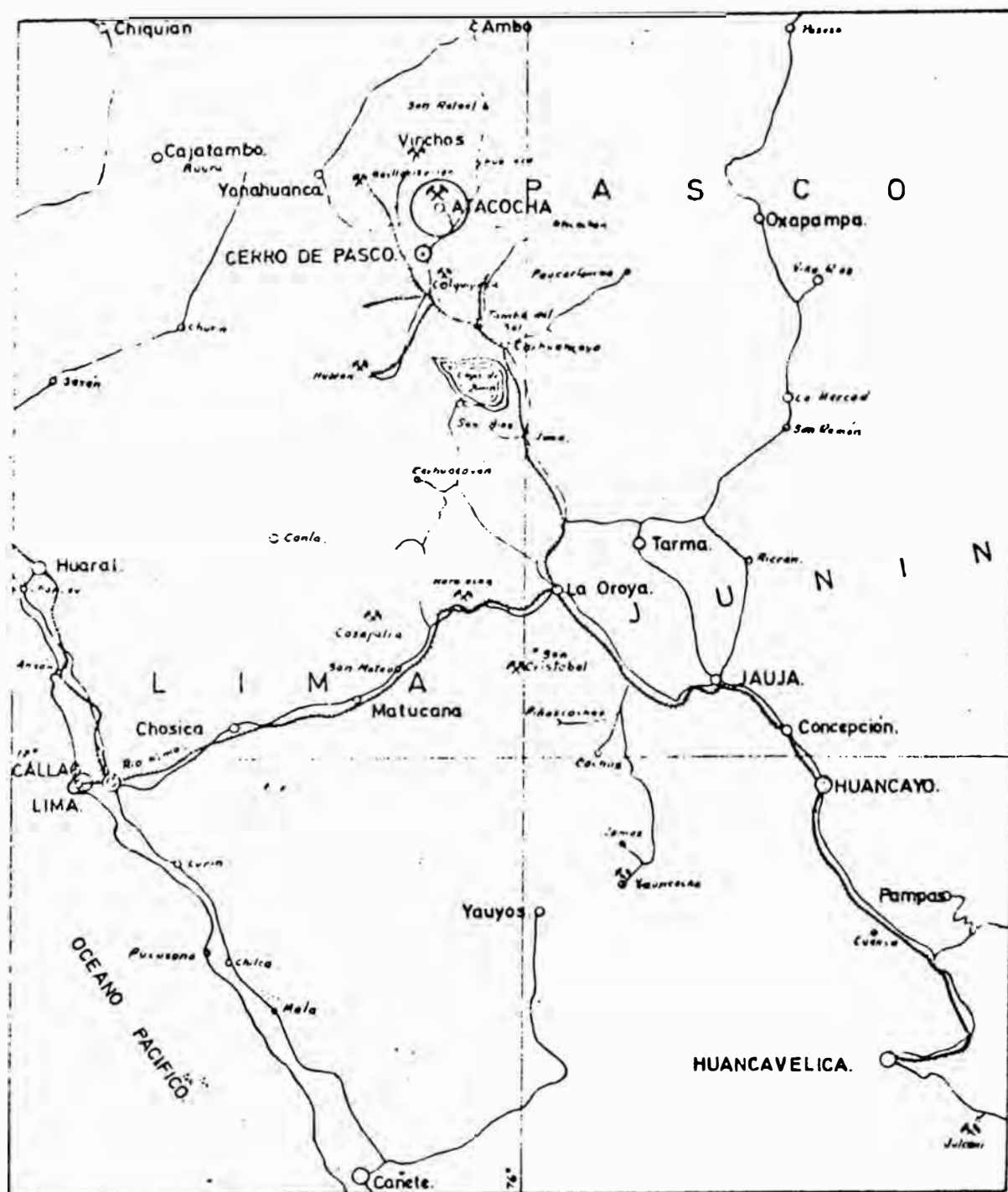
1.1.2.2. Chaprín.- Lugar donde se encuentra la Planta Hidroeléctrica y un Club de recreo para empleados; esta zona, también tiene los campamentos necesarios para el personal que labora en ésta. Dicho lugar se encuentra a una cota de 3,100 metros sobre el nivel del mar.

1.1.2.3. ATACOCHA.- Donde se encuentran las minas y todo lo necesario para el trabajo de éstas; como son el personal, campamentos para éstos, talleres, oficinas, maquinarias, etc.

La Mina Atacocha se encuentra dividida en tres secciones; cuyas cotas de los niveles están dados con respecto al nivel del mar.

La sección 1, que comprende los niveles 4263 hasta el 4103; la sección 2 del nivel 4048 hasta el 3,900 y la sección 3, que es la más importante del nivel 3,840 hasta 3,600.

La mina Santa Bárbara, ubicada al S.E. y a



Escala: 1:1750000

MAPA DE UBICACION  
REGION DE ATACOCHA

un kilómetro de la principal Atacocha; comprende los niveles 4262, 4218 y 4095.

## 1.2. CARACTERISTICAS GEOLOGICAS DE LA MINA

La sección estratigráfica que aflora en la Mina Atacocha, comprende desde el grupo MITU (Permiano-superior) hasta la formación Machay (Aptiano-Albino), las que se encuentran distorsionadas por el tectonismo e intrusiones ígneas (dacita-porfiríca). El metamorfismo de contacto producido por éstas intrusiones sobre las calizas se manifiesta en la recristalización y silicatación (Zona de Skarn) y la transformación parcial de la arenisca en cuarcita. Finalmente soluciones hidrotermales dieron lugar a la deposición de los sulfuros metálicos.

La estructura mas saltante es el flanco, éste es un anticlinal ubicado entre Atacocha y Chicrín.

Se observa también un sinclinal asimétrico en las areniscas y chet al Oeste de Atacocha.

Dichos plegamientos están separados por la falla Atacocha, que es una falla regional de rumbo norte-sur y se extiende por varios kilómetros.

El contacto caliza-arenisca, está marcado por la Falla 1 que es una Falla inversa asociada a la Falla Atacocha y parece constituir el principal control de la mineralización en el yacimiento.

El S.W. del área, al piso de la Falla 1, se presenta la Falla 13 con rumbo NW-SE y buzeando al N.E., la cual ha sido una zona favorable para la deposición de los sulfuros constituyendo el ORE-BODY 13, que es un cuerpo de reemplazamiento. En el techo de dicha Falla 1,

también están emplazadas varias vetas y cuerpos de reemplazamientos (ore-bodies), algunas de las cuales cruzan hasta las areniscas, pero con menor potencia. En el contacto caliza-arenisca se encuentra emplazado el ore-body 9.

La mina del yacimiento está constituida por galena argentífera y esfalerita; en menor proporción se presentan la chalcopirita, con poca frecuencia se encuentra tetraedrita y tenantita.

Los minerales de ganga más frecuentes son la pirita, calcita, cuarzo, fluorita, rodocrosita, rejalgar y numeros silicatos (serpentina, wollastonita, granate, epidota, etc.).

La mineralogía del distrito mineral, como su zoneamiento y paragénesis, indican que en su formación prevalecieron condiciones de moderada baja temperatura y presión, por lo que, el depósito puede ser clasificado como leptotermal.

### 1.2.1. GEOLOGIA DE LOS YACIMIENTOS MINERALES DE ATACOCCHA

#### 1.2.1.1. TIPOS Y FORMAS DE LOS DEPOSITOS

Los yacimientos en el distrito minero de Atacocha se presentan en dos tipos: Cuerpos de reemplazamiento y vetas.

A.-Cuerpos de reemplazamiento.- Es el relacionado a fracturas de tensión y de cizalla que corresponde al ore-body Santa Bárbara y a los catorce ore-bodies exceptuando el ore-body 9, que es controlado por el contacto

caliza-arenisca. Damos una somera explicación del ore-body 13 en cuanto a su magnitud y potencia en los diferentes niveles que se está explotando actualmente.

A.1. Ore-Body 13.- Este depósito está comprendido en los cuerpos de reemplazamiento y rellenando una fractura de tensión dentro de las calizas del grupo Pucará conocida como Falla 13. En superficie el ore-body, 13, muestra pequeños afloramientos de 30 á 50 mts. con una potencia de 2 á 3 mts., debido a que la erosión fue intensa, que no dió lugar a la formación de zonas oxidadas.

Las longitudes y potencias del ORE-BODY 13, en los diferentes niveles se muestra en el Cuadro No. 1 que se muestra enseguida:

NIVELES (MSNM)	LONGITUD (Mts.)	POTENCIA (Mts)
4230	150	0.5 á 1
4180	230	1 á 1.5
4103	270	1 á 2
4048	270	2 á 2.5
4000	175	2 á 2.5
3935	200	1 á 2
3900	270	1 á 2
3840	400	1 á 2
3775	500	2 á 3.5
3715	800	4 á 20

NIVELES (MSNM)	LONGITUD (Mts.)	POTENCIA (Mts)
3655	400	2 á 4
3600	10	2 á 4

CUADRO No. 1.- Longitud y potencia por niveles del ORE-BODY 13.

B.- Vetas.- Dichos depósitos mineralizados están rellenoando una fractura - de tensión localizada, entre la Falla 1 y la Falla 2, estando sus rocas encajonantes constituidas por las areniscas de la formación Goyllarisquiza, no aflorando en superficie. Su magnitud y potencia por niveles se muestra en el Cuadro No. 2.

NIVELES (M.S.N.M.)	LONGITUD (Mts)	POTENCIA (mts)
4000	50	0.5 á 1
3970	70	0.5 á 1
3935	100	0.8 á 1
3900	100	0.8 á 1.2
3870	100	0.8 á 1.2
3840	125	0.8 á 1.2
3805	110	1 á 1.5
3775	100	1 á 1.5
3715	125	1 á 1.5
3655	150	1 á 1.5

CUADRO No. 2.- Longitud y potencia por niveles de veta prima.



COLUMNA ESTRATIGRAFICA DE  
LA REGION ATACOCHA

Fig.2

EDAD	SIMB.	FORMACION	DESCRIPCION LITOLOGICO	POTENCIA EN Mts.
CUATERNARIO	Qal.		MATERIAL DE DESECHOS DE PENDIENTE Y DESLIZAMIENTO	5-10
TERCIARIO	Ti.	INTRUSIONES Y VOLCANICOS	PORFIDOS DACITICOS Y VOLCANICOS ANDESITICOS.	No determinado.
DISCORDANCIA				
CRETACICO INFERIOR	Kg.	FORMACION GOYLLARISQUIZGA.	ARENISCAS CUARCITAS DE COLOR BLANCO Y CHERT AMARILLENTO BRECHADO EN LA BASE.	100-150.
DISCORDANCIA				
JURASICO INFERIOR			CALIZAS CON CANTIDADES MENORES DE LUTITAS IN- TERESTRATIFICADAS	
		GRUPO	NODULOS SILICEOS PRE- SENTAN HORIZONTES FOSI- LIFEROS.	
TRIASICO SUPERIOR	JTrP.	PUCARA.	CONTACTO INFERIOR NO EXPUESTO.	1000-2100.

1.2.1.2. MINERALOGIA

La cantidad de minerales que se encuentra en el Distrito de Atococha es numerosa. Se da una selección de su mineralogía para cada estructura mineralizada. Se hace mención en el Cuadro No. 3.

Estructura Mineralizada	Minerales en orden de abundancia	Algunas Fórmulas Químicas
ORE-BODY 13	Galena Argentífera	$SP_6(Ag)$
	Esfalerita (Blenda)	$S Zn$
	Tetraedrita	$Sb_4S_{13}(Cu, Fe, Zn, Ag)_{12}$
	Chalcopirita	$S_2 CuFe$
	Oro	$Au$
	Cuarzo	$SiO_2$
	Pirita	$S_2Fe$
	Calcita y Fluorita	$CO_3Ca$ $F_2Ca$
ORE-BODY 9	Galena Argentífera	$S P_6(Ag)$
	Esfalerita (Blenda)	$SZn$
	Chalcopirita	$S_2CuFe$
	Tetraedrita	$Sb_1S_{13}(Cu, Fe, Zn, Ag)_{12}$
	Oro	$Au$
	Cuarzo	$SiO_2$
	Pirita y Calcita	$S_2Fe$ $CO_3Ca$
VETA PRIMA	Galena	$SP_6(Ag)$
	Esfalerita	$SZn$
	Tetraedrita	$Sb_4S_{13}(Cu, Fe, Zn, Ag)_{12}$
	Chalcopirita y Pirita	$S_2Cu Fe$ $S_2Fe$

Estructura Mineralizada	Minerales en orden de abundancia	Algunas Fórmulas Químicas
ORE-BODY SANTA BARBARA	Cuarzo y Calcita	Si O <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Ca
	Esfalerita (Blenda)	S Zn
	Galena	S Pb
	Chalcopirita	S <sub>2</sub> Cu Fe
	Rejalgar	S As
	Rodocrosita	CO <sub>3</sub> Mn
	Pirita y	S <sub>2</sub> Fe
	Cuarzo	Si O <sub>2</sub>

CUADRO No. 3.- Minerales en orden de abundancia dentro de la estructura mineralizada.

En su forma más genérica se muestra el Cuadro Mineralógico No. 4 del distrito de Atacocha, según la secuencia - de los minerales abundantes, comunes y raros dentro de los hipogénéticos, supergénéticos y paragenéticos.

**CUADRO No. 4.- Cuadeo mineralógico según su secuencia, hipogenética, supergenética y paragenética.**

GENESIS	Minerales Abundantes	Fórmula Química	Minerales Comunes	Fórmula Química	Minerales Raros	Fórmula Química
HIPOGE TICOS	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	Calcita	CO <sub>3</sub> Ca	Larcasita	S <sub>2</sub> Fe
	Pirita	S <sub>2</sub> Fe	Fluorita	F <sub>2</sub> Ca	Arsenopirita	S Fe As
	Esfalepita	S Zn	Rodocrosita	CO <sub>3</sub> Mn	Tenantita	As <sub>4</sub> S <sub>13</sub> (Cu, Fe, Zn, Ag) <sub>12</sub>
	Galena	SPb	Rejalgar	SAs	Chalcopirita	S <sub>2</sub> Cu Fe
	Yeso	SO <sub>4</sub> Ca2H <sub>2</sub> O	Cerargirita	SbS <sub>3</sub> Ag <sub>3</sub>	Limonita	Fe(OH)NH <sub>2</sub> O
	Cerusita	CO <sub>3</sub> Pb	Malquita	CO <sub>3</sub> Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>		
	Psilomelara	(BaH <sub>2</sub> O) <sub>2</sub> Mn <sub>5</sub> O <sub>10</sub>	Goslarita	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>		
	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>				
	Pirita	S <sub>2</sub> Fe				
	Chalcopirita	S <sub>2</sub> CuFe				
	Tetraedrita	Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub> (Cu, Fe, Zn, Ag) <sub>12</sub>				
	Esfalerita	SAn				
	Galena	SPb				
	Carbonatos	Grupo de Calcita Grupo de dolorita Grupo de aragonita				
	Oropimente	S <sub>3</sub> As <sub>2</sub>				
	Rejalgar y Fluorita	SAs F <sub>2</sub> Ca.				

## 1.2. DESARROLLO DE LA MINA (DATO DEL AÑO 1971)

En la mina Atacocha han tenido un desarrollo de 3,686 mets. por año, en promedio de los últimos tres años, realizados, en labores de exploración y desarrollo-preparación. Daremos más énfasis, referente a los niveles en cuya zona se realiza en presente estudio.

El relleno de grava seca actual se obtiene de dos fuentes que son:

A.- Desarrollo en roca estéril

B.- Depósito en superficie de morrenas

La cantidad de relleno obtenido por desarrollos tomando en cuenta que los niveles para éste son: Nivel 3840, Nivel 3775, Nivel 3715 y Nivel 3655.

Se tomaron en cuenta los niveles 4,000 y 3,900; porque el relleno se puede hacer llegar hasta el área, en estudio. Es necesario considerar también el nivel 3,600 y su ampliación por ser la zona futura.

A continuación se muestra un Cuadro No. 5 de los desarrollos promedios por año:

CUADRO No. 5.- Desarrollos por niveles:

NIVEL	GALERIAS-CRUCEROS (Mts/mes)	CHIMENEAS Mts/mes.
3,840	14.70	8.25
3,775	7.80	7.65
3,715	5.90	9.35
3,655	14.50	2.10
<b>T O T A L</b>	<b>42.90</b>	<b>27.35</b>
4,000	13.20	----
3,900	12.80	5.15
3,600	3.20	7.50
<b>T O T A L</b>	<b>29.20</b>	<b>12.65</b>

### 1.3.1. CALCULO DE LA CANTIDAD DE RELLENO POR DESARRO - LLOS

Galerías-Cruceros= $42.90 \times 1.83 \times 2.13 \times 1.9 = 317.7 \text{ TM.}$   
 Chimeneas  $= 27.35 \times 1.52 \times 1.52 \times 1.9 = 120.1 \text{ TM.}$   
 437.8 TM.

Galerías-Cruceros= $26.00 \times 1.83 \times 2.13 \times 1.9 = 192.6 \text{ TM.}$   
 Chimeneas  $= 5.15 \times 1.52 \times 1.52 \times 1.9 = 22.6 \text{ TM.}$   
 215.2 TM.

TOTAL =  $437.8 + 215.2 = 653.0 \text{ TM.}$

Estos cálculos han sido hechos considerando como sección de las galerías y cruceros 6'x7' y de las chimeneas 5'x5', y teniendo en cuenta que la densidad de éste tipo de relleno de  $1.9 \text{ TM/m}^3$ .

Si utilizamos sólo el relleno producido por las labores de explotación y desarrollo-preparación en la zona que se va a usar relleno hidráulico, tenemos disponibles un máximo de 653.00 TM.; para completar lo que falta se utiliza los dentri-  
tus de superficie.

### 1.4. METODOS DE MINADO

Los métodos usados en la Mina Atacocha son los siguientes:

- Corte y Relleno Ascendente
- Corte y Relleno con Cuadros
- Corte y Relleno con Cuadros Descendentes
- Acumulación Dinámica.

En la zona en estudio sólo se emplean los dos méto-

dos primeros y particularmente ambos combinados.

#### 1.5. TRATAMIENTO DEL MINERAL

El mineral para ser tratado en la planta concentradora No. 2, sale por el túnel principal de extracción o nivel 3,600, usándose para ésta, locomotoras General Electric de 8 y 4 toneladas métricas, capaces de transportar 60 y 30 toneladas por viaje. El mineral es transportado en carros de 55 pies, y recibe en dos sistemas de tolvas independientes:

A.- En seis tolvas de roca de 350 TM c/u.

B.- En cinco tolvas de madera de 100 TM c/u.

Por medio de fajas transportadoras independientemente alimentan a una chancadora de quijadas Taylor 15"x24". El producto triturado, después de pasar por cedazos vibratorios y dos chancadoras Symons, es acarreado por una faja de 24" y distribuido por medio de un tripper magensa a una de las cuatro tolvas metálicas de finos con una capacidad promedio de 180 TM c/u., que están provistas de sus respectivos feedometer hardinge.

Un sistema de fajas transportadoras hace posible que estas tolvas puedan alimentar cada una a un molino y en casos de emergencia se pueda alimentar de la tolva 3 al molino 4 ó viceversa; lo mismo, con el 1 y el 2.

Los molinos usados son cónicos de bolas hardinge 8'x60" en la sección molienda; actualmente, la planta concentradora tiene una capacidad máxima de 1,600 TM por día.

Los equipos de molienda y flotación de plomo son independientes, contando cada molino con su respectivo banco de celdas; siendo tratado en éstas, el over-flow del clasificador dorr duplex de 6'x21.8" que está en -

circuito cerrado con el molino.

El concentrado de los circuitos de plomo obtenido, va a uno de los cuatro espesadores denver de 35'x10' para después ser filtrados en un filtro de tambor oliver de 14'x8'. La humedad obtenida es de 8%.

El relave del circuito de plomo, pasa primero al acondicionador de zinc de 10'x10' y luego al circuito de flotación de aquí al espesador y de éste al filtro, saliendo con una humedad de 7%.

Existe un filtro de tambor oliver de 10'x8', para casos de emergencia o reparación del filtro de plomo o zinc.

Dos bombas de vacío ingersoll-rand, accionados por un motor de 100 HP c/u. proporcionan el vacío necesario, para la eficiente operación de los filtros.

Los reactivos que se usan en la flotación de plomo y zinc, son:

- Aerofloat No. 25
- Cianuro de Sodio
- Sulfato de Zinc
- Bicarbonato de Sodio (Flotación: Plomo-Cobre)
- Cal
- Sulfato de Cobre
- Xantato Z-14
- Z - 200

## 1.6 DESCRIPCIÓN DEL RELLENO HIDRAULICO

La introducción a la mina de los relaves de la concentradora se ha identificado tradicionalmente como relleno hidráulico. Si bien este es el caso más común, no



es el único, pues en algunas minas el material de relleno hidráulico, no es el relave, sino arenas glaciares u otro material granulado existentes en la naturaleza.

Lo que da el nombre de relleno hidráulico al relleno es la manera de transportarlo en forma de pulpa, por medio de tuberías. En nuestro caso se va a introducir material de relleno hidráulico previamente clasificado de los relaves de la planta concentradora No. 2.

La planta concentradora No. 2 se encuentra a una cota de 3,350 m.s.n.m. y se bombeará dicho relleno hidráulico hasta una cota de 3,840 m.s.n.m.

#### 1.6.1. VENTAJAS DEL RELLENO HIDRAULICO

Si se emplea relave la obtención del relleno es gratuita.

El transporte hidráulico en tuberías es más económico y veloz. Reduce el ciclo de minado y por ende aumenta la eficiencia.

No se requiere esparcir el relleno en el tajeo.

Se reduce la dilución del mineral en el relleno.

Ofrece alta resistencia al movimiento de las cajas.

Permite el método de explotación más eficientes.

#### 1.6.2. DESVENTAJAS DEL RELLENO HIDRAULICO

Requiere una inversión de capital que se tiene que justificar con una producción adecuada.

La introducción de agua a la mina puede crear - problemas de sostenimiento y bombeo.

La elevación de temperatura y producción del -  $SO_2$  pueden ser inconvenientes si no existiese una ventilación adecuada.

Los finos del relleno pueden ser arrastrados por el agua y depositados en las galerías y cunetas causando problemas en la limpieza de éstas.

Un sistema debidamente diseñado puede minimizar y hasta eliminar este problema.

## CAPITULO II

### CARACTERISTICAS DEL RELAVE

#### 2.0. RELAVE DISPONIBLE PARA EL RELLENO HIDRAULICO

##### 2.1.0. Determinación del peso específico de los sólidos del relave

Se empleó muestras de 24 horas del relave de la planta concentradora No. 2 de la Compañía Minera Atacocha obtenidas con un muestreador automático tomando como intervalo de tiempo de una hora, - durante una semana.

El procedimiento que siguió a diario fue con el método clásico de Arquímedes, que es el siguiente:

- La muestra tomada se lleva a sequedad
- Se realiza los cuarteos, con un cuarteador mecánico especial.

- Se toma un determinado peso de la muestra cuarteada.
- Se mide un volumen de agua destilada en una probeta
- Luego se vierte la muestra en la probeta
- Se deja sedimentar durante un tiempo prudencial
- Se lee el volumen de agua final en la probeta
- Aplicando la siguiente relación se procede a calcular la gravedad específica.

$$\text{GRA - Esp.} = \frac{W}{V_f - V_i}$$

El CUADRO No. 6.- Muestra los resultados obtenidos

F E C H A	W (Gramos)	V <sub>i</sub> (c.c)	V <sub>f</sub> (c.c)	GR-Esp.
17.5.75	100	300	337	2.702
19.5.75	100	300	336	2.777
20.5.75	100	300	338	2.631
21.5.75	100	300	337	2.702
22.5.75	100	300	337	2.702
23.5.75	100	300	336	2.777
24.5.75	100	300	338	2.631
PROMEDIO	700	2100	2359	2.702

CUADRO No. 6.- Resultados de las mediciones para la obtención de la gravedad específica de los sólidos del relave.

2.1.1. DETERMINACION DE LA DENSIDAD (PESO ESPECIFICO) DE LA PULPA

Se tomó en forma directa mediante una balanza de densidades (Marcy). A diario durante una sema-

na. Estos datos son:

FECHA	DENSIDAD (Gr/litro)
17.5.75	1,160
19.5.75	1,170
20.5.75	1,150
21.5.75	1,180
22.5.75	1,160
23.5.75	1,170
24.5.75	1,165
PROMEDIO	1,165

2.1.2. DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE SOLIDOS AL VOLU  
MEN

Para ésto deducimos una fórmula en función de -  
pesos específicos, nomenclatura:

- $V_R$  = Volúmen del relave
- $V_S$  = Volúmen de sólidos del relave
- $V_{H_2O}$  = Volúmen de agua del relave
- $X$  = Densidad del relave : Gr/cm<sup>3</sup>
- $P$  = Peso específico del sólido en el Relave (Gr/cm<sup>3</sup>)
- $1$  = Peso específico del H<sub>2</sub>O
- $W_R$  = Peso del relave
- $W_S$  = Peso del sólido en el relave
- $W_{H_2O}$  = Peso del agua
- $W_R$  =  $W_S + W_{H_2O}$
- $XV_R$  =  $P V_S + V_{H_2O}$  (I)
- $V_S$  =  $V_R - V_{H_2O}$  (II)

Sumando (I) y (II)

$$XV_R + V_S = P V_S + V_R \longrightarrow V_R (X-1) = V_S (P-1)$$

$$\% \text{ de sólidos en volumen } \frac{V_s}{V_r} 100 = \frac{(X-1)}{(P-1)} 100$$

$$X = 1.165 \text{ Gr/cm}^3$$

$$P = 2.702 \text{ Gr/cm}^3$$

$$\% \text{ de sólidos en volumen } \frac{1.165-1}{2.702-1} 100 = 9.69\%$$

### 2.1.3. DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE SOLIDOS AL PESO

$$V_r = V_s + V_{H_2O}$$

$$\frac{W_r}{X} = \frac{W_s}{P} + W_{H_2O} \quad (I)$$

$$W_s = W_r - W_{H_2O} \quad (II)$$

Sumando (I) y (II)

$$\frac{W_r}{X} + W_s = \frac{W_s}{P} + W_r \longrightarrow W_s(1-1/P) = W_r(1-1/X)$$

$$\% \text{ de sólidos al peso } \frac{W_s}{W_r} 100 = \frac{(1-1/X)}{(1-1/P)} 100 = \frac{(X-1)P}{(P-1)X} 100$$

Con los datos obtenidos  $X = 1,165 \text{ Gr/litro}$ ,

$$P = 2.7 \text{ Gr/cm}^3$$

$$\% \text{ de sólidos al peso } \frac{(1.165-1)}{(2.702-1)} \frac{1.702}{1.165} 100 = 22.49\%$$

### 2.1.4. DETERMINACION DEL TONELAJE DE SOLIDOS EN EL RELAVE

Se obtiene primero una fórmula que relacione las leyes y alimentación de la planta concentradora No. 2 de la Mina Atacocha.

#### NOMENCLATURA:

T = Tonelaje de sólidos en el relave

F = Tonelaje de sólidos en la alimentación o cabeza

Z = Tonelaje de concentrado de Zn

- L = Tonelaje de concentrado de Pb  
 l<sub>1</sub> = Ley de Pb en la cabeza  
 l<sub>2</sub> = Ley de Pb en el concentrado de Pb  
 l<sub>3</sub> = Ley de Pb en el concentrado de Zn  
 z<sub>1</sub> = Ley de Zn en la cabeza  
 z<sub>2</sub> = Ley de Zn en el concentrado de Pb  
 z<sub>3</sub> = Ley de Zn en el concentrado de Zn  
 z<sub>4</sub> = Ley de Zn en el relave  
 l<sub>4</sub> = Ley de Pb en el relave.

$$F = L + Z + T \quad (I)$$

$$F l_1 = L l_2 + Z l_3 + T l_4 \quad (II)$$

$$F z_1 = L z_2 + Z z_3 + T z_4 \quad (III)$$

Resolvemos las ecuaciones con tres incognitas (L, Z, T)

$$\left. \begin{aligned} F l_2 &= L l_2 + Z l_2 + T l_2 \\ F_1 l_1 &= L l_2 + Z l_3 + T l_4 \end{aligned} \right\} F(1_2 - 1_1) = Z(1_2 - 1_3) + T(1_2 - 1_4) \quad (IV)$$

$$\left. \begin{aligned} F z_2 &= L z_2 + Z z_2 + T z_2 \\ F z_1 &= L z_2 + Z z_3 + T z_4 \end{aligned} \right\} F(z_2 - z_1) = Z(z_2 - z_3) + T(z_2 - z_4) \quad (V)$$

Eliminamos (Z) de las ecuaciones (IV) y (V)

$$F(1_2 - 1_1)(z_2 - z_3) = Z(z_2 - z_3)(1_2 - 1_3) + T(1_2 - 1_4)(z_2 - z_3)$$

$$F(z_2 - z_1)(1_2 - 1_3) = Z(z_2 - z_3)(1_2 - 1_3) + T(z_2 - z_4)(1_2 - 1_3)$$

Restando ambos miembros de las ecuaciones y simplificando, se tiene:

$$T = \frac{F \left[ (1_2 - 1_1)(z_2 - z_3) - (z_2 - z_1)(1_2 - 1_3) \right]}{(1_2 - 1_4)(z_2 - z_3) - (z_2 - z_4)(1_2 - 1_3)} \quad (VI)$$

Conociendo la recuperación y los radios de con-

centración, también se pueda calcular el tonelaje de relave.

$$\begin{aligned}
 R_L &= \text{Recuperación de Pb} \quad \text{conocido} \\
 R_Z &= \text{Recuperación de Zn} \quad \text{conocido} \\
 K_L &= \text{Radio de concentración del Pb} \quad \text{conocido} \\
 K_Z &= \text{Radio de concentración del Zn} \quad \text{conocido} \\
 R_L &= \frac{L l_2}{F l_1} \cdot 100 \quad K_L = \frac{F}{L} \quad L = \frac{R_L \cdot F \cdot l_1}{l_2 \cdot 100}
 \end{aligned}$$

$$R_Z = \frac{Z z_2}{F z_1} \cdot 100 \quad K_Z = \frac{F}{Z} \quad Z = \frac{R_Z \cdot F \cdot z_1}{z_2 \cdot 100}$$

$$T = F - (L+Z) \quad \text{(VII)}$$

Se ha obtenido los resultados metalúrgicos de los cuatro meses de Enero a Abril para tener más representativo y se calculará con la fórmula - (VII), a partir de las recuperaciones.

Los datos de los cuatro meses, se muestran en el Cuadro No. 7.

$$L = \frac{93.232 \times 34,804.6405 \times 3.925}{57.857 \times 100} = 2,239$$

$$Z = \frac{81.21 \times 34,804.6405 \times 4.747}{54.055 \times 100} = 2,420$$

$$T = F - (L+Z) = 34,804.6405 - 4,659 = 30,145.6405 \text{TMS}$$

Obtenemos ahora las TMS/hora

$$T = \frac{30,145.6405}{24.56 \cdot 24} = 51.33 \quad \text{TMS/hora} = 83.71 \text{ GP.M.}$$

CUADRO No. 7

RESULTADOS METALURGICOS DE LOS CUATRO MESES

FECHA	Anotaciones	Peso en T.M.S.	ENSAYOS		Recuperaciones %		Dias Utiles
			%Pb	%Zn	Pb	Zn	
ENERO 1975	Alimentación	37,534.348	3.94	4.47	--	--	24.54
	Concent.de Pb	----	57.88	8.97	92.63	--	
	Concent.de Zn	----	2.48	53.62	--	77.27	
	Relaves	----	0.15	0.52			
FEBRERO 1975	Alimentación	33,121.667	3.61	4.39			23.24
	Concent.de Pb	----	57.10	5.94	92.08	--	
	Concent.de Zn	----	1.82	53.87	--	81.89	
	Relaves	----	0.19	0.47			
MARZO 1975	Alimentación	32,198.528	3.89	4.56	--	--	23.30
	Concent.de Pb	----	58.56	7.07	93.12		
	Concent.de Zn	----	2.10	54.60		82.80	
	Relaves	----	0.14	0.40			
ABRIL 1975	Alimentación	36,364.019	4.26	5.57	--	--	27.16
	Concent.de Pb	----	57.89	6.16	94.10	--	
	Concent.de Zn	----	1.83	54.13	--	82.88	
	Relaves	----	0.14	0.41	--	--	
<u>PROMEDIO DE LOS CUATRO MESES</u>							
	Alimentación	34,804.6405	3.925	4.747	--	--	24.56
	Concent.de Pb	----	57.857	7.035	93.232		
	Concent.de Zn	----	2.057	54.055		81.21	
	Relaves	----	0.155	0.437			



2.1.5. DETERMINACION DEL VOLUMEN DE AGUA EN EL RELAVE

Hallamos una fórmula en función del T,P,X.

Usando la siguiente nomenclatura:

$W_r$  = Peso del relave en (TMS)

$V_r$  = Volúmen del relave en (M<sup>3</sup>)

$W_{H_2O}$  = Peso del agua en (TMS)

$V_{H_2O}$  = Volúmen del agua en (M<sup>3</sup>)

$V_s$  = Volúmen de sólidos en (M<sup>3</sup>)

$$W_r = T + W_{H_2O} \longrightarrow V_r X = T + V_{H_2O}$$

$$(V_s + V_{H_2O}) X = T + V_{H_2O}$$

$$(T/P)X + V_{H_2O}X = T + V_{H_2O}$$

$$V_{H_2O} = \frac{T(1-X/P)}{X-1} = T \frac{(P-X)}{P(X-1)} \quad (I)$$

$$V_{H_2O} = 51.33 \frac{(2.702 - 2.265)}{2.702(1.165-1)} = 176.80 \text{ M}^3/\text{hora}$$

$$W_{H_2O} = 176.80 \text{ TMS/hora.}$$

2.1.6. PESO DE LA PULPA DEL RELAVE

Peso de pulpa = T + Peso de agua

$$\text{Peso de pulpa} = 51.33 + 176.80 = 228.13 \text{ TMS}$$

2.1.7. CALCULO DEL CAUDAL EN VOLUMEN (G.P.M.) DE LOS SOLIDOS, DEL AGUA Y DE LA PULPA DEL RELAVE

$$\text{G.P.M. (Sólidos)} = \frac{T}{P} \frac{264.20}{60} = \frac{51.33 \cdot 264.20}{2.702 \cdot 60} = 83.71 \text{ G.P.}$$

$$\text{G.P.M. (Agua)} = 176.80 \times \frac{264.20}{60} = 779.29 \text{ G.P.M.}$$

$$\text{G.P.M. (pulpa)} = 83.71 + 779.29 = 863.00 \text{ G.P.M.}$$

### 2.1.8. RESUMEN

#### Relave Disponible

<u>Peso específico de sólidos</u>	=	2.702 Gr/cm <sup>3</sup>	=	2.702TMS/m <sup>3</sup>
<u>Densidad de pulpa</u>	=	1.165 Gr/cm <sup>3</sup>	=	1.165TMS/m <sup>3</sup>
<u>% Sólidos en peso</u>	=	22.49%		
<u>% Sólidos en volúmen</u>	=	9.7%		

#### FLUJO ACTUAL

	<u>TMS/HORA</u>	G.P.M.
Sólidos	51.33	83.71
Agua	176.80	779.29
Pulpa	228.13	863.00

## CAPITULO III

### 3.0. GRANULOMETRIA DEL RELAVE

La utilización del relave para fines del relleno hidráulico, exige conocer la granulometría o tamaño de sus partículas sólidas, puesto que, de esta característica depende primordialmente la velocidad de percolación, velocidad de sedimentación, Grado de compactación, Densidad relativa o in-situ y otras cualidades del relleno hidráulico, siendo éstas las medidas que directa o indirectamente evalúan la bondad del relleno hidráulico.

La granulometría del relave o de cualquier otro material granular, viene a ser la fracción medida al peso de partículas de cada tamaño con respecto al total

Si todas las partículas son de igual tamaño, los espacios interparticulares o poros serán iguales y el área

de contacto entre dichas partículas será igual, pero si existe una determinada proporción de tamaños en que las partículas menores pueden ocupar los espacios entre las partículas mayores, entonces los poros serán menores aumentando el área de contacto. Estas dos secuelas de la granulometría afectan casi todas las propiedades de un Relleno Hidráulico.

El método usual que se sigue para determinar la granulometría del relave, es mediante el análisis por mallas para el presente estudio se empleó este procedimiento y además el método de clasificación por velocidad de sedimentación, para las partículas de tamaños menores a malla 325 (45 micrones-Serie ASTM).

### 3.0.1. CLASIFICACION GRANULOMETRICA POR ANALISIS DE MALLA O TAMIZADO

Es el método más sencillo para la clasificación en el laboratorio que consiste en pasar el material, de modo sucesivo, por una serie de tamices o cedazos que poseen orificios o mallas progresivamente decrecientes. El material que pasó a través de un tamiz y que ha sido retenido sobre otro, es porque sus orificios son de tamaño menor que la anterior, suele considerarse de tamaño igual a la media aritmética de las aberturas de ambos tamices; este valor representa el "tamaño medio" o "diámetro medio" de las partículas.

Para el propósito del presente estudio, se efectuaron cuatro pruebas de análisis de malla de los sólidos del relave, para las tres primeras se tomaron muestras de 24 horas (trabajando la planta concentradora No. 2 a plena capacidad) y la cuarta prueba fue del compósito de los tres

días siendo el peso base de 200 gramos de muestra.

Dichos análisis de malla dio los resultados que se muestran en los Cuadros Nos. 8 y 9.

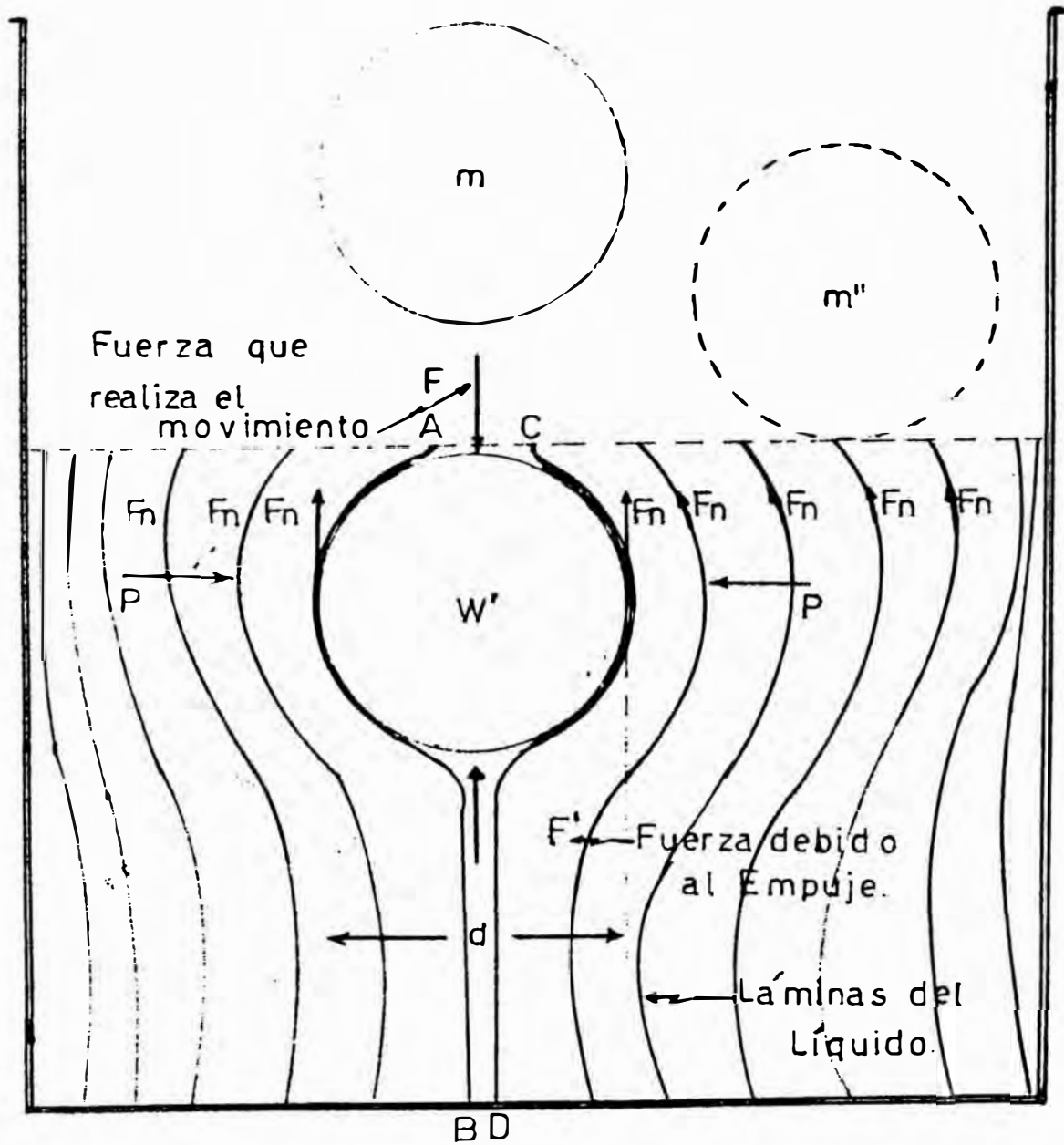
### 3.0.2. CLASIFICACION GRANULOMETRICA POR SEDIMENTACION (SUB-MALLAS)

Este método de separación por sedimentación se aplicó a las partículas menores a la malla 325, esencialmente se basa en el hecho de que las partículas pequeñas de un determinado producto caen en el seno de un fluido a una velocidad de sedimentación uniforme y proporcional a su tamaño. En la práctica el método consiste en agitar el material sólido con agua; después que la suspensión ha reposado cierto tiempo, mediante una pipeta se retira una porción de la suspensión hasta un nivel calculado en el que se hallan partículas del mismo tamaño que tienen la misma velocidad de sedimentación.

Se sabe que la velocidad de sedimentación de las partículas sólidas en el seno de un líquido es una característica resaltante en virtud de la cual pueden ser clasificadas; ésta velocidad es una función de la densidad del sólido, densidad del líquido, resistencia que opone el líquido al desplazamiento del sólido (Resistencia que se conoce con el nombre de viscosidad), del tamaño de la partícula sólida y de la aceleración de la gravedad; urge por consiguiente deducir una fórmula matemática que relacione éstos valores.

Para el mejor entendimiento de la caída de una

FIGURA No. 3.- DESPLAZAMIENTO DE UNA PARTICULA SOLIDA DE FORMA ESFERICA EN EL MEDIO DE UN LIQUIDO LAMINAR VISCOSO.



partícula sólida de forma esférica en el seno - de un líquido de régimen viscoso laminar, se considera necesario objetivizar al sistema mediante la Figura No. 3.

De la observación de la Figura No. 3 para fines de la deducción de la relación matemática buscada, la explicación se sintetiza en la siguiente ecuación.

$$mg - m''g - F_n = ma = m \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

Siendo:

$m$  = Masa de la partícula sólida

$m''$  = Masa del fluido desalojado por la partícula de volumen igual al de la partícula

$g$  = Aceleración debido a la gravedad

$F_n$  = Fuerza de resistencia debido a los efectos de la viscosidad.

$a$  = Aceleración de la partícula en medio fluido que es igual a la derivada de la velocidad con respecto al tiempo.

De acuerdo a la Figura No. 3, cabe agregar que:

$F$  =  $mg$

$F'$  = Fuerza de empuje =  $m''g$

$W'$  = Peso de la partícula dentro del líquido

$d$  = Diámetro de la partícula

$dd$  = Diferencia del diámetro

$P$  = Presión entre las láminas del líquido que actúa sobre la sección de la partícula

La ecuación (1) ha sido establecida luego del siguiente razonamiento: Para que una partícula sólida se mueva en el interior de un líquido deberá vencer a las fuerzas contrarias de empuje y de resistencia del líquido, lo cual equivale

a una pérdida en el peso de la partícula.

Ecuación que se puede expresar del siguiente modo:

$$F - F' - F = ma \quad (2)$$

Para desarrollar la ecuación No. (1) resulta necesario encontrar una relación para  $F_n$  en función de los parámetros de la partícula sólida; para éste fin tendremos como punto de partida el siguiente concepto; la viscosidad es una propiedad importante y típica de los fluidos no ideales. En cierto modo, corresponde a la resistencia al corte o exfoliación de los sólidos.

Constituyendo la representación gráfica, la mejor ayuda para apreciar más nitidamente un concepto, nos permitimos extraer dos de las láminas del líquido en deformación, tal como, a continuación se muestran en las Figuras Nos. 4 (a) (b), (c) y (d).

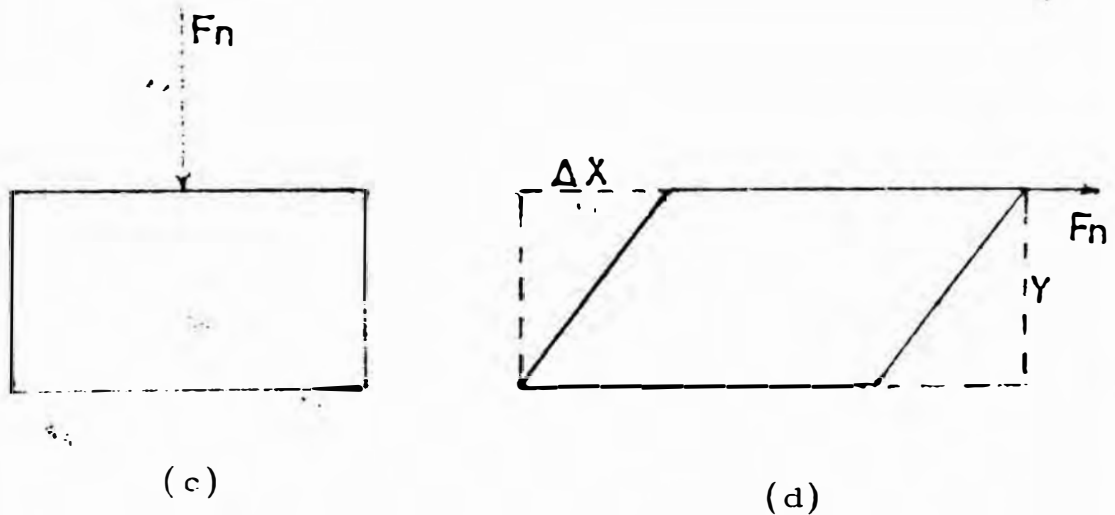
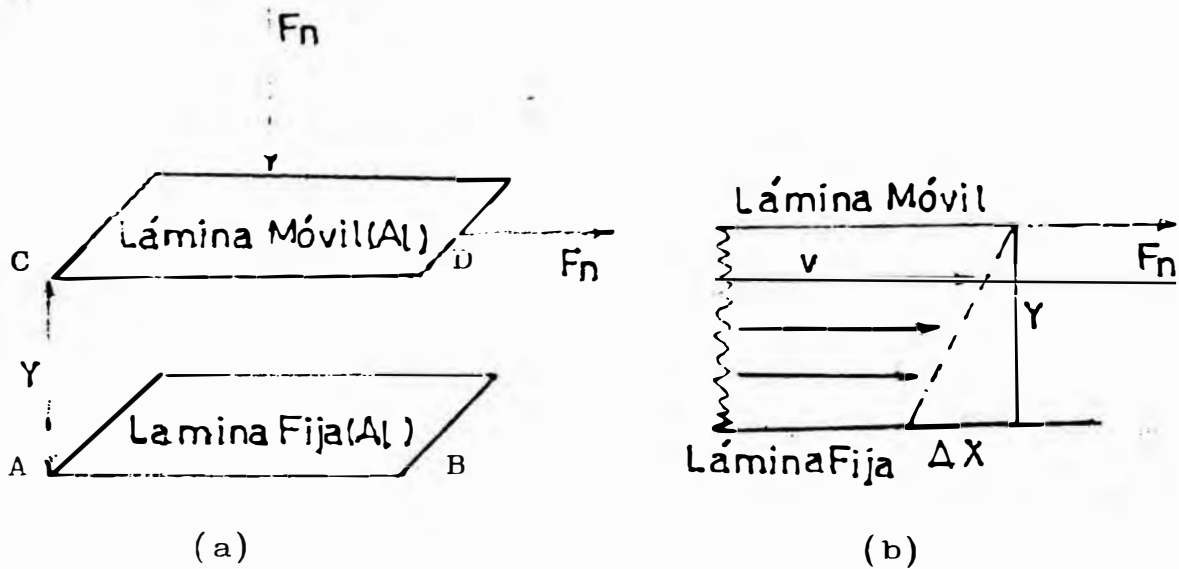


FIGURA No.4.- (a) DOS LAMINAS DEL LIQUIDO EN DESPLAZAMIENTO LAMINAR ; (b) REPRESENTACION EN CORTE DEL DESPLAZAMIENTO DE LAMINAS DEL LIQUIDO; (c) UN SOLIDO ACCIONADO POR LA FUERZA  $F_n$ ; (d) SOLIDO DEFORMADO.



En la Figura No. 4 (a) son las dos láminas extraídas del líquido y separadas entre sí por una distancia "Y", una de ellas se considera fija, en tanto la otra se mueve, con respecto a la primera por acción de la fuerza  $F_n$  normal al plano - que es igual a la fuerza que desplaza esta lámina, manteniendo una velocidad constante V, esto mismo se representa en corte en (b).

En forma comparativa lo que sucede con un sólido se reproduce mediante las Figuras (c) y (d), en (d) observamos el sólido deformado por acción de la fuerza  $F_n$  siendo la deformación unitaria por cizallamiento:  $\frac{\Delta x}{Y}$ ; dentro del límite de elasticidad el esfuerzo cortante  $F_n/A$  que soporta un sólido es proporcional al esfuerzo unitario.

$$\text{O sea: } F_n/A \propto \frac{\Delta x}{Y} \quad (3)$$

Opuestamente ocurre con el líquido laminar, la deformación unitaria se incrementa sin límite mientras se encuentre sometido a la fuerza aplicada  $F_n$  existiendo incrementación, se hace indispensable derivar el esfuerzo unitario con respecto al tiempo:

$$\frac{d\left(\frac{\Delta x}{Y}\right)}{dt} = \frac{Yd\Delta x - \Delta xdY}{Y^2dt}$$

$$\frac{d\left(\frac{\Delta x}{Y}\right)}{dt} = \frac{d\Delta x}{Ydt} - \frac{\Delta xdY}{Y^2dt}$$

Para que la relación  $\frac{d\left(\frac{\Delta x}{Y}\right)}{dt}$  sea máximo, dY será mínimo, lo que es lo mismo  $dY = 0$

$$\text{De donde resulta: } \frac{d\left(\frac{\Delta x}{Y}\right)}{dt} = \frac{d\Delta x}{Ydt}$$

Analizando el segundo miembro de la última ecuación, encontramos que:

$$\frac{d \Delta x}{dt} = V$$

Por consiguiente:

$$\frac{d\left(\frac{\Delta x}{Y}\right)}{dt} = \frac{V}{Y}$$

De lo desarrollado hasta el momento, inferimos que para los líquidos el esfuerzo cortante por cizallamiento, no es proporcional a la deformación unitaria, sino a su derivada con respecto al tiempo lo que significa que es directamente proporcional a la velocidad de la lámina móvil e inverso a la distancia de separación inter laminar. Expresado matemáticamente, como:

$$\frac{F_n}{A_1} \propto \frac{d\left(\frac{\Delta x}{Y}\right)}{dt}$$

Reemplazando y escribiéndolo como igualdad tenemos que:

$$\frac{F_n}{A_1} = \frac{V}{Y}$$

En términos generales es posible escribir:

$$\frac{F_n}{A_1} = \frac{dV}{dY} \quad (4)$$

En esta expresión  $\frac{dV}{dY}$  es la gradiente de

Velocidad y el coeficiente de proporcionalidad que se representa por la letra griega  $\eta$  (ETA) -

se suele denominar viscosidad del líquido.

Si nuevamente volvemos a analizar el sistema sólido líquido de la Figura No. 3, concluimos de que la distancia de separación entre las láminas AB y CD es el diámetro de la partícula sólida  $d$ , en consecuencia la ecuación (4) se puede escribir:

$$F_n = PA = A_1 \eta \frac{dV}{dd}$$

En donde:

$A$  = Es el área de la sección, cuyo diámetro varía a medida, que se sumerge la partícula.

$A_1$  = Es el área lateral de la misma partícula. Con el objeto de integrar esta ecuación, se puede escribir también:

$$P \frac{\pi d^2}{4} \quad Vd = A_1 \eta \quad dV$$

Para la integración se ha considerado que la partícula parte del reposo del nivel del líquido, que una vez introducida, tanto la velocidad y el diámetro alcanzan sus valores máximos  $V_m$  y  $d$  - respectivamente; mientras que  $P$ ,  $A_1$  y  $\eta$  permanecen constantes.

$$\int_0^d \frac{P \pi d^2}{4} dd = \int_0^{V_m} A_1 \eta dV$$

$$\frac{\pi P}{4} \left| \frac{d^3}{3} \right|_0^d = A_1 \eta \left| V \right|_0^{V_m}$$

$$P = \frac{12 A_1 \eta V_m}{\pi d^3}$$

Reemplazando P:

$$P = \frac{F_n}{A} = \frac{F_n}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

Despejando  $F_n$

$$F_n = \frac{3A_1 \eta V_m}{d} \quad (5)$$

La ecuación (5) nos pone en condiciones de sustituir el valor de  $F_n$  en la ecuación (1)

$$mg - m''g - \frac{3A_1 \eta V_m}{d} = ma = m \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

Como el líquido es laminar viscoso y homogéneo la velocidad máxima ( $V_m$ ) lograda por la partícula sólida será constante:

$$\text{Por ende: } \frac{dv}{dt} = 0$$

La ecuación (6) se simplifica a:

$$mg - m''g - \frac{3A_1 \eta V_m}{d} = 0$$

Expresando  $m$  y  $m''$  en términos de volumen y sus densidades respectivas, simultáneamente " $A_1$ " en función de:

$$\frac{\pi d^3}{6} P_s g - \frac{\pi d^3}{6} P g - \frac{3 \pi d^2}{d} \eta V_m = 0$$

Siendo:

$P_s$  = densidad de la partícula sólida

$P$  = densidad del líquido

Simplificando y despejando  $V_m$

$$V_m = \frac{(P_s - P) g d^2}{18 \eta} \quad (7)$$

$V_m$  se conoce con el nombre de velocidad máxima ó límite de caída o ascenso de una partícula esférica de un cuerpo sólido, no poroso e incomprensible y moviéndose en flujo laminar.

Cuando  $V_m$ , es la velocidad máxima o límite de caída, se conoce con el nombre de velocidad de sedimentación característica que es muy peculiar para cada tamaño de partículas sólidas de la misma naturaleza, lo cual se aprovechó para efectuar la clasificación mencionada.

El empleo de esta fórmula en el ámbito práctico se aclarará mejor con el siguiente ejemplo que se ejecutó con los sólidos del relave de la planta concentradora No. 2 de Atacocha.

Datos:

$$P_s = 2.7 \text{ Gr/cm}^3$$

$$P = 1 \text{ Gr/cm}^3 \text{ (agua)}$$

$$\eta = 0.95 \text{ Centi-Poise} = 95 \times 10^{-4} \frac{\text{grm}}{\text{cm} \times \text{seg}} \quad (\text{Agua})$$

$$g = 980 \text{ cm/seg}^2$$

$$d = 30 \text{ micrones} = 3 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

$$V_m = ?$$

$$V_m = \frac{(2.7 - 1) 980 \times (3 \times 10^{-3})^2}{18 \times 95 \times 10^{-4}} = 0.088 \text{ cm/seg} = 0.88 \text{ m-m/seg.}$$

Conocida la velocidad se da un tiempo prudencial determinado; para este experimento se tomó un -

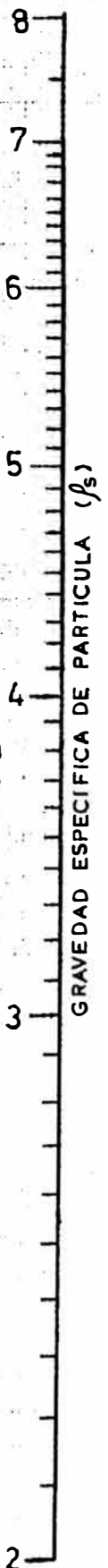
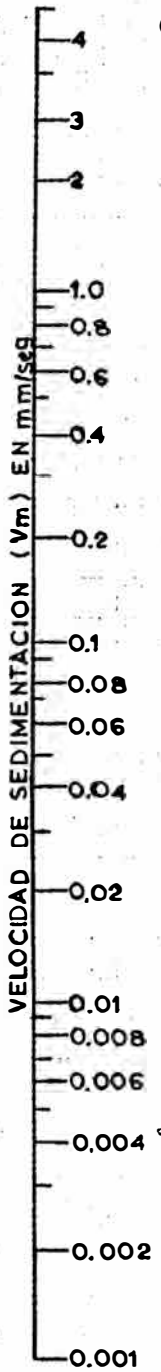
**NOMOGRAMA PARA LA APLICACION DE LA LEY DE STOKES EN LA  
SEPARACION POR SEDIMENTACION (SUB-MALLAS)  
DE PARTICULAS ESFERICAS EN EL AGUA.**

$$V_m = \frac{(\rho_s - \rho) g d^2}{18\eta}$$

donde :  $V_m$  = velocidad de sedimentación.  
 $g$  = aceleración de la gravedad.  
 $d$  = diámetro de la partícula.  
 $\eta$  = viscosidad del agua.  
 $\rho$  = densidad del agua = 1 gr/cm<sup>3</sup>.  
 $\rho_s$  = densidad de la partícula.

Este nomograma es válido sólo cuando:

- 1.-El número de Reynolds no es mayor que 0.2.
  - 2.-La partícula debe estar completamente mojada y dispersada.
  - 3.-Las paredes del recipiente no deben influir en la sedimentación; para cuestiones prácticas. El diámetro del recipiente debe ser mayor de 10 cm.
  - 4.-La proporción de sólidos no debe exceder a 0.5% por volumen.
  - 5.-La temperatura debe permanecer constante durante el periodo de sedimentación.
  - 6.-No debe haber turbulencia ni corriente.
- Las siguientes correcciones deben ser hechas a las lecturas obtenidas debido al cambio de viscosidad del agua con la temperatura.



Tempº C	Los resultados obtenidos pueden ser multiplicados por los siguientes valores ya determinadas.		
	Velocidad de Sedimentación	Gravedad Especifica	Diámetro de Partícula.
15	0.88	1.14	1.07
16	0.90	1.11	1.06
17	0.93	1.08	1.04
18	0.95	1.05	1.03
19	0.97	1.03	1.02
20	1.00	1.00	1.00
21	1.02	0.98	0.99
22	1.04	0.95	0.98
23	1.08	0.94	0.97
24	1.19	0.91	0.95
25	1.12	0.89	0.94
26	1.15	0.87	0.93
27	1.17	0.85	0.92
28	1.19	0.84	0.91
29	1.21	0.82	0.90
30	1.25	0.80	0.89

tiempo:  $t = 2 \text{ min} = 120 \text{ seg.}$

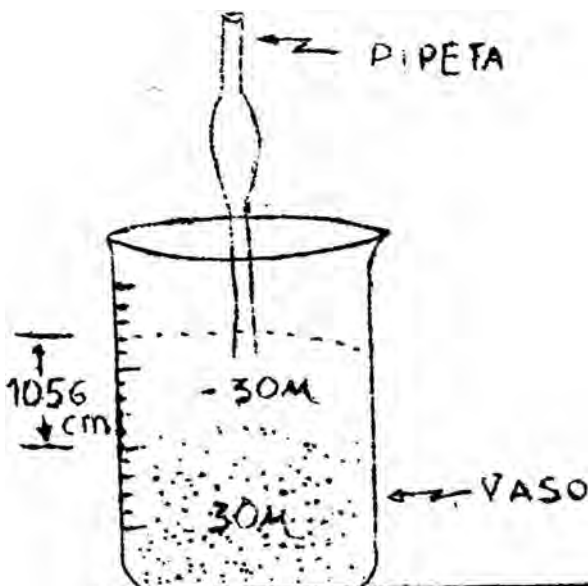
Con este dato se calcula la distancia recorrida (e) de todas las partículas que tienen 30 micrones:

$$e = V_m \times t$$

$$e = 0.88 \text{ mm/seg.} \times 120 \text{ seg/} = 10.56 \text{ cm.}$$

Este resultado nos indica que el volumen de la mezcla líquido-agua de altura de 10.56 cm está contenido por partículas de diámetro menores a 30 micrones; esta porción es separada con la pipeta; en la otra porción que queda se encuentran partículas de 30 micrones o mayores que ella.

En el siguiente gráfico se puede observar mejor lo expresado anteriormente:



La prueba se repite varias veces añadiendo agua hasta el nivel original y hasta que la porción superior de la mezcla sea bastante clara.

A continuación se da un Cuadro No. 8 donde se pone los valores conseguidos para los diversos tamaños de partículas:

CUADRO No. 8.-

Diámetro En Micrones	V <sub>m</sub> en mm./seg.	Tiempo (t) en minutos	Distancia recorrida en cm	Peso en Gramos
- 325 + 30	0.88	2	10.56	15.84
- 30 + 20	0.39	4.3	10	19.14
- 20 + 10	0.097	17.0	10	29.70
- 10	_____	_____	_____	11.64

Se ha visto conveniente que para usos prácticos y cálculos inmediatos de la velocidad de sedimentación adjuntar el siguiente monograma.

- Los resultados obtenidos para la granulometría del relave por análisis de malla y velocidad de sedimentación se presentan en el Cuadro No. 9:



CUADRO No. 9.-

MALLA SERIE	P E S O      E N      G R A M O S				
	5--Junio-75	6--Junio-75	7--Junio-75	Compositivo	Promedio
+ 35	7.60	8.32	7.68	8.08	7.92
- 35 ÷ 50	18.76	18.04	18.68	18.28	18.44
- 50 ÷ 60	19.38	21.82	19.18	21.22	20.40
- 60 ÷ 100	26.02	23.58	26.22	24.18	25.00
- 100 ÷ 140	17.39	15.40	17.55	15.90	16.56
- 140 ÷ 200	14.81	16.80	14.65	16.30	15.64
- 200 ÷ 325	21.29	17.95	18.21	20.83	19.72
- 325 ÷ 30	14.27	17.61	15.25	16.23	15.84
- 30 ÷ 20	20.86	18.18	19.91	17.61	19.14
- 20 ÷ 10	27.90	30.74	28.93	31.23	29.70
- 10	11.72	11.56	13.14	10.14	11.64
	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00

- 45 -

3.0.3. EXPRESION EN PORCIENTO Y TONELADAS POR HORA PARA CADA MALLA A PARTIR DEL PROMEDIO

CUADRO No. 10.-

Mallas Serie ASTM	Mallas en Micrones	Diámetro Promedio Micrones	% Peso Directo (+)	% Peso Acumulativo (-)	Peso Directo TMS/Hr (+)	Peso Acumulativo TMS/Hr (-)
+ 35	500	500	4.0	96.0	2.05	49.28
- 35 + 50	300	400	9.2	86.8	4.72	44.56
- 50 + 60	250	275	10.2	76.6	5.24	39.32
- 60 + 100	150	200	12.5	64.1	6.42	32.90
-100 + 140	106	128	8.3	55.8	4.26	28.64
-140 + 200	75	91	7.8	48.0	4.00	24.64
-200 + 325	45	60	9.9	38.1	5.08	19.56
-325 + 30	30	38	7.9	30.2	4.05	15.50
-30 + 20	20	25	9.6	20.6	4.93	10.57
-20 + 10	10	15	14.8	5.8	7.59	2.98
- 10			5.8		2.98	
T O T A L	---	---	100.0	---	51.33	---

Esta distribución se hizo en base al flujo horario de sólidos del relave, que es 51.33 TMS/hora.

#### 4.0 COMPOSICION MINERALOGICA DEL RELAVE

Es evidente, que el conocimiento de la composición mineralógica del Relleno Hidráulico, nos ayuda a predecir en cierta forma la conducta del material frente al medio subterráneo.

El análisis mineralógico del relave de la planta concentradora No. 2 de Atacocha, arrojó los siguientes resultados.:

Sílice .....	50%
Carbonatos .....	30%
Sulfuros .....	17%
Otros .....	3 %

#### 5.0 PRUEBAS DE PERCOLACION

El fenómeno de percolación o permeabilidad, consiste en la circulación o paso del agua a través de la masa granular del Relleno Hidráulico de arriba hacia abajo, por acción exclusiva de la gravedad; a la mayor o menor rapidez con que el agua circula se acostumbra llamar velocidad de percolación o coeficiente de permeabilidad.

El coeficiente de permeabilidad es un medio que nos permite averiguar cuan rápido un relleno hidráulico pasará del estado de pulpa al de un cuerpo granular firme y es utilizado como una medida de comparación de un relleno con otro.

La permeabilidad de una masa granular se halla limitada por el influjo de las características, que a continuación se enumeran:

1.- El volumen de los espacios interparticulares, cono

- cido como la relación de vacíos o razón de poros.
- 2.- El tamaño o granulometría de sus partículas.
  - 3.- La composición mineralógica y físico-química de la masa granular.
  - 4.- La estructura u ordenamiento de las partículas.
  - 5.- El grado de suturación.
  - 6.- La presencia de agujeros, fisuras, etc.

Como se citó líneas arriba, la permeabilidad está interrelacionada con numerosas características y simultáneamente dependiente de ellas, por esta razón, cuanta determinación se ha realizado de la velocidad, de percolación o deficiente de permeabilidad rigurosamente - ha sido de carácter experimental con el propósito de encontrar una relación matemática que facilite calcular la velocidad de percolación, el autor del presente estudio se rigió del siguiente razonamiento; partiendo - de las experiencias efectuadas en el dispositivo que seguidamente se representa en la Figura No. 5.

FIGURA No. 5 (a) PRUEBA PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE PERCOLACION DE UN RELLE NO HIDRAULICO (b) ESQUEMA QUE ILUSTR LA PERCOLACION PARA DEDUCIR UNA FORMULA

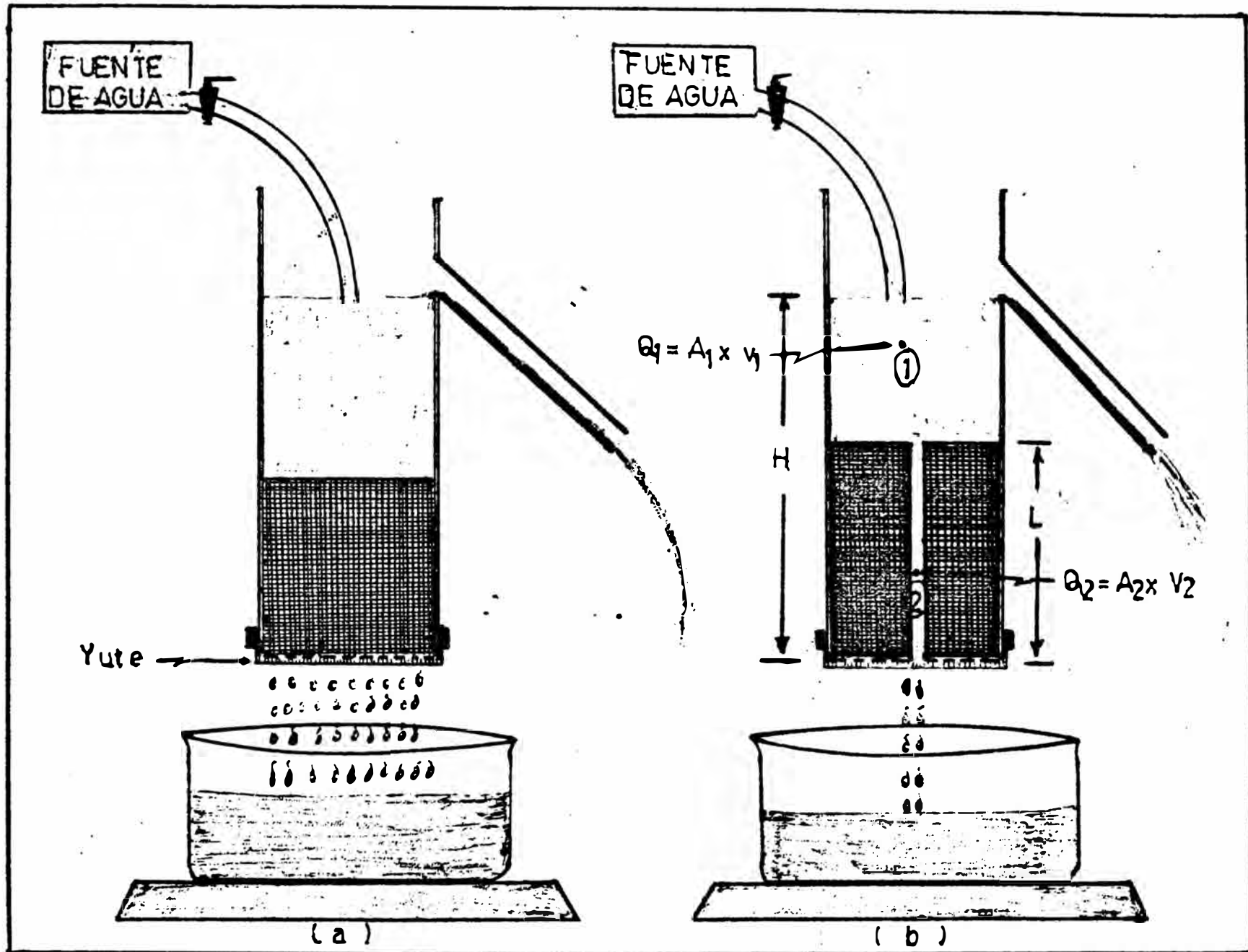


Figura No. 5 (a) prueba para determinar la velocidad de percolación de un Relleno Hidráulico (b) esquema que ilustra la percolación para deducir una fórmula.

En la figura No. 5 (b). Para fines de la obtención de la fórmula y su mejor comprensión, se esquematiza de tal forma, de que por la porción de los sólidos del relleno Hidráulico, atravieza un conducto de altura "L" y cuyo volúmen es igual a la suma de volúmenes de todos los espacios interparticulares o poros existentes, quedando las partículas sólidas unidas a otras sin dejar el menor vacío.

En este mismo esquema se ha escogido dos puntos tales como (1) y (2), en el punto (1) al caudal de agua que circula llamamos  $Q_1$ , al área correspondiente de la sección  $A_1$  y la velocidad con que circula  $V_1$ ; en forma semejante en el punto (2) éstos valores son:

$$Q_2, A_2 \text{ y } v_2$$

$$Q_1 = A_1 v_1$$

$$Q_2 = A_2 v_2$$

Sabemos que el caudal en el punto (1) y (2) es el mismo:

$$Q_1 = Q_2$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$A_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 \quad (3)$$

$$A_1 = \frac{v_1}{H}$$

$$A_2 = \frac{v_2}{L}$$

Donde:

$v_1$  y  $v_2$  son sus volúmenes respectivos para las áreas

$A_1$  y  $A_2$

Reemplazando los valores de  $A_1$  y  $A_2$  en la ecuación (3)

$$v_2 = \frac{v_1 L}{v_2 H} v_1$$

El agua que se alimenta al dispositivo es un flujo consistente, con el que se mantiene el nivel y la presión constante. La cantidad de agua remanente sale por un tubo pequeño adecuadamente ubicado, por consiguiente - el volumen de agua que percola es igual al volumen de agua que ingresa en el punto (1), de donde resulta ser:

$$v_1 = v_2$$

Luego:  $v_2 = \frac{L}{H} v_1$  ó  $v_2 = \frac{L Q_1}{H A_1}$  (4)

La ecuación No. 4 sintetiza la Ley de Darcy válida para velocidades de percolación a través de masas granulares y se utilizó en esta experiencia de Relleno Hidráulico.

Se ha creído oportuno dar las dimensiones del dispositivo empleado para las sucesivas experiencias:

#### TUBO GRANDE

Diámetro interior = 10.16 cm = 4"  $\emptyset$   
Altura total = 60 cm  
Altura H = 50 cm

#### TUBO PEQUEÑO

Diámetro interior = 2.54 cm = 1"  $\emptyset$   
Longitud total = 40 cm

El extremo interior del tubo grande está protegido por yute blanco en una cantidad representativa a lo que se emplea en los tajeos a rellenar en el interior de la mina.

Empleando el dispositivo mostrado en la Figura No. 5 (a) y la aplicación de la Ley de Darcy (Fórmula 4); fijando un porcentaje de sólidos de 60% y una densidad de - 1,600 Gr/litro, cantidades que se consideran apropiadas para un relleno hidráulico, de material sólido, de 2.7 gravedad específica, con muestras de relave de diversas granulometrías se efectuaron las siguientes pruebas de percolación:

PRUEBA No. 1

Granulometría : Malla + 60 (250)

Area :  $A_1 \quad (10.16)^2 = 81.04 \text{ cm}^2$

$V_t$  (Volúmen para altura "H") =  $A_1 H = 81.04 \times 50 = 4,052 \text{ cm}^3$

Peso de muestra seca = 3,900 gr.

Peso de agua = 2,600 gr. = 2,600  $\text{cm}^3$

Volúmen de agua que pasó = 1,650  $\text{cm}^3 = 1,650 \text{ gr.}$

Volúmen de agua retenido = 2,600 - 1,650 = 950  $\text{cm}^3 = 950 \text{ gr.}$

Volúmen de muestra húmeda = 4,052 - 1,650 = 2,402  $\text{cm}^3$

Peso de muestra húmeda = 3,900 + 950 = 4,850 gr.

Densidad relativa =  $\frac{4,850}{2,402} = 2.02 \text{ gr/cm}^3$

Altura de la muestra húmeda:  $L = \frac{2,402}{81.04} = 29.64 \text{ cm}$

$A_1$ ( $\text{cm}^2$ )	L (cm)	H (cm)	T (min)	V ( $\text{cm}^3$ )	$Q_1$ ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )	$V_2$ (cm/Hr)
81.04	29.64	50	10	5,200	520	227.760
81.04	29.64	50	20	10,360	518	226.88
81.04	29.64	50	30	15,495	516	226.01

Velocidad de percolación promedia:  $V_2 = 226.88 \text{ cm/Hr.}$



PRUEBA NO. 2

Granulometría : Malla + 100 (150 $\mu$ )

Area  $A_1 = 81.04 \text{ cm}^2$

Volúmen para altura "H" =  $A_1 \cdot H = 81.04 \cdot 50 = 4,052 \text{ cm}^3$

Peso de muestra seca = 3,900 gr.

Peso de agua = 2,600 gr. = 2,600  $\text{cm}^3$

Volúmen de agua que pasó = 1,540 gr. = 1,540  $\text{cm}^3$

Volúmen de agua retenido = 2,600 - 1,540 = 1,060  $\text{cm}^3$

Volúmen de muestra húmeda = 4,052 - 1,540 = 2,512  $\text{cm}^3$

Peso de muestra húmeda = 3,900 + 1,060 = 4,960 gr.

Densidad relativa =  $\frac{4,960}{2,512} = 1.98 \text{ gm/cm}^3$

Altura de la muestra húmeda =  $\frac{2,512}{81.04} = 31 \text{ cm}$

$A_1 (\text{cm}^2)$	L (cm)	H (cm)	T (min)	v ( $\text{cm}^3$ )	$Q_1 \text{ cm}^3/\text{min}$	$V_2 (\text{cm/hr})$
81.04	31	50	10	2,740	274	125.77
81.04	31	50	20	5,200	260	119.34
81.04	31	50	30	7,715	257	117.96

Velocidad de percolación promedio:  $v_2 = 121.02 \text{ cm/hr.}$

PRUEBA No. 3

Granulometría Malla + 200 (75 $\mu$ )

Area :  $A_1 = 81.04 \text{ cm}^2$

Volúmen para altura "H" = 4,052  $\text{cm}^3$

Peso de muestra seca = 3,900 gr

Peso de agua = 2,600 gr = 2,600  $\text{cm}^3$

Volúmen de agua que pasó = 1,500  $\text{cm}^3$  = 1,500 gr.

Volúmen de agua retenido = 1,100  $\text{cm}^3$

Volúmen de muestra húmeda = 4,052 - 1,500 = 2,552  $\text{cm}^3$

Peso de muestra húmeda = 3,900 + 1,100 = 5,000 gr.

Densidad relativa =  $\frac{5,000}{2,552} = 1.96 \text{ gr/cm}^3$

$$\text{Altura de muestra húmeda } L = \frac{2,552}{81,04} = 31.50 \text{ cm}$$

$A_1$ (cm <sup>2</sup> )	L (cm)	H (cm)	T (min)	v (cm <sup>3</sup> )	$Q_1$ (cm <sup>3</sup> /min)	$v_2$ cm/hr
81.04	31.50	50	10	1,630	163	75.95
81.04	31.50	50	20	3,270	163	75.95
81.04	31.50	50	30	4,910	164	75.24

Velocidad de percolación promedio  $v_2 = 76.11$  cm/hr.

PRUEBA No. 4

Granulometría : Malla ÷ 325 (45µ)

Area :  $A_1 = 81.04$  cm<sup>2</sup>

Volúmen para la altura "H" = 4,052 cm<sup>3</sup>

Peso de muestra seca = 3,900 gr.

Peso de agua = 2,600 gr. = 2,600 cm<sup>3</sup>

Volúmen de agua que pasó = 1,400

Volúmen de agua retenido = 2,600 - 1,400 = 1,200 cm<sup>3</sup>

Volúmen de muestra húmeda = 4,052 - 1,400 = 2,652 cm<sup>3</sup>

Peso de muestra húmeda = 3,900 ÷ 1,200 = 5,100 gr.

Densidad relativa =  $\frac{5,100}{2,652} = 1.96$  gm./cm<sup>3</sup>

Altura de muestra húmeda =  $\frac{2,652}{81,04} = 32.7$  cm

$A_1$ (cm <sup>2</sup> )	L (cm)	H (cm)	T (min)	V (cm <sup>3</sup> )	$Q_1$ (cm <sup>3</sup> /min)	$v_2$ cm/hr
81.04	32.7	50	10	1,080	108	52.27
81.04	32.7	50	20	2,130	106	51.30
81.04	32.7	50	30	3,115	104	50.34

Velocidad promedio de percolación  $v_2 = 51.30$  cm/hr.

PRUEBA No. 5.-

Los resultados altos que se obtuvieron para la velocidad de percolación de las cuatro pruebas anteriores, - indujo a llevar a cabo una nueva experiencia con el relave en las mismas condiciones en que salen en la planta concentradora, o sea:

% de sólidos 22.5%

Densidad de pulpa = 1,165 gr/litro

Gravedad específica de los sólidos = 2.7

Granulometría; estos valores se da en la Tabla No. 9 y 10.

Area  $A_1 = 81.04 \text{ cm}^2$

Volúmen para la altura "H" =  $4,052 \text{ cm}^3$

Peso de muestra seca = 1,062 gr.

Peso de agua = 3,660 gr =  $3,660 \text{ cm}^3$

Volúmen de agua que pasó =  $3,260 \text{ cm}^3$

Volúmen de agua retenido =  $3,660 - 3,260 = 400 \text{ cm}^3$

Volúmen de muestra Húmeda =  $4,052 - 3,260 = 792 \text{ cm}^3$

Peso de muestra húmeda =  $1,062 + 400 = 1,462 \text{ gr.}$

Densidad relativa =  $\frac{1,462 \text{ gr}}{792 \text{ cm}^3} = 1.85 \text{ gr/cm}^3$

Altura de muestra húmeda =  $\frac{792 \text{ cm}^3}{81.04 \text{ cm}^2} = 9.8 \text{ cm}$

$A_1$ (cm)	L (cm)	H (cm)	T (min)	V ( $\text{cm}^3$ )	$Q_1$ ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )	$v_2$ cm/hr
81.04	9.8	50	10	54	5.4	0.78
81.04	9.8	50	20	104	5.2	0.75
81.04	9.8	50	30	143	4.8	0.70

Velocidad promedio de percolación:  $v_2 = 0.74 \text{ cm/hr.}$

Los valores proporcionados por las pruebas realizadas para la velocidad de percolación, nos ilustra, de que esta característica varía directamente con el tamaño de las partículas de una masa granular; cuanto más grandes sean las partículas mayor es la velocidad de percolación o viceversa.

La permeabilidad es uno de los valores que admite amplias variaciones, según la naturaleza de la masa granular de que se trate. Fluctúa entre extremos bastante extensos, tales como 360,000 cm/hr para gravas limpias a 0.00036 cm/hr para arcillas homogéneas bentoníticas, para este valor mínimo un material se cataloga prácticamente impermeable.

En el caso singular del relleno hidráulico el coeficiente de permeabilidad o velocidad de percolación óptima, que se ha comprobado estadísticamente es de 10 cm/hr, los valores mayores o menores acarrearán perjuicios. Una velocidad inferior a 4 cm/hr ocasiona una eliminación de agua sumamente lenta, demorando el retorno del personal a la labor; mientras que valores por encima de 20 cm/hr, da lugar a la aparición del fenómeno de "EMBUDO" que consiste en la formación de conductos pequeños en el interior del relleno, mediante los cuales mana la pulpa a velocidades altas ensanchándolos progresivamente hasta derrumbarlos; en consecuencia precipitándose la masa de relleno por chimeneas y anegando las galerías. Ambas anomalías van en desmedro de la producción, la seguridad del personal, seguridad de equipos y maquinarias.

El resultado suministrado por la Prueba No. 5 que se practicó con el relave de la Planta Concentradora No. 2 de la Compañía Minera Atacocha S.A., nos señala claramente de que en estas condiciones este material es totalmente inapropiado para su empleo como relleno hidráulico, de donde surge la necesidad de eliminar cierta cantidad de partículas muy finas, que son las que entorpecen la percolación del agua. La separación de estas partículas finas nos permitirá obte-

ter un producto cuya velocidad de percolación sea bastante aproximada a la óptima, con esta finalidad el método que se ha seleccionado para la clasificación, es mediante HIDROCI-CLON.

#### CAPITULO IV

##### 4.0. CLASIFICACIÓN EN HIDROCICLON

Centro de este capítulo se ha considerado de sumo interés, hacer una breve exposición de los principios generales en que se basa la operación de un Hidrociclón.

Se ha visto que en medio del agua una partícula sólida desciende por acción de la fuerza de gravedad, con una velocidad de sedimentación constante. Para lograr incrementar esta velocidad puede suplirse la fuerza de gravedad actuante sobre la partícula, por una fuerza centrífuga mucho mayor. Es en esta apreciación en que se fundamenta la operación de separación centrífuga, constituyendo el hidrociclón el dispositivo más típico en que se lleva a cabo este proceso.

Desde el punto de vista teórico, el hidrociclón es un aparato de sedimentación en el que se emplea una fuerza centrífuga radial elevada, en vez de la débil fuerza de gravedad que actúa verticalmente. La fuerza centrífuga varía entre extremos bastante amplios desde 5 veces la de gravedad en los aparatos grandes que trabajan a baja velocidad hasta 2,500 veces la de gravedad en aparatos pequeños que funcionan a alta presión.

El beneficio por el hidrociclón es una operación de separación gravimétrica, que se realiza sobre la base de la diferencia en la gravedad específica y tamaño de las partículas; por eso estos son dos de las más importan-

tes variables en la clasificación en el hidrociclón.

En el funcionamiento del hidrociclón, una mezcla de partículas sólidas y agua, es alimentada próximo a la cabeza o tope del hidrociclón, ingresando con una velocidad lineal en forma tangencial a la periferia y siguiendo interiormente una trayectoria circular; la velocidad lineal del medio se descompone dentro del cono en tres componentes: una componente de velocidad radial hacia la periferia del cono, una componente de Velocidad vertical y una componente de Velocidad Tangencial.

La separación o clasificación de partículas en el hidrociclón ocurre debido a la formación de dos torbellinos siendo uno de ellos, un torbellino interior surgente y el otro un torbellino periférico descendente. En medio del primero aparece una columna de aire, merced a una corriente ascensional de aire que penetra por el orificio inferior o apex del hidrociclón y al vacío producido por el barrido tangencial del agua que rebosa por la parte superior; este remolino está poseído de bastante violencia, suficiente para vencer las fuerzas centrifugas sobre las partículas más finas y livianas, y luego arrastrarlas en suspensión por el tubo central superior de rebose o vortex; este producto toma el nombre de rebalse u over flow. El otro torbellino periférico descendente, baja lamiendo las paredes del hidrociclón, llevando en suspensión las partículas más pesadas y a su paso arrastrando las partículas sedimentadas en las paredes, sobre las que predominan las fuerzas centrifugas, esta porción de mezcla, es descargada por el apex del hidrociclón, producto que se denomina como gruesos o under flow.

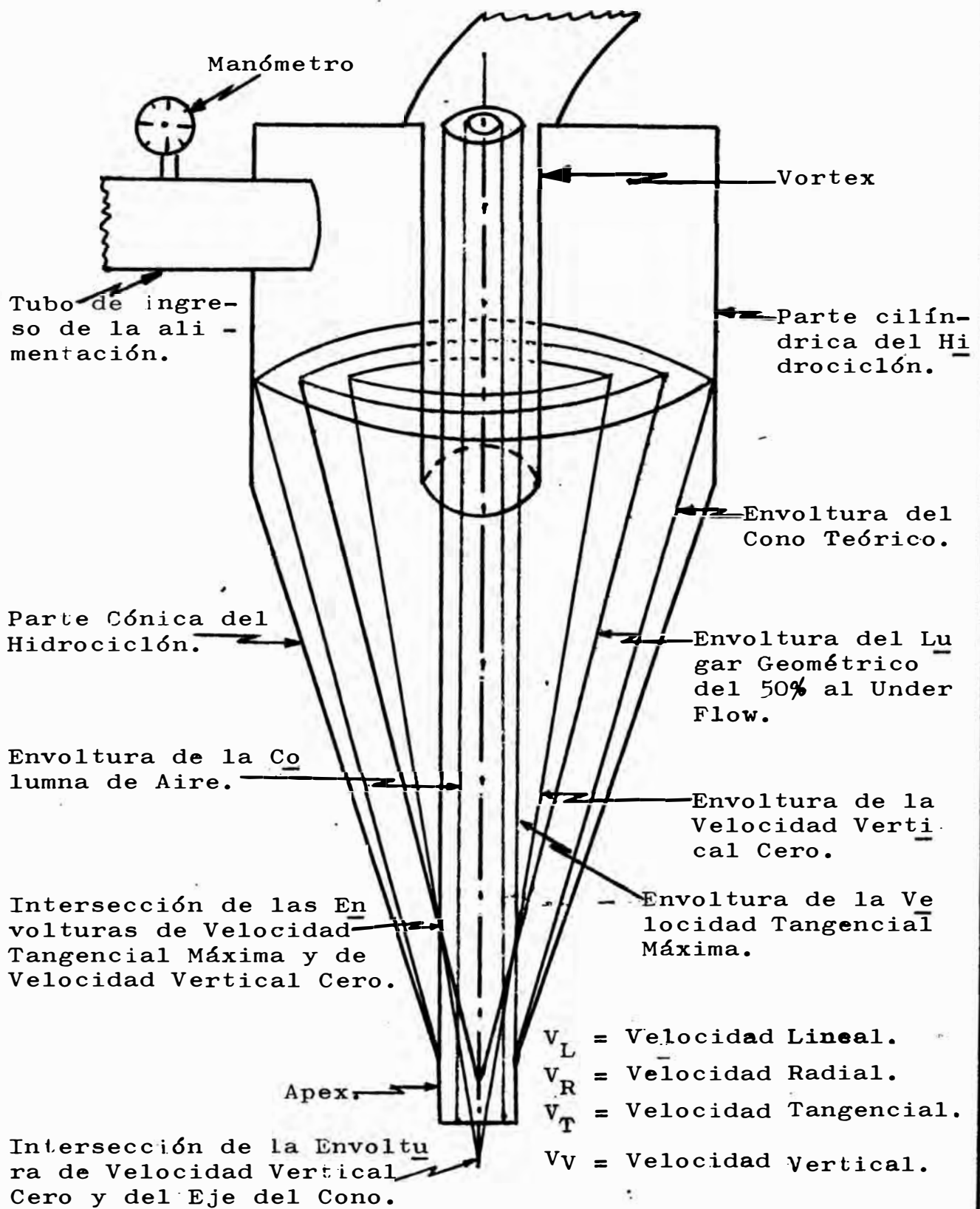
Múltiples investigaciones hechas a cerca de la operación del hidrociclón y de los fenómenos que acontecen en el interior de este aparato, han arribado a la con-

clusión de que durante el funcionamiento surgen cinco capas o envolturas, que a continuación se mencionan:

- a) Envoltura de la Columna de Aire
- b) Envoltura de la Máxima Velocidad Tangencial
- c) Envoltura de la Velocidad Vertical Cero
- d) Envoltura del Lugar geométrico de las Partículas que reportan 50% a under flow.
- e) Envoltura del Cono Teórico.

Seguidamente en la Figura No. 6, se ilustra la disposición de las envolturas y las partes integrantes de un hidrociclón.

FIGURA No.6.- ENVOLTURAS Y PARTES DE UN HIDROCICLÓN.





Se ha dado crédito y cuenta con la aprobación general, que el destino de una partícula abedece al desequilibrio de dos fuerzas opuestas en el hidrociclón, las cuales actúan sobre la partícula en una dirección radial; las fuerzas referidas son:

- La Fuerza Centrifuga, que actúa en la partícula en la dirección radial hacia la periferia del cono, y
- La Fuerza del Agua o Fuerza de Freno ó Fricción ( $F_D$ ), que viene a ser la fuerza radial actuante sobre la partícula en una dirección radial hacia el centro del cono.

La finalidad de conocer la posición de cualquier partícula en el hidrociclón, nos obliga a hallar una fórmula matemática en la que intervengan las diferentes variables de una partícula introducida en el hidrociclón juntamente con el agua; para esta deducción nos ayudaremos con la Figura No. 6A:

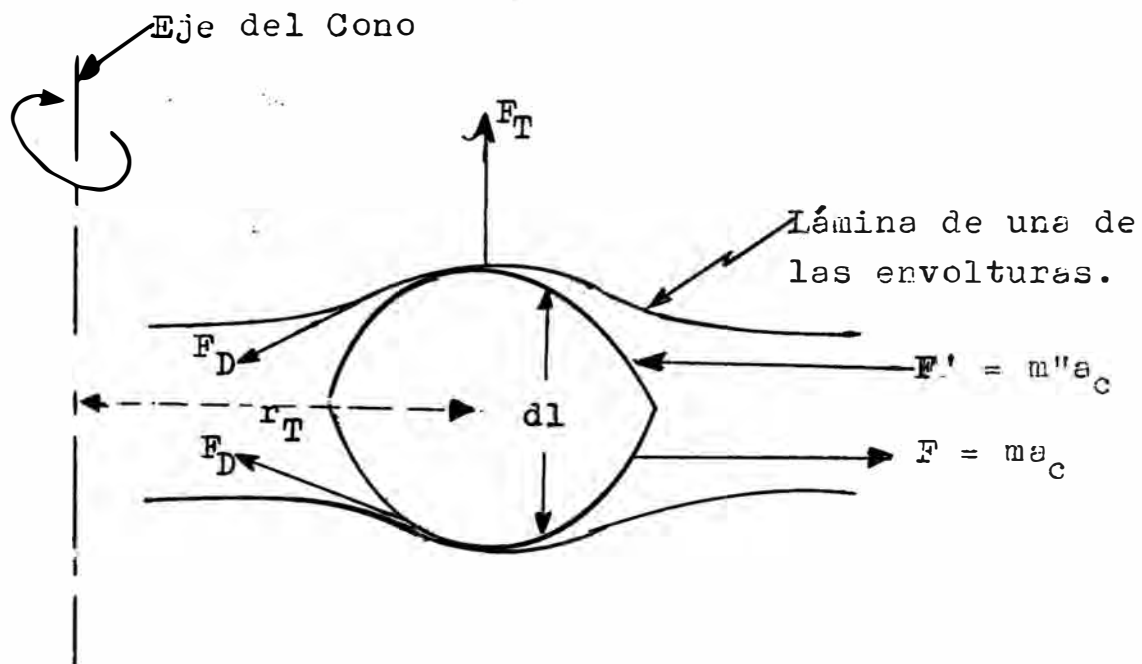


FIGURA No. 6A.- PARTICULA INTRODUCIDA ENTRE LAS LAMINAS DEL AGUA ESTANDO EL SISTEMA EN MOVIMIENTO CENTRIFUGO.

Del análisis de la Figura No. 6A, se obtiene la siguiente ecuación:

$$ma_c - m''a_c - F_D = ma_R = m \frac{dv_R}{dt} \quad (1)$$

En la ecuación (1), como quiera que la partícula sólida sustituye a la partícula de agua de igual volumen, la fuerza centrífuga ( $F_c$ ) neta sobre la partícula debida a la velocidad tangencial es:

$$ma_c - m''a_c = F_c$$

donde:

$m$  = masa de la partícula sólida

$m''$  = masa de la partícula del agua

$a_c$  = aceleración debida a la velocidad tangencial.

Mientras que  $F_D$ , es la fuerza de freno o fricción del agua sobre la partícula sólida, se debe a la Velocidad Radial que viene a ser la Fuerza Radial, que se representa por  $F_R$ .

Para dar una expresión más completa de la ecuación (1) se precisa hallar  $F_D$  en función de la velocidad radial ( $v_R$ ), densidad del agua ( $\rho$ ) y el área de la sección ( $A$ ); para esto:

$$F_D = m''a_{H_2O} \quad a_{H_2O} = \text{aceleración de desplazamiento de la partícula del agua}$$

$$a_{H_2O} = \frac{dv_{H_2O}}{dt} \quad v_{H_2O} = \text{velocidad de desplazamiento de la partícula de agua.}$$

$$F_D = m'' \frac{dv_{H_2O}}{dt}$$

Como la masa ( $m''$ ) de la partícula del agua varía a me-

dida que la partícula sólida se introduce en ella, se tiene:

$$F_D = \frac{dm'' v_{H_2O}}{dt}$$

Derivando:

$$F_D = m'' \frac{dv_{H_2O}}{dt} + v_{H_2O} \frac{dm''}{dt}$$

La velocidad de desplazamiento del agua y la velocidad radial de la partícula guardan entre sí una proporcionalidad; y siendo ésta más factible de determinar que la primera, es posible escribir:

$$v_{H_2O} = K v_R$$

K = constante de proporcionalidad.

$$F_D = m'' K \frac{dv_R}{dt} + K v_R \frac{dm''}{dt}$$

$$m'' = A \int 1$$

1 = diámetro medio de la partícula.

$$\frac{dm''}{dt} = A \int \frac{d1}{dt}$$

$$\frac{d1}{dt} = v_R$$

$$F_D = A \int 1 K \frac{dv_R}{dt} + K v_R^2 A \int \quad (2)$$

Reemplazando la ecuación (2) en (1):

$$m a_c = m'' a_c = A \int 1 K \frac{dv_R}{dt} + K v_R^2 A \int = m \frac{dv_R}{dt}$$

$$m = U \rho_s$$

$$m'' = U \rho_s v^2$$

$$a_c = \frac{v_T^2}{r_T}$$

Donde:

$U$  = volúmen de la partícula sólida  
 $\rho_s$  = densidad de la partícula sólida  
 $v_T$  = velocidad tangencial  
 $r_T$  = radio del cono en el punto donde  $v_T$  es medido.

Luego:

$$\left(\rho_s - \rho\right)U \frac{v_R^2}{r_T} - A \rho_s K \frac{dv_R}{dt} - KA \rho_s v_R^2 = U \rho_s \frac{dv_R}{dt} \dots (3)$$

La velocidad Radial y la Velocidad Tangencial se incrementan progresivamente como descienda la alimentación, llegando a alcanzar sus valores máximos en la intersección de las envolturas de velocidad vertical cero y de máxima velocidad tangencial, lugar que se denomina PUNTO DE CORTE DEL HIDROCICLON, en el que se efectúa la separación de las últimas porciones de over flow y under flow, fracciones que corresponden a las partículas cuyo diámetro es el DIAMETRO DE CORTE o TAMAÑO DE PARTICIÓN, también conocido como:  $d_{50}$ . Siendo la velocidad radial máxima se hace:

$$\frac{dv_R}{dt} = 0$$

Simplificándose la ecuación (3), en:

$$\left(\rho_s - \rho\right)U \frac{v_T^2}{r_T} = KA \rho_s v_R^2$$

Dando una forma energética al segundo miembro, se tiene:

$$K = \frac{C_D}{2}$$

Donde:

$C_D$  = Coeficiente de Arrastre o Coeficiente de Resistencia de una partícula sólida; característico para cada tamaño y naturaleza de partícula y el medio en que se desplaza.

Entonces:

$$(\rho_s - \rho) U \frac{v_T^2}{r_T} = C_D A \rho \frac{v_R^2}{2} \dots\dots\dots (4)$$

Esta ecuación (4) es definida como "LA ECUACION DE FUERZA DEL CONO". Siendo  $v_T$  la máxima velocidad tangencial  $r_T$  el respectivo radio y  $v_R$  la velocidad radial máxima, se determina el tamaño de partícula ( $d_{50}$ ) que se reporta 50% a under flow y 50% a over flow.

Para partículas de forma esférica, esta ecuación toma la forma siguiente:

$$(\rho_s - \rho) \frac{\pi d^3}{6} \frac{v_T^2}{r_T} = C_D \frac{\pi d^2}{4} \rho \frac{v_R^2}{2}$$

$$(\rho_s - \rho) \frac{1}{3} \frac{v_T^2}{r_T} = C_D \frac{\rho}{4} v_R^2 \dots\dots\dots (5)$$

Como resultado de muchas investigaciones empíricas de la operación de un hidrociclón, se ha encontrado relaciones matemáticas que permiten emplear la fórmula (5) las cuales se enumeran a continuación:

$$r_a = 0.083 r_c \dots\dots\dots (6)$$

$$r_o = r_T = 0.167 r_c \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{v_{Te}}{v_i} \cdot \left(\frac{A_c}{A_{iL}}\right)^{0.565} = 5.31 \dots\dots\dots (8)$$

$$v_{Te} r_e^{0.8} = K \dots\dots\dots (9)$$

$$v_T r_T^{0.8} = K \dots\dots\dots (10)$$

$$v_R = \frac{30.5 Q_o}{D_c \cdot h} \dots\dots\dots (11)$$

Donde:

- $r_a$  = radio de la columna de aire del hidrociclón
- $r_c$  = radio del cono del hidrociclón
- $r_o$  = radio mínimo (ideal) del vortex
- $r_T$  = radio de la envoltura de la velocidad tangencial máxima
- $v_{Te}$  = velocidad tangencial en el ingreso
- $v_T$  = velocidad tangencial máxima
- $v_i$  = velocidad media de admisión al hidrociclón
- $A_c$  = área del cono del hidrociclón
- $A_i$  = área de admisión del hidrociclón
- $K$  = constante
- $v_R$  = velocidad radial máxima
- $Q_o$  = caudal del over flow
- $D_c$  = diámetro del cono del hidrociclón
- $h$  = altura efectiva del cono; distancia entre el vortex y apex.

También se conoce que:

$$r_e = r_c \quad r_i \quad \dots\dots\dots (12)$$

Donde:

- $r_e$  = radio de entrada al hidrociclón
- $r_i$  = radio de admisión al hidrociclón

En el presente estudio la aplicación más justa de la ecuación de fuerza del cono, estará dado por los requerimientos de la cantidad de relleno hidráulico que la mina Atacocha necesita; siendo inmediato saber el tonelaje de mineral extraído y el volumen de tajeos a rellenarse. Datos que seguidamente son proporcionados por medios estadísticos de la ubicación de la mina; aspecto que ha continuación nos ocuparemos, en el siguiente Capítulo.

CAPITULO V

5.0. CUBICACION DE LA MINA Y CANTIDAD DE RELLENO REQUERIDO

5.0.1. CUBICACION DE LA MINA.- La zona deseada a re - llenarse está ubicada debajo del nivel 3,840; pa ra el cálculo de la cantidad del relleno hidráu lico a emplearse, empezaremos informándonos de la cubicación de la Mina Atacocha durante el año de 1974, y es como sigue :

5.1.1. CUADRO NO. 11.- PRODUCCIÓN POR LABORES POR DEBAJO DEL NIVEL 3840 (Año 1974)

<u>NIVELES</u>	<u>STOPES</u>	<u>TONELADAS METRICAS SECAS</u>
3,775	350	12,565.1
3,775	442	5,367.4
3,775	223	11,562.6
3,775	220	5,693.0
3,775	100	11,637.0
3,715	382	15,064.3
3,715	212	6,910.8
3,715	367	52,379.4
3,715	367	52,379.4
3,655	362	35,231.5
3,655	208	9,788.1
3,655	443	23,842.5
3,655	364	6,556.1
3,600	412	1,975.3
<b>T O T A L</b>	<b>-</b>	<b>198,573.1</b>

Tomando como base de cálculo la producción Promed io Mensual, se obtiene:

$$\frac{\text{T.M.S. (Promedio)}}{\text{Mes}} = \frac{198,573.1}{12} = 16,548 \text{ T.M.S./mes}$$

Asumiendo en el futuro la producción incrementada en un 25%, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Producción Máxima Estimada} &= 16,548 \quad 16,548 \times 0.25 \\ &= \underline{\underline{21,000 \text{ T.M.S./mes.}}} \end{aligned}$$

5.2.0. CANTIDAD DE RELLENO HIDRAULICO REQUERIDO.- Para conocer el peso de relleno requerido, previamente se determina el volumen del vacío dejado por el mineral extraído, puesto que éste es el espacio a rellenarse; teniendo como dato el tonelaje de mineral producido, para hallar el volumen correspondiente, antes se determina la gravedad específica del mineral In-situ.

5.2.1. DETERMINACION DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA DEL MINERAL IN-SITU.- Con este fin, el procedimiento empleado es el mismo que se utilizó para los sólidos del relave. Las muestras tomadas fueron de cabeza fresca (alimentación a la planta) o sea mineral procedente de la Mina Atacocha.

Los resultados que se consiguieron se dan a continuación:

CUADRO No. 12

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA DETERMINAR LA GRAVEDAD ESPECIFICA DEL MINERAL IN-SITU

F E C H A	W(Gramos)	V <sub>i</sub> (c.c.)	V <sub>f</sub> (c.c.)	GR-ESP.
17.5.75	100	300	333	3.03
19.5.75	100	300	334	2.94
20.5.75	100	300	332	3.12
21.5.75	100	300	333	3.03
22.5.75	100	300	331	3.21
23.5.75	100	300	332	2.94



F E C H A	W(Gramos)	V <sub>i</sub> (c.c.)	V <sub>f</sub> (c.c.)	GR-ESP.
24.5.75	100	300	333	3.03
T O T A L	700	2,100	2,328	--
PROMEDIO	-	--	--	3.07

La gravedad específica promedio del mineral in-situ es de 3.07.

5.2.2. CALCULO DE LA CANTIDAD DE RELLENO HIDRUALICO REQUERIDO

- Producción promedio de mineral por debajo del nivel 3,840 = 16,548 TMS/Mes
- Producción máxima de mineral estimado = 21,000 TMS/Mes
- Densidad del mineral in-situ obtenido experimentalmente = 3.07 TMS/m<sup>3</sup>
- Volúmen promedio del mineral:
 
$$16,548 \frac{\text{TMS}}{\text{mes}} \div 3.07 \frac{\text{TMS}}{\text{m}^3} = 5,390 \text{ m}^3/\text{mes}$$
- Volúmen máximo estimado de mineral:
 
$$21,000 \frac{\text{TMS}}{\text{mes}} \div 3.07 \frac{\text{TMS}}{\text{m}^3} = 6,840 \text{ m}^3/\text{mes}$$

Estos son los volúmenes de relleno hidráulico - que deberá introducirse a la mina. Para su conversión a cantidades en peso, se tendrá que hallar la Densidad In-situ ó Densidad Relativa del relleno hidráulico a usarse; para la consecución de este dato vital cuya determinación es netamente experimental, a juicio del autor, se ha recurrido a los valores de las densidades relativas obtenidas durante las anteriores pruebas de percolación, que se verificaron con el relave y materiales para diversas granulometrías,

el valor medio medido de esta densidad relativa o in-situ, es:

- En la Prueba No. 1:  
Densidad relativa =  $2.02 \text{ gr/cm}^3 = 2.02 \text{ TMS/m}^3$
  - En la Prueba No. 2:  
Densidad relativa =  $1.98 \text{ gr/cm}^3 = 1.98 \text{ TMS/m}^3$
  - En la Prueba No. 3:  
Densidad relativa =  $1.96 \text{ gr/cm}^3 = 1.96 \text{ TMS/m}^3$
  - En la Prueba No. 4:  
Densidad relativa =  $1.96 \text{ gr/cm}^3 = 1.96 \text{ TMS/m}^3$
  - En la Prueba No. 5:  
Densidad relativa =  $1.85 \text{ gr/cm}^3 = 1.85 \text{ TMS/m}^3$
- SUMA TOTAL ..... =  $9.77 \text{ TMS/m}^3$

Promedio de la Densidad Relativa =  $\frac{9.77}{5} = 1.96 \text{ TMS/m}^3$

Aproximando esta densidad =  $2 \text{ TMS/m}^3$

Más adelante se comprobará también experimentalmente esta densidad, con el material del under-flow del hidrociclón que es el relleno a emplearse.

Utilizando este dato, los pesos mensuales de relleno hidráulico necesario son:

- Peso promedio de Relleno Hidráulico:

$$5,390 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \times 2.0 \frac{\text{TMS}}{\text{m}^3} = 10,780 \frac{\text{TMS}}{\text{mes}}$$

- Peso máximo estimado de relleno hidráulico:

$$6,840 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \times 2.0 \frac{\text{TMS}}{\text{m}^3} = 13,680 \frac{\text{TMS}}{\text{mes}}$$

Una relación de bastante utilidad a saber, es las

toneladas de relleno hidráulico necesario para llenar el vacío dejado por una tonelada de mineral:

$$2.0 \frac{\text{TMS}}{\text{m}^3} \div 3.07 \frac{\text{TMS}}{\text{m}^3} = 0.651$$

Lo que significa que para rellenar el espacio dejado por una tonelada de mineral se necesita 0.651 de relleno hidráulico.

Habitualmente el sistema de trabajo de relleno hidráulico, opera en base a un tonelaje horario por ende, es conveniente calcular los flujos horarios respectivos. Para esta intención se necesita conocer el número de horas diarias y la cantidad de días mensual que operará el sistema de relleno hidráulico. Únicamente se establecerá este dato de acuerdo a la política operacional de cada empresa, no obstante, es incuestionable que cuanto mayor número de horas al mes trabajadas por el sistema mayor será el costo de operación y menor el costo de inversión y viceversa.

Para el presente caso de las exigencias de la Compañía Minera Atacocha S.A., el sistema de relleno hidráulico operará a razón de 26 días/mes y 22 horas/día, resultando el total de horas mensuales:

$$22 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \times 26 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 572 \text{ horas/mes.}$$

Por consiguiente:

- Flujo horario promedio de relleno en peso:

$$10,780 \frac{\text{TMS}}{\text{mes}} \div 572 \frac{\text{horas}}{\text{mes}} = 18.85 \text{ TMS/hora}$$

- Flujo horario promedio de relleno en volumen:

$$18.85 \frac{\text{TMS}}{\text{hora}} \div 2.0 \frac{\text{TMS}}{\text{m}^3} = 9.43 \text{ m}^3/\text{hora}$$

- Flujo horario máximo estimado de relleno en peso:

$$13,680 \frac{\text{TMS}}{\text{mes}} \div 572 \frac{\text{horas}}{\text{mes}} = 23.92 \text{ TMS/hora.}$$

- Flujo horario máximo estimado de relleno en volúmen:

$$23.92 \frac{\text{TMS}}{\text{hora}} \div 2.0 \frac{\text{TMS}}{\text{m}^3} = 11.96 \text{ m}^3/\text{hora}$$

Conocido el flujo horario máximo estimado de relleno, se está en condiciones de determinar el tiempo que se utilizará en rellenar cualquier stope; como ejemplo se ha escogido el stope más grande, que es el STOPE 367:

- Producción anual del stope = 52,379.4 TMS/año
- Area total del stope = 2,296 m<sup>3</sup>
- Densidad del mineral in-situ = 3.07 TMS/m<sup>3</sup>
- Producción mensual promedio =  $52,379.4 \frac{\text{TMS}}{\text{año}} \div 12 \text{ meses}$   
= 4,365 TMS/mes
- Volúmen del stope =  $4,365 \text{ TMS} \div 3.07 \frac{\text{TMS}}{\text{m}^3}$   
= 1,421.5 m<sup>3</sup>
- Altura a rellenarse =  $1,421.5 \text{ m}^3 \div 2,296 \text{ m}^2$   
= 0.62 m.
- Tiempo de rellenado del stope:  
 $1,421.5 \text{ m}^3 \div 11.96 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}} = 119 \text{ horas} = 5.4 \text{ días}$   
de 22 horas de operación.

Los resultados son resumidos en el siguiente cuadro:

---

M A T E R I A	PROMEDIO	MAXIMO
Producción de mineral (TMS/mes)	16,548	21,000
Densidad del mineral (TMS/m <sup>3</sup> )	3.07	
Volúmen por rellenar (m <sup>3</sup> /mes)	5,390	6,840
Densidad relativa del relleno (TMS/m <sup>3</sup> )	2.0	
Peso del relleno (TMS/mes)	10,780	13,680
Relación al peso:relleno/mineral	0.651	---
Tiempo de operación (horas/mes)	572	572
Flujo horario de relleno al peso (TMS/hora)	18.85	23.92
Flujo horario de relleno al volúmen (m <sup>3</sup> /hora)	9.43	11.96

Los resultados de estos cálculos nos faculta hacer una evaluación comparativa de la cantidad requerida de relleno con respecto al tonelaje de relave disponible. En la concentradora No. 2 de Atacocha se dispone de 51.33 TMS/hora de relave y se necesita 23.92 TMS/hora para relleno hidráulico, siendo la diferencia de 27.41 TMS/hora que representa al 53% de sólidos; este porcentaje de sólidos a eliminarse nos depara un amplio margen de tolerancia para propósitos de la clasificación.

En lo referente del análisis de calidad según la granulometría del relave ya citado en el Cuadro No. 10, el corte en el hidrociclón debería hacerse en la malla 200, hasta donde se tiene un tonelaje acumulativo retenido de 26.69TMS/hr, pero por razones que a continuación se exponen, el corte se efectuará en la malla 325, siendo el tonelaje acumulativo retenido de 31.77 TMS/hora.

a) Las operaciones en una Planta Concentradora-

están siempre propensas a incidencias que directa o indirectamente perturban la normal producción del relave.

b) No siempre las características y eficiencias de un hidrociclón permanecen constantes, puesto que éstos sufren modificaciones con el uso

c) Con la finalidad de controlar que la pérdida de sólidos en el over-flow no exceda al 53%.

Basado en estas razones se ha adoptado este margen de seguridad en el corte.

## CAPITULO VI

### 6.0 SELECCION, CAPACIDAD MAXIMA E INSTALACION DEL HIDROCICLON

6.1.0. SELECCION.- En vista del caudal del relave disponible de 863 GPM y con el objetivo de practicar las experiencias de clasificación, en condiciones iguales a que se hará posteriormente para obtener el relleno hidráulico a emplearse; se ha elegido un hidrociclón de 15 pulg. cuya selección se justificará con el cálculo de su capacidad máxima. Las características del hidrociclón escogido, son las siguientes:

Marca : KREBS  
Modelo : D-15-B  
Diámetro : 15 pulg.  
Diámetro del vortex: 6 pulg.  
Diámetro del apex : Se fijará en la experiencia  
Area de alimentación: 11 pulg<sup>2</sup>.

6.2.0. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD MAXIMA.- Aplicando la e-

cuación de flujo:

$$Q = v_i \times A_i \dots\dots\dots (1)$$

Siendo:

- $Q$  = Caudal máximo de alimentación (cm<sup>3</sup>/seg.)  
 $v_i$  = Velocidad de alimentación (cm/seg.)  
 $A_i$  = Area de ingreso del hidrociclón (cm<sup>2</sup>).

Con la consiguiente relación matemática se procede a calcular  $v_i$ :

$$v_i^2 = k r_c g \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

$K$  = Factor de fuerza centrífuga; para este tipo de hidrociclón fluctúa de 15 á 19, es de origen empírico, siendo su valor el promedio, o sea:

$$K = \frac{15 + 19}{2} = 17$$

$r_c$  = Radio del hidrociclón (cm)

$r_c$  = Aceleración de la gravedad = 980 cm/seg<sup>2</sup>

Sustituyendo valores en la fórmula (2):

$$v_i = \sqrt{17 \times 19 \times 980} = 563 \text{ cm/seg.}$$

$$A_i = 11 \times (2.54)^2 = 70.97 \text{ cm}^2$$

Reemplazando en (1) :

$$Q = 563 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \times 70.97 \text{ cm}^2 = 40,000 \text{ cm}^3/\text{seg.}$$

$$Q = 40 \text{ lts/seg.}$$

Expresando en GPM:

$$Q = 40 \frac{\text{lbs}}{\text{seg}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ lbs.}} \times 60 \frac{\text{seg}}{\text{min}} = Q = 634 \text{ GPM}$$

Este resultado nos manifiesta que un sólo hidrociclón no es suficiente para clasificar el caudal total del relave disponible, en efecto, es forzoso valerse de dos hidrociclones, tratándose en cada uno de ellos 432 GPM de relave, que es inferior a su capacidad máxima.

6.3.0. INSTALACION.- Contando con un hidrociclón de 15 pulg. y sabiendo que el caudal de relave que le pertenece es de 432 GPM se procede a hallar la altura respectiva de instalación:

$$Q_i = 432 \text{ GPM} = \frac{432}{60} \times 3,785 = 27,252 \text{ cm}^3/\text{seg.}$$

$$A_i = 11 \text{ pulg}^2 = 70.97 \text{ cm}^2$$

Aplicando la siguiente ecuación de flujo:

$$Q_i = A_i C_v C_c \sqrt{2 g h} \dots\dots\dots ( 1 )$$

Donde:

- $Q_i$  = Caudal de alimentación
- $A_i$  = Area de alimentación
- $C_c$  = Coeficiente de contracción = 1
- $C_v$  = Coeficiente de velocidad
- $g$  = Aceleración de la gravedad
- $h$  = Altura a hallarse.

Esta ecuación se ha aplicado porque resultados de investigaciones indican bastante claro, que el flujo a través de los orificios en el cono se ciñen generalmente a los conceptos de flujo en o



rificios largos, establecidos en Mecánica de Fluidos.

Se sabe que:

$$C_v = \frac{r_o}{r_e} \dots\dots\dots (2)$$

De las fórmulas empíricas:

$$r_o = 0.167 r_c$$

$$r_o = 0.167 \times \frac{15}{2} \text{ pulg.} = 1.2525 \text{ pulg.}$$

$$r_e = r_c - r_i$$

$$r_i = \sqrt{\frac{A_i}{\pi}} = \sqrt{\frac{11}{3.1416} \text{ pulg}^2} = 1.87 \text{ pulg.}$$

$$r_e = \frac{15}{2} \text{ pulg} - 1.87 \text{ pulg} = 5.63 \text{ pulg.}$$

Supliendo valores en (2)

$$C_v = \frac{1.2525 \text{ pulg}}{5.63 \text{ pulg}} = 0.222$$

El coeficiente de Arrastre  $C_D$ , está relacionado con estos coeficientes por la siguiente fórmula:

$$C_D = C_c \times C_v \dots\dots\dots (3)$$

Reemplazando valores en la ecuación (3):

$$C_D = 1 \times 0.222 = 0.222$$

Sustituyendo valores en la ecuación (1):

$$27,252 = 70.97 \times 1 \times 0.222 \times \sqrt{2 \times 980 \times h}$$

$$1,722 = \sqrt{2 \times 980 \times h}$$

$$h = 1,513 \text{ cm} = 15.13 \text{ mets.}$$

Esta altura sería la aproximada prescindiendo la pérdida por fricción de tubería de alimentación, pero por no haberse encontrado un sitio adecuado

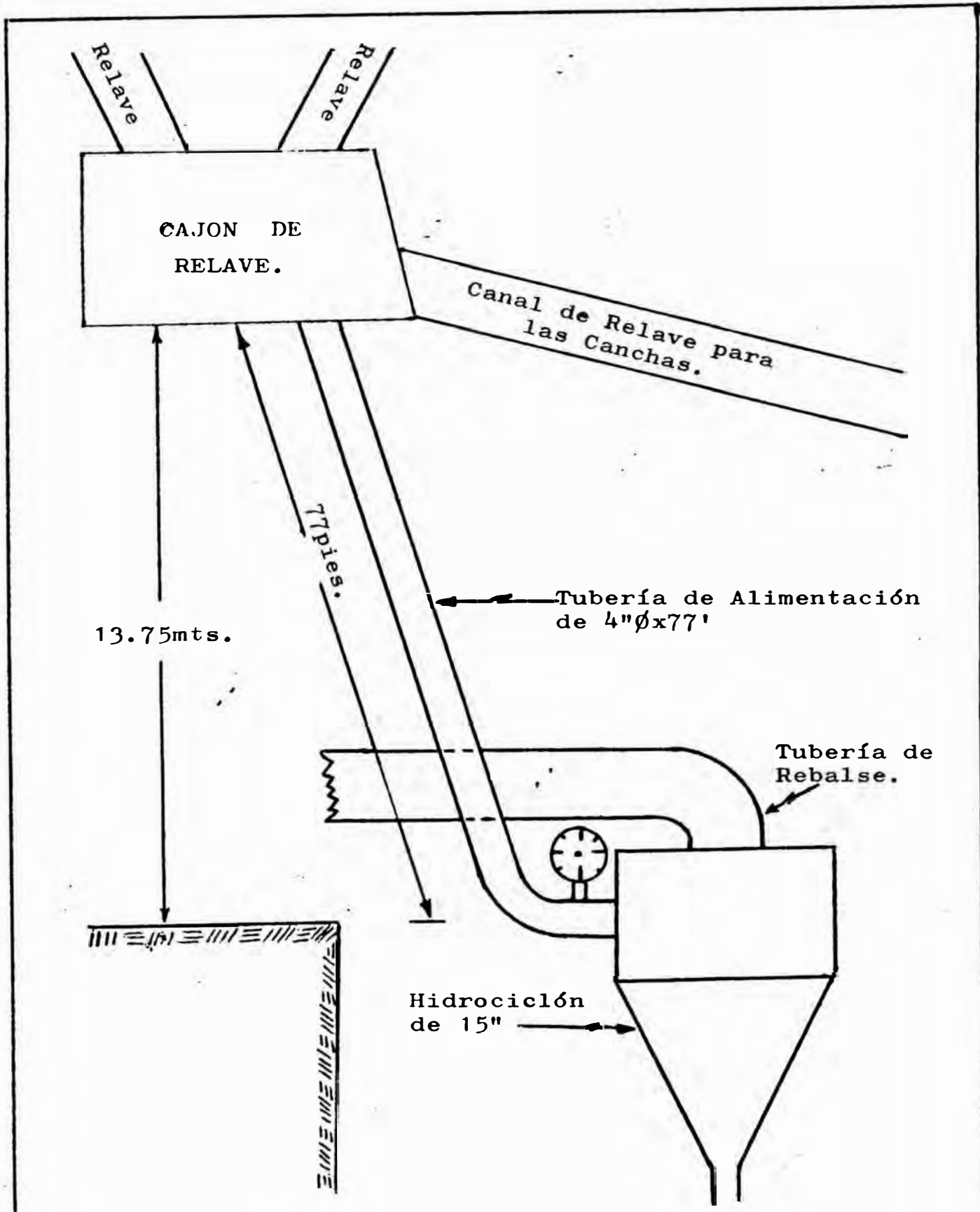


FIGURA No.7 ESQUEMA QUE MUESTRA LA INSTALACION DEL HIDROCICLON.

para la instalación con esta altura y por motivos de transporte de las muestras y de distancia a la instalación para la prueba de velocidad crítica, el aparato se ubicó en un lugar cuya diferencia de altura fue de 13.75 mts.; naturalmente con esta cota disminuyó ligeramente el caudal, compensándose esta reducción con el punto de toma del relave que favoreció para conservar la granulometría del material. La tubería de alimentación al hidrociclón tiene las dimensiones de 4" de diámetro por 77 pies de longitud. Seguidamente se esquematiza la instalación en la Figura No. 7:

6.3.1. CALCULO DEL CAUDAL DE ALIMENTACION PARA LA NUEVA ALTURA .- Para este cálculo se incluye la pérdida de cabeza por fricción de la tubería:

$$Q_1/A_1 = C_D \sqrt{2g(h-h_f)} \dots\dots\dots (1)$$

$$h_f = \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \times f \dots\dots\dots (2)$$

$$v = \frac{Q_1}{A} \dots\dots\dots (3)$$

En donde:

- $h_f$  = Pérdida de cabeza por fricción de la tubería
- $h$  = La nueva altura = 13.75 mts = 1,375 cm.
- $L$  = Longitud de tubería = 77 pies = 924 pulg.
- $D$  = Diámetro de tubería = 4 pulg.
- $v$  = Velocidad de flujo en la tubería
- $f$  = Factor de fricción de la tubería = 0.038.
- $A$  = Sección de la tubería

$$A = \frac{\pi}{4} (4 \text{ pulg} \times 2.54 \frac{\text{cm}}{\text{pulg}})^2 = 81 \text{ cm}^2$$

$A_1$  = Area de ingreso al hidrociclón.

Reemplazando las ecuaciones (2) y (3), en la e -

ecuación (1), se deduce:

$$\frac{Q_1^2}{A_1^2} = C_D^2 \times 2g \left( h - \frac{L}{D} \times \frac{Q_1^2}{A_1^2} \times \frac{f}{2g} \right)$$

$$\frac{Q_1^2}{2g \times A_1^2 \times C_D^2} = h - \frac{L}{D} \times \frac{Q_1^2}{A_1^2} \times \frac{f}{2g}$$

$$\frac{Q_1^2}{2g} \left( \frac{1}{A_1^2 \times C_D^2} + \frac{L}{D} \times \frac{f}{A_1^2} \right) = h \dots\dots (4)$$

Sustituyendo sus valores:

$$A_1^2 = (70.97 \text{ cm}^2)^2 = 5036.7 \text{ cm}^4$$

$$C_D^2 = (0.222)^2 = 0.049$$

$$C_D^2 \times A_1^2 = (5,036 \text{ cm}^4 \times 0.049) = 246.8 \text{ cm}^4$$

$$A^2 = (81 \text{ cm})^2 = 6,561 \text{ cm}^4$$

$$\frac{L}{D} f = \frac{924}{4} \frac{\text{pulg}}{\text{pulg}} \times 0.038 = 8.778$$

En la ecuación (4):

$$\frac{Q_1^2}{2g} \left( \frac{1}{246.8 \text{ cm}^4} + \frac{8.778}{6,561 \text{ cm}^4} \right) = 1,375 \text{ cm}$$

$$\frac{Q_1^2}{2g} (0.004 + 0.001) = 1,375 \text{ cm}^5$$

$$Q_1^2 = \frac{2 \times 980 \times 1,375}{0.005} \text{ cm}^6/\text{seg}^2$$

$$Q_1^2 = 539 \times 10^6 \text{ cm}^6/\text{seg}^2$$

$$Q_1 = 10^3 \sqrt{539} = 23,216 \text{ cm}^3/\text{seg}.$$

Expresando en GPM:

$$Q_1 = 23.216 \frac{\text{lbs}}{\text{seg}} \times \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3,785 \text{ lbs}} =$$

$$Q_1 = 368 \text{ GPM}$$

Para hallar la pérdida de cabeza por fricción, - en la ecuación (2) sustituimos la ecuación (3):

$$h_f = \frac{L}{D} \times f \times \frac{Q_1^2}{A^2 \times 2g} \dots\dots\dots (5)$$

Reemplazando valores en esta última relación:

$$h_f = 8.778 \times \frac{(23.216 \text{ cm}^3/\text{seg})^2}{(81 \text{ cm}^2)^2 \times 2 \times 980 \text{ cm}/\text{seg}^2} =$$

$$h_f = 367.6 \text{ cm} = 3.68 \text{ mts.}$$

Conocido la pérdida de cabeza por fricción, se calcula la altura real ( $h_1$ ) de alimentación al hidrociclón:

$$h_1 = h - h_f$$

Por tanto:

$$h_1 = (13.75 - 3.68) \text{ mts}$$

$$h_1 = 10.07 \text{ mts.}$$

El caudal calculado de 368 GPM se verificará posteriormente con el balanceo de materiales a efectuarse en el hidrociclón.

## CAPITULO VII

7.0. APLICACION DE LA ECUACION DE FUERZA DEL CONO.- Oportunamente se advirtió, que la Ecuación de Fuerza del Cono es la encargada de definir el diámetro de corte en

el hidrociclón; en esta circunstancia su aplicación se liga íntimamente con las exigencias cuantitativas y cuantitativas del material de relleno hidráulico. Obedeciendo a estos factores, como ya se anticipó, el diámetro de corte o  $d_{50}$  fijado es el que corresponde a la malla 325 (60 micrones, diámetro promedio).

Con este tamaño de partición pretendemos obtener teóricamente el under flow apropiado, haciéndose la separación en dicho dispositivo gracias a los cambios en el diámetro del apex, ya que ésta es la única variable con que se puede jugar en este caso. La performance de clasificación del hidrociclón se examinará con las gráficas clásicas de las curvas de GAUDIN-SCHUMMAN y las curvas TROMPO ó de EFICIENCIA DE CLASIFICACION; mientras que la bondad del under flow se evaluará con la prueba de percolación, coeficiente de uniformidad del material, razón de poros, ángulo de fricción interno.

A continuación se da la relación de datos de que precisa la ecuación de fuerza del cono para el presente caso:

$$\rho_s = 2.7 \text{ gr/cm}^3$$

$$\rho_f = 1.165 \text{ gr/cm}^3$$

$$d_{50} = 60 \text{ micrones} = 6 \times 10^{-3} \text{ cm} = 2.362 \times 10^{-3} \text{ pulg.}$$

$$r_c = 7.5 \text{ pulg.}$$

$$r_T = 0.167 r_c = 0.167 \times \frac{15}{2} \text{ pulg.} = 1.2525 \text{ pulg.}$$

$$r_i = 1.87 \text{ pulg.}$$

$$r_e = r_c - r_i = \frac{15}{2} \text{ pulg.} - 1.87 \text{ pulg.} = 5.63 \text{ pulg.}$$

$$A_i = 11 \text{ pulg}^2 = 70.96 \text{ cm}^2$$

$$C_D = 0.222$$

$$A_c = 176.7 \text{ pulg}^2$$

Empleando la ecuación de fuerza del cono para -  
partículas esféricas:

$$(\rho_s - \rho) \frac{d_{50}^3}{3} \times \frac{v_T^2}{r_T} = C_D \times \rho \times \frac{v_R^2}{4}$$

Supliendo valores:

$$\frac{4(2.7 - 1.165)}{1.165} \times d_{50} \times \frac{v_T^2}{r_T} = 3 \times 0.222 \times v_R^2$$

$$5.268 d_{50} \times \frac{v_T^2}{r_T} = 0.666 v_R^2$$

$$7.91 d_{50} \times \frac{v_T^2}{r_T} = v_R^2 \dots\dots\dots (1)$$

- Cálculo de  $v_T$  :

$v_{Te}$  en  $r_e$  se sabe que es:

$$\frac{v_{Te}}{v_i} \times \left( \frac{A_c}{A_i} \right)^{0.565} = 5.31$$

Reemplazando :

$$\frac{v_{Te}}{v_i} \times \left( \frac{176.7}{11} \right)^{0.565} = 5.31$$

$$\frac{v_{Te}}{v_i} \times (16)^{0.565} = 5.31$$

$$\frac{v_{Te}}{v_i} \times 4.8 = 5.31$$

$$v_{Te} = \frac{5.31 v_i}{4.8}$$

Determinando  $v_i$ :

$$v_i = \frac{Q_i}{A_i} = \frac{23.216 \text{ cm}^3/\text{seg.}}{70.96 \text{ cm}^2} = 327 \text{ cm/seg.}$$

Luego:

$$v_{Te} = \frac{5.31 \times 327 \text{ cm/seg.}}{4.8} = 361.7 \text{ cm/seg.}$$

Se conoce que:

$$v_{Te} \times (r_e)^{0.8} = K$$

$$v_T \times (r_T)^{0.8} = K$$

Igualando estas dos relaciones:

$$v_T = v_{Te} \times \left(\frac{r_e}{r_T}\right)^{0.8}$$

$$v_T = 361.7 \text{ cm/seg} \times \left(\frac{5.63 \text{ pulg.}}{1.2525 \text{ pulg.}}\right)^{0.8} =$$

$$v_T = 361.7 \text{ cm/seg.} \times (4.5)^{0.8} =$$

$$v_T = 361.7 \times 3.34 \text{ cm/seg.} =$$

$$v_T = 1,208 \text{ cm/seg.}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (1):

$$7.91 \times 2.362 \times 10^{-3} \text{ pulg} \times \frac{(1,208 \text{ cm/seg})^2}{1.2525 \text{ pulg}} = v_R^2$$

$$1.492 \times 10^{-2} (1,208 \text{ cm/seg})^2 = v_R^2$$

$$v_R = 1.221 \times 120.8 \text{ cm/seg.}$$

$$v_R = 147.5 \text{ cm/seg.}$$

El siguiente paso es el cálculo de  $Q_o$ , a partir de la ecuación (11) del Capítulo IV, es otra de las fórmulas de importancia cuya deducción es



digna de ser aplicada.

La velocidad radial encima de la envoltura de -  
velocidad vertical cero, queda determinado por -  
la relación del volúmen total de over flow y el  
área de la envoltura sobre la cual este volúmen  
a cruzado. La velccidad radial en este punto es

$$v''_R = \frac{Q_o}{A_E} \dots\dots\dots (2)$$

El área de la envoltura ( $A_E$ ) es:

$$A_E = \pi K (r_E - r_a) \dots\dots\dots (2A)$$

Donde:

$$K = 0.144 h_2 \dots\dots\dots (3)$$

$h_2$  = Altura de la envoltura de velocidad verti-  
cal cero donde la velocidad radial, es pro  
medio.

$r_E$  = Radio de la envoltura de velocidad verti-  
cal cero.

$$r_E = 0.5470 r_c$$

$r_a$  = Radio de la columna de aire

$$r_a = 0.083 r_c$$

En la ecuación (2A):

$$A_E = 0.144 \pi h_2 (0.5470 - 0.083) r_c$$

$$A_E = 0.144 \pi x 0.464 h_2 x r_c$$

Reemplazando en la ecuación (2):

$$v''_R = \frac{Q_o}{0.144 \pi x 0.464 h_2 x r_c} \dots\dots\dots (4)$$

El promedio de la velocidad radial obtenido por  
división de todo el volumen de over flow por el  
área de la envoltura, sucede a una altura de:

$$h_2 = 0.38 h_1$$

Donde:

$h_1$  = Altura de la base de la envoltura de velocidad vertical cero a la intersección de la envoltura de velocidad tangencial máxima con la envoltura de velocidad vertical cero.

Por la intersección de las envolturas de velocidad vertical cero y velocidad tangencial máxima, ocurre en todos los hidrociclones a la distancia vertical de:

$$h_1 = 0.82 h$$

Siendo:

$h$  = Altura efectiva del cono del hidrociclón

En la intersección referida, la ecuación de fuerza de cono predice el tamaño  $d_{50}$ .

Con estas alturas en la ecuación (4), se obtiene:

$$v_R = \frac{Q_o}{0.144\pi \times 0.464 (D_c/2) \times 0.38 \times 0.82 h} =$$

$$v_R = \frac{Q_o}{0.1414 \times 0.232 D_c \times h}$$

$$v_R = \frac{30.5 Q_o}{D_c \times h}$$

Para el hidrociclón de 15 pulg. se tiene que:

$$h = 106 \text{ cm}$$

$$D_c = 15 \text{ pulg} = 38.1 \text{ cm.}$$

Con estos datos y aplicando la última fórmula, se consigue:

$$147.5 \text{ cm/seg} = \frac{30.5 Q_o}{38.1 \text{ cm} \times 106 \text{ cm}}$$

Despejando  $Q_o$ :

$$Q_o = 19,532 \text{ cm}^3/\text{seg.}$$

Expresando en GPM:

$$Q_o = 19,532 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \times \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ gal.}}{3,785 \text{ cm}^3} =$$

$$Q_o = 310 \text{ GPM}$$

Con este resultado mediante una simple diferencia de caudales, se determina el flujo de under flow  $Q_u$ .

$$Q_i = Q_o + Q_u$$

$$Q_u = Q_i - Q_o$$

Sustituyendo:

$$Q_u = (368 - 310) \text{ GPM}$$

$$Q_u = 58 \text{ GPM}$$

El hecho de conocer los flujos de over y under flow, nos ubica en una situación muy ventajosa para con suma aproximación calcular el diámetro del apex a utilizarse en la práctica.

**7.1.0. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LOS DIAMETROS DEL APEX Y VORTEX.**- Para todos los hidrociclones existe una relación digna de confianza, porque así lo garantiza los resultados obtenidos con su aplicación hasta hoy; lejos de afectar la cuantía de la ecuación de fuerza del cono, esta sencilla relación que nos referimos viene a gobernar la proporción cabal que debe guardar el cau

dal de over flow y under flow, proporción dependiente de las dimensiones de los diámetros de los orificios del vortex y apex; llana relación denominada "RAZON DE CONO", que expresa la relación de:  $D_u/D_o$ , siendo  $D_u$  el diámetro del apex u orificio de under flow y  $D_o$  el diámetro ideal del vortex u orificio de over flow.

El diámetro del vortex ideal,  $D_o$ , viene ha ser igual al diámetro de la envoltura de velocidad tangencial máxima, por causa de que ésta es la única corriente ascencional que lleva partículas en suspensión, o sea:

$$r_o = r_T = 0.167 r_c$$

O lo que es lo mismo:

$$D_o = D_T = 0.167 D_c$$

Para el hidrociclón de 15 pulg.,  $D_o$ , es:

$$D_o = 0.167 \times 15 \text{ pulg.} = 2.5 \text{ pulg.}$$

El valor de 2.5 pulg. representa el diámetro ideal del vortex. Las limitaciones en la práctica de las exigencias de la razón de cono, imposibilita colocar al diámetro de over flow en este valor, por eso se suele poner vortex con diámetro mayor al ideal, lo cual no significa incrementar el caudal de over flow con partículas ya clasificadas, sino simplemente el mayor área del vortex inevitablemente hace que una porción de la alimentación, es decir, carga sin clasificar sea arrastrada juntamente con el over flow; mientras que una reducción menor al  $D_o$  ideal provoca la creación de carga circulante en

el cono, menoscabando el normal funcionamiento de este dispositivo.

De conformidad con las investigaciones hechas - para hidrociclones, ha sido fijado una relación empírica útil que enlaza el porcentaje de volumen de over flow con la razón de cono, permitiendo de manera fácil obtener el diámetro del apex. Estas dos variables se relacionan mediante una curva empírica de utilización muy valiosa cuya gráfica se representa en la Figura No. 8.

Los flujos en volumen de  $Q_i$ ,  $Q_o$  y  $Q_u$  encontrados nos posibilita conocer la fracción o porcentaje de over flow y con este dato acudir a la curva de la Figura No. 8 para leer el  $D_u/D_o$  respectivo; certificado el valor de ambas variables proseguimos a calcular el diámetro del apex requerido.

$$\begin{aligned} \% Q_o &= \frac{Q_o}{Q_i} \times 100 \\ \% Q_o &= \frac{310 \text{ GPM}}{368 \text{ GPM}} \times 100 \\ \% Q_o &= 84\% \end{aligned}$$

La razón de cono perteneciente a 84% de  $Q_o$  en la curva es:

$$\frac{D_u}{D_o} = 0.67$$

$$D_u = 0.67 D_o$$

$$D_u = 0.67 \times 2.5 \text{ pulg.}$$

$$D_u = 1.675 \text{ pulg.}$$

En la práctica para este tipo de hidrociclón es corriente usar apex con diámetros que varían entre medidas establecidas, quedando ubicado este

Porcentaje de Volumen a Over Flow :  $\frac{O_1}{O_2} \times 100.$

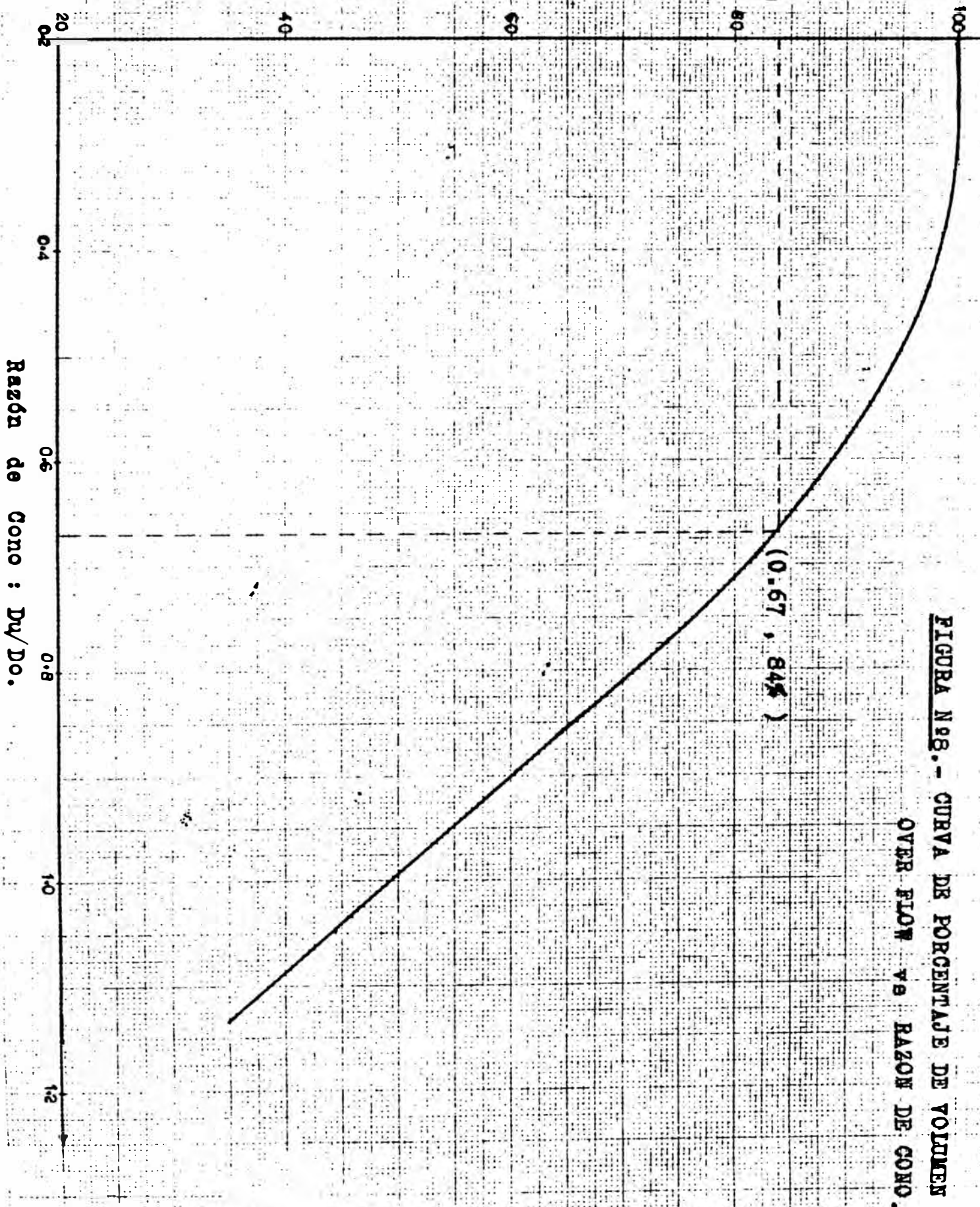


FIGURA N°8.- CURVA DE PORCENTAJE DE VOLUMEN DE OVER FLOW vs RAZON DE CONO.

valor de 1.675 pulg. entre 1 1/2 pulg. y 2 pulg. de diámetro; frente a estas dimensiones, la disjuntiva por elegir el apex con diámetro apropiado se deja a consideración de los ensayos a efectuarse con cada uno de ellos. La discusión y análisis de los resultados que se logren en las experiencias aludidas, es materia de otro capítulo, al cual de inmediato nos dedicaremos.

## CAPITULO VIII

**8.0. PRUEBAS DE SELECCION DEL APEX APROPIADO PARA EL HIDRO-CICLON** .- En el desarrollo de este estudio creemos haber dado cima en lo que concierne a los cálculos teóricos sobre la operación del hidrociclón, quedando pendiente la ratificación de ellos en el terreno práctico; a continuación se describe las pruebas hechas:

### **8.1. PRUEBA CON APEX DE 2 PULGADAS DE DIAMETRO**

Con este ensayo damos inicio a la selección del apex cuyo desempeño en el trabajo satisfaga la demanda de un material de relleno hidráulico apto para cumplir con los menesteres de la mina. El desarrollo de la presente experiencia consistió en:

**8.1.1. CALCULO DEL CAUDAL DEL UNDER FLOW** .- Para medir este flujo se valió de un depósito de forma cilíndrica, cuyas dimensiones son:

Altura = 31 pulg = 78.74 cm

Diámetro = 17.75 pulg = 45.10 cm.

Tiempo promedio de llenado = 25 seg.

Volúmen del depósito =  $\frac{1}{4} (45.10 \text{ cm})^2 \times 78.74 \text{ cm}$

$$\text{Volúmen del depósito} = 125,787.15 \text{ cm}^3$$

$$\text{Caudal: } Q_u = \frac{125,787.15 \text{ cm}^3}{25 \text{ seg.}}$$

$$Q_u = 5,031.5 \text{ cm}^3/\text{seg.}$$

En GPM:

$$Q_u = \frac{5,031.5 \text{ cm}^3}{\text{seg}} \times \frac{60 \text{ seg.}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ gal.}}{3,785 \text{ cm}^3}$$

$$Q_u = 79.9 \text{ GPM}$$

8.1.2. MEDICION DE LA DENSIDAD DEL UNDER FLOW.- Las mediciones se realizaron con una balanza Marcy, los resultados son:

1,590 gr/lt	1,570 gr/lt
1,540 gr/lt	1,560 gr/lt
1,530 gr/lt	1,510 gr/lt

$$\text{Densidad promedio: } X = 1,550 \text{ gr/lt} = 1.55 \text{ TM/m}^3$$

8.1.3. MEDICION DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS DEL UNDER FLOW.- Luego de varias pruebas efectuada en el laboratorio siguiendo el método de Arquímedes, se obtuvo:

$$\text{Gravedad Específica promedio} = 2.8$$

8.1.4. CALCULO DE CAUDALES EN PESO Y EN VOLUMEN DE SOLIDOS Y DE AGUA DEL UNDER FLOW.-

- Hallando el porcentaje de sólidos al volúmen:

$$\% \text{ sólidos al volúmen} = \frac{X - 1}{\frac{X}{\rho_s} - 1} \times 100$$

$$\% \text{ sólidos al volúmen} = \frac{1.55 - 1}{2.80 - 1} \times 100$$

$$\% \text{ sólidos al volúmen} = 30.55 \%$$

- Determinando el porcentaje de sólidos al peso:



$$\% \text{ sólidos al peso} = \frac{(X - 1)}{(\rho_s - 1)} \times \frac{\rho_s}{X} \times 100$$

$$\% \text{ sólidos al peso} = \frac{1.55 - 1}{2.80 - 1} \times \frac{2.80}{1.55} \times 100$$

$$\% \text{ sólidos al peso} = 55.2 \%$$

- Caudal en peso de sólidos:

$$Q_u = 5,031.5 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \times \frac{3,600 \text{ seg}}{\text{hora}} \times \frac{\text{m}^3}{10^6 \text{cm}^3} =$$

$$Q_u = 18.1134 \text{ m}^3/\text{hora}$$

$$Q_u = 18.1134 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \times 1.55 \frac{\text{TM}}{\text{m}^3} =$$

$$Q_u = 28.10 \text{ TM/hora}$$

$$Q_u = 28.10 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times 0.552 =$$

$$Q_u = 15.5 \text{ TMS/hora}$$

-Caudal en volúmen de sólidos:

$$Q_u = 15.5 \frac{\text{TMS}}{\text{hora}} \times \frac{\text{m}^3}{2.80 \text{ TMS}} \times \frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \times \frac{264.20 \text{ gal}}{\text{m}^3} =$$

$$Q_u = 24.4 \text{ GPM}$$

-Caudal en peso de agua:

$$Q_{\text{agua}} = 28.10 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times \frac{(100 - 55.2)}{100} =$$

$$Q_{\text{agua}} = 12.6 \text{ TM/hora}$$

- Caudal de agua en volúmen:

$$Q_{\text{agua}} = 12.6 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times \frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \times \frac{\text{m}^3}{1 \text{ TM}} \times \frac{264.20 \text{ gal}}{\text{m}^3} =$$

$$Q_{\text{agua}} = 55.5 \text{ GPM}$$

8.1.5. CALCULO DEL CAUDAL DEL OVER FOPW.- Se utilizó un recipiente cilíndrico de dimensiones:

Altura = 43.3 cm.

Diámetro = 45.0 cm

Tiempo promedio de llenado = 4 seg.

Volúmen del recipiente =  $\frac{\pi}{4} (45 \text{ cm})^2 \times 43.3$

Volúmen del recipiente = 68,887 cm<sup>3</sup>

Caudal:  $Q_o = \frac{68.887 \text{ cm}^3}{4 \text{ seg.}}$

$Q_o = 17,222 \text{ cm}^3/\text{seg.}$

En GPM:  $Q_o = 17,222 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \times \frac{60 \text{ seg}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ gal.}}{3,785 \text{ cm}^3} =$

$Q_o = 273 \text{ GPM}$

8.1.6. MEDICION DE LA DENSIDAD DEL OVER FLOW.- Se midió con la balanza Marcy y la lectura de los resultados fue:

1,065 gr/lt

1,060 gr/lt

1,050 gr/lt

1,055 gr/lt

1.050 gr/lt

1,050 gr/lt.

Densidad promedio:  $X = 1,055 \text{ gr/lt} = 1,055 \text{ TM/m}^3$

8.1.7. MEDICION DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS DEL OVER FLOW .- Con el método de Arquímedes - se realizaron repetidos ensayos en el laboratorio y se determinó que:

Gravedad específica promedio = 2.6

8.1.8. CALCULO DE CAUDALES EN PESO Y EN VOLUMEN DE SOLIDOS Y DE AGUA DEL OVER FLOW.-

- Hallando el porcentaje de sólidos al volúmen:

$$\% \text{ sólidos al volúmen} = \frac{X - 1}{\rho_s - 1} \times 100$$

$$\% \text{ sólidos al volúmen} = \frac{1.055 - 1}{2.600 - 1} \times 100$$

$$\% \text{ Sólidos al volumen} = 3.44 \%$$

- El porcentaje de sólidos al peso es:

$$\% \text{ Sólidos al peso} = \frac{(X - 1)}{(\rho_s - 1)} \times \frac{\rho_s}{X} \times 100$$

$$\% \text{ Sólidos al peso} = \frac{1.055 - 1}{2.600 - 1} \times \frac{2.600}{1.055} \times 100$$

$$\% \text{ Sólidos al peso} = 8.47 \%$$

- Caudal en peso de sólidos:

$$Q_o = 17,222 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \times \frac{3,600 \text{ seg}}{\text{hora}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} =$$

$$Q_o = 61.999 \text{ m}^3/\text{hora}$$

$$Q_o = 61.999 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \times 1.055 \frac{\text{TM}}{\text{m}^3} =$$

$$Q_o = 65.3 \text{ TM/hora}$$

$$Q_o = 65.3 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times 0.0847 =$$

$$Q_o = 5.5 \text{ TMS/hora}$$

- Caudal en volumen de sólidos:

$$Q_o = 5.5 \frac{\text{TMS}}{\text{hora}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{2.6 \text{ TMS}} \times \frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \times \frac{264.20 \text{ gal}}{\text{m}^3} =$$

$$Q_o = 9.8 \text{ GPM}$$

- Caudal en peso de agua:

$$Q_{\text{agua}} = 65.3 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times \frac{(100 - 8.47)}{100} =$$

$$Q_{\text{agua}} = 59.8 \text{ TM/hora}$$

- Caudal en volumen de agua:

$$Q_{\text{agua}} = 59.8 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times \frac{\text{m}^3}{1 \text{ TM}} \times \frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \times \frac{264.20 \text{ gal}}{\text{m}^3} =$$

$$Q_{\text{agua}} = 263.2 \text{ GPM}$$

### 8.1.9. CALCULO DEL CAUDAL DE ALIMENTACION AL HIDROCICLON

Conocido los flujos de under flow, over flow - por balance de materias se procede a calcular - el caudal de la alimentación.

$$Q_i = Q_u + Q_o$$

$$Q_i = (28.10 + 65.3) \text{ TM/hora}$$

$$Q_i = 93.4 \text{ TM/hora}$$

En GPM:

$$Q_i = 93.4 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times \frac{\text{m}^3}{1.165 \text{ TM}} \times \frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \times \frac{264.20 \text{ gal}}{\text{m}^3} =$$

$$Q_i = 352.9 \text{ GPM}$$

A continuación se da las características de la alimentación o relave: Gravedad específica de sólidos = 2.7

$$\text{Densidad de pulpa} = 1.165 \text{ gr/cm}^3$$

$$\% \text{ de sólidos al volumen} = 9.7 \%$$

$$\% \text{ de sólidos al peso} = 22.5 \%$$

$$\% \text{ de agua al peso} = 77.5 \%$$

-Caudal en peso de sólidos:

$$A_i = 93.4 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times 0.225 = 21 \text{ TMS/hora}$$

- Caudal en volumen de sólidos:

$$Q_i = 21 \frac{\text{TMS}}{\text{hora}} \times \frac{\text{m}^3}{2.7 \text{ TMS}} \times \frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \times \frac{264.20 \text{ gal}}{\text{m}^3} =$$

$$Q_i = 34.2 \text{ GPM}$$

- Caudal en peso de agua:

$$Q_{\text{agua}} = 93.4 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times 0.775$$

$$Q_{\text{agua}} = 72.4 \text{ TM/hora}$$

- Caudal en volumen de agua:

$$Q_{\text{agua}} = 72.4 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times \frac{\text{m}^3}{1 \text{ TM}} \times \frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \times \frac{264.20 \text{ gal}}{\text{m}^3} =$$

$$Q_{\text{agua}} = 318.7 \text{ GPM}$$

Habiéndose obtenido numerosos resultados para - esta prueba con apex de 2 pulgadas de diámetro y con el fin de presentar en forma sinóptica, - se ha confeccionado un Cuadro que es presentado seguidamente:

8.1.10 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA CON APEX  
DE DOS PULGADAS DE DIAMETRO

M A T E R I A S	ALIMENTACION (RELAVE)	UNDER FLOW	OVER FLOW
Gr. Esp. de sólidos (TMS/m <sup>3</sup> )	2.7	2.8	2.6
Densidad de pulpa (TM/m <sup>3</sup> )	1.165	1.550	1.055
% de sólidos al peso	22.5	55.2	8.47
% de sólidos al volúmen	9.7	30.55	3.44
% de agua al peso	77.5	44.8	91.53
Flujo de sólidos (TMS/hora)	21.0	15.5	5.5
Flujo de agua (TM/hora)	72.4	12.6	59.8
Flujo de pulpa (T./hora)	93.4	28.1	65.3
Flujo de sólidos (GPM)	34.2	24.4	9.8
Flujo de agua (GPM)	318.7	55.5	263.2
Flujo de pulpa (GPM)	352.9	79.9	273.0

Las características granulométricas de la alimentación al hidrociclón y de sus respectivos productos así como los pesos horarios por mallas se expresan sucesivamente en los siguiente cuadros:

8.1.11. CUADRO No. 13

GRANULOMETRIA DEL RELAVE O ALIMENTACION AL HI  
DROCICLON

MALLAS Serie: ASTM	Peso DIRECTO (+)	%Peso Acumu. (-)	Peso Direc. (+) TMS/Hr	Peso Acumu. (-) TMS/Hr
+ 35	4.0	96.0	0.84	20.16
- 35 + 50	9.2	86.8	1.93	18.23
- 50 + 60	10.2	76.6	2.14	16.09
- 60 + 100	12.5	64.1	2.63	13.46
-100 + 140	8.3	55.8	1.74	11.72
-140 + 200	7.8	48.0	1.64	10.06
-200 + 525	9.9	38.1	2.08	8.00
-325	38.1	--	8.00	--
<b>T O T A L</b>	<b>100.0</b>	<b>--</b>	<b>21.00</b>	<b>--</b>

8.1.12. CUADRO No. 14

GRANULOMETRIA DEL UNDER FLOW.- Se ha desdoblado este cuadro en dos partes para hacerlos más explicativo, en la primera se resume los resultados de dos ensayos de análisis de malla y en la segunda se reseña los porcentajes en peso y tonelaje horario para cada cedazo.

Mallas Serie ASTM	1ra. Prueba Peso (grs)	2da. Prueba Peso (grs.)	Promedio Peso (grs.)	% Peso Directo (+)
+ 35	8.0	10.4	9.2	4.6
- 35 + 50	22.8	20.4	21.6	10.8
- 50 + 60	24.2	29.4	26.8	13.4
- 60 +100	32.6	27.4	30.0	15.0
-100 +140	17.2	19.6	18.4	9.2
-140 +200	20.2	17.8	19.0	9.5
-200 +325	19.0	21.8	20.4	10.2
-325	56.0	53.2	54.6	27.3

T O T A L	200.0	200.0	200.0	100.0
-----------	-------	-------	-------	-------

Peso Base de muestra: 200 grs.

Mallas Serie ASTM	% Peso Directo (+)	% Peso Acumu. (-)	Peso Direc. (+) TMS/Hr	Peso Acumu. (-) TMS/Hr.
+ 35	4.6	95.4	0.71	14.79
- 35 + 50	10.8	84.6	1.68	13.11
- 50 + 60	13.4	71.2	2.08	10.03
- 60 + 100	15.0	56.2	2.32	8.71
-100 + 140	9.2	47.0	1.42	7.29
-140 + 200	9.5	37.5	1.47	5.82
-200 + 325	10.2	27.3	1.58	4.24
-325	27.3	--	4.24	--
T O T A L	100.0	--	15.50	--

8.1.13. CUADRO No. 15

GRANULOMETRIA DEL OVER FLOW.- Con la misma secuencia de las pruebas anteriores se realizaron los ensayos granulétricos para las muestras del rebalse, - cuyos resultados figuran en los sub-cuadros siguientes:

Mallas Serie:ASTM	1ra.Prueba Peso (grs)	2da.Prueba Peso (grs.)	Promedio Peso(grs)	%Peso Directo(+)
+ 35	5.12	4.32	4.72	2.36
- 35 + 50	9.04	9.12	9.08	4.54
- 50 + 60	2.10	2.26	2.18	1.09
- 60 + 100	11.36	11.20	11.28	5.64
-100 + 140	10.04	13.24	11.64	5.82
-140 + 200	7.80	4.60	6.20	3.10
-200 + 325	18.00	18.36	18.18	9.09
-325	136.54	136.90	136.72	68.36
T O T A L	200.00	200.00	200.00	100.00

Peso Base de muestra: 200 grs.



Mallas Serie:ASTM	%Peso Directo (+)	%Peso Acumu. (-)	Peso Direc. (+)TMS/Hr.	Peso Acumu. (-)TMS/Hr.
+ 35	2.36	97.64	0.13	5.37
- 35 + 50	4.54	93.10	0.25	5.12
- 50 + 60	1.09	92.01	0.06	5.06
- 60 + 100	5.64	86.37	0.31	4.75
-100 + 140	5.82	80.55	0.32	4.43
-140 + 200	3.10	77.45	0.17	4.26
-200 + 325	9.09	68.36	0.50	3.76
-325	68.36	--	3.76	--
T O T A L	100.00	--	5.50	--

8.1.14. PRUEBA DE PERCOLACION DEL UNDER FLOW

Siguiendo con igual modalidad a la conducción de las experiencias antes hechas, se dio paso a medir la velocidad de percolación del agua a través de este material, resultado que nos permitirá calificar su utilidad o inconveniencia como relleno hidráulico. Los cálculos y mediciones es como sigue:

- Densidad de los sólidos = 2.8 gr/cm<sup>3</sup>
- Densidad del U/F = 1.55 gr/cm<sup>3</sup>
- % de sólidos en peso = 55.2 %
- % de agua en peso = 44.8 %
- Volúmen del dispositivo = 4,052 cm<sup>3</sup>
- Peso total de U/F = 4,052 cm<sup>3</sup> x 1.55  $\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$  = 6,281 gr
- Peso de muestra seca = 6,281 gr. x 0.552 = 3,467 gr.
- Peso o volúmen de agua requerido = 6,281 gr x 0.448 = 2,814 cm<sup>3</sup> ó gr.
- Peso o volúmen de agua que pasó = 1,754 gr. ó cm<sup>3</sup>

- Peso o volúmen de agua retenido  $= (3,467 - 1,754) \text{ gr ó cm}^3 = 1,060 \text{ gr ó cm}^3$
- Peso de muestra húmeda  $= (3,467 + 1,060) \text{ gr} = 4,527 \text{ gr.}$
- Volúmen de muestra húmeda  $= (4,052 - 1,754) \text{ cm}^3 = 2,298 \text{ cm}^3$
- Densidad relativa  $= \frac{4,527 \text{ gr}}{2,298 \text{ cm}^3} = 1.97 \text{ gr/cm}^3$
- Altura: H = 50 cm
- Área : A = 81.04 cm<sup>2</sup>
- Altura: L =  $\frac{2,298 \text{ cm}^3}{81.04 \text{ cm}^2} = 28.4 \text{ cm.}$

- Datos de velocidad de percolación:

<u>Tiempo (min)</u>	<u>Volúmen de agua (cm<sup>3</sup>)</u>
10	150
10	145
10	145
10	145
10	145
10	145
<u>10</u>	<u>145</u>
60 min = hora	875 cm <sup>3</sup>

Caudal: Q = 875 cm<sup>3</sup>/hora

Aplicando la fórmula de DARCY:

$$v = \frac{L}{H} \times \frac{Q}{A}$$

Sustituyendo valores:

$$v = \frac{28.4 \text{ cm}}{50 \text{ cm}} \times \frac{875 \text{ cm}^3/\text{hora}}{81.04 \text{ cm}^2} =$$

$$v = 6.13 \text{ cm/hora} = 2.41 \text{ pulg/hora.}$$

Como el valor de este resultado dista de la velocidad de percolación óptima fluctuante entre 10 cm/hora á -

20 c./hora, situación tal que nos obligó a acudir a tomar la otra alternativa de modificar el apex a un diámetro de 1 1/2 pulgadas en el hidrociclón.

El desenvolvimiento de la nueva práctica, de manera pormenorizada se explica a continuación:

### 8.2. PRUEBA CON APEX DE 1 1/2 PULGADAS DE DIAMETRO.-

Con la reducción del diámetro del apex lo que se persigue es alcanzar un under flow cuya granulometría contenga menor porcentaje de partículas finas que son las que disminuyen la velocidad de percolación.

Empezaremos con los cálculos cuantitativos de los flujos de under flow y over flow tomados en la práctica.

8.2.1. CALCULO DEL CAUDAL DEL UNDER FLOW.- Mediante el depósito utilizado en la anterior prueba se efectuó este cálculo:

$$\begin{aligned} \text{Volúmen del depósito} &= 125,787.15 \text{ cm}^3 \\ \text{Tiempo promedio de llenado} &= 35 \text{ seg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Caudal: } Q_u &= \frac{125,787.15 \text{ cm}^3}{35 \text{ seg.}} \\ Q_u &= 3,565 \text{ cm}^3/\text{seg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{En GPM: } Q_u &= 3,565 \text{ cm}^3/\text{seg.} \times \frac{60 \text{ seg}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ gal.}}{3,785 \text{ cm}^3} \\ Q_u &= 56.4 \text{ GPM} \end{aligned}$$

8.2.2. MEDICION DE LA DENSIDAD DEL UNDER FLOW.- Haciendo uso del instrumento ya mencionado, la densidad promedio encontrada fue de:

$$X = 1,600 \text{ gr/lt} = 1.6 \text{ TM/m}^3$$

8.2.3. MEDICION DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS DEL UNDER FLOW.- Por el mismo procedimiento de la anterior prueba, se calculó que:

$$\text{Gravedad específica promedio} = 2.8$$

8.2.4. CALCULO DE CAUDALES EN PESO Y EN VOLUMEN DE SOLIDOS Y DE AGUA DEL UNDER FLOW

- Porcentaje de sólidos al volumen:

$$\% \text{ sólidos al volumen} = \frac{X - 1}{\rho_s - 1} \times 100$$

$$\% \text{ sólidos al volumen} = \frac{1.6 - 1}{2.8 - 1} \times 100$$

$$\% \text{ sólidos al volumen} = 33.3 \%$$

- Procentajes de sólidos al peso:

$$\% \text{ sólidos al peso} = \frac{(X - 1) \times \rho_s}{\rho_s - 1} \times \frac{1}{X} \times 100$$

$$\% \text{ sólidos al peso} = \frac{1.6 - 1}{2.8 - 1} \times \frac{2.8}{1.6} \times 100$$

$$\% \text{ sólidos al peso} = 58.3 \%$$

- Caudal en peso de sólidos:

$$Q_u = 3,565 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \times \frac{3,600 \text{ seg}}{\text{hora}} \times \frac{\text{m}^3}{10^6 \text{cm}^3} =$$

$$Q_u = 12.834 \text{ m}^3/\text{hora}$$

$$Q_u = 12.834 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \times 1.6 \frac{\text{TM}}{\text{m}^3} =$$

$$Q_u = 20.5 \text{ TM/hora}$$

$$Q_u = 20.5 \text{ TM/hora} \times 0.583 =$$

$$Q_u = 12.0 \text{ TMS/hora}$$

- Caudal en volumen de sólidos:

$$Q_u = 12.0 \frac{\text{TMS}}{\text{hora}} \times \frac{\text{m}^3}{2.8 \text{ TMS}} \times \frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \times \frac{264.20 \text{ gal}}{\text{m}^3}$$

$$Q_u = 19.0 \text{ GPM}$$

- Caudal en peso de agua:

$$Q_{\text{agua}} = 20.5 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times \frac{(100 - 58.3)}{100}$$

$$Q_{\text{agua}} = 8.5 \text{ TM/hora}$$

- Caudal de agua en volúmen:

$$Q_{\text{agua}} = 8.5 \text{ TM/hora} \times \frac{\text{m}^3}{1 \text{ TM} \times \text{hora}} \times \frac{60}{264.20 \text{ gal}} =$$

$$Q_{\text{agua}} = 37.4 \text{ GPM}$$

8.2.5. CALCULO DEL CAUDAL DEL OVER FLOW.- Con el recipiente de la prueba anterior se hizo la medición, los resultados obtenidos son:

$$\text{Volúmen del recipiente} = 68,887 \text{ cm}^3$$

$$\text{Tiempo promedio de llegada} = 3.68 \text{ seg.}$$

$$\text{- Caudal: } Q_o = \frac{68,887 \text{ cm}^3}{3.68 \text{ seg.}}$$

$$Q_o = 18,719.3 \text{ cm}^3/\text{seg.}$$

$$\text{- En GPM: } Q_o = 18,719.3 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \times \frac{60 \text{ seg}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ gal.}}{3,785 \text{ cm}^3}$$

$$Q_o = 296.5 \text{ GPM}$$

8.2.6. MEDICION DE LA DENSIDAD DEL OVER FLOW.- La densidad promedio luego de sucesivas mediciones fue:

$$X = 1,080 \text{ gr/lt} = 1.08 \text{ TM/m}^3$$

8.2.7. MEDICION DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS DEL OVER FLOW.- Se determinó que:

$$\text{Gravedad específica promedio} = 1.5$$

8.2.8. CALCULO DE CAUDALES EN PESO Y EN VOLUMEN DE SOLIDOS Y DE AGUA DEL OVER FLOW.-

- Porcentaje de sólidos al volúmen:

$$\% \text{ sólidos al volúmen} = \frac{X - 1}{\rho_s - 1} \times 100$$

$$\% \text{ sólidos al volúmen} = \frac{1.08 - 1}{2.50 - 1} \times 100$$

$$\% \text{ sólidos al volúmen} = 5.33 \%$$

- Procentaje de sólidos al pesc:

$$\% \text{ sólidos al peso} = \frac{(X - 1)}{(\rho_s - 1)} \times \frac{\rho_s}{X} \times 100$$

$$\% \text{ sólidos al pesc} = \frac{(1.08 - 1)}{(2.50 - 1)} \times \frac{2.50}{1.08} \times 100$$

$$\% \text{ sólidos al peso} = 12.34 \%$$

- Caudal en peso de sólidos:

$$Q_o = 18,719 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \times \frac{3,600 \text{ seg}}{\text{hora}} \times \frac{\text{m}^3}{10^6 \text{ cm}^3}$$

$$Q_o = 67.4 \text{ m}^3/\text{hora}$$

$$Q_o = 67.4 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \times 1.08 \frac{\text{TM}}{\text{m}^3}$$

$$Q_o = 72.9 \text{ TM/hora}$$

$$Q_o = 72.9 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times 0.1234$$

$$Q_o = 9.0 \text{ TMS/hora}$$

- Caudal en volúmen de sólidos:

$$Q_o = 9.0 \frac{\text{TMS}}{\text{hora}} \times \frac{\text{m}^3}{2.5 \text{ TMS}} \times \frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \times \frac{264.20 \text{ gal}}{1 \text{ m}^3}$$

$$Q_o = 15.2 \text{ GPM}$$

Caudal en peso de agua:

$$Q_{\text{agua}} = 72.9 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times \frac{(100 - 12.34)}{100}$$

$$Q_{\text{agua}} = 63.9 \text{ TM/hora}$$

- Caudal en volúmen de agua:

$$Q_{\text{agua}} = 63.9 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times \frac{\text{m}^3}{1 \text{ TM}} \times \frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \times \frac{264.20 \text{ gal}}{\text{m}^3}$$

$$Q_{\text{agua}} = 281.3 \text{ GPM}$$

8.2.9.

- CALCULO DEL CAUDAL DE ALIMENTACION AL HI DROCICLON.- Con los flujos de under flow y over flow, se determina el caudal de a limentación:

$$Q_i = Q_o + Q_u$$

$$Q_i = (20.5 + 72.9) \text{ TM/hora}$$

$$Q_i = 93.4 \text{ TM/hora}$$

Las siguientes son las características de la alimentación o relave:

Gravedad específica de sólidos = 2.7

Densidad de Pulpa = 1.165 gr/cm<sup>3</sup>

% de sólidos al volúmen = 9.7 %

% de sólidos al peso = 22.5 %

% de agua al peso = 77.5 %

Flujo en GPM:

$$Q_i = 93.4 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times \frac{\text{m}^3}{1.165 \text{ TM}} \times \frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \times \frac{264.20 \text{ gal}}{\text{m}^3}$$

$$Q_i = 352.9 \text{ GPM}$$

Caudal de sólidos en peso:

$$Q_i = 93.4 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times 0.225$$

$$Q_i = 21.0 \text{ TMS/hora}$$

Caudal de sólidos en volúmen:

$$Q_i = 21.0 \frac{\text{TMS}}{\text{hora}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1.7 \text{ TMS}} \times \frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \times \frac{264.20 \text{ gal}}{\text{m}^3}$$

$$Q_i = 34.2 \text{ GPM}$$

Caudal de agua en peso:

$$Q_{\text{agua}} = 93.4 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times 0.775$$

$$Q_{\text{agua}} = 72.4 \text{ TM/hora}$$

Caudal de agua en volúmen:

$$Q_{\text{agua}} = 72.4 \frac{\text{TM}}{\text{hora}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1 \text{ TM}} \times \frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \times \frac{264.20 \text{ gal}}{\text{m}^3}$$

$$Q_{\text{agua}} = 318.7 \text{ GPM}$$

Todos los resultados de la prueba con apex de -  
1 1/2 pulgadas de diámetro se sintetiza en el -  
Cuadro que a continuación se presenta:

#### 8.2.10. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA CON APEX DE 1 1/2 PULGADAS DE DIAMETRO

M A T E R I A S	ALIMENTACION (RELAVE)	UNDER FLOW	OVER FLOW
Gr. Esp. de sólidos	2.7	2.8	2.5
Densidad de pulpa (TM/m <sup>3</sup> )	1.165	1.600	1.080
% de sólidos al peso	22.5	58.3	12.34
% de sólidos al volúmen	9.7	33.3	5.33
% de agua al peso	77.5	41.7	87.66
Flujo de sólidos (TMS/hora)	21.0	12.0	9.0
Flujo de agua (TM/hora)	72.4	8.5	63.9
Flujo de pulpa (TM/hora)	93.4	20.5	72.9
Flujo de sólidos (GPM)	34.2	19.0	15.2
Flujo de agua (GPM)	318.7	37.4	281.3
Flujo de pulpa (GPM)	352.9	56.4	296.5



8.2.11. PRUEBA DE PERCOLACION DEL UNDER FLOW.- Previo al análisis de mallas de los productos del hidrociclón, se efectuó la prueba para conocer la velocidad de percolación del nuevo under-flow y a través de este resultado evaluar la bondad de este material como relleno hidráulico:

Datos:

- Densidad de los sólidos = 2.8 gr/cm<sup>3</sup>
- Densidad de U/F = 1.6 gr/cm<sup>3</sup>
- % de sólidos en peso = 58.3 %
- % de agua en peso = 41.7 %
- Volúmen del dispositivo = 4,052 cm<sup>3</sup>
- Peso total de U/F = 4,052 cm<sup>3</sup> x 1.6  $\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$  = 6,483 gr.
- Peso de muestra seca = 6,483 gr x 0.583 = 3,780 gr.

Peso o volúmen de agua requerido = 6,483 gr x 0.417 = 2,703 gr ó cm<sup>3</sup>

- Peso o volúmen de agua que pasó = 1,603 gr ó cm<sup>3</sup>
- Peso o volúmen de agua retenido = (2,703 - 1,603) gr = 1,100 gr ó cm<sup>3</sup>
- Peso de muestra húmeda = (3,780 + 1,100) gr = 4,880 gr.

- Volúmen de muestra húmeda = (4,052 - 1,603) cm<sup>3</sup> = 2,449 cm<sup>3</sup>

- Densidad relativa =  $\frac{4,880 \text{ gr}}{2,449 \text{ cm}^3} = 2 \text{ gr/cm}^3$

Altura : H = 50 cm

Area : A = 81.04 cm<sup>2</sup>

Altura : L =  $\frac{2,449 \text{ cm}^3}{81.04 \text{ cm}^2} = 30.2 \text{ cm}$

- Datos de velocidad de Percolación:

<u>Tiempo (min)</u>	<u>Volúmen de agua (cm<sup>3</sup>)</u>
10	280
10	270
10	273
10	270
10	265
10	265
<hr/>	<hr/>
60 min = 1 hora	1,623 cm <sup>3</sup>

Caudal:  $Q = 1,623 \text{ cm}^3/\text{hora}$

Con la fórmula de DARCY:

$$v = \frac{L}{H} \times \frac{Q}{A}$$

Reemplazando valores:

$$v = \frac{30.2 \text{ cm}}{50 \text{ cm}} \times \frac{1.623 \text{ cm}^3/\text{hora}}{81.04 \text{ cm}^2}$$

$$v = 12.0 \text{ cm/hora} = 4.72 \text{ pulg/hora}$$

Se observa que este resultado es satisfactorio y queda enmarcado dentro de los límites de los valores admisibles del coeficiente de permeabilidad o velocidad de percolación; condición que nos faculta a afirmar que el under flow en contrado es el material propio para ser introducido en la mina como relleno hidráulico.

Para detallar más a cerca de las cualidades de este material, las particularidades granulométricas son descritas como sigue:

## 8.2.12. CUADRO No. 16

GRANULOMETRIA DEL RELAVE O ALIMENTACION AL HIDROCICLON

MALLAS SERIE ASTM	MALLAS EN MICRONES	DIAMETRO PROMEDIO MICRONES	% PESO DIRECTO (+)	% PESO ACUMULATIVO (-)	PESO DIRECTO (+) TMS/Hr.	PESO ACUMULATIVO (-) TMS/Hr.
+ 35	500	500	4.0	96.0	0.84	20.16
- 35 + 50	300	400	9.2	86.8	1.93	18.23
- 50 + 60	250	275	10.2	76.6	2.14	16.09
- 60 + 100	150	200	12.5	64.1	2.63	13.46
-100 + 140	106	128	8.3	55.8	1.74	11.72
-140 + 200	75	91	7.8	48.0	1.64	10.08
-200 + 325	45	60	9.9	38.1	2.08	8.00
-325 + 30 $\mu$	30	38	7.9	30.2	1.66	6.34
-30 $\mu$ + 20 $\mu$	20	25	9.6	20.6	2.01	4.33
-20 $\mu$ + 10 $\mu$	10	15	14.8	5.8	3.11	1.22
-10 $\mu$	--	--	5.8	--	1.22	--
T O T A L	--	--	100.0	--	21.00	--

## 8.2.13 CUADRO No. 17

GRANULOMETRIA DEL UNDER FLOW .- Dada la importancia del under flow, se realizaron dos ensayos de análisis de malla inclusive hasta micrones; los resultados se presentan en el primer Cuadro y en el segundo se resume los porcentajes en peso y las TMS/hora en cada malla:

Mallas Serie: ASTM	1ra.Prueba Peso (grs)	2da.Prueba Peso (grs.)	Promedio Peso (grs.)	% Peso Directo (+)
↓ 35	12.50	15.10	13.80	6.9
- 35 † 50	29.78	32.22	31.00	15.5
- 50 † 60	28.70	27.30	28.00	14.0
-60 † 100	43.00	41.80	42.40	21.2
-100 † 140	27.40	25.80	26.60	13.3
-140 † 200	22.90	23.34	23.12	11.5
-200 † 325	16.58	16.94	16.76	8.4
-325 † 30 $\mu$	3.12	4.48	3.80	1.9
-30 $\mu$ † 20 $\mu$	4.08	2.72	3.40	1.7
-20 $\mu$ † 10 $\mu$	3.25	3.15	3.20	1.6
-10 $\mu$	8.69	7.15	7.92	1.0
<b>T O T A L</b>	<b>200.00</b>	<b>200.00</b>	<b>200.00</b>	<b>100.0</b>

Peso base de muestra: 200 grs.

## 8.2.13. CUADRO No. 17

## GRANULOMETRIA DEL UNDER FLOW (continuacion)

MALLAS SERIE ASTM	MALLAS EN MICRONES	DIAMETRO PROMEDIO MICRONES	%PESO DIRECTO (+)	% PESO ACUMULATIVO (+)	PESO DIRECTO (+) TMS/hora	PESO ACUMULATIVO (+) TMS/hora
+ 35	500	500	6.9	93.1	0.83	11.17
- 35 + 50	300	400	15.5	77.6	1.85	9.32
- 50 + 60	250	275	14.0	63.6	1.68	7.64
- 60 + 100	150	200	21.2	42.4	2.54	5.10
-100 + 140	106	128	13.3	29.1	1.60	3.50
-140 + 200	75	91	11.5	17.6	1.40	2.10
-200 + 325	45	60	8.4	9.2	1.00	1.10
-325 + 30μ	30	38	1.9	7.3	0.23	0.87
-30μ + 20μ	20	25	1.7	5.6	0.20	0.67
-20μ + 10μ	10	15	1.6	4.0	0.19	0.48
-10μ	--	--	4.0	--	0.48	--
T O T A L	--	--	100.0	--	12.00	--

## 8.2.14. CUADRO No. 18

GRANULOMETRIA DEL OVER FLOW.- Del mismo modo se llevaron a cabo las pruebas granulométricas sus resultados se muestran en dos cuadros:

Mallas Serie; ASTM	1ra. Prueba Peso (grs.)	2da. Prueba Peso (grs.)	Promedio Peso (grs.)	%Peso Directo (+)
+ 35	0.20	0.24	0.22	0.11
- 35 + 50	1.78	1.74	1.76	0.88
- 50 + 60	10.24	10.20	10.22	5.11
- 60 + 100	1.92	1.08	2.00	1.00
-100 + 140	3.20	3.04	3.12	1.56
-140 + 200	5.48	5.20	5.34	2.67
-200 + 325	23.70	24.30	24.00	12.00
-325 + 30M	30.70	32.86	31.78	15.89
-30M + 20M	41.30	39.14	40.22	20.11
-20M + 10M	62.12	67.64	64.88	32.44
-10M	19.36	13.56	16.46	8.23
T O T A L	200.00	200.00	200.00	100.00

Peso base de muestra: 200 grs.

8.2.14. CUADRO No. 18GRANULOMETRIA DEL OVER FLOW (continuacion)

MALLAS SERIE ASTM.	MALLAS EN MICRONES	DIAMETRO PROMEDIO MICRONES	% PESO DIRECTO (+)	% PESO ACUMULATIVO (-)	PESO DIRECTO (+) TMS/hora	PESO ACUMULATIVO (-) TMS/hora
+ 35	500	500	0.11	99.89	0.01	8.99
- 35 + 50	300	400	0.88	99.01	0.08	8.91
- 50 + 60	250	275	5.11	93.90	0.46	8.45
- 60 + 100	150	200	1.00	92.90	0.09	8.36
-100 + 140	106	128	1.56	91.34	0.14	8.22
-140 + 200	75	91	2.67	88.67	0.24	7.98
-200 + 325	45	60	12.00	76.67	1.08	6.90
-325 + 30 $\mu$	30	38	15.89	60.78	1.43	5.47
-30 $\mu$ + 20 $\mu$	20	25	20.11	40.67	1.81	3.66
-20 $\mu$ + 10 $\mu$	10	15	32.44	8.23	2.92	0.74
-10 $\mu$	--	--	8.23	--	0.74	--
T O T A L	--	--	100.00	--	9.00	--

8.2.15 APLICACION DE LAS CURVAS GAUDIN-SCHUMMAN PARA EL HIDROCICLON.- Las clásicas curvas Gaudin-Schumman, son gráficas que se representan en función del tamaño de partículas de un material y el porcentaje acumulativo (-) para cada tamiz de la serie de mallas utilizadas, con el empleo de ellas se suele determinar el grado de reducción en las máquinas trituradoras o de molienda, se mide el rendimiento de clasificación de máquinas o aparatos clasificadores; aprovechando esta última finalidad, en esta ocasión se hace uso de las curvas citadas para evaluar la eficiencia del hidrociclón de 15 pulgadas.

La eficiencia puede calcularse para cualquier abertura de malla, pero ha quedado normalizado para un clasificador expresar su eficiencia para el diámetro de corte ó  $d_{50}$  respectivo, dato que se obtiene mediante las curvas trompo o de eficiencia de clasificación, que después nos ocuparemos sobre ellas.

Para un hidrociclón son en número de tres las curvas de Gaudin-Schumman, a saber:

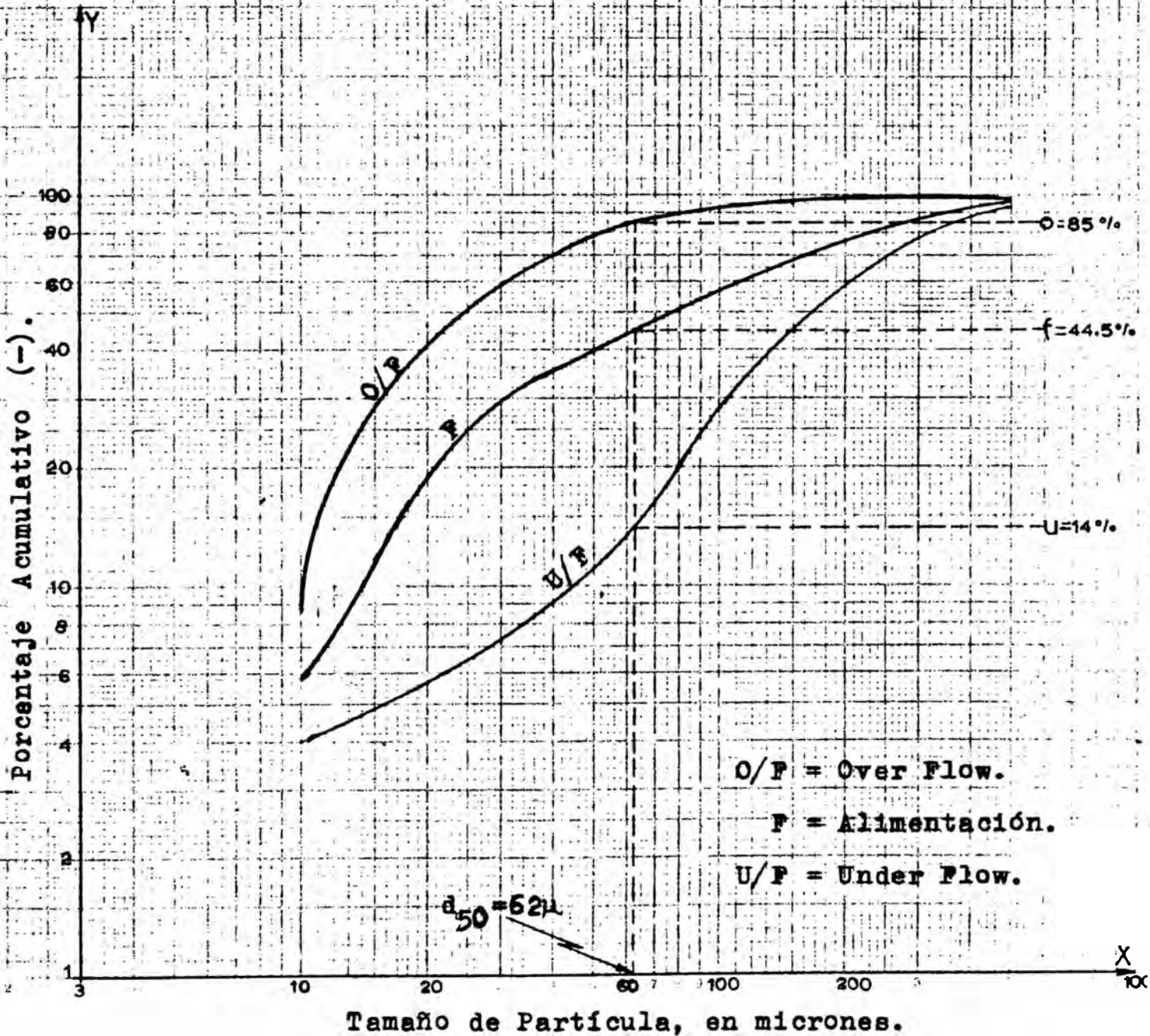
- Para la alimentación,
- Para el under flow y
- Para el over flow,

Por lo general se escoge el papel de escala log log, para su representación, una vez trazadas las curvas y conocido el  $d_{50}$  se encuentra los porcentajes acumulativos (-) en cada una de las curvas y con estos valores se calcula las eficiencias en la fracción gruesa, fina y global.

En la Fig. No. 9, se muestran las curvas Gaudin



FIGURA N°9.- CURVAS GAUDIN - SCHUMMAN DE LA ALIMENTACION Y LOS PRODUCTOS DEL HIDROCICLON.



Schumman.

### 8.2.16 CALCULO DE LAS RECUPERACIONES O DISTRIBUCIONES

EN EL UNDER FLOW Y OVER FLOW .- Las partículas componentes de la alimentación que ingresan al hidrociclón, se reparten en mayor o menor proporción entre sus productos, al ejecutar un balance para cada malla y referir los pesos parciales al peso total de la alimentación, se halla los porcentajes de recuperación o distribución en cada uno de los productos.

Las expresiones matemáticas respectivas se mencionan a continuación:

$$\% \text{ Recuperación U/F} = \frac{U \times u}{F \times f} \times 100$$

$$\% \text{ Recuperación O/F} = \frac{O \times o}{F \times f} \times 100$$

Donde:

F = Peso del material en la alimentación a una malla determinada.

O = Peso del material en el over flow a una malla determinada.

U = Peso del material en el under flow a una malla determinada.

f = % en peso de la alimentación a una malla determinada.

o = % en peso del over flow a una malla determinada.

u = % en peso del under flow a una malla determinada.

A manera de ejemplo se calcula las recuperaciones para la malla + 35

$$\% \text{ Recuperación U/F} = \frac{12 \text{ TPH} \times 6.9\%}{21 \text{ TPH} \times 4.0\%} \times 100 = 98.8\%$$

$$\% \text{ Recuperación O/F} = \frac{9 \text{ TPH} \times 0.11\%}{21 \text{ TPH} \times 4.0\%} \times 100 = 1.2 \%$$

De idéntica forma se hallan las recuperaciones para cada tamiz de una serie de mallas; los resultados obtenidos, de modo sinóptico se expresan en el Cuadro No. 19, graficando estos datos se confeccionan las curvas trompo o de eficiencia de clasificación representadas en la Figura No. 10 en la que también se incluye la curva de distribución en peso en el alimento al hidrociclón.

8.2.17.- CUADRO No. 19.-

RECUPERACIONES POR MALLAS DE LOS PRODUCTOS DEL HIDROCICLOJ

MALLAS SERIE: ASTM.	MALLAS EN MICRONES	DIAMETRO PROMEDIO MICRONES	ALIMENTACION		OVER FLOW					
			% PESO DIRECTO	TPH	% PESO DIRECTO	TPH	%RECUPE RACION	% PESO DIRECTO	TPH	%RECUPE RACION
+ 35	500	500	4.0	0.84	0.11	0.01	1.2	6.9	0.83	98.8
- 35 + 50	300	400	9.2	1.93	0.88	0.08	4.2	15.5	1.85	95.8
- 50 + 60	250	275	10.2	2.14	5.11	0.46	21.5	14.0	1.68	78.5
- 60 + 100	150	200	12.5	2.63	1.00	0.09	3.4	21.2	2.54	96.6
-100 + 140	106	128	8.3	1.74	1.56	0.14	8.0	13.3	1.60	92.0
-140 + 200	75	91	7.8	1.64	2.67	0.24	14.6	11.5	1.40	85.4
-200 + 325	45	60	9.9	2.08	12.00	1.08	51.9	8.4	1.00	48.1
-325 + 30μ	30	38	7.9	1.66	15.89	1.43	86.3	1.9	0.23	13.7
-30μ + 20μ	20	25	9.6	2.01	20.11	1.81	90.0	1.7	0.20	10.0
-20μ + 10μ	10	15	14.8	3.11	32.44	2.92	93.9	1.6	0.19	6.1
-10μ	--	--	5.8	1.22	8.23	0.74	60.6	4.0	0.48	39.4
T O T A L	--	--	100.0	21.00	100.00	9.00	--	100.0	12.00	--

### 8.2.18 REPRESENTACION DE LAS CURVAS TROMPO O DE EFICIENCIA DE CLASIFICACION PARA UN HIDROCICLON

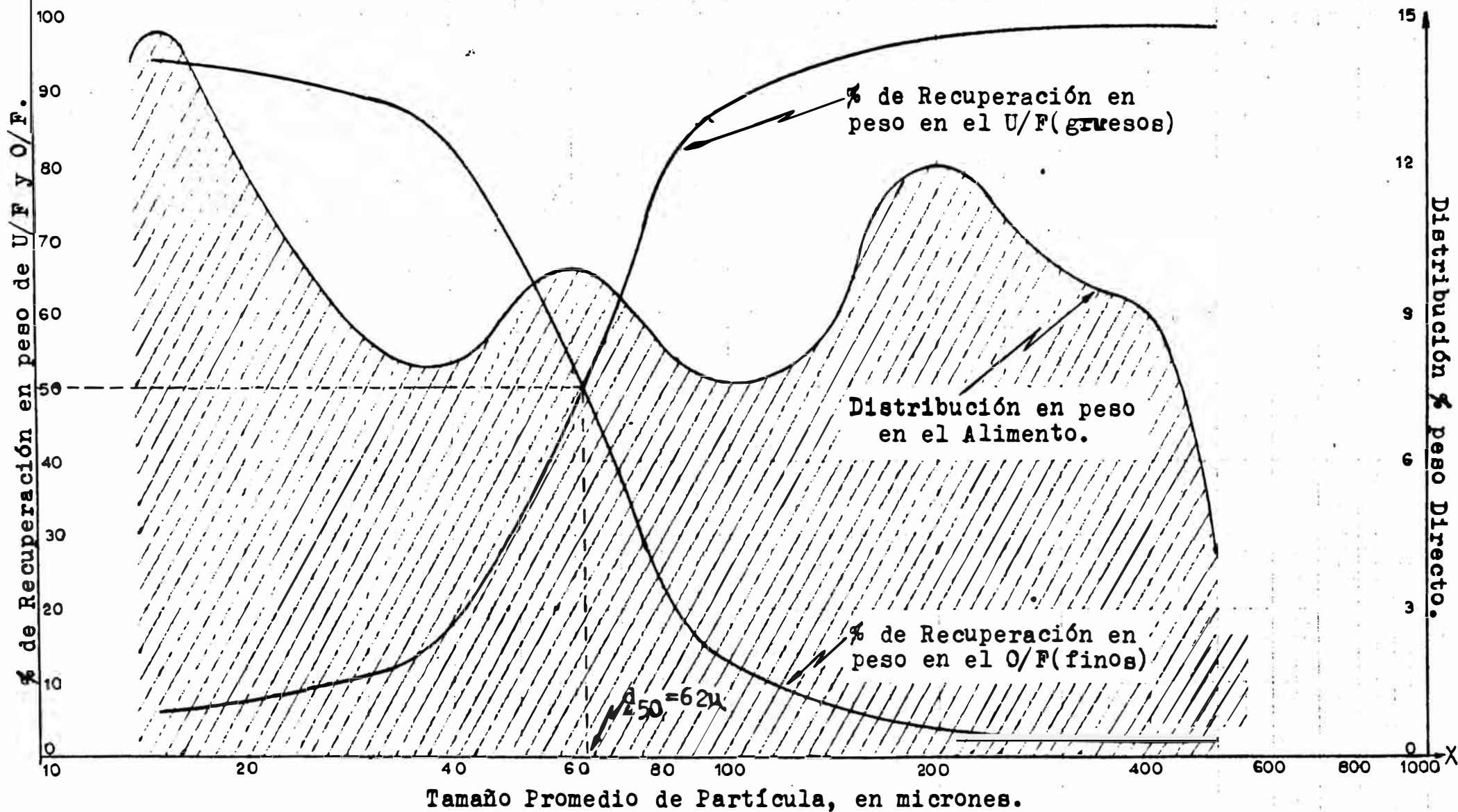
Constituyendo las curvas trompo o de eficiencia de clasificación juntamente con las curvas de Gaudin-Schumman, el medio más correcto de verificar el trabajo de un hidrociclón, merece describir en que consisten estas gráficas y destacar su importancia.

Son curvas que relacionan los porcentajes de recuperación en peso de over flow y under flow con el tamaño promedio de partículas para cada malla su representación se realiza en papel de escala semi-logarítmica; su principal característica estriba en que para un mismo tamaño promedio de partícula, los porcentajes que se leen en las curvas son complementarios en consecuencia, se llegan a intersectar en un punto cuya ordenada es 50% de recuperación, punto tal que se denomina Diámetro de Corte o Tamaño de Partición, que se simboliza con  $d_{50}$  y que tiene su expresión respectiva en micrones.

El diámetro de corte nos señala que el 50% de recuperación de este tamaño de partícula se reporta al under flow y el 50% restante se encuentra en el over flow, al mismo tiempo en las curvas se distingue que partículas mayores al  $d_{50}$  existen en mayor cantidad en el under flow y en menor en el over flow y viceversa.

Para el presente estudio el  $d_{50}$  gráficamente hallado tal como se observa en la Figura No. 10, es de 62 micrones, valor muy aproximado al diámetro de corte (60 micrones) adoptado para la Ecuación de Fuerza del Cono que se aplicó pa

**FIGURA N°10.- CURVAS TROMPO O DE EFICIENCIA DE CLASIFICACION EN EL HIDROCICLON.  
SE INCLUYE LA DISTRIBUCION POR TAMAÑO DEL ALIMENTO.**



ra recabar el diámetro del apex conveniente, es ta ligera diferencia en los tamaños de partición nos permite afirmar que el under flow logrado - cumplirá con las exigencias de cantidad y calidad para ser utilizado como material de relleno apropiado.

En la Figura No. 10 que seguidamente se muestra se encuentran graficadas las curvas trompo inclu yéndose la curva de distribución en peso en el alimento.

### 8.2.19. CALCULO DE LAS EFICIENCIAS DEL HIDROCICLON.-

Conocido el valor de  $d_{50}$  se transporta a la gráfica de las curvas de Gaudin-Schumman y proyectando se determina los porcentajes acumulativos (-) en el under flow, la alimentación y over flow correspondientes. Luego en función de estos porcentajes y con ayuda de las fórmulas abajo escritas, se procede a calcular las eficiencias:

Eficiencia del U/F (fracción gruesa)

$$= E_u = \frac{u(f - o)}{f(u - o)} \times 100$$

Eficiencia del O/F (fracción fina)

$$= E_o = \frac{(f - u)}{(o - u)} \frac{(100 - o)}{(100 - f)} \times 100$$

Eficiencia Global del Hidrociclón:

$$= E_u \times E_o \times 100$$

Siendo: f, u, o, los porcentajes acumulativos (+) en la alimentación, under flow y over flow respectivamente al  $d_{50}$ .

En la Figura No. 9 de las Curvas Gaudin-Schumman se obtiene:

<u>% acumulativo (-)</u>	<u>% acumulativo (+)</u>
o(-) = 85%	o = 15%
f(-) = 44.5%	f = 55.5%
u(-) = 14%	u = 86%

Aplicando las fórmulas de eficiencias:

$$E_u = \frac{86(55.5 - 15)}{55.5(86 - 15)} \times 100$$



$$E_u = 88.77\%$$

$$E_o = \frac{(55.5 - 86)(100 - 15)}{(15 - 86)(100 - 55.5)} \times 100$$

$$E_o = 82.05\%$$

$$\text{Eficiencia Global} = 0.8877 \times 0.8205 \times 100$$

$$\text{Eficiencia Global} = 72.84\%$$

Estos resultados de eficiencias tratándose de un hidrociclón que trabaja como deslamador, está dentro de límites aceptables.

## CAPITULO IX

### 9.0 EVALUACION DE LA CALIDAD DEL RELLENO

La cantidad y calidad son las condiciones de capital importancia con que debe cumplir un material para ser identificado como relleno. En el desarrollo del actual trabajo, con el Capítulo anterior ha concluido lo referente a los Cálculos del Tonelaje o Cantidad necesaria de relleno; faltando examinar sus cualidades y con este fin someter a pruebas y analizar los resultados que reporten estas experiencias y así calificar las propiedades.

Son varias las pruebas que contribuyen a juzgar la parte cualitativa del relleno, dirigidas a estimar la composición granulométrica, el ordenamiento de las partículas, las consistencias de su masa granular, las alteraciones que puedan modificar su composición química; este Capítulo está destinado a describir los experimentos y discutir sus resultados.

En la prueba de percolación que es una de las medidas para valorar la bondad de un relleno, para este caso, se

ha concluido en el Capitulo anterior.

### 9.1 COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD

Es una peculiaridad que las masas granulares presenten debido al tamaño de sus partículas y a través de ella se llega a conocer con mucha aproximación el carácter físico y el comportamiento de un relleno.

El coeficiente de uniformidad, está definido como la razón del diámetro de la partícula más grande que se encuentra en el 60% de fracción acumulativa (-) del material al diámetro de la partícula de mayor tamaño presente en el 10% de fracción acumulativa (-) del material.

Conforme a la definición la expresión matemática del coeficiente de uniformidad, es:

$$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots\dots\dots (1)$$

- Donde: CU = coeficiente de uniformidad  
 D60 = diámetro de partícula más grande que se encuentra en el 60% de fracción acumulativa (-) del material  
 D10 = diámetro de la partícula de mayor tamaño presente en el 10% de la fracción acumulativa (-) del material.

Siendo el coeficiente de uniformidad exclusivamente función de la granulometría del relleno, su determinación se hace en base al resultado del análisis de malla respectivo; el método usual que se sigue, es por representación gráfica en un papel semi-logarítmico, en el eje de las ordenadas se expresa el porcentaje acumulativo (-) y en el de las abscisas el tamaño de partícula en micrones. En la figura No. 11 se ha hecho lo descrito y se encuentra la obtención gráfica del coeficiente de

uniformidad.

Como se observa el coeficiente de uniformidad, es un número adimensional y por tanto carece de significado real, el hecho de haberse escogido el D60 y D10 no es rígido, puesto que hay la libertad de tomar otros porcentajes y su correspondiente tamaño de partícula.

Nos obstante de la condición de ser meramente un número abstracto, el coeficiente de uniformidad es un índice que en cierto grado da a conocer las cualidades de un relleno.

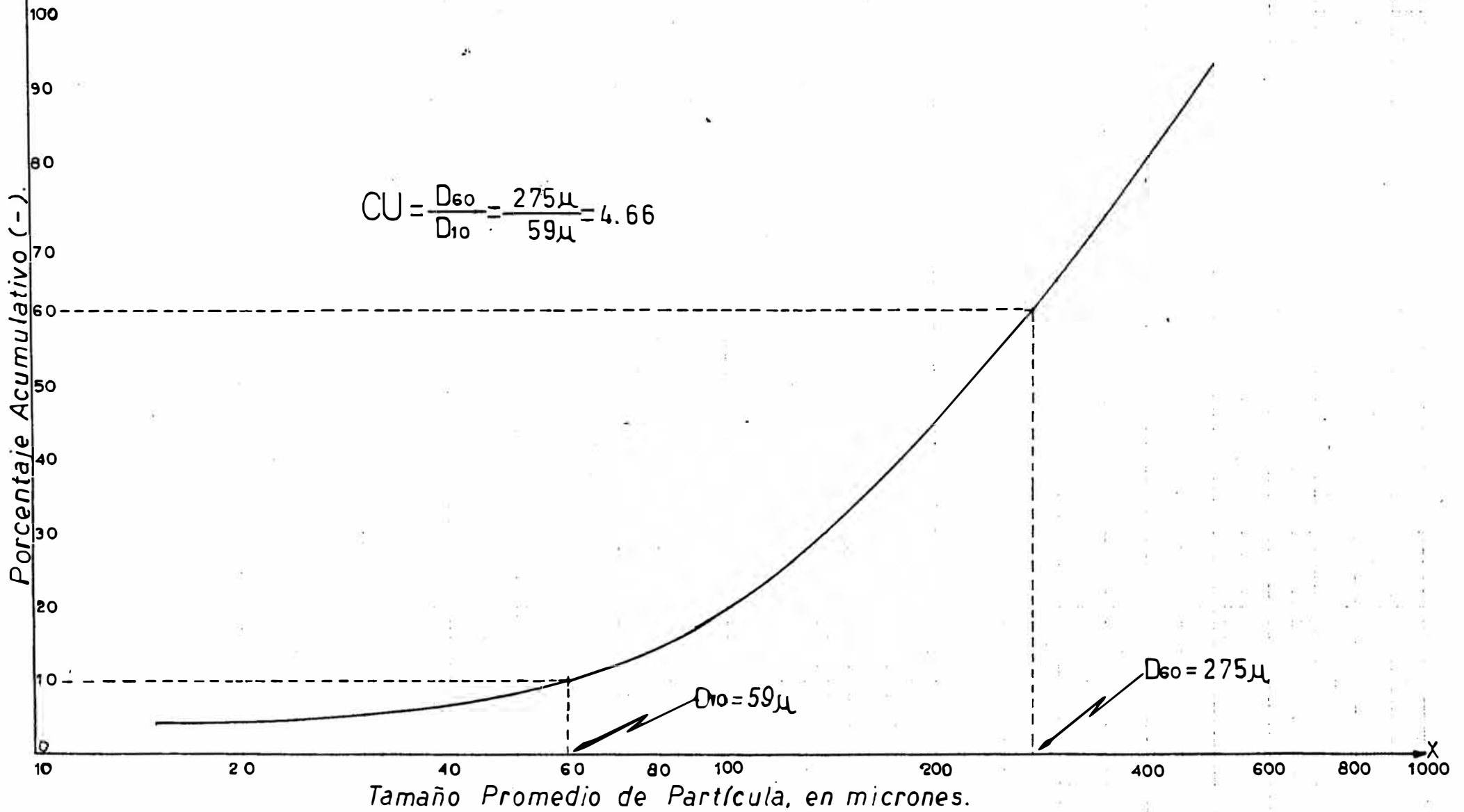
De datos recopilados de estudios sobre este tópico y por estadística, se ha podido fijar que el coeficiente de uniformidad más apropiado para el relleno hidráulico es entre 4 a 5; valores diferentes a este dato apropiado se analizan seguidamente:

Si CU es mayor que 5 manteniendo el valor D60 constante, quiere decir que el valor de D10 con respecto a D60, es pequeño, indica la presencia de gran cantidad de partículas finas, haciendo difícil la percolación del agua.

- Si CU es menor que 4 para la misma condición anterior el valor de D10 ha aumentado, con ello disminuyendo el porcentaje de partículas finas en el material y mejorando la percolación del agua con tendencia a producirse el fenómeno de "embudo" ya explicado en el Capítulo III.

El coeficiente de uniformidad y la velocidad de percolación están relacionados, guardando una proporcionalidad inversa; se ha establecido una ecuación matemática que vincula a la velocidad de percolación con el D10, cuya expresión, es:

FIGURA Nº11.-CURVA PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD.



$$v = \left( \frac{D_{10} \times 6}{100} \right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

En la que:

$v$  = Velocidad de percolación en cm/hora.

Con aplicación del método antes explicado, sus fórmulas y con la Figura No. 11, se obtiene el CU y la  $v$  para el material del under flow del hidrociclón con apex de 1 1/2 pulgadas de diámetro.

$$D_{60} = 275 \mu$$

$$D_{10} = 59 \mu$$

Con la ecuación (1) para CU:

$$CU = \frac{275 \mu}{59 \mu}$$

$$CU = 4.66$$

Y con la ecuación (2) para  $v$ :

$$v = \left( \frac{59 \times 6}{100} \right)^2$$

$$v = 12.53 \text{ cm/hora}$$

Ambos valores están ubicados dentro del límite aceptable que exige un relleno hidráulico, para que un material - cumpla con este fin.

A continuación nos ocuparemos de otro requisito de un - relleno:

## 9.2. DENSIDAD RELATIVA O DENSIDAD IN-SITU DE UN RELLENO

El material de relleno por el hecho de estar conformado por innumerables partículas de diferentes tamaños y de formas irregulares, al momento de cambiar de su estado

de mezcla sólidos-agua al de un cuerpo granular estable, sus partículas quedan ordenadas adoptando una posición - tal que entre ellas existen los espacios interparticula res en los que permanecen atrapados pequeñas porciones de aire o agua; para este tipo de material la relación - entre un determinado peso al volúmen respectivo que ocu pa, se conoce como densidad relativa ó densidad insitu del relleno, que tiene una diferencia acentuada de la - gravedad específica de sus sólidos que viene a ser la relación entre el peso promedio de los sólidos a su volúmen respectivo. Dichas relaciones serán iguales sola mente bajo las siguientes condiciones, cuando:

- El relleno sea un material no poroso o compacto, y
- La composición química permanezca constante.

La expresión matemáticas de la densidad in-situ es:

$$\text{Densidad In-Situ} = \frac{\text{Peso del relleno}}{\text{Volúmen de relleno}}$$

La densidad In -situ será menor cuanto mayor sea el volúmen inerparticular o viceversa.

La masa granular de un relleno está suceptible a modifi caciones en su estructura, física, por efecto de vibra ciones, presiones o acción del agua, causando una nueva distribución de las partículas siendo los vacíos o espa cios interparticulares ocupados por granos y simultánea mente aminorado el volúmen total de la masa, en conse cuencia, reduciéndose la velocidad de percolación, in crementándose la densidad relativa y disminuyendo la ra zón de poros requisito que posteriormente se comentará.

La densidad relativa, guarda una estrecha dependencia - de los siguientes factores:

- La composición granulométrica, tiene gran predominio

en la densidad relativa, siendo lo deseable, que los poros existentes entre las partículas grandes sean ocupados por partículas de menor tamaño y aún las más pequeñas ocupen los espacios entre las anteriores y así sucesivamente. La característica granulométrica es fácil de controlar mediante los grados de reducción del mineral en las etapas de trituración y molienda de la planta de beneficio.

- La forma de partículas, cuanto más irregular sea la forma, es decir, generalmente angulosa, están más propensas a cambiar en su disposición, alterando la densidad relativa del relleno. Es un factor imposible de controlar.

- La manera de depositar el relleno, es otro de los factores que gravita en la densidad relativa del mismo. Cuando la deposición del relleno se realiza en un sólo punto, sucede que a cierta distancia las partículas sólidas se sedimentan en un ambiente quieto por acción de su propio peso y los granos se acomodan formando arcos o bóvedas naturales con posibilidades futuras a fuertes reordenamientos. Para imposibilitar este tipo de asentamientos y distribución de partículas se recomienda depositar el relleno en distintos puntos del tajeo obteniéndose al mismo tiempo un material más homogéneo y de mayor resistencia a las presiones laterales de las cajas.

- La gravedad específica de las partículas sólidas, por definición, la densidad relativa guarda una proporción directa con este factor.

- Ordenamiento de las partículas sólidas o grado de compactación, por consiguiente, del volumen total de los poros.

Del material que contienen los poros, puede ser agua o aire, o sea del porcentaje de humedad.

En razón de existir un número ilimitado de posibilidades de disposiciones u ordenamiento de partículas, cuanto trabajo se ha efectuado hasta ahora para determinar la densidad relativa o densidad in-situ de un relleno ha sido de carácter estrictamente experimental.

A continuación se trata del método práctico que se sigue para medir la densidad relativa de un relleno.

### 9.2.1. DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA DENSIDAD RELATIVA O DENSIDAD IN SITU DE UN RELLENO

La medición de la densidad in-situ del relleno producto del under flow del hidrociclón con 1 1/2 pulgadas de diámetro, se ha ceñido a la siguiente técnica experimental, que consistió en:

- Se utilizó como dispositivo de experimento un cajón de madera tal como se ilustra en la Figura No. 12, de dimensiones proporcionales al de los tajeos de la mina, con la finalidad de que la alimentación del agua sea con igual velocidad.

Una de las caras tiene 15 orificios cada uno de 1 cm. de diámetro, ésta misma se protege interiormente con yute semejante al tajeo.

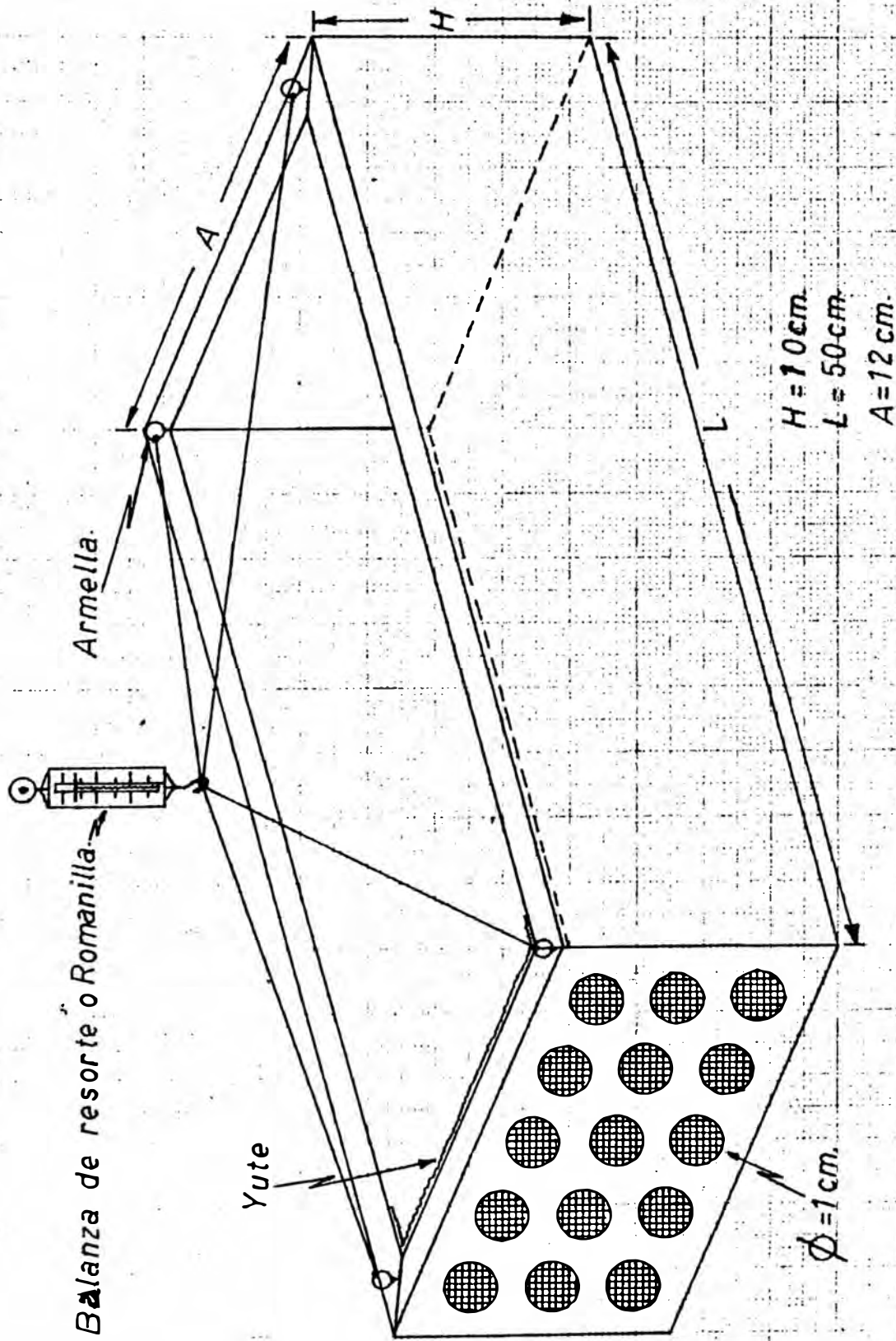
En el borde superior el cajón está provisto de cuatro armellas convenientemente ubicadas y por las cuales se hace pasar una soguilla que permite suspender al cajón para realizar las pesadas.

Inicialmente se pesó el cajón vacío.

El cajón se llenó con el material de relleno hasta un nivel determinado modiando inmediatamente con bastante cuidado la altura de llenado, al mismo tiempo se efec



**FIGURA Nº12.- DISPOSITIVO PARA MEDIR LA DENSIDAD DE UN RELLENO.**



tuó la primera pesada con una balanza de resorte o romana que es la más apropiada y se calculó la densidad relativa correspondiente.

- Luego a diferentes intervalos de tiempo se volvió a pesar y medir las nuevas alturas de llenado hallándose la densidad relativa en cada caso. Al comienzo se observó una disminución rápida de peso y altura, con el transcurso del tiempo fue haciéndose lenta hasta que el peso y volúmen permanecieron fijos determinándose la densidad relativa correspondiente, constituyendo ésta la densidad relativa o densidad in-situ del relleno.

Cabe acotar que la experimentación se ejecutó en un ambiente similar al de la mina, con el propósito de que la densidad relativa obtenida sea la misma al del relleno en los tajos.

Los resultados logrados con esta experimentación se resume en el Cuadro No. 20, para una comprensión más integral, estos datos son graficados en un papel de escala simple que se ilustra en la Figura No. 13, encontrándose una curva producto del ploteo de las densidades de un relleno hidráulico real versus el tiempo o edad del relleno. En la curva se nota que a partir de los 2 1/2 días la densidad empieza a mantenerse constante en 2.0 gr/cm<sup>3</sup>, que es la densidad in-situ del relleno.

Para fines de los cálculos de los requisitos de cantidad de relleno que se trató en el Capítulo V, se estimó una densidad in-situ de 2.0 gr/cm<sup>3</sup>, dato que se tomó de las pruebas de percolación, que en estas circunstancias queda confirmado, garantizando la exactitud de los cálculos mencionados.

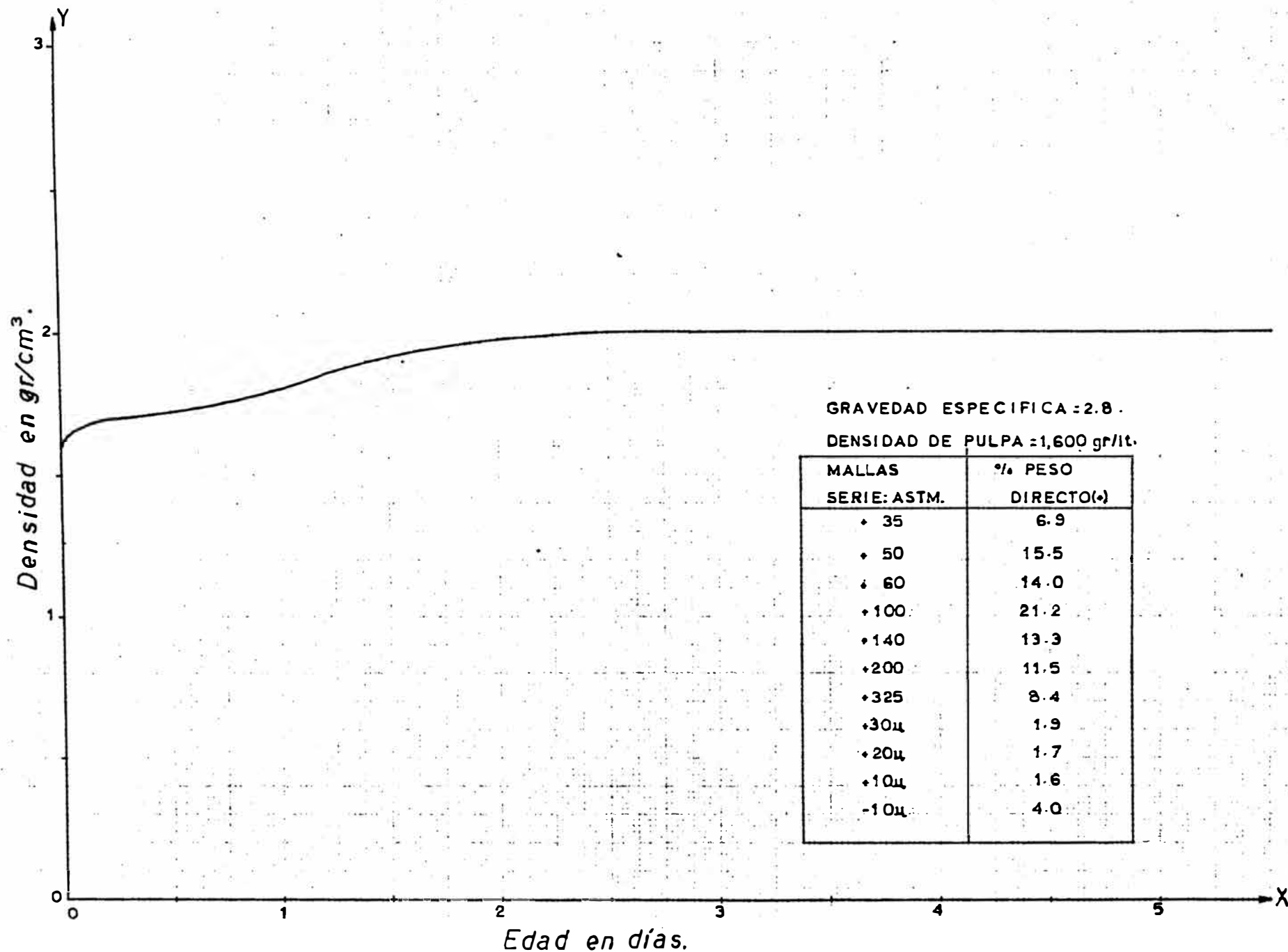
9.2.2. CUADRO No. 20

RESULTADOS DE LA DETERMINACION DE LA DENSIDAD IN SITU DE UN RELLENO

TIEMPO O EDAD	PESO TOTAL (gr)	PESO DEL CAJON (gr)	PESO DE MUESTRA (gr)	ALTURA DE LLENADO (mm)	AREA DE SECCION (cm <sup>2</sup> )	VOLUMEN DE MUESTRA (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD DE MUESTRA (gr/cm <sup>3</sup> )
0 horas	7,500	1,460	6,040	63	600	3,775	1.60
$\frac{1}{2}$ hora	7,000	1,460	5,540	56	600	3,358	1.65
1 hora	6,270	1,460	4,810	48	600	2,880	1.67
8 horas	6,250	1,460	4,790	47	600	2,818	1.70
1 día	6,200	1,460	4,740	44	600	2,633	1.80
2 días	6,000	1,460	4,540	38	600	2,270	2.00
3 días	6,000	1,460	4,540	38	600	2,270	2.00
4 días	6,000	1,460	4,540	38	600	2,270	2.00
5 días	6,000	1,460	4,540	38	600	2,270	2.00

La densidad in-situ del relleno se estabilizó en : 2.00 gr/cm<sup>3</sup>.

FIGURA Nº13.- VARIACION DE LA DENSIDAD DE UN RELLENO CON EL TIEMPO.



### 9.3. RAZON DE POROS DE UN RELLENO

Es otro de los requisitos con que debe cumplir la calidad de un relleno; se define como el cociente entre el volúmen de vacíos o poros y el volúmen de los sólidos. Matemáticamente se expresa:

$$e = \frac{V_p}{V_s} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

- e = razón de poros real
- $V_p$  = volúmen de poros o vacíos
- $V_s$  = volúmen de los sólidos

Teóricamente el valor de e puede oscilar entre límites extremos de cero a infinito; para  $e = 0$ , corresponde a un cuerpo completamente sólido libre de poros, y si  $e =$  infinito, se trata del estado de vacío perfecto pero en la práctica sus límites fluctúan entre  $e = 0.25$  para arenas muy compactas con finos y  $e = 15$  para arcillas altamente estructurales y fuertemente compresibles.

En cada tipo de material el volúmen de sus poros varía entre dos extremos, un valor máximo y un valor mínimo en consecuencia dando lugar a un  $e$  máx y un  $e$  mín. - respectivamente. En un material la razón de poros real se encuentra entre estos dos extremos.

La razón de poros por ser esencialmente una relación de volúmenes, es una medida que controla la compactación de un relleno e interviene en la determinación de su densidad relativa. Cuando la razón de poros real se aproxima al  $e$  mín la densidad relativa es mayor y el relleno es más compacto y recíprocamente.

El comportamiento mecánico de un relleno queda funda-

mentalmente definido por la COMPACIDAD. El investigador TERZAGHI, ha propuesto el concepto de COMPACIDAD RELATIVA para medir tal condición en función de las razones de poros vinculándolos matemáticamente por:

$$C_r = \frac{e_{\text{máx}} - e}{e_{\text{máx}} - e_{\text{mín}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

Siendo:

$e_{\text{máx}}$  = razón de poros correspondiente al estado más suelto, obtenida vertiendo al material dentro de un recipiente sin ninguna compactación posterior.

$e_{\text{mín}}$  = razón de poros respectivo al estado más compacto del material, obtenido al someter la muestra de la masa granular a una operación de martillado dentro de un recipiente.

$e$  = razón de poros real del material en su estado natural.

$C_r$  = Compacidad relativa expresada usualmente como porcentaje.

Valores superiores al 50% de  $C_r$  suelen considerarse un material compacto y este valor se menciona frecuentemente como límite de seguridad razonable en problemas prácticos.

Para la utilización de la fórmula (2) primeramente deberá establecerse relaciones matemáticas para las razones de poros en función de otras variables.

9.3.1. RAZON DE POROS REAL.- Dado la imposibilidad de medir directamente la razón de poros real, se ha creído conveniente encontrar una ecuación,

cuya deducción es:

$$e = \frac{V_p}{V_s}$$

$$V_p = V_r - V_s$$

$$RH = \frac{W_{\text{agua}}}{W_s}$$

Reemplazando:

$$e = \frac{V_r}{V_s} - 1$$

En función de densidades:

$$e = \frac{W_r/D}{W_s/G} - 1$$

$$W_r = W_{\text{agua}} + W_s$$

Sustituyendo:

$$e = \frac{G}{D} \left( \frac{W_{\text{agua}}}{W_s} + 1 \right) - 1$$

Por tanto:

$$e = \frac{G}{D} (RH + 1) - 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

Siendo:

$e$  = razón de poros real

$V_p$  = volúmen de poros

$V_s$  = volúmen de sólidos

$V_r$  = volúmen de relleno

$W_s$  = peso de sólidos

$W_r$  = peso de relleno

$W_{\text{agua}}$  = peso de agua.

$G$  = gravedad específica de sólidos = 2.8 gr/cm<sup>3</sup>

D = densidad del relleno = 2.0 gr/cm<sup>3</sup>  
 RH = relación de humedad.

La gravedad específica de sólidos se determina con el clásico método de Arquímedes, la densidad del relleno con el método anteriormente descrito y la relación de humedad por diferencia de pesos de la muestra húmeda y muestra seca.

Los resultados conseguidos con la técnica experimental que se siguió para determinar la razón de poros real, se sintetiza en el Cuadro No. 21, con estos datos y el empleo de la fórmula (3) se calcula el valor de  $e$ .

CUADRO No. 21

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA LA RAZON DE POROS REAL

NUMERO DE PRUEBAS	PESO DE MUESTRAS HUMEDA (gr)	PESO DE MUESTRA SECA (gr)	PESO DE AGUA EVAPORADA (gr)
1ra	200	170.20	29.80
2da	200	170.40	29.60
3ra	200	169.90	30.10
4ta	200	169.40	30.60
5ta	200	270.46	29.54
T O T A L	1,000	850.36	149.64

Hallando RH:

$$RH = \frac{149.64 \text{ gr}}{850.36 \text{ gr}}$$

$$RH = 0.175$$

Supliendo valores en la ecuación (3):



$$e = \frac{G}{D} (RH + 1) - 1$$

$$e = \frac{2.8}{2.0} (0.175 + 1) - 1$$

$$e = 0.645$$

9.3.2. RAZON DE POROS MAXIMO.- Manteniendo una proporción directa la razón de poros con el volumen de los mismos, cuando  $e_{m\acute{a}x}$ , el material contiene un volumen máximo de poros, lo que significa, que la muestra de relleno deberá encontrarse en un estado completamente seco; al aumentar el volumen de poros hasta un límite máximo, el volumen total de la muestra igualmente se hace máximo originando la densidad mínima del relleno.

La relación matemática que nos permite hallar  $e_{m\acute{a}x}$  se infiere de la ecuación (3), por encontrarse la muestra exenta de humedad:  $RH=0$ , simplificándose la ecuación en:

$$e_{m\acute{a}x} = \frac{G}{D_{m\acute{i}n}} - 1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

El desenvolvimiento del procedimiento en que se basa la determinación práctica de  $e_{m\acute{a}x}$ , es como sigue:

- Un peso conocido de muestra húmeda se lleva a sequedad en un horno y comprobada la total liberación de la humedad se obtiene un material seco y fluido.
- La muestra seca se deposita en un vaso de vidrio de 1000 cm<sup>3</sup> de volumen.
- De este depósito se vierte la muestra desde

una altura de 5 cm a un vaso graduado de mayor capacidad.

-- Se lee el nuevo volumen ocupado y se pesa la muestra, lo que da la densidad mínima.

En la Figura No. 14 se ilustra el arreglo para obtener la razón de poros máxima; mientras que en el siguiente Cuadro se dan los resultados logrados:

**CUADRO No. 22.**

**RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA LA RAZON DE POROS MAXIMA**

NÚMERO DE PRUEBAS	VOLUMEN INICIAL DE MUESTRA SECA (cm <sup>3</sup> )	VOLUMEN FINAL DE MUESTRA SECA (cm <sup>3</sup> )	PESO DE MUESTRA SECA (gr).
1ra.	1,000	1,600	2,050
2da.	1,000	1,200	1,883
3ra.	1,00	1,500	2,000
4ta.	1,000	1,300	1,933
PROMEDIO	1,000	1,400	1,966.5

$$\text{Densidad mínima} = D_{\text{mfn}} = \frac{1,966.5 \text{ gr}}{1,400 \text{ cm}^3}$$

$$D_{\text{mfn}} = 1.4 \text{ gr/cm}^3$$

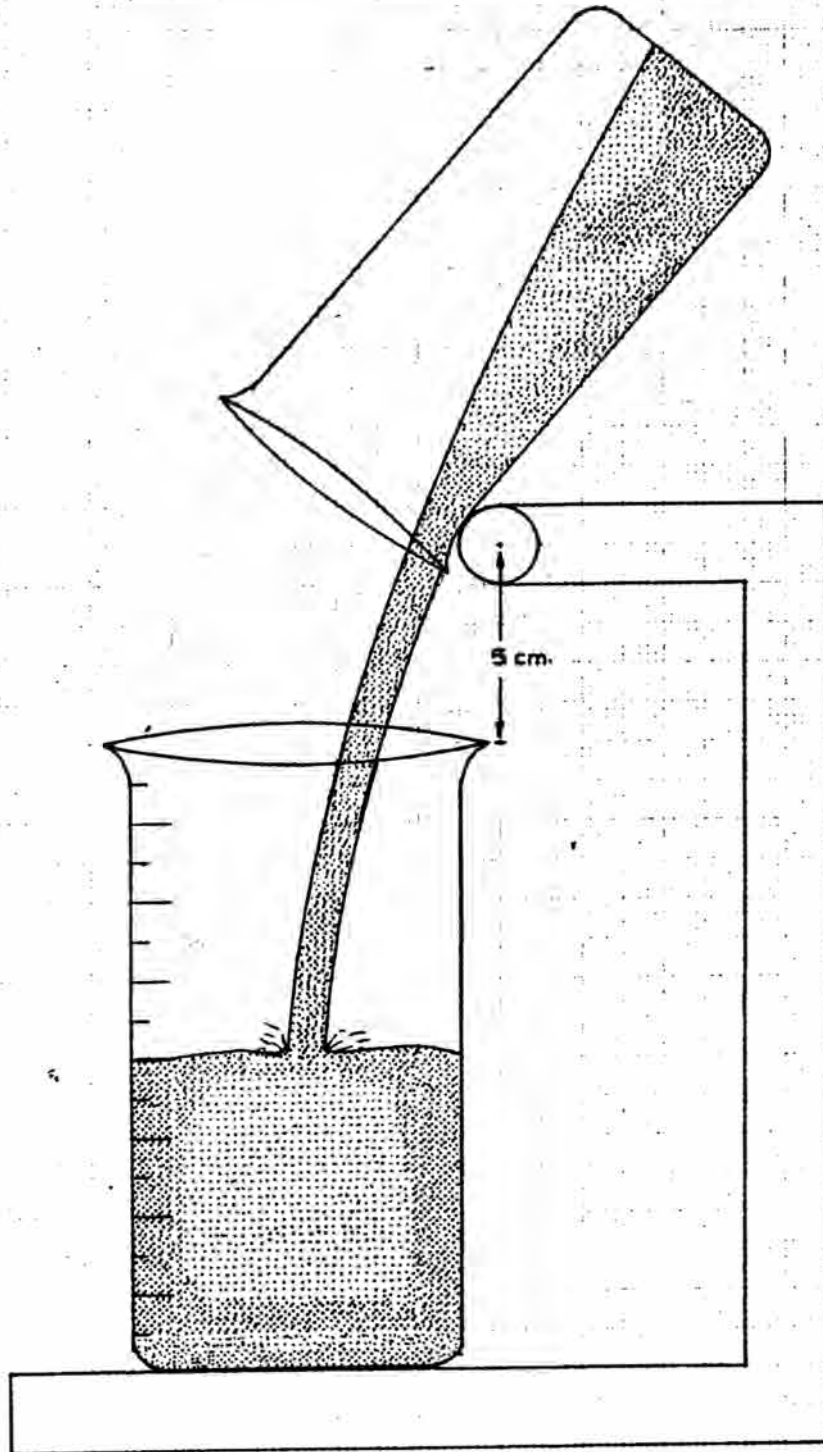
Sustituyendo valores en relación (4)

$$e_{\text{máx}} = \frac{2.8}{1.4} - 1$$

$$e_{\text{máx}} = 1.00$$

9.3.3. RAZON DE POROS MINIMA.- Conservando la razón de poros una proporcionalidad inversa con la densidad de un relleno, como en el caso anterior,

FIGURA Nº14 . - ARREGLO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD MINIMA DE UN RELLENO.



para calcular la razón de poros mínima previamente se debe conocer u obtener la densidad máxima de un relleno.

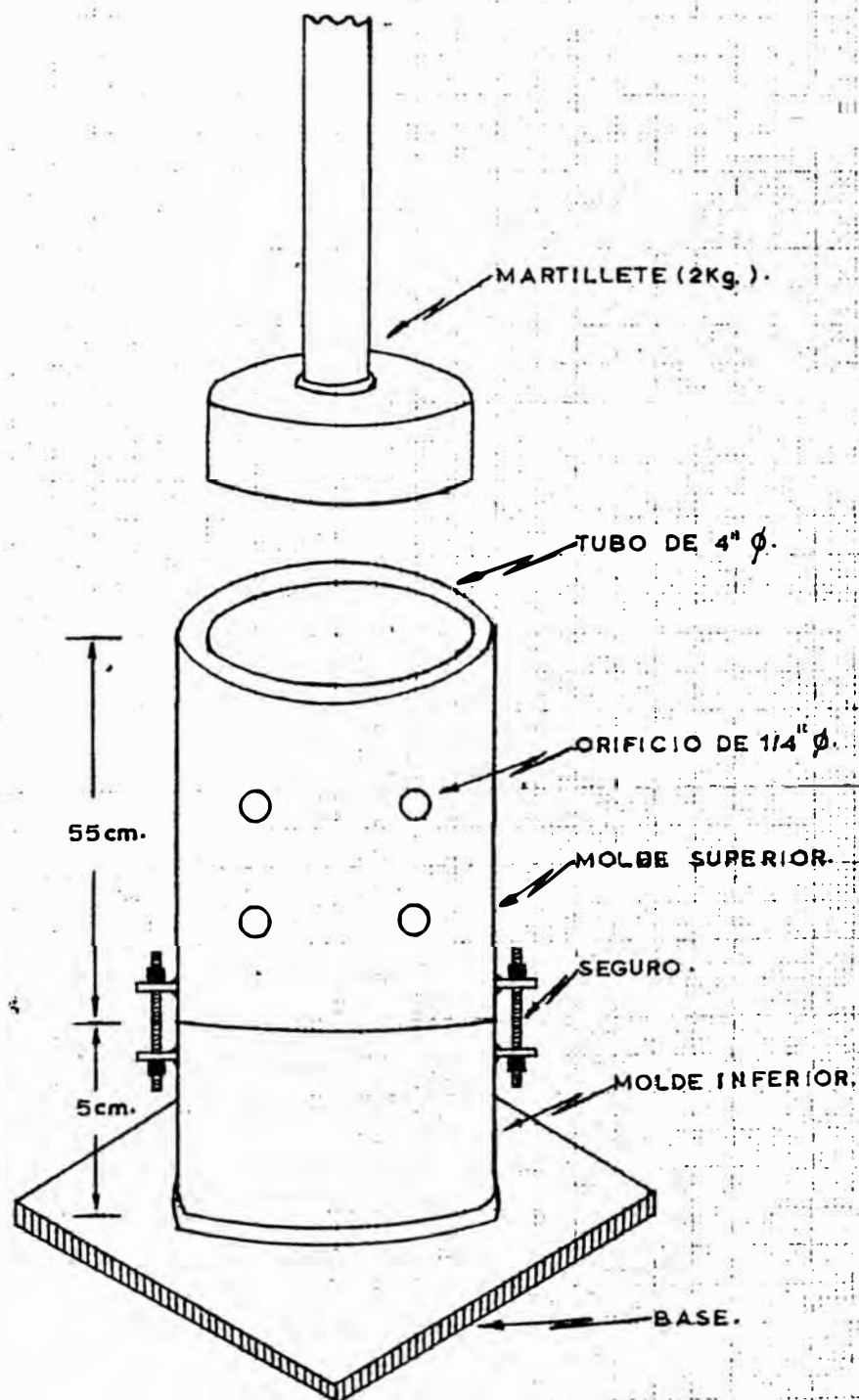
Un relleno alcanzará a tener una densidad máxima reduciendo hasta un límite mínimo el volumen ocupado por sus poros, lo que implica, - que el material adquirirá su estado más compacto, para tal condición una muestra de relleno es sometida a un trabajo de compactación.

El aparato empleado es un compactador simple, compuesto de un molde de forma tubular de dos piezas y un martillete, tal como se representa en la Figura No. 15.

El método normal que se sigue, consiste en:

- Se empalma las dos piezas del molde tubular
- Se toma una muestra natural de relleno cuyo volumen sea mayor que el de la pieza inferior del molde.
- Una tercera parte de la muestra se introduce en el molde y desde el borde superior del molde, el martillete se deja caer 25 veces.
- Se coloca el segundo tercio de muestra en el molde y nuevamente del mismo modo se golpea 25 veces con el martillete e igualmente con el tercer tercio de muestra.
- Se saca el seguro y se retira la pieza superior del molde y luego se corta el relleno al ras con una cuchilla afilada.
- Se vacía la muestra con bastante cuidado y se pesa determinándose la Densidad Máxima :  $D_{\text{máx}}$
- Se lleva a sequedad la muestra
- Se vuelve a pesar la muestra seca y se calcula el RH.

FIGURA Nº 15. -ARREGLO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD MAXIMA DE UN RELLENO.



relleno.

$$C_r = \frac{1.00}{1.00} = \frac{0.645}{0.40} \times 100$$

$$C_r = 59.17 \%$$

Con 59.17% de  $C_r$  y fundamentado en la proposición de TERZAGHI nos permitimos sostener que, el relleno obtenido con el under flow como producto del hidrociclón con apex de 1 1/2 pulgadas de diámetro, cumplir con las exigencias de compacidad.

En la Figura No. 16 se representa la gráfica de la variación de la densidad relativa con respecto a la razón de poros para el relleno de Atacocha, es obvio la proporción inversa que guardan estas dos variables o requisitos que califican la calidad de un relleno.

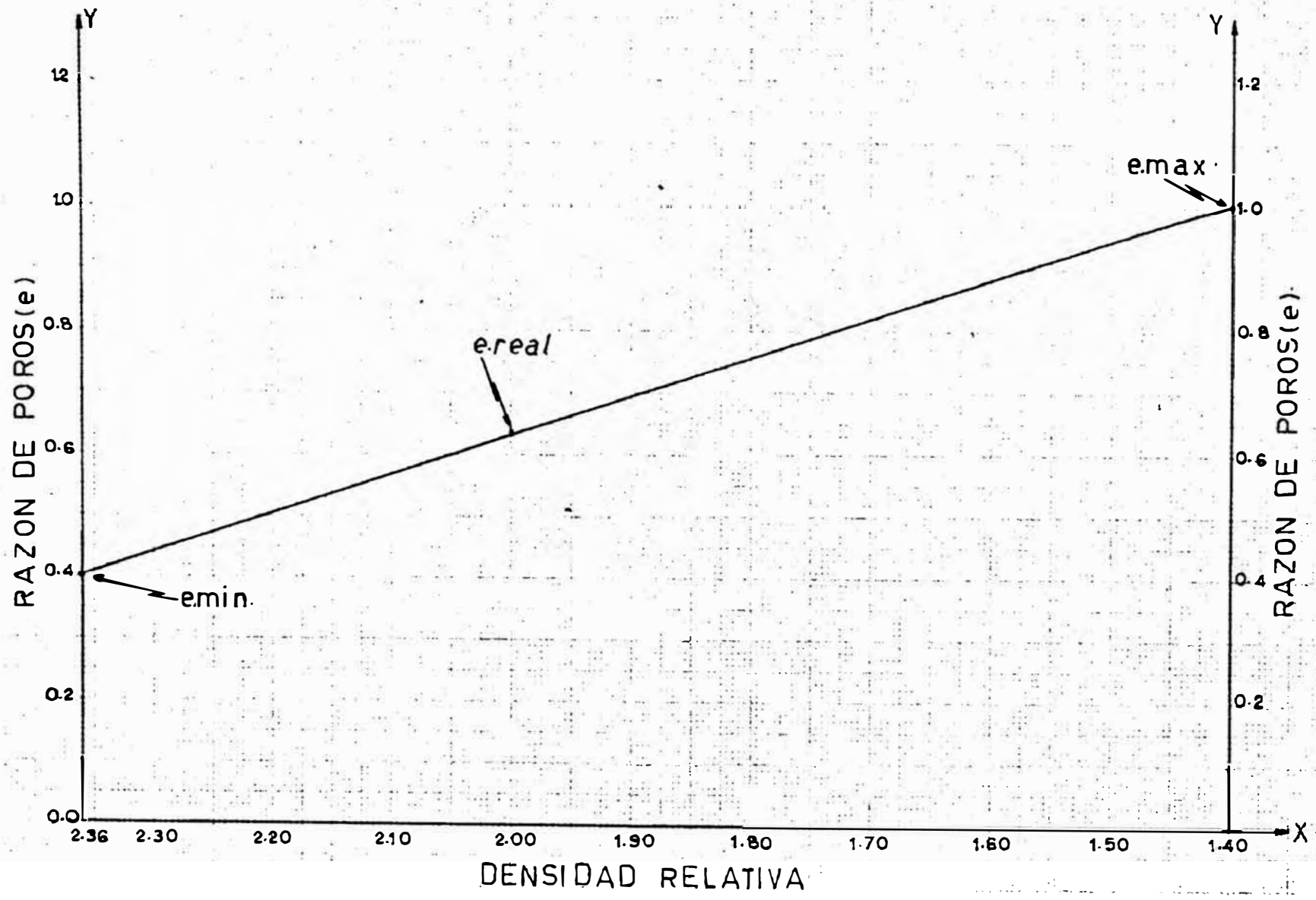
#### 9.4. ANGULO DE FRICCIÓN INTERNA Y COHESIÓN DE UN RELLENO

Al explotarse zonas adyacentes a otras anteriormente explotadas y rellenadas, es decir, que el relleno antiguo constituya una de las paredes laterales del nuevo tajeo, la mayor preocupación que se debe tener, es que el relleno permanezca en su posición original sin sufrir desprendimientos, de lo contrario, su deslizamiento dará lugar a problemas que entorpecen la normal operación minera y posteriormente al tratamiento metalúrgico que recibe el mineral contaminado en la planta de beneficio.

La pared de un relleno se derrumba o más propiamente falla, por acción de su propio peso dejando una superficie libre tal como se esquematiza en la Figura No. 17.

La estabilidad de un relleno varía con la altura del

FIGURA Nº 16.-REPRESENTACION GRAFICA DE LA DENSIDAD RELATIVA DE UN RELLENO.



A continuación en un cuadro se resume los resultados de las cuatro pruebas:

CUADRO No. 23

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA LA RAZON DE POROS MINIMA

NUMERO DE PRUEBAS	VOLUMEN DEL MOLDE INFERIOR (cm <sup>3</sup> )	PESO DE MUESTRA HUMEDA (gr)	PESO DE MUESTRA SECA (gr)	VOLUMEN DE AGUA RETENIDA (cm <sup>3</sup> ).
1ra.	565.5	1,335.5	1,130	205.5
2da.	565.5	1,340.0	1,125	215.0
3ra.	565.5	1,350.0	1,135	215.0
4ta.	565.5	1,330.0	1,126	204.0
PROMEDIO	565.5	1,338.88	1,129	209.88

Hallando RH:

$$RH = \frac{209.88 \text{ gr}}{1129 \text{ gr}}$$

$$RH = 0.185$$

Calculando la densidad máxima:

$$D_{\text{máx}} = \frac{1,338.88 \text{ gr}}{565.5 \text{ cm}^3}$$

$$D_{\text{máx}} = 2.36 \text{ gr/cm}^3$$

Para determinar  $e_{\text{mín}}$ , la ecuación (3) se convierte en:

$$e_{\text{mín}} = \frac{G}{D_{\text{máx}}} (RH + 1) - 1$$

Reemplazando valores:

$$e_{\text{mín}} = \frac{2.80}{2.36} (0.185 + 1) - 1$$

$$e_{\text{mín}} = 0.40$$

Llegado a conocer los valores de  $e$ ,  $e_{\text{máx}}$ ,  $e_{\text{mín}}$ , se procede a suplir estos datos en la fórmula (2) propuesta por TERZAGHI para saber la Compacidad Relativa del



mismo, existiendo un nivel hasta donde el material conserva su firmeza, con este propósito hoy toca encontrar una relación matemática que en base a ella se calcula con seguridad la altura permisible de relleno, su función del ángulo de fricción interna y la cohesión, factores que desempeñan un rol trascendental dentro de este fenómeno.

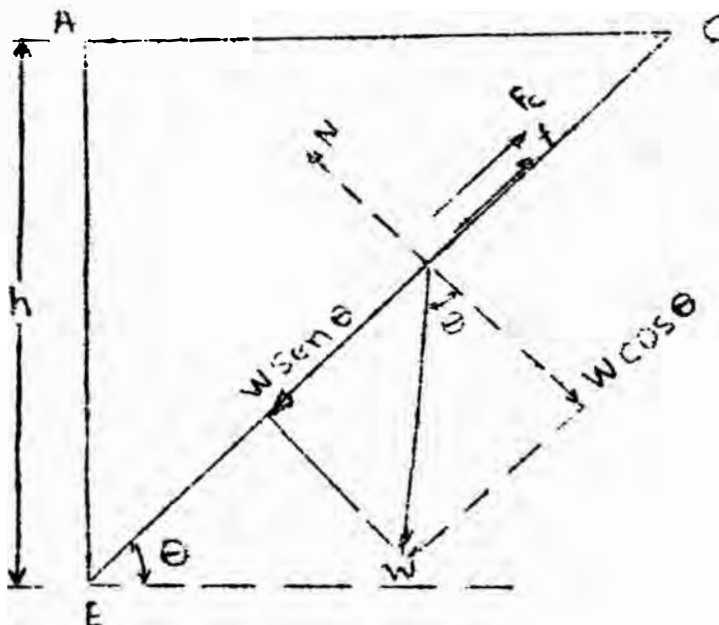
Quienes se dedicaron a la observación del fallamiento de un relleno han revelado que en la Figura No. 17:

Area del arco AB = Area BCD

Por tanto:

Perímetro de la falla ABDE = Perímetro del triángulo ACE

Partiendo de estas observaciones geométricas y con el objeto de visualizar mejor a las fuerzas actuantes que originan el fallamiento, para demostrar nos ayudaremos del siguiente gráfico:



Donde:

$W$ , es el peso por unidad de longitud

$f$ , es la fuerza de fricción

$F_c$ , es la fuerza de cohesión por unidad de longitud

$N$ , es la normal

$\theta$ , es el ángulo de deslizamiento.

Estableciendo el equilibrio de fuerzas, se tiene:

$$N = W \cdot \text{sen} \theta = f + F_c \quad (1)$$

$$f = \mu \cdot N = u \cdot W \cdot \text{cos} \theta$$

$$F_c = C \text{ (perímetro del fallamiento)}$$

Siendo:

$C$  = esfuerzo de cohesión, ton/m<sup>2</sup>

$u$  = coeficiente de fricción de la masa granular

$u = \text{tg} \phi$

$\phi$  = ángulo de fricción de la masa granular.

Luego la fuerza de fricción es:

$$f = W \cdot \text{tg} \phi \cdot \text{cos} \theta$$

Reemplazando valores en la ecuación (1)

$$W \cdot \text{sen} \theta = W \cdot \text{tg} \phi + C \text{ (perímetro del fallamiento)}$$

$$\text{Perímetro del fallamiento} = \overline{AC} + \overline{CE}$$

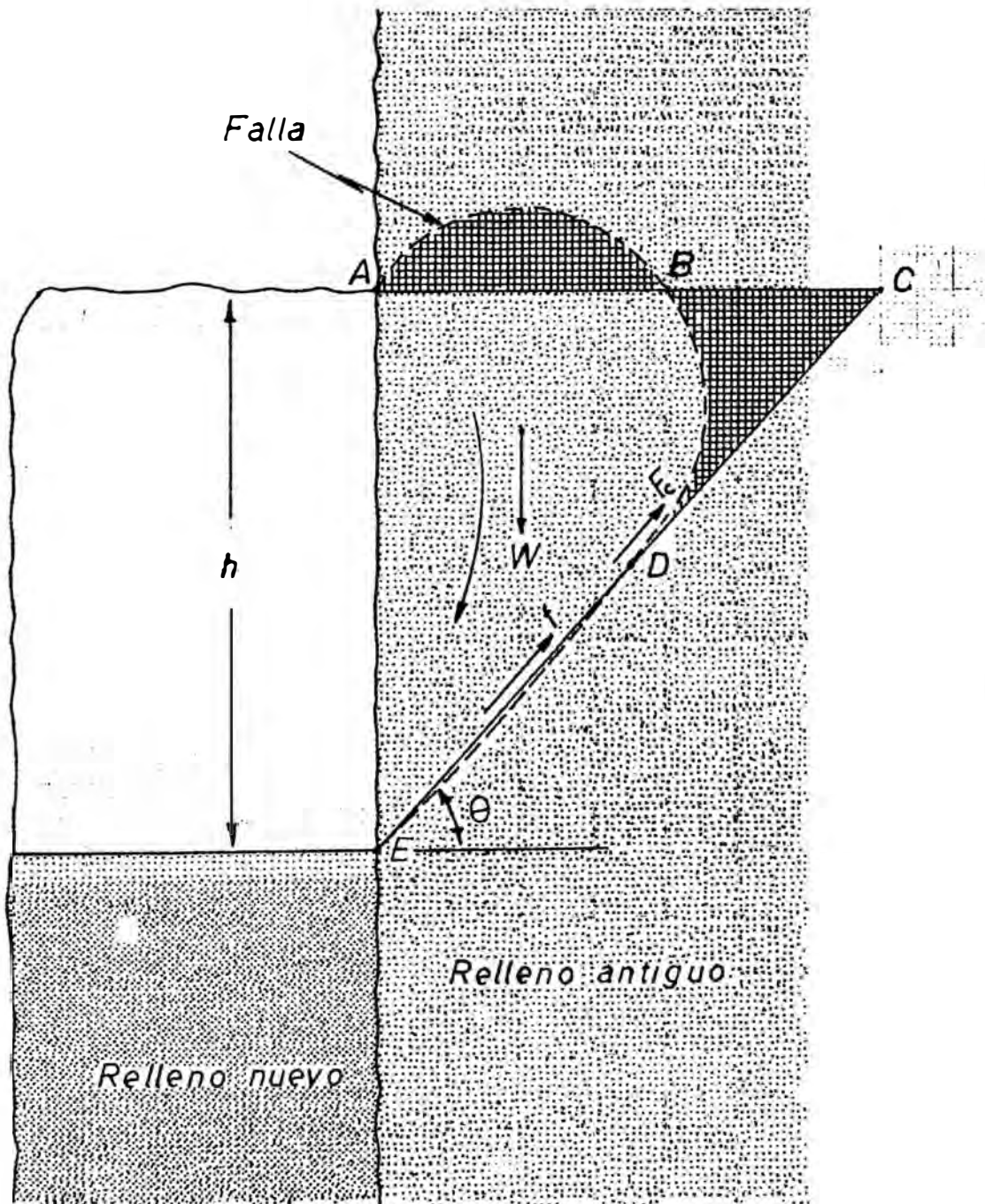
$$\text{Perímetro del fallamiento} = \frac{h}{\text{tg} \theta} + \frac{h}{\text{sen} \theta}$$

$$W \cdot \text{sen} \theta - W \cdot \text{tg} \phi \cdot \text{cos} \theta = C \left( \frac{h}{\text{tg} \theta} + \frac{h}{\text{sen} \theta} \right)$$

Pero:

$$W = \text{área del triángulo ACE} \times D = \frac{h}{\text{tg} \theta} \times \frac{h}{2} \times D$$

FIGURA Nº 17 - ESQUEMA DEL FALLAMIENTO  
DE UNA PARED DE RELLENO ANTIGUO.



Donde Ñ

$D$ , es densidad del relleno, ton/m<sup>3</sup>

Sustituyendo y factorando:

$$\frac{h^2}{2 \operatorname{tg} \theta} \times D (\operatorname{sen} \theta - \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \theta) = C \cdot h \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \theta} + \frac{1}{\operatorname{sen} \theta} \right)$$

$$\frac{h}{2 \operatorname{tg} \theta} \times D (\operatorname{sen} \theta - \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \theta) = C \left( \frac{1 + \operatorname{tg} \theta}{\operatorname{sen} \theta} \right)$$

$$\frac{h \cdot D}{2 \operatorname{tg} \theta} (\operatorname{sen}^2 \theta - \operatorname{sen} \theta \cdot \cos \theta \cdot \operatorname{tg} \phi) = C (1 + \cos \theta)$$

Sabemos:  $\theta = 45^\circ + \phi/2$

Luego:

$$\operatorname{tg} \phi = \operatorname{tg}(2\theta - 90^\circ) = -\operatorname{ctg} 2\theta$$

$$\frac{h \cdot D}{2 \operatorname{tg} \theta} (\operatorname{sen}^2 \theta + \operatorname{sen} \theta \cdot \cos \theta \cdot \operatorname{ctg} 2\theta) = C (1 + \cos \theta)$$

$$\frac{h \cdot D}{2 \operatorname{tg} \theta} \operatorname{sen}^2 \theta + \frac{\operatorname{sen} \theta \cdot \cos \theta (\cos^2 \theta - \operatorname{sen}^2 \theta)}{2 \operatorname{sen} \theta \cdot \cos \theta} = C (1 + \cos \theta)$$

$$\frac{h \cdot D}{4 \operatorname{tg} \theta} = C (1 + \cos \theta)$$

$$h = \frac{4C}{D} (\operatorname{sen} \theta + \operatorname{tg} \theta)$$

Pero:

$$c_f = \operatorname{sen} \theta + \operatorname{tg} \theta$$

O sea:

$$c_f = \operatorname{sen} (45^\circ + \phi/2) + \operatorname{tg}(45^\circ + \phi/2)$$

Por lo tanto:

$$h = \frac{4C}{D} \times c_f \quad \dots \dots \dots (2)$$

TERZAGHI, recomendó cambiar el coeficiente 4 por 2.6; fallas en taludes verticales han demostrado que la co rrección de TERZAGHI es justificada.

Por consiguiente:

$$h = \frac{2.6 C}{D} \times c_f \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

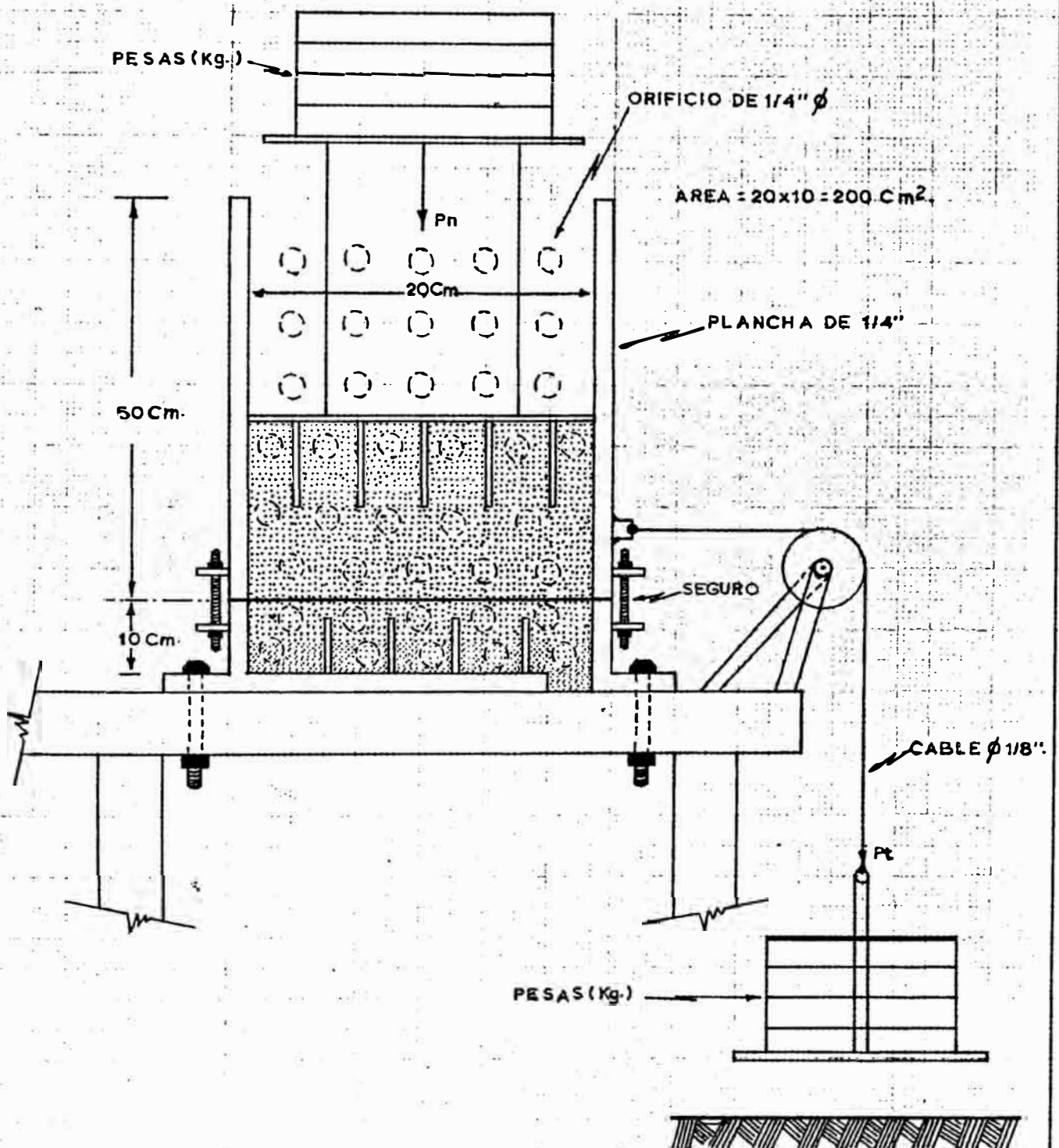
h = Altura del relleno en m.

Para la utilización de la fórmula matemática (3), se debe conocer los valores de C (esfuerzo de cohesión) y del ángulo de fricción interna,  $\phi$ , en base a ello calcular  $c_f$ ; la determinación es práctica, la técnica experimental usada es como se describe.

**9.4.1. PRUEBA PARA EL CALCULO DEL ANGULO DE FRICCION INTERNA Y EL ESFUERZO DE COHESION.**- El esfuerzo de cohesión y el ángulo de fricción interna se determina simultáneamente con la misma experiencia.

El equipo adecuado con el que se realiza esta experimentación, se compone de una caja construída de una plancha metálica y dividida en dos secciones. La sección superior está atada a un cable para aplicar una fuerza tangencial mediante pesos, el cable pasa por una polea ubicada al borde de la mesa y la sección inferior se encuentra fijada a una mesa o plataforma. Las paredes largas de la caja están provistas de orificios de 1/4 pulgada de diámetro para el drenaje. Se protege con yute las paredes interiores de la caja y luego se llena con relleno hidráulico a experimentar. En la base de la sección inferior y encima del relleno hidráulico se colocan planchas con aletas con el objeto de distribuir la fuerza tangencial uniformemente en todo el área. El equipo se representa en la Figura No. 18.

FIGURA Nº18 - ARREGLO PARA PRUEBAS AL CORTE HORIZONTAL.



El área de contacto es de 200 cm<sup>2</sup> (10x20cm). Sobre la plancha superior se pone un peso fijo y después se comienza a colocar pesos al extremo del cable hasta causar la rotura de la muestra de relleno por cizallamiento.

Para el presente estudio se realizaron 5 pruebas con el mismo relleno hidráulico, depositándose en cada una de ellas pesos fijos diferentes en la parte superior. Se procede a calcular el esfuerzo unitario normal y el esfuerzo unitario tangencial en base a:

$$G_n = \frac{P_n}{A} \dots\dots\dots (4)$$

$$G_t = \frac{P_t}{A} \dots\dots\dots (5)$$

Donde:

- G<sub>n</sub> = esfuerzo unitario normal, ton/m<sup>2</sup>
- G<sub>t</sub> = esfuerzo tangencial unitario, ton/m<sup>2</sup>
- P<sub>n</sub> = fuerza normal
- P<sub>t</sub> = fuerza tangencial
- A = área de la caja = 200 cm<sup>2</sup> = 0.02 m<sup>2</sup>
- P<sub>n</sub> = peso del relleno contenido en la sección superior de la caja, más el peso de la sección superior de la caja, más el peso de una plancha con aletas, más el peso de las pesas que se colocan sobre el relleno.
- P<sub>t</sub> = peso del cable y base para las pesas, - más el peso de las pesas.

Los resultados encontrados para las pruebas se resumen en el Cuadro No. 24.

CUADRO No. 24

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA EL ANGULO DE FRICCION  
Y EL ESFUERZO DE COHESION

NUMERO DE PRUEBAS	AREA (cm <sup>2</sup> )	Pn (Kg)	Gn (ton/m <sup>2</sup> )	Pt (Kg)	Gt (ton/m <sup>2</sup> )
1ra.	200	93.7	4.69	62.9	3.14
2da.	200	106.7	5.34	62.0	3.10
3ra.	200	195.5	9.78	100.4	5.02
4ta.	200	250.7	12.54	117.8	5.89
5ta.	200	308.7	15.44	138.0	6.90

Llevando estos valores a un papel de escala simple y ploteando Gn versus Gt, se determina una recta cuyo ángulo que forma con la horizontal es el respectivo Angulo de Fricción Interna,  $\theta$ , para el relleno y la intersección de la recta con el eje de las ordenadas fija el valor de Gt que corresponde a la Cohesión, C. La Figura No. 19, es la encargada de ilustrar lo explicado.

Cabe añadir que los esfuerzos unitarios que figuran en el Cuadro No. 24, se calcularon con las fórmulas (4) y (5).

Los resultados graficamente hallados que suministra la Figura No. 19, son para:

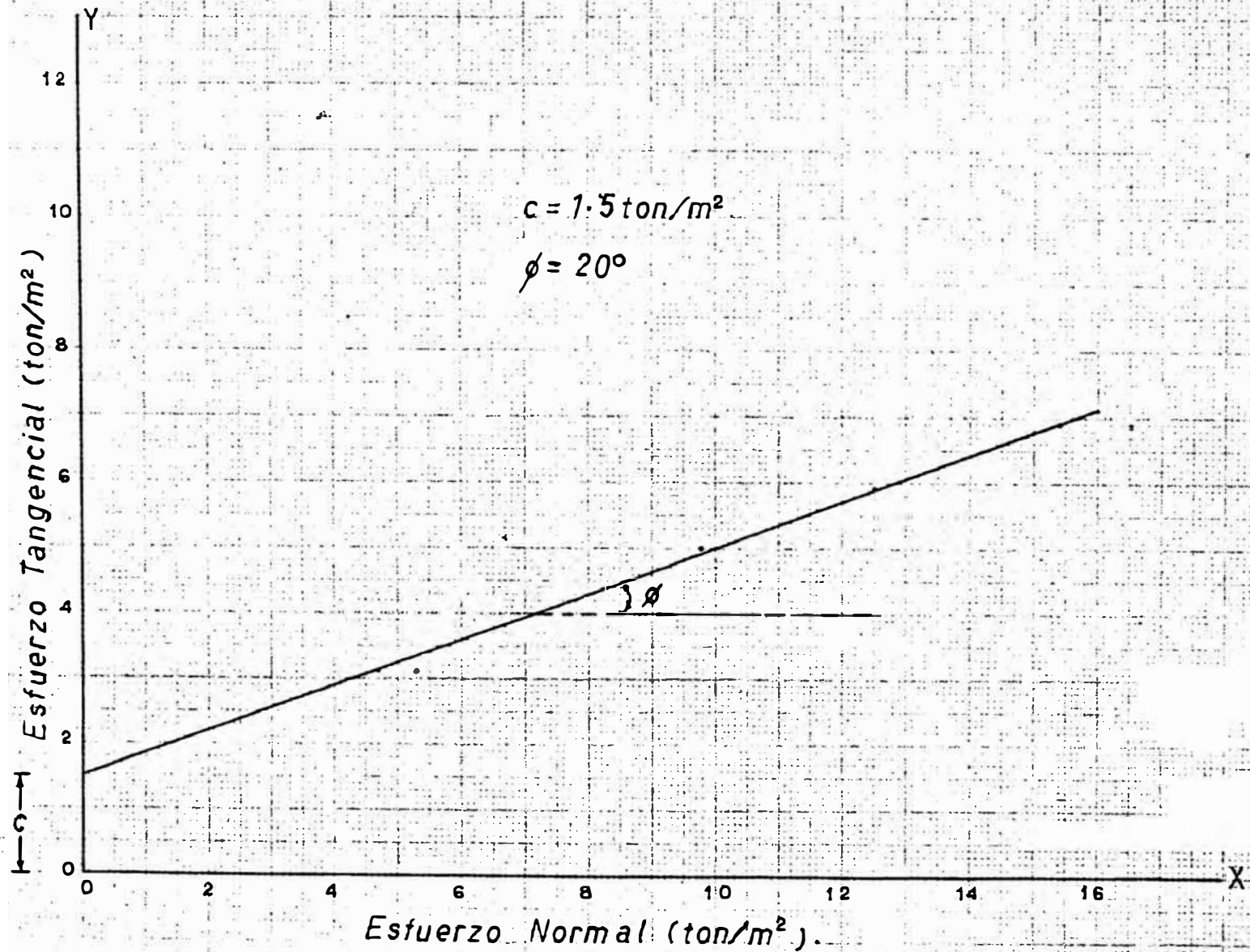
Angulo de fricción interna:  $\theta = 20^\circ$

Esfuerzo de cohesión:  $C = 1.5 \text{ ton/m}^2$

Con estos parámetros, la debida utilización de la ecuación modificada (3) y previo cálculo de  $c_f$ , nos permite determinar la altura hasta



FIGURA Nº19 -- DETERMINACION DEL ANGULO DE FRICION INTERNA  
Y DE LA COHESION DE UN RELLENO HIDRAULICO



donde el relleno se mantiene como un cuerpo granular firme, esto es, sin registrar fallamiento alguno en su pared libre cuando ocurran explotaciones colindantes a él.

$$c_f = \text{sen}(45^\circ + 20^\circ/2) + \text{tg}(45^\circ + 20^\circ/2)$$

$$c_f = 0.819152 + 1.428148$$

$$c_f = 2.25$$

Con la ecuación (3)

$$h = 2.6 \times \frac{1.5 \text{ ton/m}^2}{2.0 \text{ ton/m}^3} \times 2.25$$

$$h = 4.4 \text{ m.}$$

Este resultado nos indica que para casos de explotar zonas mineralizadas limitantes a rellenos antiguos, éstos debentener una altura de 4.4 m., con dicha dimensión se evitará posibles fallas o derrumbamientos del material de relleno se sobreentiende que con alturas mayores a 4.4 m., se corre el riesgo de fallamientos.

CAPITULO X10.0 TRANSPORTE DE RELLENO HIDRUALICO

Una vez evaluado en los capítulos precedentes, sobre la cantidad y calidad del material, que debe de cumplir como buen relleno, es preciso tratar sobre el transporte del Relleno Hidráulico por medio de tuberías.

Debido a la importancia del flujo de mezcla sólido-agua a través del sistema de tuberías (Relleno Hidráulico), se ha creído conveniente, estudiar profusamente, dando énfasis en lo que se refiere a la velocidad crítica, - que enseguida ha de tratarse sobre este tema..

10.1 PRUEBAS DE VELOCIDAD CRITICA

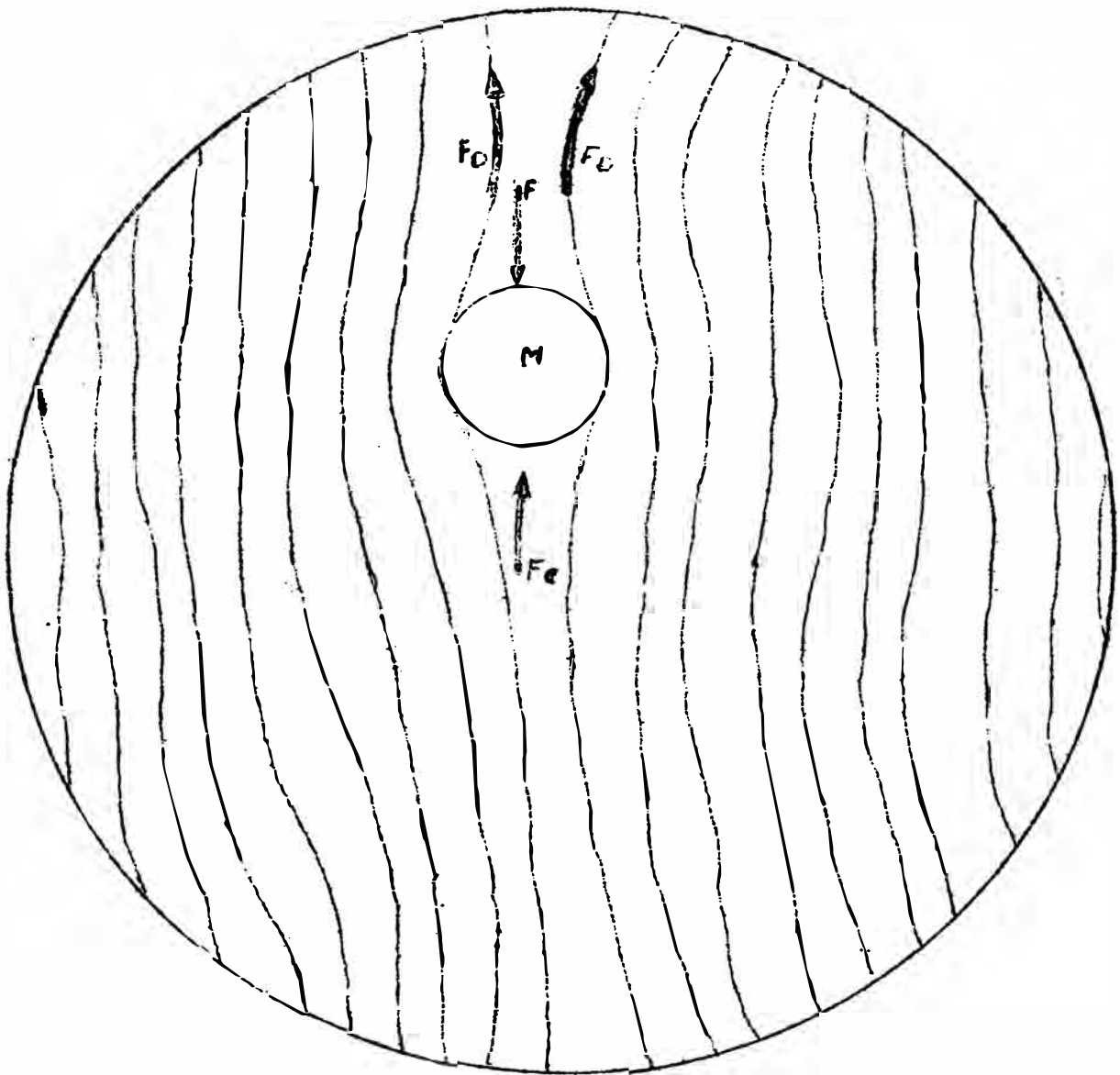
En muchas empresas mineras, el transporte del material de Relleno Hidráulico a la Mina, exige la erección de un sistema de transporte por medio de bombas y tuberías. En el desenvolvimiento de la operación de un sistema de transporte del Relleno Hidráulico o de mezclas semejantes, se hace presente algunas veces fenómenos de atoramientos, por influencia directa de la sedimentación o asentamiento de las partículas sólidas en el interior de ella. Este inconveniente se origina a raíz de una mayor velocidad de sedimentación, con respecto a la velocidad de transporte de las partículas sólidas. Es decir, la fuerza de gravedad de los sólidos supera a la fuerza de empuje que hace permanecer en movimiento a las partículas.

Es evidente lo interesante de este fenómeno, está en saber cual es la velocidad, que inmediatamente inferior a ella empieza a sedimentarse y ligeramente superior a la misma, los sólidos aún mantienen su velocidad de transporte, punto tal que en el campo de la física, se

llama crítico, por tanto ésta velocidad toma el nombre de Velocidad Crítica.

La velocidad crítica o velocidad mínima se define como el promedio de velocidades bajas o límites que permite que una partícula durante su transporte en un medio líquido no se sedimente. Una velocidad de viaje de las partículas menor a su velocidad crítica, significa una deposición de estas por sedimentación.

Frente al fenómeno de atoramiento de tuberías y sus graves consecuencias que perjudican el normal desarrollo operativo del transporte de este tipo de mezclas, brota la necesidad de conocer la velocidad crítica de las partículas sólidas en función del diámetro de tubería y del grado de dilución de la pulpa a conducirse. En base a esta operación corresponde formular una ecuación que reúna estas variables relevantes, para ello el autor se ha ayudado con la siguiente figura:



Consideremos una partícula de masa " $m$ " y de gravedad específica  $\rho_s$  originando un movimiento unidimensional a través del agua de gravedad específica  $\rho$ . Para que una partícula se mueva en el seno del agua, se requiere la existencia de una diferencia de densidad entre la partícula y el agua. Por otra parte se necesita una fuerza externa que comunique a la partícula un movimiento relativo respecto al agua. La fuerza externa - generalmente es la de gravedad.

Sobre ésta partícula actúan tres fuerzas:

- a) Una fuerza externa o de gravedad ( $F$ )
- b) La fuerza de empuje o de flotación ( $F_e$ ) que actúa - paralela a la fuerza externa pero en dirección opuesta; y
- c) La fuerza de frotamiento ( $F_D$ ), que aparece siempre que existe movimiento relativo entre la partícula y el agua, La fuerza de frotamiento, actúa oponiéndose al movimiento, paralela a la dirección del mismo, pero en dirección opuesta. La fuerza resultante que actúa sobre la partícula es por lo tanto  $F - F_e - F_D$ , la aceleración de la partícula es  $dv/dt$  y en consecuencia surge la ecuación siguiente:

$$F - F_e - F_D = m \, dv/dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

La fuerza externa ( $F$ ) puede ser expresada como el producto de la masa de partícula por la aceleración de la gravedad ( $g$ ) o sea  $F = mg$ .

La fuerza de empuje o de flotación ( $F_e$ ), por el principio de Arquímedes, es igual al producto de la masa del agua ( $m''$ ) que desplaza la partícula, por la aceleración de la gravedad producida por la fuerza externa, luego:

$$F_e = m'' g$$

La fuerza de frotamiento o de fricción ( $F_D$ ) del agua sobre la partícula es igual al producto de la masa del fluido desplazado ( $m''$ ) por la aceleración del desplazamiento del agua  $du/dt$ .

$$F_D = m'' du/dt.$$

Donde:

$u$  = es la velocidad de desplazamiento del agua.  
 $dt$  = es el incremento del tiempo de desplazamiento del agua.

Como la masa ( $m''$ ) de la partícula del agua desplazada varía a medida que la partícula sólida se introduce en ella, se tiene:

$$F_D = dm''u/dt.$$

Derivando:

$$F_D = m'' du/dt + U dm''/dt.$$

La velocidad de desplazamiento del agua ( $u$ ) y la velocidad de la partícula ( $v$ ) guardan entre sí una proporcionalidad; y siendo la velocidad de la partícula más factible de determinar que la velocidad del agua, es posible escribir:

$$u = Kv$$

$$m'' = U \rho = A \rho l$$

$$dm''/dt = \rho A dl/dt.$$

$\rho$  = Densidad del agua

$A$  = Area de la sección de la partícula

$l$  = Diámetro medio de la partícula.

Por consiguiente:

$$F_D = \int A l K \, dv/dt + K \int A \, dl/dt.$$

$$dl/dt = v$$

$$F_D = \int A l K \, dv/dt + K \int A v^2$$

Como podemos apreciar en esta ecuación la fuerza de frictamiento aumenta siempre con la velocidad; reemplazando los valores en la ecuación (1)

$$mg - m''g - \int A l K \, dv/dt - K A \int v^2 = m \, dv/dt \dots\dots(2)$$

Esta ecuación indica que la aceleración disminuye con el tiempo y tiende a cero. La partícula alcanza rápidamente, por lo tanto, una velocidad constante, - que es la máxima alcanzable en estas condiciones y que se denomina velocidad crítica o límite. En consecuencia se halla la Velocidad Crítica de la Ecuación (2) haciendo que la aceleración  $dv/dt = 0$

Entonces:

$$mg - m''g - K A \int v^2 = 0$$

$$m = U \int \rho_s$$

$$m'' = U \int \rho$$

$U =$  es el volúmen de la partícula reemplazando estos valores tenemos:

$$(\rho_s - \rho) U g = K A \int v^2$$

Dando una forma energética al segundo miembro de esta ecuación se tiene:

$$K = C_D/2$$

Donde:

$C_D =$  Coeficiente de arrastre o coeficiente de resis



tencia de una partícula sólida; característico para cada tamaño y naturaleza de partícula y - el medio en que se desplaza.

Sustituyendo el valor de K en la ecuación:

$$(\rho_s - \rho) U_g = C_D A \rho \frac{V^2}{2}$$

La velocidad crítica V será:

$$V = \sqrt{\frac{2g U (\rho_s - \rho)}{C_D A \rho}}$$

El volúmen (U) y el área(A) en esta ecuación es cualquier volúmen y área representativa de la partícula sólida. Para un tubo lleno de fluido, dicho volúmen y área guarda una proporcionalidad fija e invariable con la sección interna del tubo.

Esta proporcionalidad fija que guarda es siempre y cuando exista una semejanza geométrica y dinámica - de la partícula con respecto a la superficie interior del tubo.

Cuanto existe semejanza dinámica entre dos sistemas, los radios de curvatura de las líneas de flujo y - las trayectorias en los puntos correspondientes guardan entre si una relación fija, independiente de - cual sea la trayectoria o punto elegido. En estos puntos correspondientes las relaciones entre velocidades son constantes, cualquiera que sea el punto - particular elegido, y las relaciones entre las aceleraciones en puntos correspondientes son fijas e independientes de la posición de los puntos elegidos.

Las direcciones de las velocidades y de las aceleraciones en puntos correspondientes de los sistemas - dinámicamente semejantes, son, respectivamente, las mismas.

Como resultado de esta apreciación podemos escribir que:

$$U = KD^3$$

$$A = KD^2$$

Donde:

K = es la constante fija de proporcionalidad.

D = el diámetro interior del tubo.

Sustituyendo estas igualdades en la ecuación (3)

$$V = \sqrt{\frac{1}{C_D}} \sqrt{2gD \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho}}$$

Para el empleo cuantitativo de esta ecuación, los investigadores Duran y Condolios, sustituyen la constante,  $\sqrt{\frac{1}{C_D}}$  por otra constante adimensional Fl; tomando dicha ecuación la forma de:

$$V = Fl \sqrt{2gD \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho}} \quad (4)$$

Donde:

V = Es la velocidad crítica (pies/seg)

Fl = Constante adimensional que depende del coeficiente de arrastre, por ende característico - para cada tamaño, naturaleza de la partícula y el medio en que se desplaza.

g = Aceleración de la gravedad (32.2 pies/seg<sup>2</sup>)

d = Diámetro de la tubería (pies)

$s$  = Gravedad específica de la partícula ( $\text{Gr}/\text{cm}^3$ )  
= Densidad de la pulpa ( $\text{Gr}/\text{cm}^3$ ).

Como se vé esta relación (4), que reúne varios parámetros relevantes es el resultado final de la demostración.

Para la aplicación de la ecuación (4), éstos investigadores, Duran y Condolios obtuvieron una curva empírica,  $F_1$  en función del tamaño de partículas para diferentes porcentajes del volúmen de la muestra. Esta curva se muestra en la Figura No. 20.

Con el uso de esta curva (No. 20) y la ecuación (4), para un tamaño constante de partículas de 500 micrones (malla + 35) y gravedad específica ( $s$ ) de 2.8 (que es la dimensión más grande de la partícula que se ha registrado para el Relleno Hidráulico de Atacocha), se ha confeccionado un Cuadro No. 25 de mucha utilidad que se ilustra enseguida.

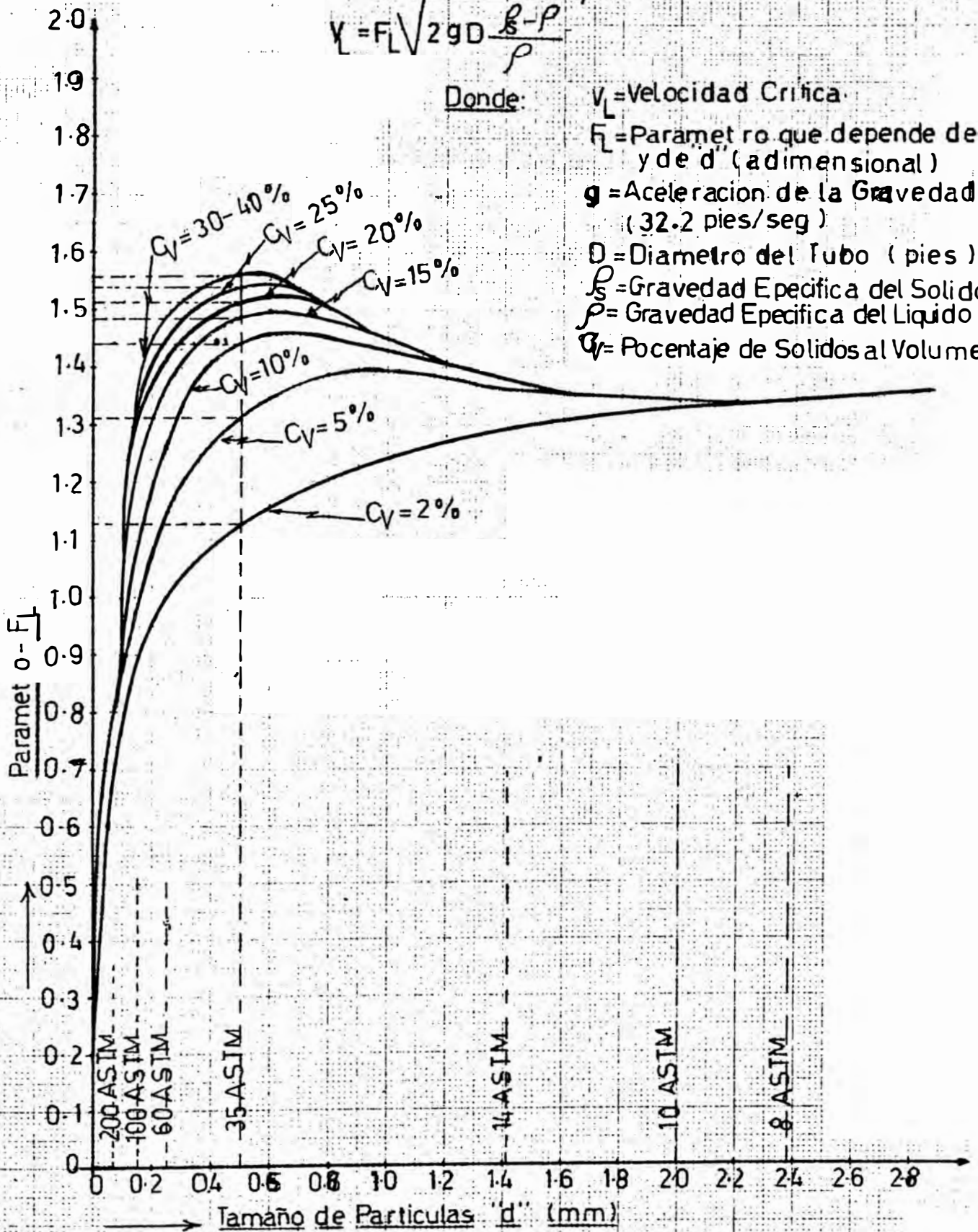
FIGURA No. 20

LA VELOCIDAD CRITICA EN (Pies/seg.)

$$V_L = F_L \sqrt{2gD \frac{\rho_s - \rho}{\rho}}$$

Donde:

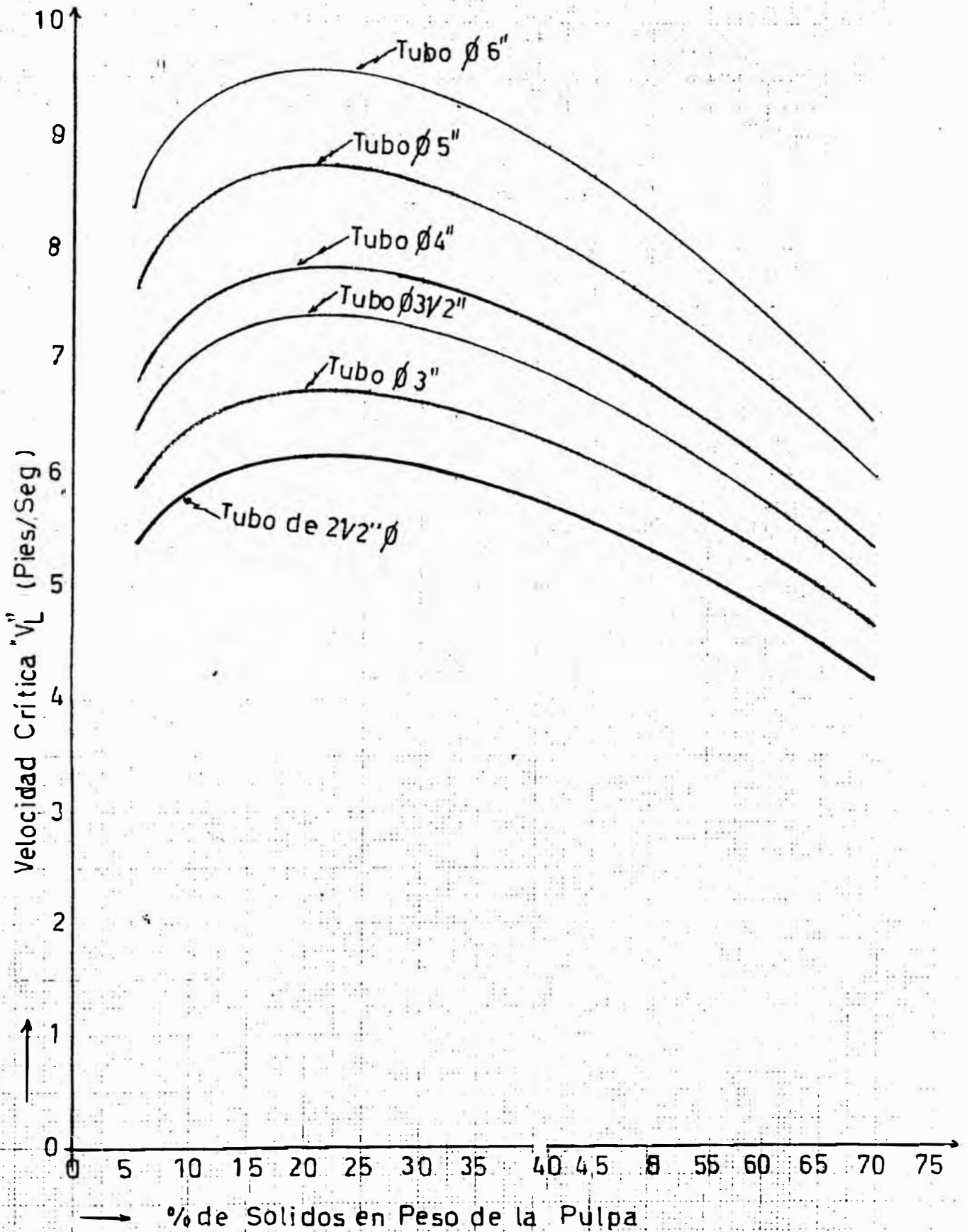
- $V_L$  = Velocidad Critica
- $F_L$  = Parametro que depende de  $C_V$  y de  $d''$  (adimensional)
- $g$  = Aceleracion de la Gravedad (32.2 pies/seg)
- $D$  = Diametro del Tubo (pies)
- $\rho_s$  = Gravedad Especifica del Solido
- $\rho$  = Gravedad Especifica del Liquido
- $C_V$  = Poceraje de Solidos al Volumen%



$F_L$  como Funcion del Tamaño de Partículas (d'') y de la Concentracion ( $C_V$ ) — Hecho por DURAND

VELOCIDAD CRÍTICA  $V_L$  VS % DE SÓLIDOS EN PESO DE LA PULPA PARA LA MALLA #35 (500 $\mu$ )

FIG. 21



CUADRO No. 25

RESULTADOS DE LOS CALCULOS TEORICOS DE LA VELOCIDAD CRITICA

% Al Volumen	Densidad de la pul ( )Gr/lt.	% Al Peso	Constante Fl.	Velocidades criticas(pies/seg) para tuberías:					
				2 1/2Pulg= 0.208 pie	3Pulg= 0.25pie	3 1/2Pulg= 0.292 pie	4pul= 0.33pie	5Pulg= 0.417pie	6Pulg = 0.5 pie
2	1,036	5.40	1.13	5.40	5.92	6.39	6.80	7.64	8.37
5	1,090	12.84	1.31	6.00	6.58	7.12	7.56	8.50	9.31
10	1,180	23.73	1.44	6.18	6.77	7.32	7.78	8.74	9.57
15	1,270	33.07	1.485	5.97	6.54	7.07	7.51	8.45	9.25
20	1,360	41.18	1.51	5.69	6.23	6.74	7.16	8.05	8.82
25	1,450	48.28	1.54	5.44	5.96	6.44	6.85	7.70	8.43
30	1,540	54.55	1.56	5.16	5.66	6.19	6.50	7.31	8.00
35	1,630	60.12	1.56	4.84	5.30	5.73	6.09	6.85	7.50
40	1,720	65.11	1.56	4.52	4.96	5.36	5.69	6.40	7.00
45	1,810	70.00	1.56	4.22	4.63	5.00	5.32	5.98	6.55

170,

Una vez tabulado estos datos se ha representado en la Figura No. 21, curvas que correlacionan la Velocidad Crítica, el porcentaje al peso de sólidos y el diámetro de tubería, su utilización es exclusivamente para el caso particular del transporte de relleno hidráulico de la Mina Atacocha.

A fin de comprobar en la práctica, la Velocidad Crítica real de un material, se ha determinado en base a un circuito cerrado tal como se puede apreciar en la Figura No. 22. Esta determinación práctica es de suma importancia para propósitos de diseño del sistema de transportes, pues la determinación teórica de la Velocidad Crítica no es suficiente.

## 10.2 PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

El procedimiento de la prueba es:

- a) Se llena el cajón del circuito con agua
- b) Con la bomba en funcionamiento se alimenta al cajón del circuito el material del under-flow hasta obtener un porcentaje requerido de la pulpa
- c) Regulando la válvula se observa en el tubo de vidrio el paso de las partículas. En el momento en que estas partículas están por sedimentarse pero todavía en transporte (que sería la velocidad crítica), se mide el tiempo de llenado de un depósito (en este caso 1/2 cilindro = 32.28 galones), luego se calcula la velocidad con la ecuación de flujo.

Se da un ejemplo de este cálculo que está en el cuadro.

$$\text{Area del tubo de 3 pulg.} = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{3}{12}\right)^2 = 0.049 \text{ pies}$$

El depósito de 1/2 cilindro tiene diámetro de 17.5

pulg. y altura de 31 pulg. su volúmen será:

$$\text{Volúmen de } 1/2 \text{ cilindro} = \frac{\pi}{4} d^2 \times h$$

$$\text{Volúmen del } 1/2 \text{ cilindro} = \frac{3.1416}{4} \times$$

$$\left(\frac{17.5}{12}\right)^2 \times \frac{31}{12} \times 7.48 = 32.28 \text{ galones}$$

para una pulpa de densidad 1,230 gr/litro, porcentaje al peso 29% y de gravedad específica de sólidos 2.8 el tiempo de llenado del depósito ha sido de 12.5 seg.

$$\text{Caudal } Q = \frac{32.28 \text{ Gal}}{12.5 \text{ seg}} \times 60 \frac{\text{seg}}{\text{min}}$$

$$Q = 154.525 \text{ gal/min}$$

Para esta tubería de 3 pulg, el factor de conversión es 0.0453 pies/gal x min/seg.

$$\begin{aligned} \text{Velocidad Crítica} &= 154.525 \text{ gal/min} \times \\ &0.0453 \text{ pies/gal} \times \\ &\text{min/seg.} = 7 \text{ pies/seg.} \end{aligned}$$

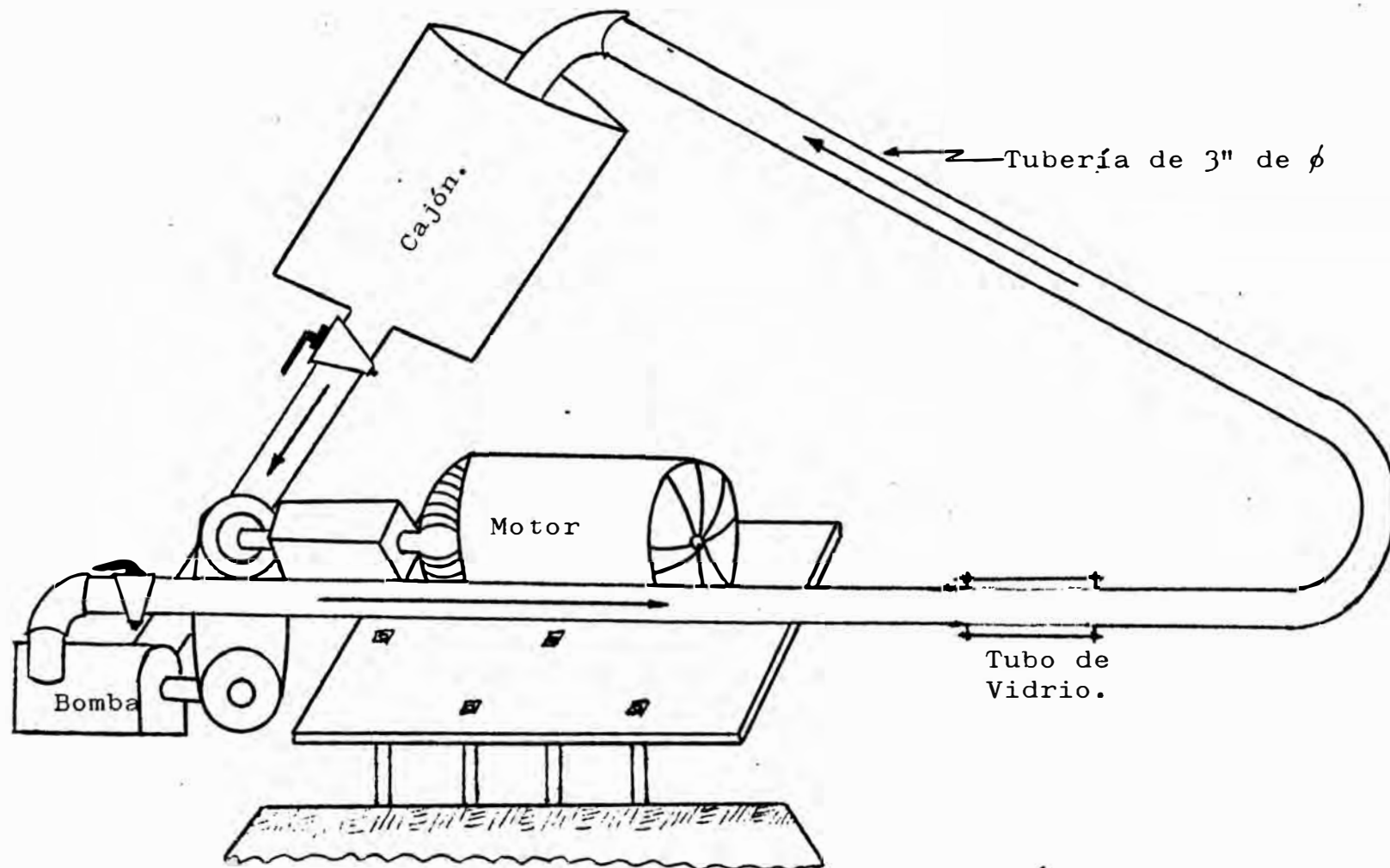
De la misma manera se ha confeccionado el Cuadro No. 26, resultado de las pruebas de Velocidad Crítica que se realizó en la concentradora No. 2 de Chicrín de la Compañía Minera Atacocha. Con el uso de este Cuadro se ha representado una curva de Velocidad Crítica en función del porcentaje de sólidos como se vé en la Figura No. 23.

Con la finalidad de comparación con esta curva práctica se ha incluido en la Figura No. 23 las curvas teóricas de Velocidad Crítica para tuberías de 3 pulgadas y 3 1/2 pulgadas. Analizando éstas curvas, se puede ver que la curva obtenida experimentalmente se encuentra dentro de estas curvas teóricas



y muy próximas a las velocidades críticas para tubería de 3 1/2 pulgadas, lo que se concluye para propósitos prácticos, es necesario aumentar; la velocidad de 1 pie/seg. a todas las velocidades críticas teóricas obtenidas.

. FIGURA N°22.- INSTALACION PARA LA MEDICION DE LA VELOCIDAD CRITICA.

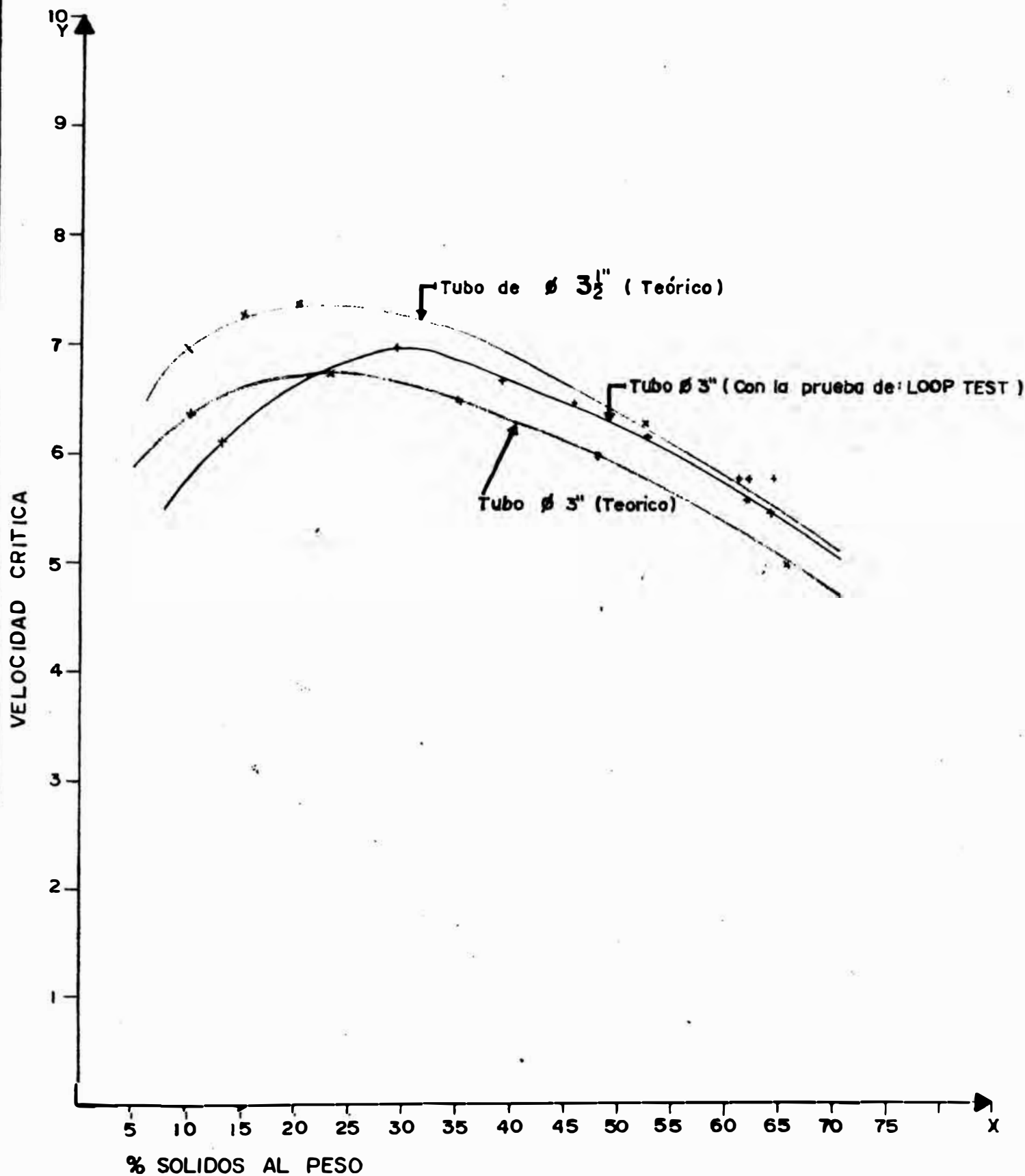


CUADRO No. 26

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA LA VELOCIDAD CRITICA (LOOP-TEST)

Area del Tubo de 3"Ø(pie2)	Volúmen del depó sito gal.	Densidad Gr/li-tro	% de sólidos al peso	Gravedad Específica del Sólido	Tiempo en seg.	Tiempo en min.	Flujo en galón/min.	Factor de conversión	Velocidad crítica pies/seg.
0.049	32.28	1,090	12.8	2.8	14.4	0.240	134.658	0.0453	6.10
0.049	32.28	1,170	22.6	2.8	13.0	0.215	150.110	0.0453	6.77
0.049	32.28	1,230	29.	2.8	12.5	0.209	154.525	0.0453	7.00
0.049	32.28	1,330	38.6	2.8	13.1	0.218	147.903	0.0453	6.72
0.049	32.28	1,410	45.2	2.8	13.5	0.225	143.488	0.0453	6.52
0.049	32.28	1,500	51.9	2.8	14.2	0.236	136.865	0.0453	6.20
0.049	32.28	1,500	51.9	2.8	13.9	0.232	139.073	0.0453	6.33
0.049	32.28	1,640	60.7	2.8	15.1	0.252	128.035	0.0453	5.83
0.049	32.28	1,650	61.3	2.8	15.7	0.261	123.620	0.0453	5.60
0.049	32.28	1,650	61.3	2.8	15.1	0.252	128.035	0.0453	5.83
0.049	32.28	1,690	63.5	2.8	16.0	0.266	121.413	0.0453	5.50
0.049	32.28	1,690	63.5	2.8	15.1	0.252	128.035	0.0453	5.83

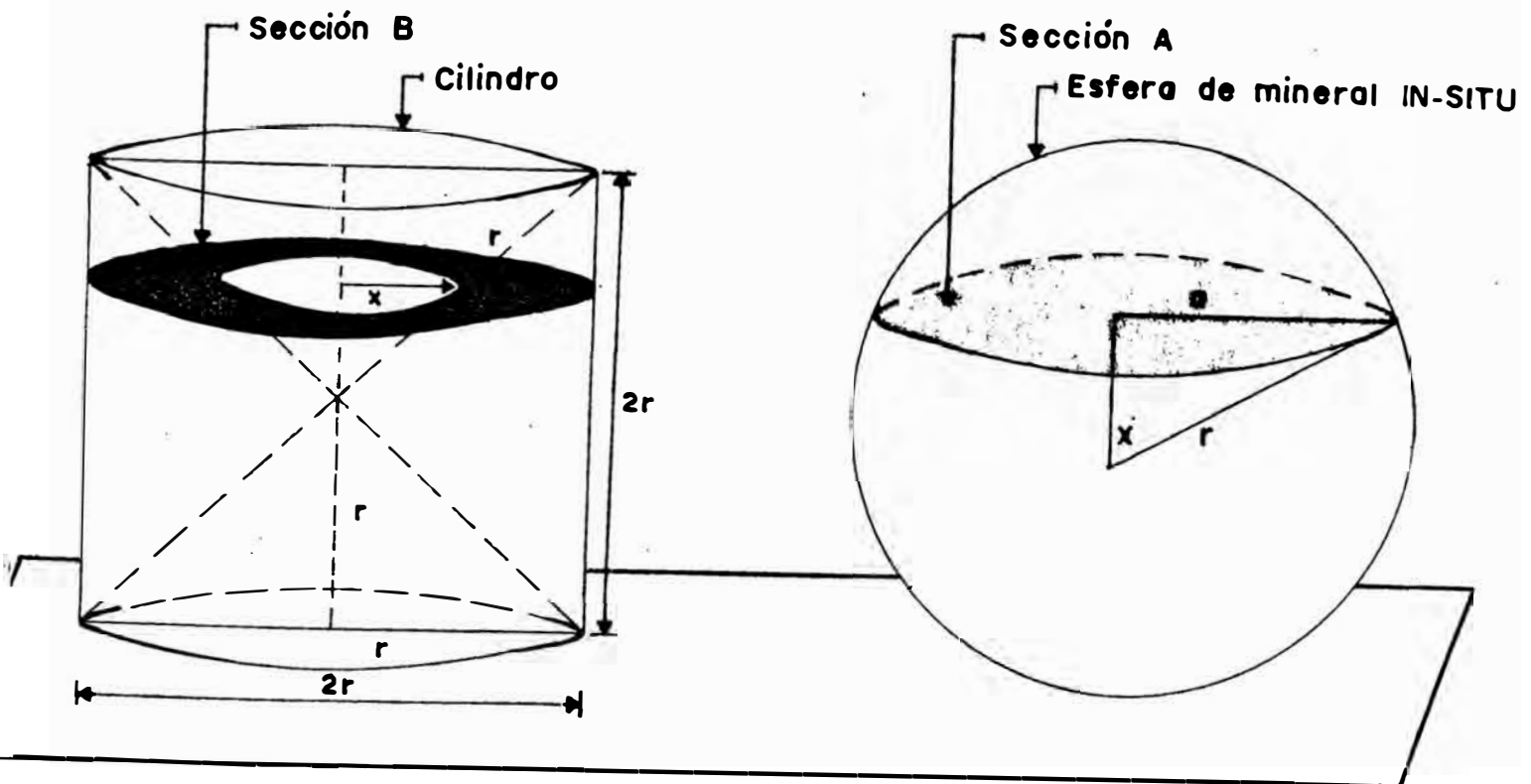
FIG. Nº 23. — REPRESENTACION GRAFICA DE LA VELOCIDAD CRITICA DEL RELLENO HIDRAULICO PARA ATACÓCHA.



## CAPITULO XI

### 11.0 DETERMINACION TEORICA DE LA DENSIDAD IN-SITU DE UN RELLENO

Hasta la actualidad, toda determinación de la densidad relativa o densidad IN-SITU; se ha ceñido en una técnica experimental, como se ha visto en el capítulo IX de este estudio, pero con el afán de investigación, los autores de este trabajo han formulado una función matemática con respecto a la densidad in-situ del mineral, basandose en el siguiente razonamiento:



- Consideramos un determinado mineral in-situ sin poros de peso  $W$ , de densidad  $\rho_s$  y forma esférica de radio  $r$  - que se encuentra sobre el plano  $P$ .

- Al lado de esta esfera sobre el mismo plano  $P$  se tiene un cilindro de base y altura igual, al diámetro de la esfera.

- A la misma distancia y paralelo al plano  $P$  se trazan secciones  $A$  y  $B$  respectivamente, como se puede ver en esta Figura.

El área de la sección  $A$ , es:

$$\begin{aligned} A &= \pi a^2 \\ a^2 &= r^2 - x^2 \quad (\text{por Pitágoras}) \\ A &= \pi r^2 - \pi x^2 \end{aligned}$$

El área de la sección  $B$ , que es un anillo circular, será:

$$B = \pi r^2 - \pi x^2$$

Entonces las secciones  $A$  y  $B$  son iguales.

Según el postulado de Cavalieri, cuando estas secciones son iguales; el volumen formado por la sección  $B$ , es igual al volumen de la esfera.

Si pensamos que esta esfera esté inscrita dentro de este cilindro, el volumen sobrante (como se puede observar en esta Figura) es igual al de los dos conos formados o sea:

$$\begin{aligned} V - \text{cilindro} - V \text{ esfera} &= 2 V \text{ cono} \\ 2\pi r^3 - \frac{4}{3}\pi r^3 &= \frac{2}{3}\pi r^3 \end{aligned}$$

Como el volúmen del cono y del cilindro son:

$$V \text{ cono} = \frac{1}{3} \pi r^3$$

$$V \text{ cilindro} = 2 \pi r^3$$

Quiere decir: que en estas condiciones, el volúmen sobrante, es la tercera parte del volúmen del cilindro. Esta esfera ocupará todo el volúmen del cilindro, siempre y cuando esté triturado en partículas finitas, con un grado de compactación u ordenamiento.

En consecuencia el volúmen sobrante será el volúmen, - de los espacios interparticulares o poros de éstas partículas finitas.

En efecto:

$$\begin{aligned} \text{Volúmenes sobrantes} &= 2 \times \text{volúmen del cono} = \text{Volúmen de} - \\ \text{los poros} &= \frac{2}{3} \pi r^3 \end{aligned}$$

Después de este análisis matemático podemos obtener que la densidad in-situ de esta masa granular introducida en este cilindro será:

$$\text{Densidad in-situ} = D_d = \frac{\text{Peso de la esfera}}{\text{Volúmen de la esfera} + \text{Volúmen de poros}}$$

En efecto:

$$D_d = \frac{\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_s}{\frac{4}{3} \pi r^3 + \frac{2}{3} \pi r^3}$$

$$D_d = \frac{2}{3} \rho_s \dots\dots\dots (1)$$

Lo que se concluye, según nuestra demostración matemática; que la densidad in-situ del material de cualquier

relleno, es las dos terceras partes de la densidad in-situ del mineral ( $\rho_s$ )

Su validez de esta fórmula está todavía en proceso de comprobación; pero ya podemos adelantarnos que:

- a) Para el relleno hidráulico en estudio que se hizo en la Compañía Minera de Atacocha; la densidad in-situ experimental del material del relleno, fue de 2 gr/cm<sup>3</sup>. Como se puede observar en el Capítulo IX.

La densidad del mineral ( $\rho_s$ ) para la Compañía Minera Atacocha obtenido ya sea experimentalmente o por cubicación fue de 3 gr/cm<sup>3</sup>.

Con esta ecuación (1) está afirmación también cumple en efecto:

$$Dd = \frac{2}{3} \times 3 \text{ gr/cm}^3$$

$$Dd = 2 \text{ gr/cm}^3$$

- b) En el trabajo presentado por el Ingeniero Felipe de Lucio P., en la XII Convención de Ingenieros de Minas del Perú (Abril de 1972), sobre "Especificaciones para el Relleno Hidráulico", ha encontrado una densidad in-situ del relleno de 1.8 gr/cm<sup>3</sup>, para gruesos de cuarzo de gravedad específica de 2.67.

Con la ecuación (1), también cumple, esta afirmación con mucha aproximación, es decir:

$$Dd = \frac{2}{3} \times 2.67 \text{ Gr/cm}^3$$

$$Dd = 1.78 \text{ Gr/cm}^3 = 1.8 \text{ Gr/cm}^3$$

- c) En el mismo trabajo del Ingeniero Felipe de Lucio P., también encuentra una densidad in-situ experi -



mental de  $2.64 \text{ gr/cm}^3$  para una gravedad específica de sólidos de 4.

También con esta ecuación (1) cumple este resultado con bastante aproximación, en efecto.

$$Dd = \frac{2}{3} \times 4 = 2.66 \text{ gr/cm}^3$$

$$Dd = 2.66 \text{ gr/cm}^3$$

Como resultado de estas afirmaciones, se recomienda que para propósitos de proyectos, puede estar utilizándose esta ecuación, que dará una densidad in situ con bastante aproximación, quedando todavía su completa ratificación, con diferentes pruebas más - en otras minas del Perú donde estén utilizando como relleno el material de Relleno Hidráulico.

## CAPITULO XII

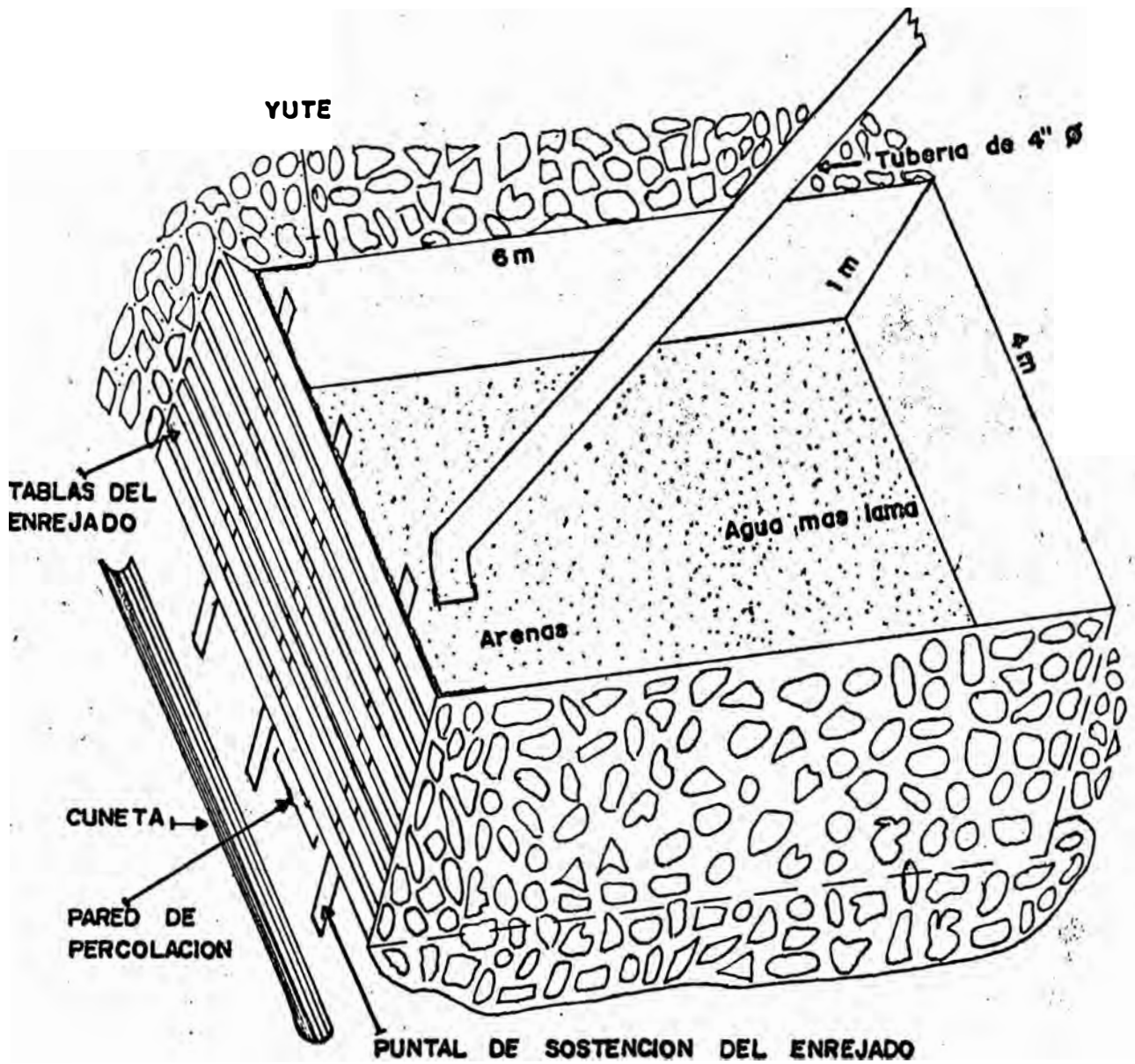
### 12.0 SIMULACION DEL RELLENO

Una vez realizadas las diferentes pruebas con respecto a, calida, cantidad y transporte del material a usarlo en el Relleno Hidráulico, se preparó modelos semejantes al tajeo de la mina. Los modelos fueron hechos con la finalidad de hacer simulaciones de rellenado.

Este modelo de tajeo, fue preparado con la ayuda del tractor en un lugar apropiado, junto a la planta concentradora No. 2 de Chicrín y cercano a la instalación del Hidrociclón en prueba.

Las dimensiones del modelo stope proporcional a los tajeos de la Mina Atacocha, fueron de 6 m. de largo, 6 m. de ancho y 1 metro de profundidad; dando un volumen de

FIGURA No.24 MODELO DEL STOPE PROPORCIONAL A LOS TAJEOS DE LA MINA



36 m<sup>3</sup>, que se puede ver en la Figura No. 24.

Al rellenar este stope modelo, con la pulpa de 58.5% de sólidos y 1,600 Gr/litro de densidad (producto del under flow del hidrociclón en estudio), se ha podido observar que la gravedad específica, el tamaño y la forma, etc., tienen influencia en las características segregativas de las partículas, por ejemplo la pirita tiende a pegarse (asentarse) en el fondo y las lamas se desplazan a la parte superior.

Cuando la pulpa es rellenada dentro del modelo, en la parte opuesta a la pared de percolación, el flujo va hasta la parte media del modelo y de ahí las partículas son transportadas y asentadas en un flujo tranquilo.

La segregación de las partículas mayores, especialmente de la pirita es producido debido al flujo rápido o la segregación de las partículas medianas del resto y de las partículas finas incluyendo lamas.

Los constituyentes predominantes del material en la pulpa son la sílice, carbonatos y pirita: Alrededor y cerca donde se ha comenzado a rellenar la pulpa en el modelo; diferentes clases de partículas son estratificadas, pero el líquido tiende a salirse.

Está claro que el agua que sale lleva partículas finas y lamas, que son transportadas a la pared de percolación (drenaje), y el agua pasa a través de la pared de percolación con algo de lamas.

Para una mejor separación de agua y lamas, se ha probado varias formas de rellenado, a diferentes análisis de mallas y de todos ellos el que mejor ha resultado se trata enseguida.

## 12.1 LA MEJOR SIMULACION DE RELLENADO

El material de relleno, se comienza a descargar justamente en la pared de percolación del stope, (la parte de extracción del stope) y se forma una pared de arena rápidamente, las partículas finas, las lamas y el agua se concentran en lado opuesto de la pared de percolación del stope, donde estas partículas finas y lamas - se sedimentan en un ambiente tranquilo.

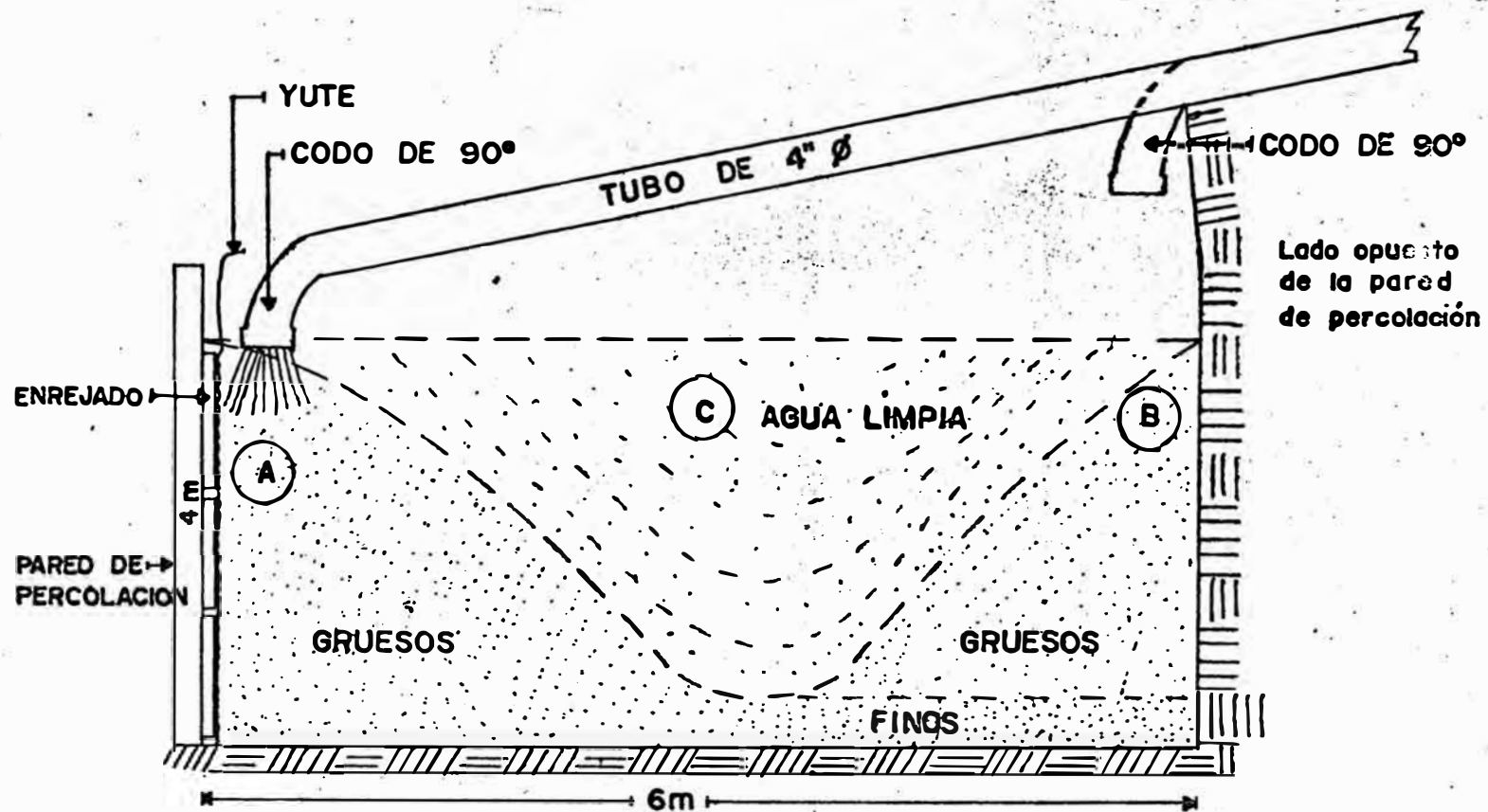
Una vez terminado de rellenar la parte de extracción - del stope, inmediatamente se cambia el método de relleno al lado opuesto de la pared de percolación, donde el agua se elimina por decantación y no por percolación se puede ver mejor en la Figura No. 25

Después de terminar con el relleno el lado de la pared de percolación del stope modelo queda la forma de (A), al pasar la puloa al lado opuesto de la pared de percolación, el material de relleno queda en forma de B, hasta después de un tiempo determinado queda el stop - modelo en forma de C listo para realizar el primer ciclo de minado.

El análisis de malla del agua de percolación y decantación es el siguiente:

Malla	% en <u>peso</u> directo
~ 35	0
+ 50	0
+ 60	0.10
+ 100	0.05
+ 140	0.10
+ 200	0.10
+ 325	0.50
- 325	99.15

FIG. Nº 25. — ESQUEMA DE LA MEJOR SIMULACION DEL STOPE MODELO.



Con esta pulpa de 58.5 % de sólidos y de 1,600 gr/litro (1.6 Ton/m<sup>3</sup>) de densidad, el tiempo de rellenado del s tope modelo de 36 m<sup>3</sup>, ha sido de 5 horas

Este tiempo podemos también obtener con los datos obtenidos del under-flow del hidrociclón de la siguiente manera.

El Flujo del under-flow de un hidrociclón es de 12 Ton/hora.

Densidad = 1.6 ton/m<sup>3</sup>

Peso a rellenarse en este stop = 36 m<sup>3</sup> x 1.6 Ton/m<sup>3</sup>  
= 57.6 Ton.

Tiempo de rellenado de  
este stop modelo =  $\frac{57.6 \text{ Ton}}{12 \text{ Ton/hr}} = 4.8 \text{ horas}$

5 horas.

## CONCLUSIONES

Los estudios experimentales en referencia, constituyen una etapa de mucha importancia en todo proyecto de Relleno Hidráulico. Las informaciones recopiladas de las diferentes pruebas experimentales han de decidir la factibilidad del proyecto y normar las etapas del diseño, erección y operación.

En otras palabras, las pruebas experimentales no vienen sino a acentuar el éxito del proyecto en sus diferentes etapas, por lo mismo, su influencia es altamente recomendado en el período de estudio de factibilidad. Las conclusiones resáltantes se pueden enumerar como sigue:

- 1.- En el cálculo del relave disponible de la concentradora No. 2 de Chicrín para el uso como Relleno Hidráulico se tuvieron los siguientes resultados:

### Flujo Actual

	<u>TMS/hora</u>	<u>G.P.M.</u>
Sólidos	51.33	83.71
Agua	176.80	779.29
Pulpa	228.13	863.00

- 2.- En el estudio granulométrico de este relave, se hicieron análisis por tamizado hasta la malla + 325 (serie ASTM) y debajo de ésta se hizo un análisis por acentamiento, pruebas que nos dieron buenos resultados.
- 3.- Con respecto a las pruebas de percolación se hicieron pruebas a diferentes tamaños de partícula para hallar los coeficientes de permeabilidad, obteniéndose los siguientes resultados:

<u>Mallas</u>	<u>Velocidad de Percolación (cm/hr)</u>
+ 60 (250 u)	226.88
#100 (150 u)	121.02
+200 (75 u )	76.11
+325 (45 u )	51.30
Relave Total	0.74

El resultado suministrado para esta última prueba, nos señala claramente de que en estas condiciones este material es totalmente inapropiado para su empleo como relleno hidráulico, debido a que la Velocidad de Percolación óptima está entre 10 cm cm/hr á 20 cm/hr; de don de surge la necesidad de eliminar cierta cantidad de partículas muy finas, que son los que entorpecen la percolación del agua y por consiguiente es necesario clasificar por Hidrociclones.

4.- Se realizó un estudio completo tanto teórico y práctico para obtener los hidrociclones adecuados para la clasificación del relave, de acuerdo a la cantidad de relave no requerido por la mina y de la velocidad de percolación óptima, dándonos las siguiente especificaciones:

Número de Hidrociclones	= 2
Diámetro del Hidrociclón	= 15 pulg.
Diámetro del Vortex	= 6 pulg.
Diámetro del Apex	= 1 1/2 pulg.
Area de alimentación	= 11 pulg.
Presión de alimentación	= 12 lib/pulg <sup>2</sup>
Capacidad máxima por caña hidrociclón	= 634 G.P.M.

Los resultados de estas pruebas se puede ver claramente en la página 99 (8-2-10) Resumen de los resultados de la Prueba con Apex de 1 1/2 pulg. de Diámetro y ob-



teniéndose una velocidad de percolación óptima de 12 cm/hr.

5.- Los resultados de producción promedio y máximos de mineral de la mina son:

<u>Materia</u>	<u>Promedio</u>	<u>Máximo</u>
Producción de mineral(TMS/mes)	16,548	21,000
Densidad del mineral(TMS/m <sup>3</sup> )	3.07	----
Volumen por rellenar(m <sup>3</sup> /mes)	5,390	6,840
Densidad relativa del relleno (TMS/m <sup>3</sup> )	2.0	----
Peso del relleno(TMS/mes)	10,780	13,680
Relación al peso:Relleno/mineral	0.651	----
Tiempo de Operación(Hrs/mes)	572	572
Flujo horario de relleno al peso (TMS/hr)	18.85	23.92
Flujo horario de relleno al volumen (m <sup>3</sup> /hra.)	9.43	11.96

Los resultados de estos cálculos nos faculta hacer una evaluación comparativa de la cantidad requerida de relleno con respecto al tonelaje de relave disponible.

En la concentradora No. 2 de Atacocha se dispone de 51.33 TMS/hora. de relave y se necesita 23.92 TMS/hora para relleno hidráulico, siendo la diferencia de 27.41 TMS/hr. que representa al 53% de sólidos; este porcentaje de sólidos a eliminarse nos deparó un amplio margen de tolerancia para propósitos de su clasificación.

En lo referente del análisis de calidad según la granulometría del relave citado en el Cuadro No. 10, el corte debería de hacerse en la malla 200, hasta donde se tiene un tonelaje acumulativo retenido de 26.69 TMS/horas; pero por razones de seguridad que el autor de es-

te estudio considera se hizo, dicho corte, en la malla 325, siendo el tonelaje acumulativo retenido de 31.77 MTS/hora, (este corte se hizo con la aplicación de la ecuación de fuerza de cono verificado con las curvas de Gaudin-Schumman y las curvas trompo o eficiencia de clasificación).

- 6.- El coeficiente de uniformidad (CU) (siendo uno de los factores primordiales para evaluar la calidad de un buen relleno, hallado con el material a emplearse como relleno-producto del Under Flow del hidrociclón, nos dio 4.66 que está dentro de los valores límites de un buen relleno.
- 7.- La densidad relativa o in-situ experimental hallado fue de  $2 \text{ RMS/m}^3$ , que es dato fundamental para la obtención de la cantidad de relleno requerido para la mina. Esta densidad in-situ se trató de obtener también teóricamente lo cual concuerda con el material de Atacocha.
- 8.- Las razones poros máximos y mínimos y compacidad fueron 1, 0.4 y 59.17% respectivamente lo que nos permite sostener que el relleno obtenido cumple con las exigencias de un buen relleno.
- 9.- El ángulo de fricción interna, la cohesión y la altura máxima a explotarse, fueron de  $20^\circ$ ,  $1.5 \text{ TON/m}^2$  y 4.4 m. Estos valores nos indican que para casos de explotar zonas mineralizadas limitantes a rellenos antiguos, se evitará posibles fallas o derrumbamientos del material de relleno; se sobreentiende que con alturas mayores a 4.4 m. se corre el riesgo de fallamiento.
- 10.- Según los estudios teóricos y experimentales para el cálculo de velocidad crítica (que están bien detallados en el informe); el autor del presente estudio segiere

para el transporte de Relleno Hidráulico en esta mina, la utilización de tubería de 3 pulgadas de diámetro con velocidades críticas de 6.25 pies/seg. á 5.75 pies /seg, con pulpa de 50 á 60% de sólidos al peso.

- 11.- Se realizaron pruebas de simulación y el tiempo de relleno en un stope modelo proporcional al tajeo de la mina, todas estas pruebas se detallan profusamente al final del informe, donde los mejores resultados se obtuvieron cuando se comenzaba a rellenar, cerca a la pared de percolación.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- Terzaghi, K. Theoretical Soil Mechanics.  
John Wiley and Sons 1943
- 2.- Ing. Felipe de Lucio: Especificaciones para el Relleno Hidráulico.  
XII Convención de Ingenieros de Minas del Perú, Abril 1972.
- 3.- Nicholson, D.E. y Wayment, W.R. properties of Hydraulic Backfill and preliminary Vibratory. Compaction Tests.  
United States Bureau of Mines.
- 4.- M. Chumbe: Relleno Hidráulico en la Mina Huanzalá  
Tesis de Grado PIGMM-UNI
- 5.- Raúl Castro Alemán: Estudio de Factibilidad del Relleno Hidráulico en Atacocha:  
Tesis de Bachiller PIGMM-UNI
- 6.- Paredes: Estudio del Hidrociclón  
Tesis de Bachiller PIGMM-UNI
- 7.- Brown. Operaciones Básicas de la Ingeniería Química-ED  
Marín ESPAÑA.
- 8.- Taggart. A.F. Handbook of Mineral Dressing.  
John Wiley Sons 1974 - USA.
- 9.- McCabe y Smith: Operaciones Básicas de la Ingeniería Química.  
E.D. Reverte SA-España
- 10.- Stagg-Zienkie Wicz. Mecánica de Rocas en la Ingeniería Práctica. EDT. Blume- España.
- 11.- A. Levin J. Ortíz, J. Tumalian: Aplicación de Relleno - Hidráulico con mezcla de cemento en las Minas de Cerro de Pasco y Atacocha.  
XII Convención de Ingenieros de Minas.  
Perú, Abril de 1972.

- 12.-Colorado School of Minas: The transportation of Solids  
in Steel Pipelines 1963
- 13.-Mott,R.C. "The Handling and Placement of Hydraulic Back  
fill Underground.  
"The Canadian Mining and Metallurgical"  
Setiembre 1960.
- 14.-M. Candia: El método de Corte y Relleno descendente en  
la Mina Yauricocha.  
XII Convención de Ingenieros de Minas  
Perú - 1972.