

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA
Y METALURGICA



Métodos Prácticos para Determinar
la Resistencia Compresiva Uniaxial
del Relleno Cementado

T E S I S
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS

David H. Obando Pacheco

PROMOCION 1989-I

LIMA-PERU

1993

**DEDICADO A MIS PADRES:
JULIA PACHECO SANTAMARIA
DAVID OBANDO CISNEROS
CON TODO CARINO**

**METODOS PRACTICOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA
COMPRESIVA UNIAXIAL DEL RELLENO CEMENTADO**

	<u>PAG.</u>
INTRODUCCION	1
RESUMEN	3

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 UBICACION	5
1.2 GEOLOGIA	5
1.3 METODO DE EXPLOTACION	9
1.4 PLANTA CONCENTRADORA	17
1.5 DESCRIPCION DE LA PLANTA DE RELLENO	17
1.6 JUSTIFICACION PARA UTILIZAR RELLENO CEMENTADO	18
1.7 ENTORNO DEL PAQUETE UTILIZADO	21

CAPITULO II

CARACTERISTICAS DEL MATERIAL PARA RELLENO HIDRAULICO CEMENTADO

2.1 ANALISIS GRANULOMETRICO	23
2.2 PROPIEDADES FISICAS	
2.2.1 GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SOLIDOS	28
2.2.2 DENSIDAD DE PULPA	29
2.2.3 % DE SOLIDOS EN PESO	29
2.2.4 % DE SOLIDOS EN VOLUMEN	30
2.2.5 COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD	30

2.3	PROPIEDADES HIDRAULICAS	
2.3.1	VELOCIDAD DE PERCOLACION	31
2.3.2	RAZON DE POROS	34
2.3.3	CONSOLIDACION	35
2.4	CEMENTO Y TIPOS DE CEMENTO	
2.4.1	CEMENTO	35
2.4.2	TIPOS DE CEMENTO	36
2.5	COMPOSICION MINERALOGICA	37
2.6	PROPIEDADES QUIMICAS	
2.6.1	CONTAMINACION QUIMICA	37
2.6.2	CARACTERISTICAS DEL AGUA	38

CAPITULO III

METODOS PRACTICOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA COMPRESIVA NO CONFINADA DEL RELLENO CEMENTADO

3.1	METODO BASADO EN EL ANALISIS GRANULOMETRICO	
3.1.1	FUNDAMENTO TEORICO	40
3.1.2	PROGRAMA DE CALCULO	64
3.2	METODO BASADO EN LAS PROPIEDADES FISICAS Y MINERALOGICAS	
3.2.1	FUNDAMENTO TEORICO	72
3.2.2	PROGRAMA DE CALCULO	79
3.3	COMPARACION ENTRE LOS METODOS PRACTICOS Y EXPERIMENTALES	84

CAPITULO IV

OPERATIVIDAD DEL RELLENO HIDRAULICO CEMENTADO

4.1	DESCRIPCION DEL PROCESO DEL RELLENO	
4.1.1	PREPARACION DEL TAJEO O CAVIDAD POR RELLENAR	88

4.1.2 REQUERIMIENTO DE RELLENO	89
4.1.3 VERIFICACION DE OPERATIVIDAD DEL SISTEMA DE RELLENO	94
4.1.4 DOSIFICACION DE LA MEZCLA	96
4.1.5 PRECAUCIONES EN EL PROCESO DE RELLENO	100
4.1.6 MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE RELLENO	100
4.2 TRANSPORTE HIDRAULICO	
4.2.1 TUBERIA	102
4.2.2 BOMBA	107
4.2.3 FLUJO DEL RELLENO	112
4.3 DRENAJE	114
4.4 EFICIENCIA DEL RELLENO HIDRAULICO CEMENTADO	115

CAPITULO V

COSTOS DE RELLENO HIDRAULICO CEMENTADO

5.1 COSTO FIJO	117
5.2 COSTO VARIABLE	118
5.3 COSTO TOTAL	119

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES	120
6.2 RECOMENDACIONES	122

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	124
-----------------------------------	------------

INTRODUCCION

El uso del relleno Hidráulico Cementado (R/H C) como elemento de sostenimiento ó para recuperar pilares de mineral, a causado interés en el diseño de este material con características y cualidades adecuadas para que cumpla la función como elemento físico de soporte a fin de obtener un alto grado de recuperación de las reservas y asegure el restablecimiento del equilibrio del macizo rocoso entorno a la zona de explotación.

En el caso de la Mina Juanita a fin de prever fenómenos de subsidencia que pudieran afectar o comprometer las instalaciones públicas ubicadas en superficie circundante a la zona mineralizada, es que la utilización del relleno cementado como elemento de sostenimiento dinámico es usado; donde la propiedad principal del relleno es la determinación de la resistencia compresiva no confinada, esta resistencia es requerida de acuerdo a las características de cada tajo y proporcionado de acuerdo al dosaje.

En esta tesis se desarrollan 2 alternativas para el cálculo de la resistencia compresiva no confinada del relleno cementado una de las cuales se basa en las propiedades físicas y mineralógicas del material de relleno y otro método se basa en el análisis granulométrico.

Finalmente deseo expresar mi gratitud a los siguientes funcionarios del INGEMMET, Presidente del Concejo Directivo Ing. Juan Zegarra West y al Director Técnico Hugo Rivera Mantilla por haberme permitido laborar en la Institución.

Hago extensivo mi agradecimiento al Director General de Investigación y Tecnología Minera Ing. David Cordova Rojas y al Director de Tecnología Minera Ing. Urbano Macazana Valencia, ambos del INGEMMET, quienes me dieron acceso a la información, me apoyaron y contribuyeron a hacer posible la presente tesis.

Así mismo, deseo expresar mi gratitud muy en especial al Gerente de Operaciones de la Compañía Minera PERUBAR S.A. Ing. Armando Cáceres; por haberme permitido acceder a las instalaciones de la Mina Juanita, brindándome las facilidades necesarias para el desarrollo de la presente tesis.

RESUMEN

los Métodos Prácticos para determinar la resistencia Compresiva Uniaxial, fue desarrollado con el fin de brindar otras alternativas de cálculo de la resistencia, aparte de la ya conocida experimentación ó ensayos de laboratorio. Estos Métodos son aplicados para el caso de la Mina Juanita.

Se describe además la operatividad del Relleno Hidráulico Cementado en la Mina Juanita con el fin de observar las implicancias sobre la resistencia, además de dar a conocer la tecnología de Relleno desarrollada.

Finalmente, con el propósito de desarrollar otras alternativas de cálculo de la resistencia Compresiva Uniaxial, se plantea los objetivos y metodología como sigue:

OBJETIVO

- Adaptar un Método de diseño alternativo para el cálculo de la resistencia Compresiva Uniaxial del Relleno Hidráulico Cementado a la Mina Juanita y difundir su adecuación a otras minas del país.
- Predecir la resistencia Compresiva Uniaxial para cualquier relleno cementado ó para cualquier dosaje (cemento/relave), poniendo en consideración dos Métodos Prácticos que requieren un análisis granulométrico detallado y de las propiedades mineralógicas del material de relleno para su implementación.
- Reducir los costos de experimentación inicial a los programas de implementación de R/HC, para acortar el rango

de experimentación en relación al material de relleno a seleccionarse.

- Analizar los factores que en la operatividad son tenidos en cuenta para obtener un buen control de calidad de la resistencia del Relleno Hidráulico Cementado.

METODOLOGIA

La metodología seguida fue:

- 1.- Recopilación de información, utilizando como datos experimentales, el análisis granulométrico, las propiedades físicas y mineralógicas del material para relleno obtenidas del informe " Proyecto de Relleno Hidráulico Cementado Mina Juanita". INGEMMET - 1987.
- 2.- Los Métodos Prácticos para determinar la resistencia Compresiva no confinada del relleno cementado son aplicados a la Mina Juanita y los programas son realizados con ayuda del paquete matemático mathCAD.
- 3.- Reconocimiento y evaluación de la Planta de Relleno de la Mina Juanita.
- 4.- Análisis de la operación de Relleno Hidráulico de la Mina Juanita en el Pilar 24/27 con el fin de obtener conclusiones de los parámetros que intervienen en la resistencia del Relleno Hidráulico Cementado.
- 5.- Reconocimiento de la ubicación de la red de tuberías.
- 6.- Evaluación del sistema de drenaje integral en la Mina Juanita.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 UBICACION

La Mina Juanita se localiza en el paraje Corcona, distrito de Santa Cruz de Cocachacra, provincia de Huarochirí, departamento de Lima, a una elevación promedio de 1250 m.s.n.m., a la altura del Km. 49 de la carretera central, la que pasa por encima de la mina en una longitud aproximada de 250 m., al igual que en el ferrocarril central.

La Mina Juanita, por su ubicación en la margen izquierda del río Rimac, es fácilmente accesible por carretera desde Lima.

1.2 GEOLOGIA

GEOMORFOLOGIA

El yacimiento se halla localizado en la vertiente Occidental de la cordillera de los Andes. Dentro de las primeras estribaciones discurre el río Rimac que desciende

de las montañas andinas conformando un cañón.

En la zona se apreciaba una fuerte rugosidad del terreno, con fuertes escarpas y pendientes accidentadas que descienden hacia el curso del río. Además, hay una serie de tributarios que descienden y al encuentro con el río Rimac forman potentes secuencias de material aluvional conformando terrazas aluvionales que son fácilmente reconocidas por lo heterogéneo del material yacente.

GEOLOGIA DESCRIPTIVA GENERALIZADA

En términos generales, en el área donde se encuentra la Mina Juanita, se presenta una potente secuencia de rocas sedimentarias, calizas y lutitas negras intercalado con derrames volcánicos pertenecientes al grupo Casma del Cretáceo Inferior a Medio.

Intruyendo a esta formación se presenta el Batolito de la costa formado por una masa ígnea de composición granodiorítica.

El yacimiento está localizado en un anticlinal con rumbo N 20° W, el cual se encuentra al sur sobre una falla. El Plano axial del anticlinal y, consecuentemente, del depósito mineral está buzando al noreste. La masa mineral adopta la forma de un gran lente emplazado entre la secuencia volcano sedimentaria. La deposición mineral presenta una alternancia de lentes conformado por baritina, marmatita (sulfuro de Zinc) y disseminaciones de pirita.

Esta masa mineral es cortada longitudinalmente (E-W) y transversalmente (N-S) por una serie de diques ígneos de

composición básica (dolerita) y otros andesíticos. Por su emplazamiento, estos son Post-mineral.

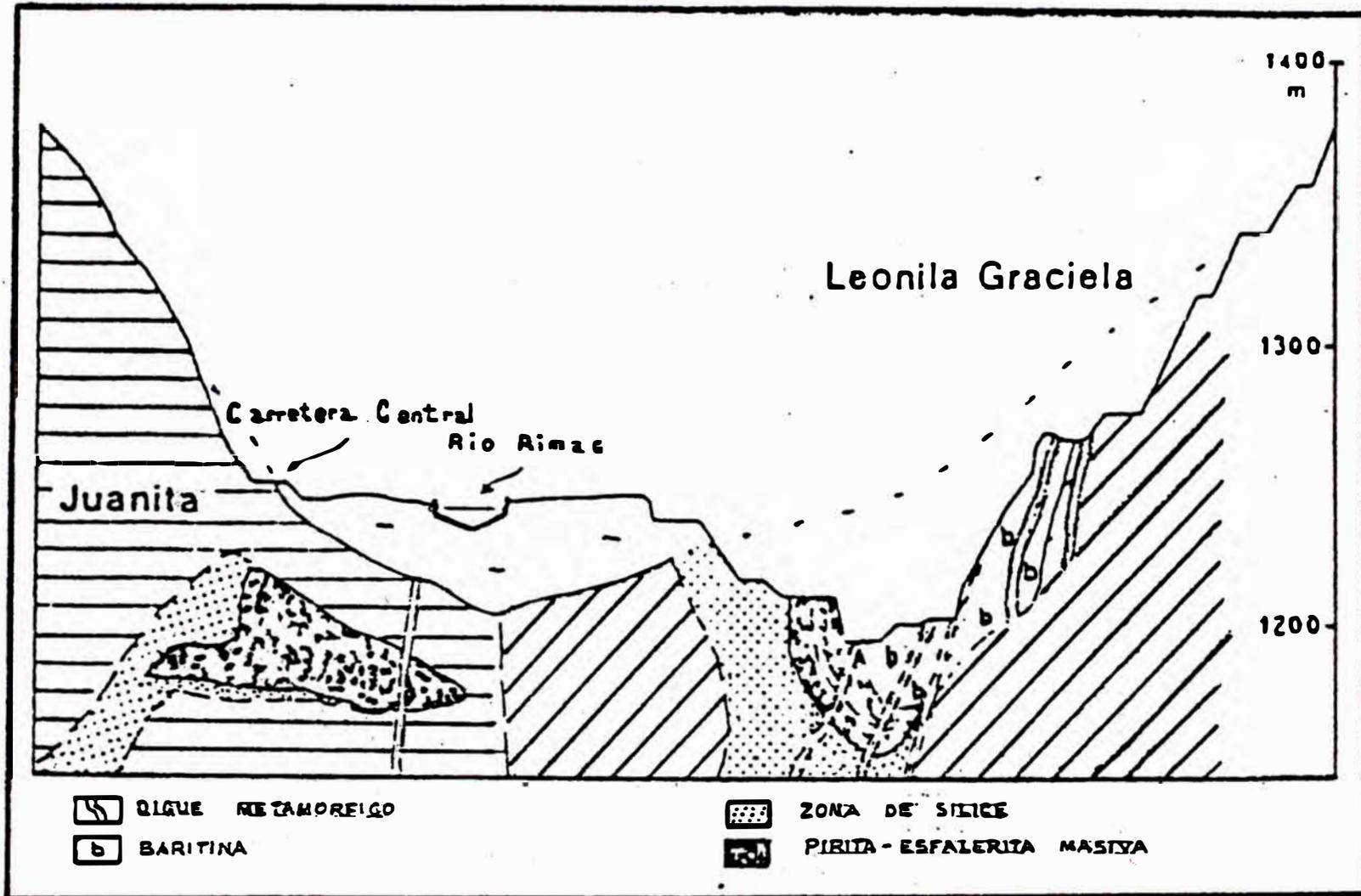
La mineralogía es simple, existe abundante baritina (Sulfato de Bario) con presencia de marmatita (Sulfuro de Zinc), acompañado de pirita (Sulfuro de Fierro) y, en menor cantidad, se halla pirrotita.

El arreglo estructural en el área es complejo. El plegamiento y fallamiento a sido intenso, debido a la orogénesis de la cadena de los Andes.

CARACTERISTICAS LITOLOGICAS ESTRUCTURALES GENERALES DE LA MINA JUANITA

TIPO	DESCRIPCION	ESTRUCTURAS	FILTRACIONES
Cuerpo mineral (baritina-marmatita)	Masiva, pobremente fracturada, juntas cerradas de textura bandeada con alternancia de marmatita y baritina. Se reconocen venillas de baritina de un espesor entre 50 y 200 μ , dentro de la estructura mineral.	NE, 60° a 85°NW, cerca a cajas al NE NE, 20° a 45° NW NS, 80° a 85° W	ligera, goteos por las juntas.
Andesita	Silicificada, masiva, medianamente fracturada, juntas rellenas con milonita y panizo algo alteradas en contacto con mineralización (biotización).	Rampas : N 45°W 45° SW Roca : NS, 30°E	Apreciable con presión en las zonas de intenso fracturamiento y fallamiento.
Diques (dolerita, pórfidos andesíticos)	Medianamente fracturado, poco alterada con cloritización en venillas, biotización y anfibolitización.	N 5° a 20°E 80° a 85° NW	Apreciable sin presión, principalmente por juntas.

MAPA GEOLOGICO - SECCION



CUERPO MINERALIZADO

La Mina Juanita viene siendo trabajada en la parte rica de zinc. El cuerpo mineralizado de la Mina Juanita tiene la forma de cuña, cuyos ejes mayor y menor tienen una longitud promedio de 250 y 95 metros respectivamente, con una altura máxima de 70 metros.

Las reservas actuales de la mina se encuentran en agotamiento ó en el final de la vida útil de la mina. El mineral extraído tiene una ley promedio de 16% de Zinc con algo de plomo y plata.

1.3 METODO DE EXPLOTACION

El Método de explotación aplicado en la mina Juanita es el corte y relleno mecanizado por subniveles, con utilización de relleno cementado y recuperación de pilares. Este método constituye un sistema de explotación a gran escala con alta recuperación y es una modernización y perfeccionamiento del método de arranque por subniveles.

El acceso al cuerpo mineralizado Juanita es a través de una rampa desarrollada enteramente en la caja sur (estéril). Es a través de esta rampa que se extrae todo el mineral y, además, constituye la vía principal de acceso tanto al personal, así como de insumos.

Es a partir de esta labor que se han desarrollado subniveles en los cuales se a aperturado cruceros paralelos y superpuestos uno encima del otro de 3.5 x 3.5 m. de sección cada uno que corta transversalmente al eje menor del cuerpo, corriendo de sur a norte.

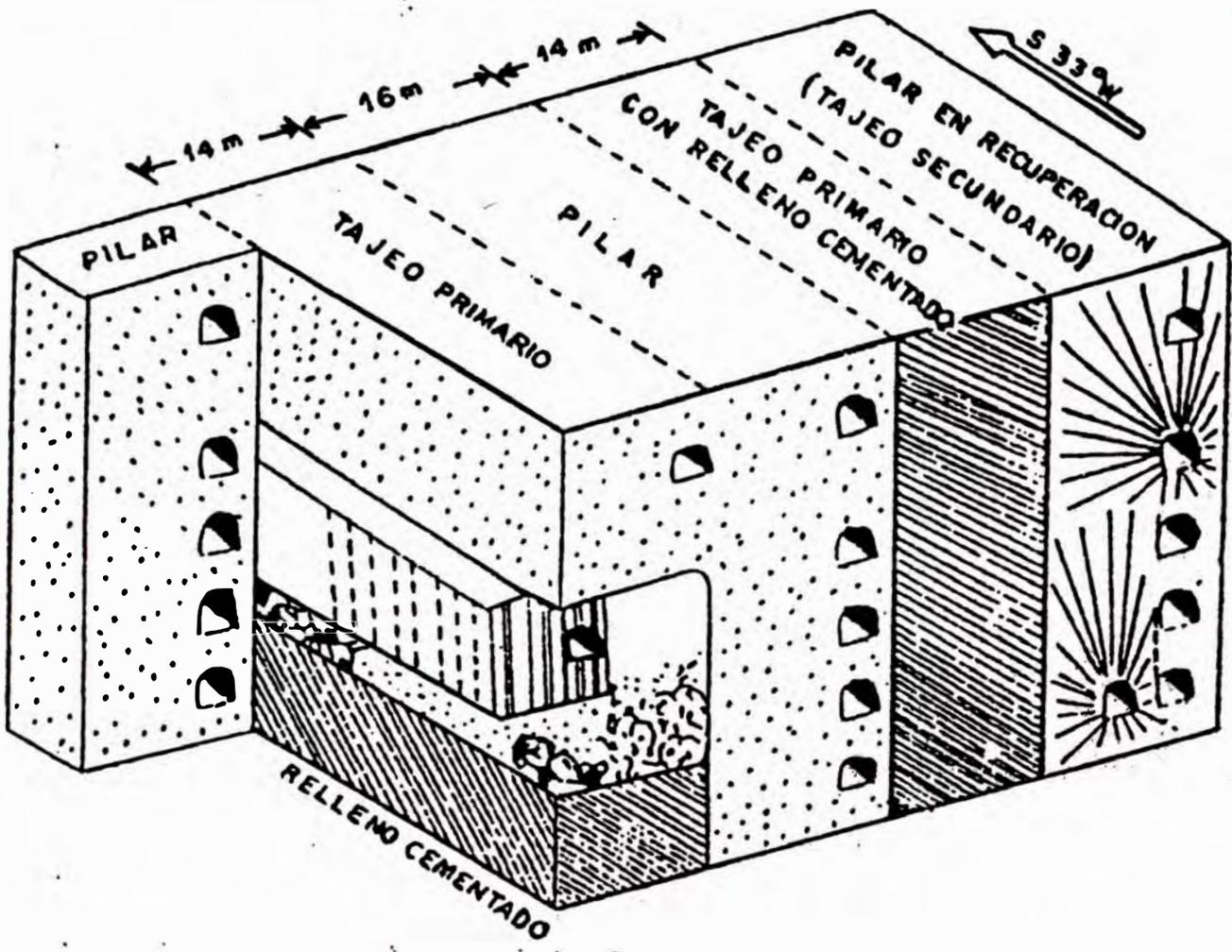
Debido a la alternancia de los cruceros se generan bloques de minado de 14 m. de ancho, separados entre sí por pilares de 16 m.

El arranque en los tajeos primarios es por niveles de aproximadamente 14 - 15 m. de altura. Para lo cual se prolonga el crucero del límite inferior hasta el extremo del tajeo, ejecutándose luego la chimenea de sección 2.5 x 2.5 m. que comunica 2 niveles y que servirá para la construcción del slot, finalmente se perfora y dispara filas de taladros en paralelo en toda su longitud.

La extracción del mineral roto se efectúa con scooptrans quienes utilizando los cruceros transportan el mineral desde los tajeos hasta las zonas de carguío, en donde el mineral es luego cargado a los volquetes por medio de cargadores frontales. Son los volquetes quienes vía la rampa sacan el mineral hasta superficie para luego llevarlos hasta la planta concentradora.

El vacío producido por la extracción del mineral es luego rellenado con relleno hidráulico cementado desde el nivel inmediatamente superior utilizando los cruceros existentes.

Cuando la cavidad ha sido rellenado, se habrá restablecido el piso sobre el cual se comenzará nuevamente el minado del tajeo inmediato superior, dándose inicio de esta forma a la extracción de la tajada inmediata superior del respectivo bloque.



ESQUEMA DEL METODO DE EXPLOTACION

Actualmente en la Mina Juanita se viene recuperando pilares, contando para ello con paredes autoestables de relleno cementado de los tajeos primarios de hasta algo más de 50 m. de altura en el mayor de los casos.

La metodología seguida para la recuperación de pilares se describe a continuación.

- Se prolonga los cruceros en los diferentes niveles hasta la pared del cuerpo mineralizado, para luego realizar la explotación en forma descendente y en retirada.
- Preparación del límite superior del panel, tanto de los cruceros cara libre (sirve para la construcción del slot) y cruceros precorte (sirve para que la otra pared del block sea vertical).

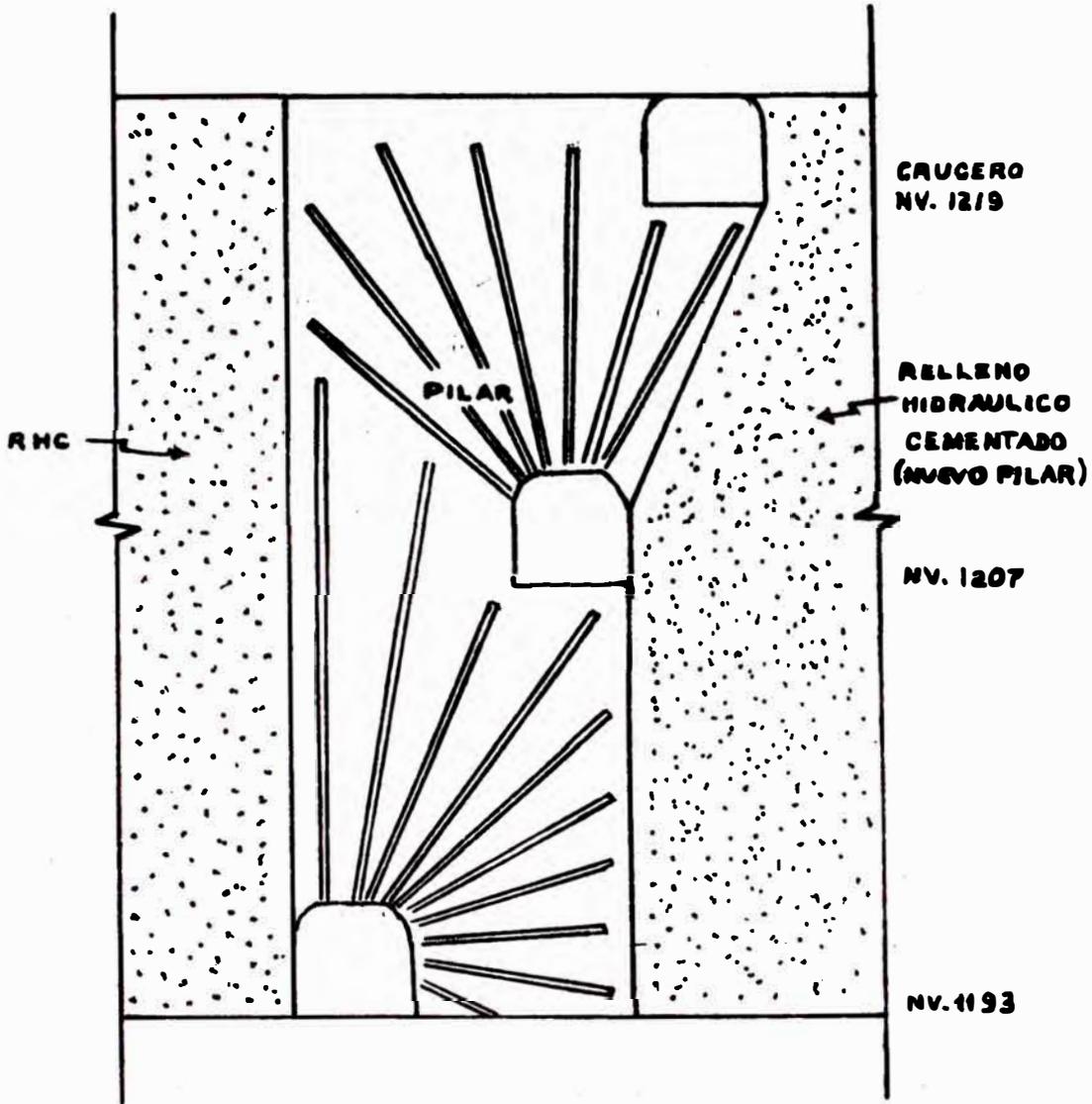
En lugares donde el techo no sea consistente, se realiza la corona (cámara en el límite superior), para de esta manera sostener el techo para asegurar la explotación.

- Luego se ejecuta la perforación integral del bloque. Siendo el orden de perforación y voladura el siguiente: chimenea, slot, filas de taladros en abanico y crucero de precorte.
- Después de cada disparo se realiza la limpieza.

Una vez arrancado el pilar en paredes de hasta 30 m. de longitud y en toda su altura, se procede a rellenar la cavidad con relleno hidráulico cementado, previa colocación de tapones en los accesos en los diferentes niveles.

El siguiente panel es arrancado en forma similar luego de que el relleno hidráulico cementado cumpla con el tiempo de curado considerado en 120 días.

RECUPERACION DE PILARES



**CORTE TRANSVERSAL
AL PILAR**

PERFORACION

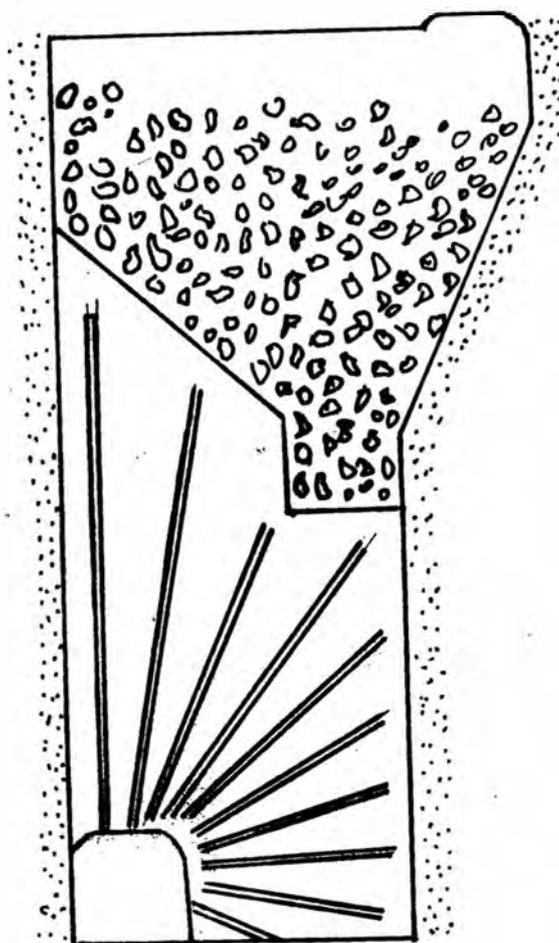
El equipo de perforación utilizado es una perforadora tamrock, modelo Jumbo de un brazo, accionado por aire comprimido; posee 4 llantas para desplazarlo, con sus correspondientes pilotes (gatas hidráulicas), para fijarse antes de perforar. Normalmente los taladros son perforados con brocas tipo "X" de 2" de diámetro, con barras de acoplamiento de 1.5 m. de longitud y 1¼ de diámetro. La excepción lo constituyen los taladros iniciadores de las chimeneas que son de 5". Como equipo secundario se tiene perforadoras Jack Leg, que son usadas para labores de preparación (cruceos y para instalación de grampas para los tapones, entre otros).

VOLADURA

Para la voladura se utilizan: Dinamita (dinasol 65%) en cartuchos de 7" de longitud y 7/8" diámetro, envasados en cajas de 22.7 kg de peso neto (288 cartuchos) y ANFO en proporción 1 saco de AN (aprox. 50 kg) con 1 gal. de FO. El ANFO es colocado en los taladros con un cargador Nitro Nobel neumático, con presiones de trabajo de 0.2 MPa.

Como iniciadores se utilizan fulminantes eléctricos con retardo, para el chequeo de la serie conector se utiliza un medidor de resistencia (lectura 100 ohmios para conexión correcta). Para el disparo se utiliza un explosor eléctrico.

VOLADURA EN RECUPERACION DE PILARES



**CORTE TRANSVERSAL
AL PILAR**

1.4 PLANTA CONCENTRADORA

La Compañía Minera PERUBAR S.A., procesa actualmente el mineral proveniente de la Mina Graciela con una ley promedio de cabeza 7.9% Zn; la capacidad operativa normal de la planta es de 960 TM/día, de la cual se tiene 200 TM/día de concentrado de Zn. y el resto es relave con una ley de 1% de Zn.

1.5 DESCRIPCION DE LA PLANTA DE RELLENO

El relave general de la planta es espesado, filtrado y transportado por medio de fajas a los echaderos de almacenamiento, ó mandado de la planta directamente por tuberías a la cancha de relaves; en el caso que no se envíe relave a mina.

Cuando se envía relave a mina, del espesador el relave pasa al acondicionador con una densidad promedio de 1.7 TM/m³, en el acondicionador se le adiciona agua obteniéndose densidades entre 1.5 a 1.6 TM/m³, para incrementar esta densidad se le adiciona relave seco, de tal manera que al medir en el acondicionador la densidad de la mezcla este entre 2.1 a 2.4 TM/m³.

Luego, en otro acondicionador se le adiciona cemento según el dosaje, para lo cual se cuenta con dos silos de 41 TM cada uno; en la parte inferior de cada silo (parte cónica) se tiene un vibrador magnético que sirve para hacer bajar el cemento que luego es graduado por una compuerta y además por un motor de tornillo que hace que gire el sin fin, el motor tiene una llave para aumentar ó disminuir la

velocidad de una faja (parte del motor) y por lo tanto controla la velocidad del sin fin.

Por controles de peso y densidad cada 15 minutos se calcula el dosaje. Si la relación cemento/relave es menor que la requerida se abre más la compuerta del silo, caso contrario se cierra parcialmente.

Finalmente la mezcla cemento-relave es bombeado por tuberías a interior mina.

1.6 JUSTIFICACION PARA UTILIZAR RELLENO CEMENTADO

(El relleno hidráulico cementado en minas subterráneas como elemento de sostenimiento ó para recuperar pilares de mineral con economía y seguridad en la cual el procedimiento que justifica su utilización es como se muestra en el diagrama de flujo adjunto; donde cada una de las etapas será desarrollada posteriormente.

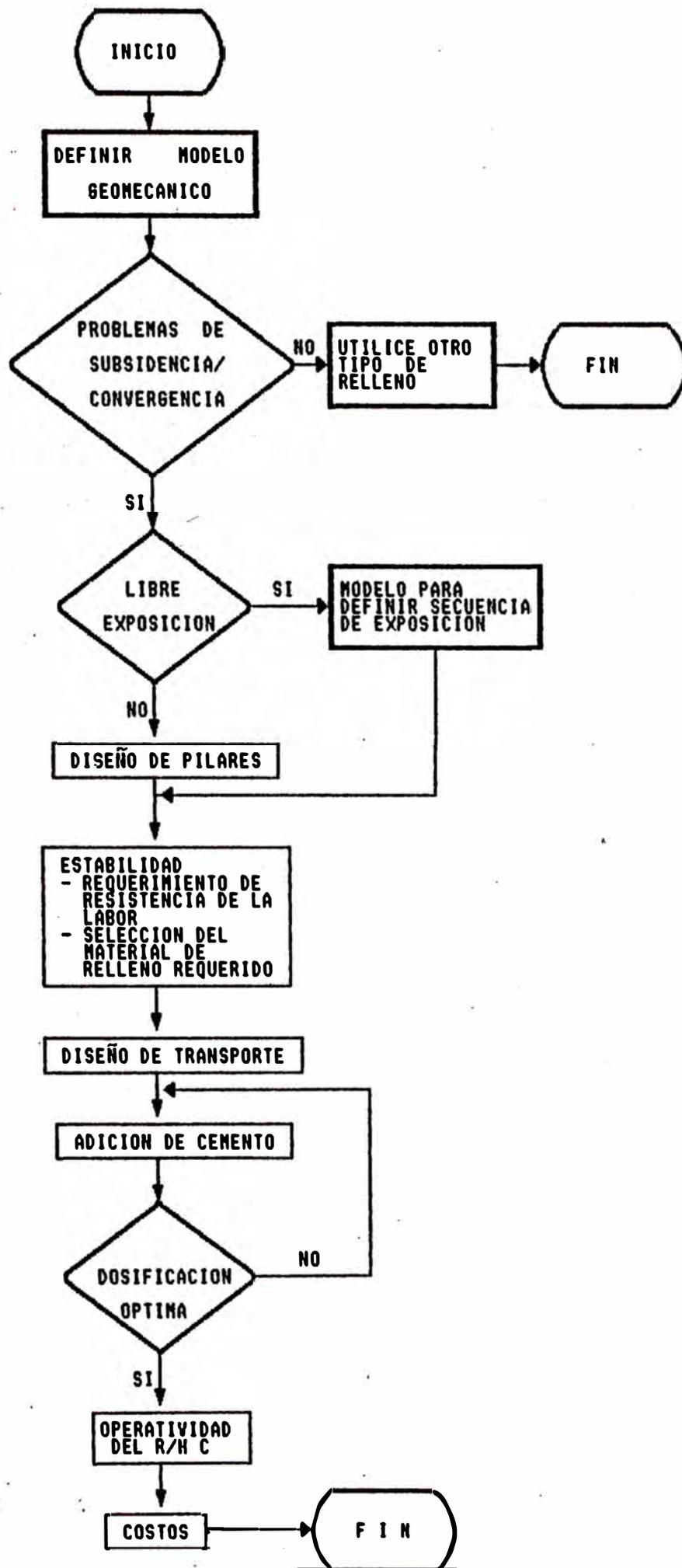
El objetivo es evitar la subsidencia/convergencia del macizo rocoso con la utilización de relleno de alta densidad a fin de satisfacer los requerimiento de resistencia; finalmente las dimensiones de la excavación permiten definir los requerimientos de agentes cementantes (cemento), de tal forma que ayuden a mejorar la resistencia del relleno y cumplan su función dentro de las condiciones y ambientes de minado.

En tal sentido, se adjunta el diagrama de flujo que expresa la secuencia y justificación para utilizar relleno hidráulico cementado en función y objetivos de utilizar el

relleno en minería.

Para el caso de la Mina Juanita se utiliza relleno hidráulico cementado con el fin de prevenir fenómenos de subsidencia que pudieran afectar o comprometer las instalaciones públicas ubicadas en superficie circundante a la zona mineralizada.

JUSTIFICACION PARA UTILIZAR RELLENO CEMENTADO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHILE
OFICINA CENTRAL DE B. S. Y T.
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS

1.7 ENTORNO DEL PAQUETE UTILIZADO

El paquete utilizado es el MATHCAD, que son programas diseñados especialmente para resolución de los siguientes algoritmos: Sistema de ecuaciones, ecuaciones trascendentes, ecuaciones diferenciales, integrales, cálculos numéricos, gráficos de ecuaciones, manejo de unidades físicas, etc.

Este paquete matemático realiza todos los cálculos mediante métodos numéricos de aproximaciones sucesivas, hasta llegar a la respuesta final. El usuario tiene control sobre la precisión de la aproximación.

El MATHCAD permite digitar ecuaciones como se está acostumbrado a expresar, escribirlo y visualizarlo en toda la pantalla.

La configuración del MATHCAD requiere lo siguiente:

COMPUTADORA

IBM PC, PC/XT, PC/AT, ó compatible incluyendo las series PS/2.

SISTEMA OPERATIVO

MS-DOS ó PC-DOS versiones 2.x ó 3.x

MEMORIA

Requiere 512k en la RAM, recomendado 640k.

FORMAS DE INGRESAR AL MATHCAD:

- Desde disco flexible

Si se usa disco flexible de 5¼" el programa MATHCAD se accederá de 2 discos. Un disco contiene el programa MATHCAD (MCAD.EXE) y el disco auxiliar contiene el archivo overlay además

de otro archivo auxiliar.

A>MCAD

Luego pide el segundo disco. Al insertar el segundo disco en el drive A ó B se da enter y se habrá ingresado al MATHCAD.

Si se usa disco de 3½"

A>MCAD

- Desde el disco duro

Se ingresara al MATHCAD de la siguiente manera:

C>cd MATHCAD

C>MCAD

CAPITULO II

CARACTERISTICAS DEL MATERIAL PARA RELLENO

HIDRAULICO CEMENTADO

En la Mina Juanita la principal característica es que no se realiza clasificación (no se utiliza hidrociclones) del material de relleno. Por lo tanto se utiliza todo el relave proveniente del flujo dinámico de tratamiento de la planta concentradora.

2.1 ANALISIS GRANULOMETRICO

El propósito de este análisis es someter al material de relleno a un proceso de clasificación de acuerdo al tamaño del sólido mediante mallas a fin de poder obtener las propiedades físicas de la pulpa. Por este procedimiento el tamaño de partícula se asocia al número de aberturas que tiene el tamiz por pulgada lineal, a continuación se da una serie de tamices de uso industrial.

Series de tamices de uso Industrial

Tyler		U.S.(A.S.T.M)		Alemana DIN	Francesa AFNOR	Británica	
Malla Abertura		Malla Abertura		Malla Abertura	Malla Abertura	Malla Abertura	
3/8"	9423	3/8"	9510				
5/16"	7925	5/16"	8000	8000			
.265"	6600	.265"	6730				
		1/4"	6350	6300			
3m	5613	3m	5660	5000	38	5000	
4m	4699	4m	4760				
5m	3962	5m	4000	4000	37	4000	
6m	3377	6m	3360	3150	36	3150	5 3353
7m	2774	7m	2830				6 2812
8m	2362	8m	2380	2500	35	2500	7 2411
9m	1981	10m	2000	2000	34	2000	8 2057
10m	1651	12m	1680	1600	33	1600	10 1678
12m	1397	14m	1410				12 1405
				1250	32	1250	
14m	1168	16m	1190				14 1204
16m	991	18m	1000	1000	31	1000	16 1003
20m	833	20m	841	800	30	800	18 853
24m	701	25m	707	630	29	630	22 697
28m	589	30m	595	500	28	500	25 599
32m	495	35m	500	500	28	500	30 500
35m	417	40m	420	400	27	400	35 477
42m	351	45m	354	315	26	315	44 353
48m	295	50m	297	250	25	250	52 295
60m	248	60m	250	200	24	200	60 251
65m	208	70m	210	160	23	160	72 211
80m	175	80m	177	125	22	125	85 178
100m	147	100m	150	100	21	100	100 152
115m	124	120m	125	90			120 124
150m	104	140m	105	80	20	80	150 104
170m	88	170m	98	71			170 87
200m	74	200m	74	63	19	63	200 70
230m	61	230m	63	56			240 66
270m	53	270m	53	50	18	50	300 53
325m	43	325m	44	45			
400m	38	400m	37	40	17	40	

**ANALISIS GRANULOMETRICO DE SOLIDOS EN LA PULPA
PARA LA MINA JUANITA**

MALLA		MICRONES	PESO %	PESO Ac. (+)	PESO Ac. (-)
	+20	841	1.71	1.71	98.29
-20	+28	718	3.40	5.11	94.89
-28	+35	507	5.46	10.57	89.43
-35	+48	358	6.65	17.22	82.78
-48	+65	253	8.17	25.39	74.61
-65	+100	179	14.68	40.07	59.93
-100	+150	127	13.90	53.97	46.03
-150	+200	89	8.88	62.85	37.15
-200	+270	63	9.82	72.67	27.33
-270	+325	48	7.72	80.39	19.61
		33	1.38	81.77	18.23
		25	3.27	85.04	14.96
		17	5.00	90.04	9.96
		12	3.12	93.16	6.84
		8	2.01	95.17	4.83
		-8	4.83	100.00	-----
			100.00		

GRAFICANDO EN MATHCAD EL TAMAÑO DE PARTICULA VERSUS EL ACUMULADO NEGATIVO PROVENIENTES DEL ANALISIS GRANULOMETRICO DE SOLIDOS EN LA PULPA PARA LA MINA JUANITA.

$i := 0 \dots 14$

A :=

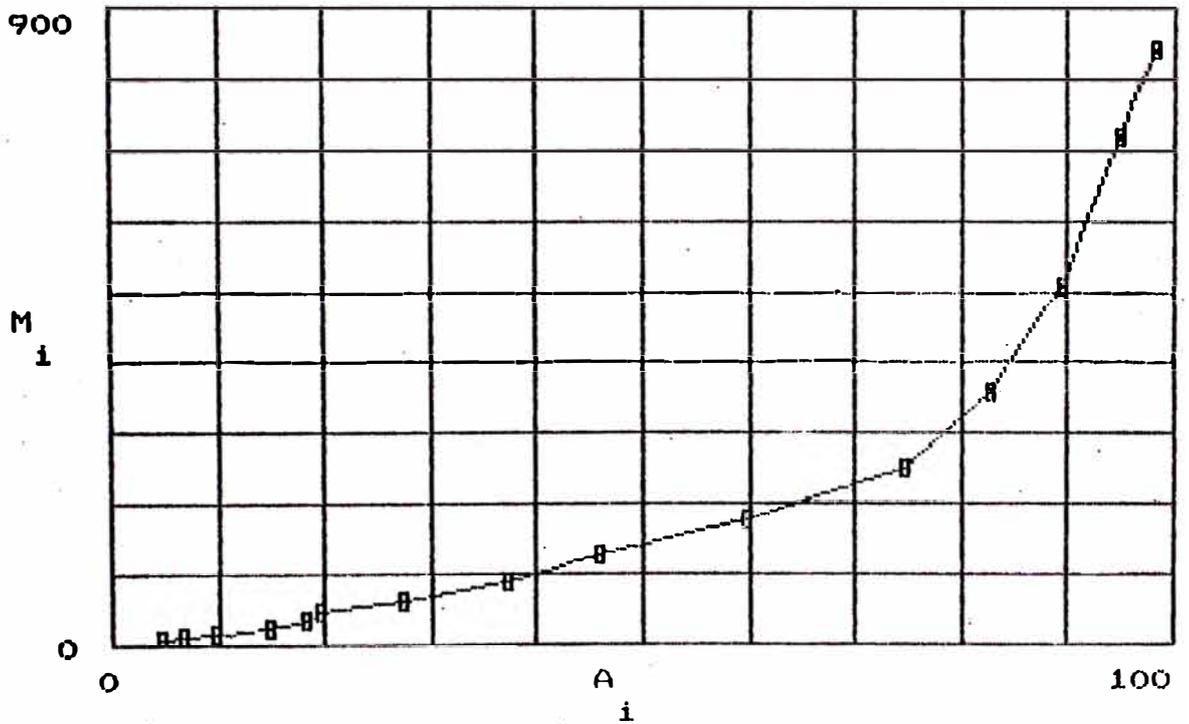
i
4.83
6.84
9.96
14.96
18.23
19.61
27.33
37.15
46.03
59.93
74.61
82.78
89.43
94.89
98.29

M :=

i
8
12
17
25
33
48
63
89
127
179
253
358
507
718
841

CURVA GRANULOMETRICA

MINA JUANITA



Donde :

M : Tamaño de partícula en Micrones.

A : Porcentaje en peso de material que pasa.

INTERPOLACION LINEAL

linterp(A,M,10) -- 17.064
linterp(A,M,60) -- 179.353

CALCULO DE LAS PROPIEDADES HIDRAULICAS DEL MATERIAL

Coeficiente de Uniformidad

$$Cu := \frac{179.353}{17.064} \quad \text{---} Cu = 10.511$$

Velocidad de Percolación

$$Vp := \left[17.064 \cdot \frac{6}{100} \right]^2 \quad Vp = 1.048$$

2.2 PROPIEDADES FISICAS

2.2.1 GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS (G_s)

En la mina se determina esta propiedad física, ya sea para el material de relleno y para trozos de relleno cementado extraído de la labor. La gravedad específica promedio de los sólidos es:

$$G_s = 3.8$$

La gravedad específica para el material de relleno muestreados en la planta cada 15 minutos, se determina pesando previamente la muestra entre 70 grs. a 80 grs, luego es vertido en una fiola donde se le adiciona kerosene y a su vez la fiola se encuentra en un recipiente de vidrio que contiene también kerosene y otras dos fiolas una piloto ó patrón y la otra con sólo kerosene; finalmente la gravedad específica se determina por la relación masa sobre volumen (volumen a la cual la variación del volumen se estabiliza)

La gravedad específica de los sólidos para un trozo de relleno cementado extraído de la labor, se determina mediante la balanza marca OHAUS como sigue:

$$G_s = \frac{\text{Peso en el aire}}{\text{Peso en el aire} - \text{Peso en el Agua}}$$

2.2.2 DENSIDAD DE PULPA (G_p)

Para la determinación de la densidad de pulpa se utiliza un DENSIMETRO de lecturas directas, efectuándose la lectura cada 15 minutos.

$$G_p = 2.4 \text{ Kg/Lt}$$

En la mina Juanita se tienen en cuenta los efectos beneficiosos de la densificación del relleno sobre la resistencia del relleno cementado, para lo cual el relave cuya densidad es de 1.5 a 1.6 Kg/Lt se transporta a un acondicionador en donde se incrementa la densidad a 2.4 kg/lt con relave seco y arena que van en las siguientes proporciones:

relave	30%		
arena	1	} 70%	
relave seco	3		

La arena y el relave seco se transporta de la cancha donde se almacena a la faja transportadora con tolva incorporada por un equipo de carguío (Pala CAT 930) y de allí al acondicionador de pulpa.

2.2.3 % DE SOLIDOS EN PESO

Con este parámetro se determina las características de peso en la pulpa de descarga y viene dado por la siguiente relación:

$$\% S_p = \frac{100 G_s (G_p - 1)}{G_p (G_s - 1)}$$

luego tenemos:

$$\% S_p = 79.17$$

2.2.4 % DE SOLIDOS EN VOLUMEN

Parámetro que determina las características de volumen de pulpa y está dado por la siguiente relación:

$$\% S_v = 100 \times \frac{G_p - 1}{G_s - 1}$$

luego tenemos:

$$\% S_v = 50$$

2.2.5 COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (Cu)

El coeficiente de uniformidad (Cu) es función exclusiva de la granulometría del material de relleno, su cálculo se hizo en base a la representación gráfica en MATHCAD de una distribución granulométrica del material de relleno.

Allen Hazen propuso el coeficiente de uniformidad por:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

En donde:

D₆₀: Diámetro de la partícula más grande que se encuentra en el 60% de la fracción acumulativa (-) del relave.

D_{10} : Diámetro de la partícula de mayor tamaño presente en el 10% de fracción acumulativa (-) del material.

De la curva de análisis granulométrico se tiene que el valor de C_u es de 10.511.

Por experiencia sobre operaciones de relleno hidráulico los valores del coeficiente de uniformidad comprendidos entre 5 y 7 han dado mejores resultados.

2.3 PROPIEDADES HIDRAULICAS

2.3.1 VELOCIDAD DE PERCOLACION (V_p)

Llamado también coeficiente de permeabilidad, es un fenómeno que consiste en la circulación rápida ó lenta de un volumen determinado de agua a través del relleno en una unidad de tiempo.

El coeficiente de uniformidad y la velocidad de percolación están relacionados entre sí, guardando una proporcionalidad inversa expresada en la siguiente relación:

$$V_p = (D_{10} \times \frac{6}{100})^2$$

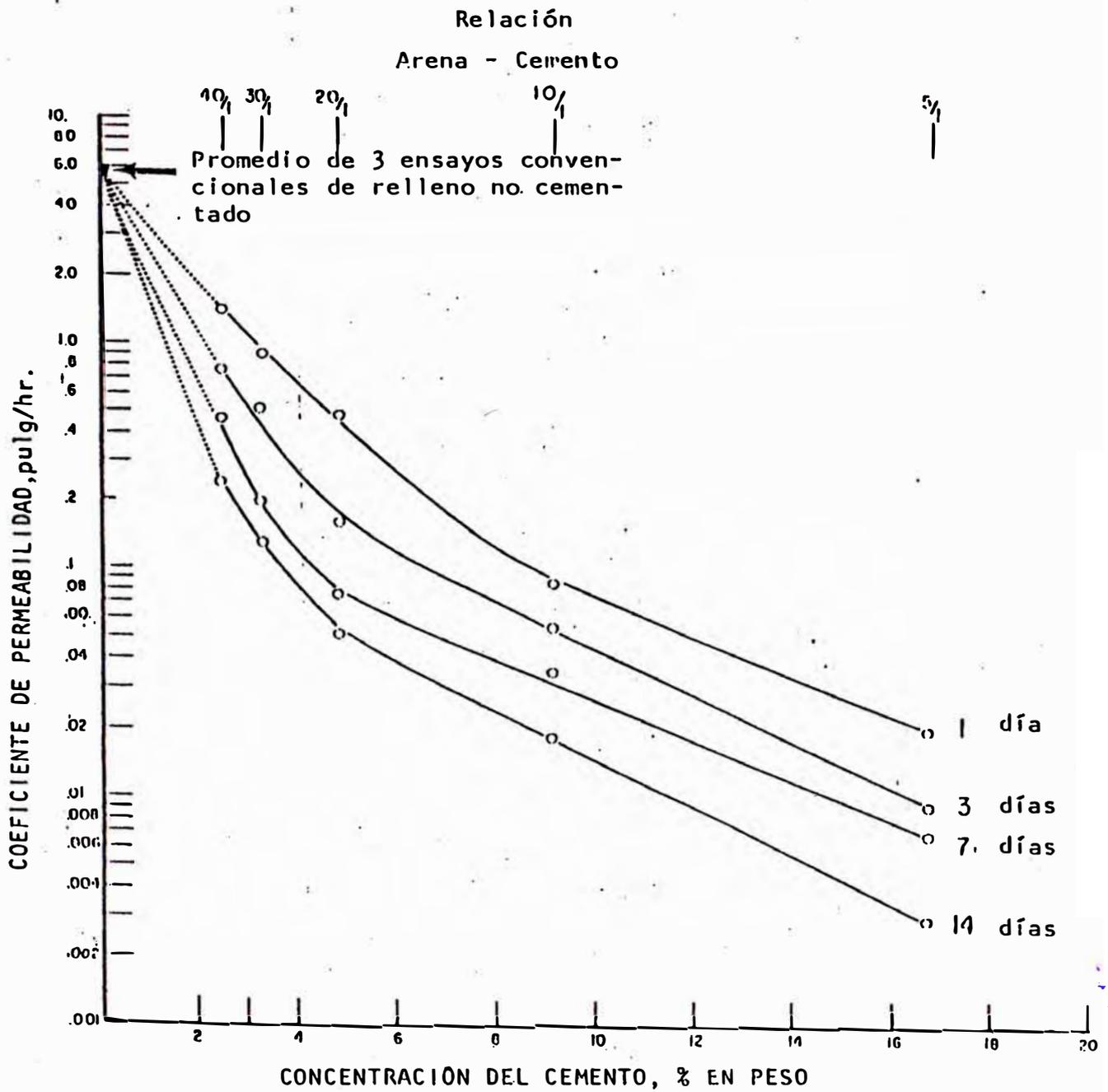
En el caso de relleno hidráulico la velocidad de percolación varía entre 3 y 10 cm/hr. Los valores mayores o menores acarean perjuicios. Velocidades inferiores a 3 cm/hr ocasiona una eliminación del agua muy lenta, demorando el ingreso del personal a la labor; mientras que valores superiores a 20 cm/hr da lugar a la aparición del

fenómeno embudo, por el cual se forma pequeños conductos abiertos dentro de la masa de relleno, a través de los cuales fluye la pulpa a gran velocidad. Los valores permisibles de la velocidad de percolación para relleno hidráulico se resumen en la siguiente tabla:

Rangos de Vp para relleno Hidráulico cm/hr	Consecuencia	Observación
Vp <3	Presencia de gran cantidad de partículas finas, en el material, causando la difícil percolación del agua	No aceptable
3 < Vp ≤ 10	Buen drenaje	Optima
10 < Vp ≤ 20	Regular drenaje	Aceptable
Vp >20	Presencia de baja concentración de partículas finas en el material, con tendencia a producirse el fenómeno del embudo	No aceptable

Para el material de relleno de la mina Juanita se tiene una velocidad de percolación de 1.05 cm/hr.

La velocidad de percolación no es un parámetro importante en el caso de relleno hidráulico cementado ya que para el fraguado el cemento absorbe parte del agua lo que ocasiona que tenga velocidades inferiores a las mencionadas para el caso del relleno hidráulico y que por lo tanto varían según el dosaje ó contenido de cemento. A fin de dar ejemplo de como varía la velocidad de percolación en el caso del relleno hidráulico cementado se muestra el siguiente gráfico.



Permeabilidad como una función del contenido de cemento.

Ref: Ensayos realizados al material de relleno de la mina B.
(Método Basado en las Propiedades Físicas y Mineralógicas)

2.3.2 RAZON DE POROS (e)

Está dado por la relación volumen ocupado por los poros (VP) al volumen ocupado por los sólidos (VS) en una masa granular.

$$e = \frac{VP}{VS}$$

La razón de poros no se mide directamente sino hay que calcularlo en base a la relación:

$$e = \frac{Gs}{D} (1 + RH) - 1$$

Donde:

D : densidad de relleno en gr/m³

RH: Relación de humedad

$$RH = \frac{\text{Peso de agua en el relleno}}{\text{Peso de solidos en el relleno}}$$

Para determinar la razón de poros máximo y mínimo se utilizan las siguientes relaciones:

$$e_{\max} = \frac{G}{D_{\min}} - 1$$

$$e_{\min} = \frac{G}{D_{\max}} (1 + RH) - 1$$

Donde:

G :Gravedad específica de sólidos en gr/cm³

Luego la razón de poros empleados para relleno hidráulico en minería será:

RELLENO	e
Arenoso	0.3 - 0.9
Arena - Arcilla	0.8 - 1.6
Arcilloso	1.5 - 2.5

2.3.3 CONSOLIDACION

Es el proceso de disminución de volumen, que tiene lugar en un lapso de tiempo provocado por un aumento de las cargas sobre el relleno.

2.4 CEMENTO Y TIPOS DE CEMENTO

2.4.1 CEMENTO

Es un material aglomerante que tiene las propiedades de adherencia y cohesión necesarias para unir el material de relleno entre sí formando una masa sólida.

Para fines prácticos se puede considerar que el cemento está integrado de cuatro componentes principales a saber.

COMPUESTO	FORMULA	ABREVIATURA
Silicato Tricálcico	$3CaOSi$	C3S
Silicato Dicálcico	$2CaOSi$	C2S
Aluminato Tricálcico	$3CaOAl_2$	C3A
Aluminato Ferrato Tetracálcico	$4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$	C2AF

En la mayoría de los aumentos de resistencia se controlan por el C3S y C2S.

2.4.2 TIPOS DE CEMENTO

La American Society for Testing and Material (ASTM) provee 5 tipos de cemento Portland.

TIPO I. Este tipo de cemento es de uso general. Es apropiado para todos los usos cuando no son requeridas las propiedades especiales de los otros tipos de cemento.

TIPO II. Es usado donde no se requiere una excesiva protección contra ataques de sulfuros, es decir donde los ataques por sulfuros no son muy severos.

Usualmente genera menos calor de hidratación que el cemento tipo I ó cemento normal.

TIPO III. Este tipo de cemento de resistencia iniciales altas generalmente a una semana ó menos.

Este cemento produce un alto calor de hidratación.

TIPO IV. Este cemento se usa donde el calor de hidratación debe ser reducido al mínimo. Desarrolla resistencias a más largo plazo que el tipo I.

TIPO V. Este tipo de cemento es usado solamente en concretos que van a ser expuestos a una severa acción de sulfatos. Este cemento adquiere resistencia más lentamente que el tipo I.

El cemento usado en la Mina Juanita es de tipo I.

2.5 COMPOSICION MINERALOGICA

La composición mineralógica del relave es como sigue:

ELEMENTOS	%	OXIDOS	%
Si	10.38	SiO ₂	22.22
Al	2.69	Al ₂ O ₃	5.08
Fe	15.47	Fe ₂ O ₃	22.13
Ca	3.88	CaO	5.43
Mg	0.90	MgO	1.49
Ba	17.00	BaO	19.23
SO ₄	29.00	SO ₃	24.17
Pb	0.13	PbO	0.18
Cu	0.04		
Zn	0.82		
Sb	0.012		
As	0.05		

2.6 PROPIEDADES QUIMICAS

2.6.1 CONTAMINACION QUIMICA

Cuando el relleno se encuentra en el tajo, los sulfuros comienzan a oxidarse y a liberar anhídrido sulfuroso (SO₂) que se introduce al medio ambiente.

En la práctica la cantidad de anhídrido sulfuroso emitido es muy bajo debido a que la oxidación de la pirrotita nunca es completa por lo siguiente:

- El agua no estará suficiente tiempo en contacto con el sulfuro de hierro y el azufre, la carencia de oxígeno cesará la reacción.
- El sulfato Ferroso forma una película al-rededor de cada grano de pirrotita protegiendolo de mayor oxidación.

2.6.2 CARACTERISTICAS DEL AGUA

Para el caso del relleno hidráulico cementado en la Mina Juanita, el agua utilizada está en los rangos de 6 a 12 PH de acidez, que es lo recomendable.

Sedapal y el Ministerio de Salud exigen que se trate el agua bombeada proveniente del drenaje en los tajeos rellenos, para lo cual se adiciona sulfato de aluminio (floculante) a fin de que se logre la precipitación de las partículas sólidas en las piscinas de tratamiento, y luego es enviada al río Rimac.

CAPITULO III
METODOS PRACTICOS PARA DETERMINAR LA
RESISTENCIA COMPRESIVA NO CONFINADA
DEL RELLENO CEMENTADO

Las experiencias de muchos especialistas en diferentes minas han conllevado a visualizar métodos prácticos para diseño de relleno hidráulico en minas subterráneas.

En el presente capítulo se tienen en cuenta 2 métodos los cuales nos dan una idea clara de que con los datos que se obtienen de la mina se puede determinar la resistencia compresiva no confinada del relleno hidráulico cementado sin necesidad de realizar ensayos de laboratorio.

La primera considera un método basado en el análisis granulométrico que considera que todos los agregados de las partículas son esféricas de tamaño variable y dispuestos en una matriz aleatoria.

El segundo método se basa en las propiedades Físicas y Mineralógicas que considera un análisis de regresión para determinar estimados razonables de resistencia para rellenos cuyas propiedades físicas y mineralógicas caen dentro de los rangos que serán mostrados más adelante.

3.1 METODO BASADO EN EL ANALISIS GRANULOMETRICO

En la selección del material de relleno se incluye, la necesidad económica, dependiente del lugar. Sin embargo, no es material a seguir una selección óptima de los compuestos típicos como desmontes, morrenas, relave. En particular se propone un número cementador "BINDER", basado en el promedio de la distancia entre los agregados, superficie esférica y contenido de cemento. Usando este número se relaciona empíricamente a la resistencia compresiva, y puede predecir el rendimiento mecánico esperado para cualquier relleno cementado.

3.1.1 FUNDAMENTO TEORICO

INTRODUCCION.- Por muchos años un volumen considerable de información se ha acumulado sobre el diseño del material de relleno en mina. El componente agregado a sido el relave aunque también son comunes una mixtura de desmonte, arena y relave. Por entre otras cosas para estos materiales las propiedades de resistencia compresiva uniaxial y velocidad de percolación se conocen, mediante la gradación. Mientras existen las fórmulas empíricas para relacionar el análisis granulométrico con la velocidad de percolación hay una incertidumbre considerable relacionado con la resistencia desarrollada.

En el diseño, donde generalmente es de vital importancia, se conoce la dificultad de tener definido una curva de grado preferido. Ensayos han tenido limitaciones demostrables con el uso de parámetros simples como el

coeficiente de uniformidad. El problema puede ser reducido a una distribución con el número de adopciones ó valores índices. La solución a este problema se describe en los párrafos posteriores.

La experiencia demuestra que de 3 materiales para relleno, el fin es desarrollar la mayor resistencia para un contenido de cemento dado. El esfuerzo real se comparó con un amplio tipo de materiales para relleno. Es decir un problema aparente con otros estudios que muestran que la adición de agregados (ejemplo arena) a relave tiene un efecto beneficioso sobre esfuerzo por peso de cemento consumido.

Quizás la mayor fuente de datos que muestran los efectos del terreno sobre los esfuerzos existentes en la investigación del concreto. En particular, los métodos se han desarrollado para comparar las propiedades del concreto de diversos agregados arena/grava y para responder tales preguntas como cuanto más de cemento necesita cuando un grado inferior de finos se usa.

La así llamada curva de Talbot definida por Talbot como:

$$P(u) = 100 (u/u_m)^n \dots \dots \dots (1)$$

da el porcentaje que pasa en peso de tamaño μ . Para un tamaño de partícula dado μ_m , Talbot encontró experimentalmente un valor para el exponente n que minimiza la porosidad p , por lo tanto maximiza el esfuerzo. El resultado obtenido que se puede ser considerado óptimo para el concreto, aunque no necesariamente práctico, será usado

posteriormente por referirse a este propósito.

Además se requiere para la gradación de un terreno, la investigación del concreto teniendo identificado la existencia de lo siguiente en la relación a esfuerzos.

- Una fuerte dependencia de la distancia interpartícula ó distancia promedio libre, \bar{d} de los agregados.

Inversamente proporcional con el área superficial de los agregados α_p , por relación constante agua/cemento. Directamente proporcional con el contenido de cemento, C_v .

En principio todos los parámetros son de igual importancia si el agregado-cemento se mezcla es un concreto ó cualquier tipo de relleno consolidado. Por lo tanto una relación entre una mixtura de propiedades y resistencias, se resume en la ecuación,

$$\sigma_c \propto (C_v / \bar{d} \alpha_p)^k \dots \dots \dots (2)$$

puede ser generalmente considerado.

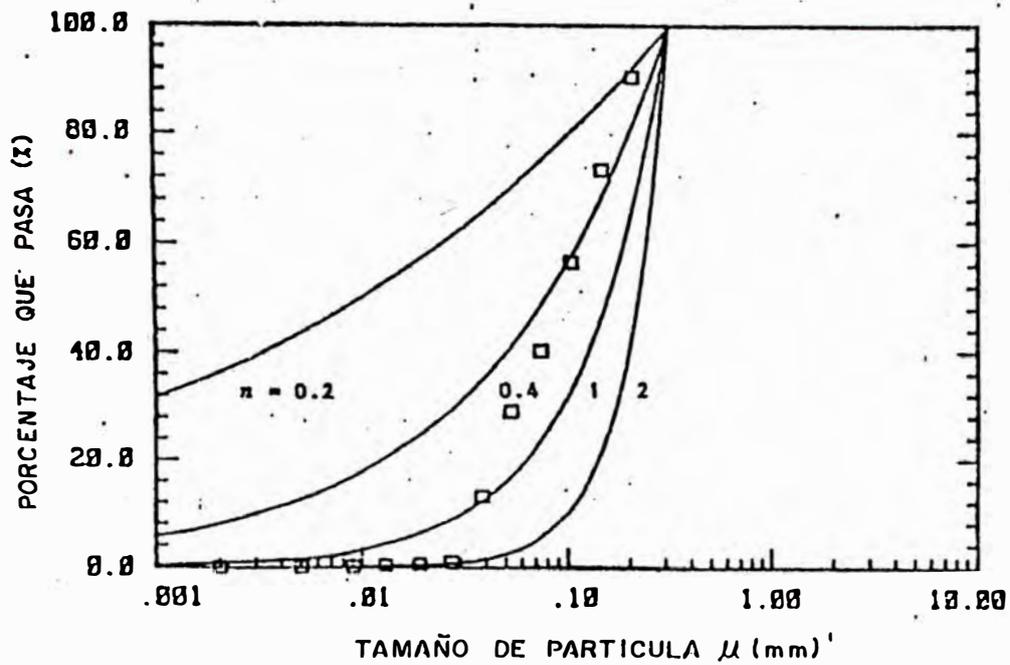


Figura 1 - Curva granulométrica definida por la Ec.1 $\mu_m = 0.315$ mm. los rectángulos mostrados describen una distribución típica de relave para una mina.

Ref. Gráfico generado en base al tamaño máximo de partícula μ_m , variación del tamaño μ y al reemplazo de estos 2 valores en la ecuación (1).

En este punto se podría observar que mientras, generalmente, los componentes del relleno se expresan en peso, es aconsejable hacer los cálculos en volumen. Para los cálculos se considera lo siguiente:

- El consumo será determinado por el volumen del tajeo de modo que,
- Las variaciones en la cantidad de relleno puede ser considerado para el cálculo del uso de cemento.

Así, C_v se define como el volumen de cemento en una unidad de volumen seco de relleno colocado recientemente. (Generalmente C se expresa como un porcentaje en peso; la conversión es fácilmente lograda por multiplicación del factor (gravedad específica: cemento/densidad: a granel, seca)). Con este método se propone una racional evaluación de datos de relleno cementado. La fuente de datos toma tanto como sea posible la información. Variación en la distribución del tamaño, tamaño absoluto del agregado, relación de vacíos y contenido de cemento generalmente son reducidos a, el número adimensional, $(C_v/\bar{\alpha}_p)$. Mientras se espera que este número pueda ser relacionado con una aproximación normalizada de esfuerzo, por la ecuación (2), en la práctica el esfuerzo se mide teniendo una variación adicional debido al tamaño de los agregados, forma, tiempo y temperatura de curado, errores experimentales, etc. Por lo tanto esta evaluación de datos del relleno sirven para definir un promedio empírico bajo condiciones de laboratorio.

TEORIA.- El relleno cementado y concreto abarca generalmente agregados de material obteniéndose una matriz cementante. El material de la matriz contiene agregado fino, un porcentaje arbitrario del agregado total, junto con vacío. La siguiente teoría asume que todos los agregados de las partículas son esféricas, de tamaño variable y dispuestos en una matriz aleatoriamente.

Con este concepto de material de relleno, se identifican 2 parámetros \bar{d} y α_p . Esto sirve para medir, respectivamente una dispersión de partículas en una matriz y cubre la superficie total. Usando el método descrito, esto puede ser calculado de:

$$\alpha_p = 6[N]_2/[N]_3 \dots \dots \dots (3) \text{ y}$$

$$V_p(1+1/2\bar{d}\alpha_p+1/2\bar{d}^2\alpha_p[N]_1/[N]_2+1/6\bar{d}^3\alpha_p[N]_0/[N]_2) = 1 \dots \dots (4)$$

donde:

$$[N]_i = \int_{u_0}^{u_m} u^i f(u) du \dots \dots \dots (5)$$

y $f(u)$ es la función de probabilidad de la densidad del total de diámetro de partículas.

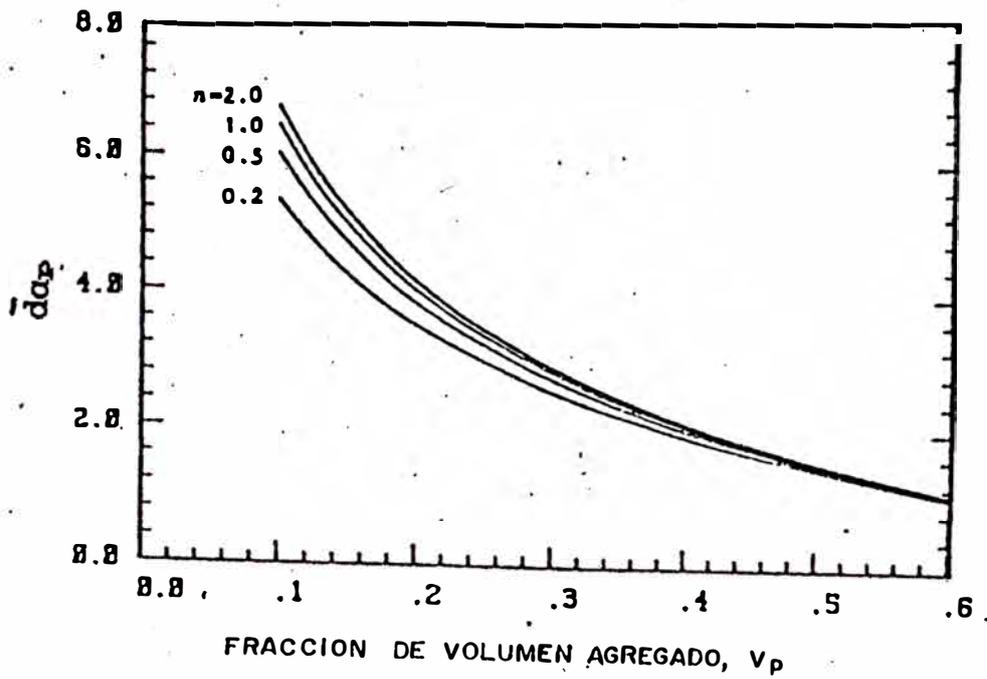


Figura 2 - Relación entre \bar{d}_{ap} y la fracción del volumen agregado definido por la granulometría de la ecuación 1

Los límites μ_0 y μ_m son, respectivamente el diámetro mínimo y máximo, y V_p es la fracción del volumen agregado del total del volumen relleno. (μ_0 se encuentra definido de acuerdo a $\mu_0 = \mu_{10}$ donde, $P(\mu_{10}) = 10\%$ en peso que pasa). Mientras es arbitrario la definición de volumen agregado, en concretos se estima generalmente como agregado entre el 60 a 70 %, la diferencia representa la matriz.

La definición de V_p para cálculos se da por:

$$V_p = 0.6(1-p-C_v/100) \dots\dots\dots (6)$$

donde p es la porosidad del relleno.

Ya que las dimensiones de α_p y d son $[m]^{-1}$ y $[m]$, respectivamente, la relación esfuerzo - granulometría puede ser convenientemente expresado por el número, $d\alpha_p$. Sabiendo que la distribución del tamaño de las partículas del relleno, su porosidad y contenido volumetrico de cemento, luego las ecuaciones (3) a (6) pueden ser usadas para calcular el número cementador ($C_v/d\alpha_p$). Este número se relacionará con σ por la ecuación (2).

ENSAYOS DEL CONCRETO - GRANULOMETRIA DE TALBOT ..-Antes de proceder a una evaluación empírica de la relación por la ecuación (2), algunas observaciones serán localizadas para la granulometría sugerida por Talbot y referidas a Coates.

Para la granulometría definida por la ecuación (1) (fig.1), la función densidad está dada por:

$$f(u) = n(1/u_m)^n(\mu)^{n-1} \dots\dots\dots (7)$$

se reemplaza en la ecuación (5) El valor de $d\alpha_p$ luego se

puede calcular de la ecuación (3) y (4). Una dependencia sobre V_p sólo se encuentra para diversos valores de n (fig.2). Talbot encontró experimentalmente que maximizando un esfuerzo el valor n existe para cualquier tamaño de partícula dado u_m . Cualitativamente para relave los tamaños de partícula n varía entre 1 y 2; para agregados gruesos (- 50mm) entre 0.5 y 0.8. Luego de la tabla 1 se tiene el cálculo del número cementador.

CALCULO EMPIRICO DEL RELLENO EN MINA .-En base a informes publicados los valores de a_p y d , se calculó y combinó con C_v para formar el número cementador. Se consideró un conjunto total de 68 rellenos y concretos. Después del resultado numérico la eliminación de la sospecha ó datos inusuales debido a las condiciones peculiar de curado descripción incompleta de condiciones de prueba, etc.

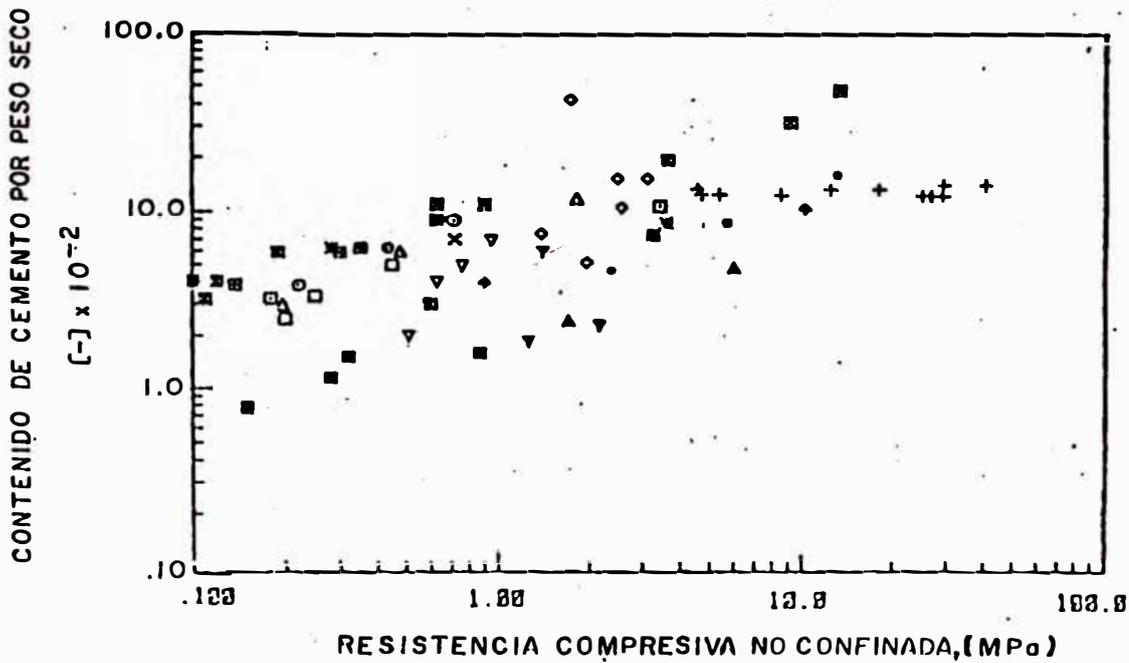


Figura 3

- Resistencia compresiva no confinada del relleno seleccionado de mina y concreto versus el contenido de cemento expresado en % del peso total. El símbolo del relleno se asigna al macizo rocoso cementado (ver tabla 2). Condiciones de curado 28 días y 100% de humedad.

En la figura anterior se representa la convención para el total de datos inicialmente en términos de resistencia compresiva y contenido de cemento en porcentaje en peso. También se acompaña por el símbolo clave, como se muestra en la tabla 2.

De lo anterior surgieron diversas observaciones;

- El incremento del esfuerzo 10 veces puede ser logrado con sólo un incremento nominal en contenido de cemento en porcentaje de peso.
- Incrementa 10 veces el contenido de cemento, porcentaje en peso, no se logra apreciar el incremento de la resistencia. (ver datos de la mina Lockerby).
- Basado en su peso total, el enrocado cementado consume menos cemento que el relleno hidráulico cementado, arena, grava para lograr dar una resistencia compresiva uniaxial.

Explicando estas observaciones en términos de mezcla de componentes expresado por la relación de vacíos, tamaño de las partículas y distribuciones. Para este fin una conversión del contenido de cemento al volumen total en porcentaje (fig. 4), resuelve alguna de las inconsistencias tomando en cuenta el volumen vacío. Permanece sin embargo cuantificado los efectos de la granulometría de la partícula.

Para lograr esto se recurre al coeficiente de uniformidad como:

$$Cu = u_{eo}/u_{io} \dots \dots \dots (8)$$

en el caso de relleno hidráulico (agregado de partículas finas) a sido observado un valor óptimo de 5. La prueba generalmente se estas recomendaciones es el factor adimensional ($C_v * C_u/5$) se calcula para 68 rellenos y concretos en total. Se gráfica el resultado versus la resistencia y se muestra en la figura 5 para diversas clases de intervalos discretos de C_u .

Evidentemente la expresión sirve como un criterio general de diseño.

En contraposición, un gráfico más completo del número cementador fig. 6, muestra una mejora considerable eliminando las dificultades. En consecuencia, las observaciones a) y b) son resueltas inicialmente; el incremento de la resistencia se logra por el aumento del número cementador. Además, dentro de los límites de este cálculo empírico, el número cementador no distingue clases de tamaño de las partículas como es común hacerlo con relleno hidráulico cementado (CHF), relave cementado (CTSF), relleno de roca cementada (CRF), etc. esto es importante para propósitos de diseño de relleno donde generalmente se desea. además, sin un conocimiento anterior (como los ensayos del concreto), no es posible distinguir entre granulometría optima/ no optima de la fig. 6. Una explicación recomendable para el problema acerca del promedio lineal por lo tanto se sitúa en :

-Error experimental y pocos ensayos de control;

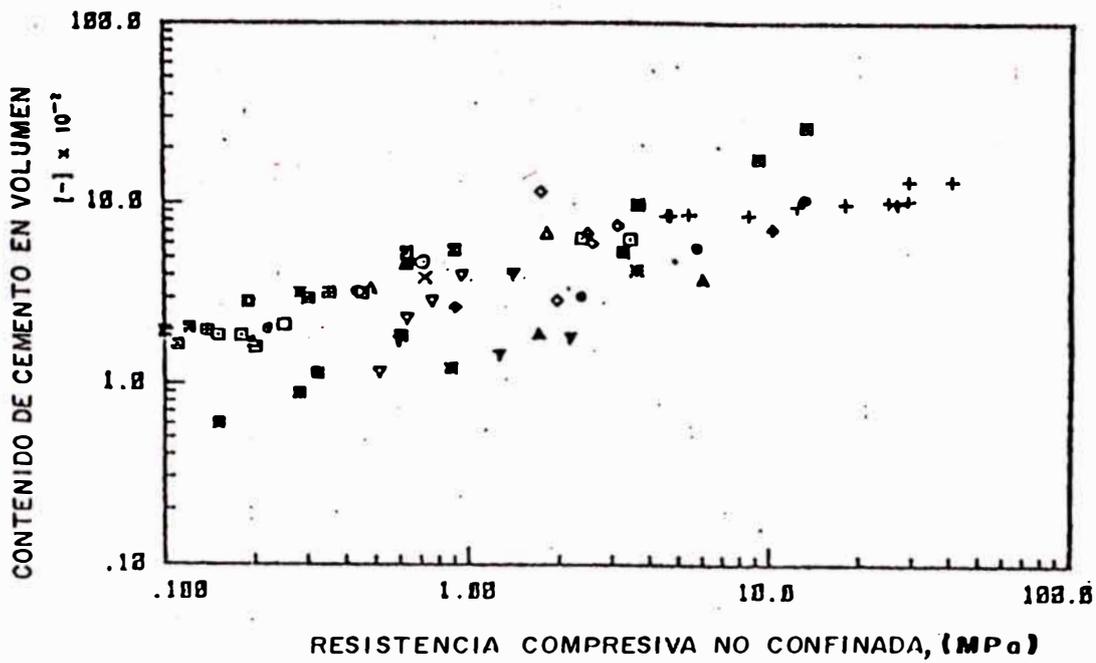


Figura 4 - Resistencia compresiva no confinada de selección de relleno de concreto en mina versus el contenido total de cemento en volumen expresado en % (ver tabla 2 para códigos de símbolos)

TABLA 1 Datos de ensayos del concreto - series 29 de
TALBOT y RICHART

U_m (mm)	n	P	C_v	σ_c (Mpa)	V_p	C_v/\bar{d}_{ap}
0.315	2.0*	0.366	0.085	4.55	0.329	3.21
0.620	1.5*	0.326	0.085	4.69	0.353	3.49
1.41	1.5*	0.298	0.087	5.38	0.369	3.76
2.38	1.0*	0.262	0.086	8.54	0.391	4.03
4.76	1.0	0.217	0.095	12.34	0.413	4.77
9.41	0.9	0.176	0.098	17.86	0.436	5.31
19.00	0.9	0.122	0.101	24.82	0.466	5.99
25.40	0.8	0.114	0.100	26.20	0.472	6.05
38.10	0.8	0.101	0.103	28.75	0.478	6.36
50.80	0.65	0.117	0.098	26.61	0.471	5.96

* Estimados optimos no bien definidos

TABLA 2 Claves para relleno en Mina

Símbolo	Mina, Material
+	Concreto
x	Black Mountain, CTSF
◊	Warrego, CGF
⊠	Strathcona, CHF CTSF
⊞	Garson, CSF
⊗	Levack, CSF
◎	Inco, CHF
◊	Lockerby, CHF
△	Falconbridge, CHF
▽	Mount Isa, CHF
□	Selbaie, CHF
▣	Kiena, CTSF
*	Coal Washery, CRF
▲	Kidd Creek, CRF
▼	Mount Isa, CFR
■	Selbaie, CRF
●	Uludag, CRF
◆	Gavorrano, CRF

Observación:

CTSF = Relave Cementado - Relleno de arena

CGF = Relleno de Grava cementada

CSF = Relleno de arena cementada

CHF = Relleno Hidráulico Cementado

CRF = Relleno de roca cementada

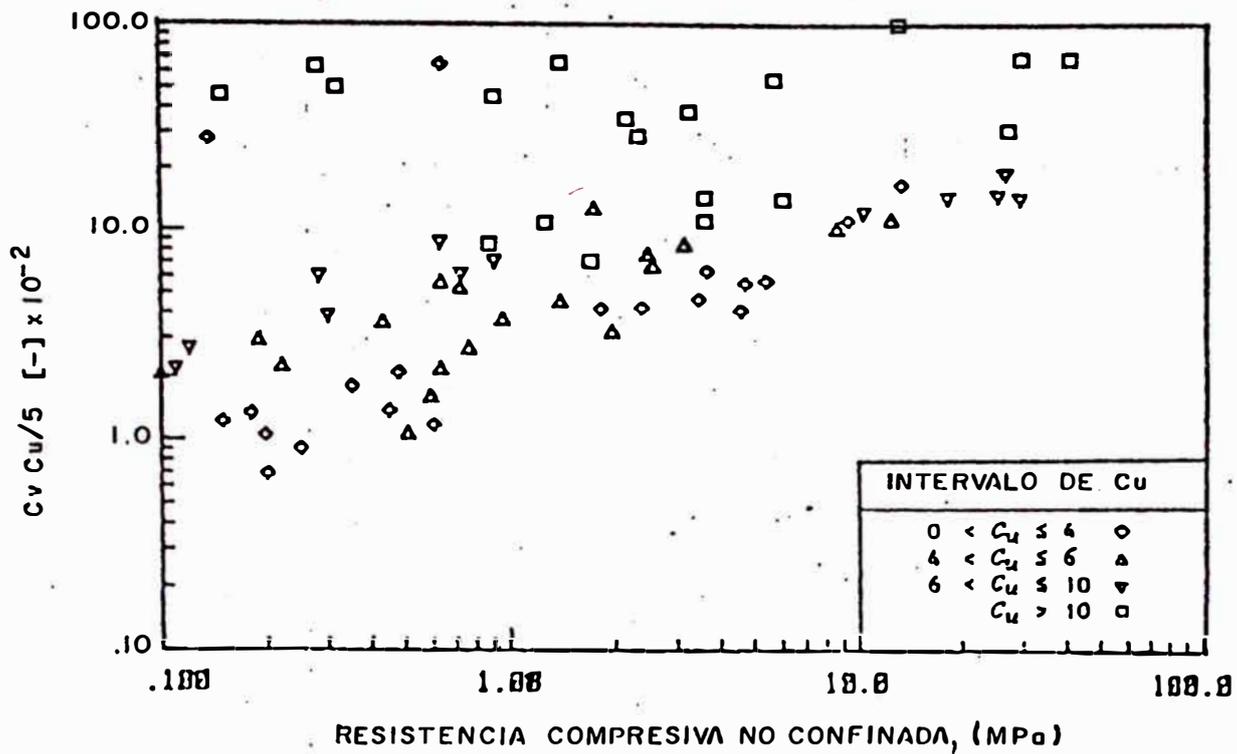


Figura 5 - Resistencia compresiva no confinada de selección de relleno de concretos en mina versus $C_v C_u / 5$. Los símbolos denotan diversas clases de intervalos para C_u .

- Otras temperaturas de curado que el normalizado 20°C
- Diferentes efectos del mineral ó composición química de la material agregado/matriz; y
- Efecto de la forma y tamaño de las partículas.

La línea más aproximada a los datos la da la fig. 6

$$\sigma_c = 0.283 (C_v/\bar{d}_{\alpha P})^{2.36} \dots \dots (9)$$

ANALISIS.- Mientras se resalta el mismo incremento del contenido de cemento por otro lado sin cambiar la mezcla mejorará la resistencia, la influencia de la granulometría es más difícil cuantificarlo. Asumiendo que los datos de Talbot es un indicador de la resistencia óptima para el contenido de cemento y máximo tamaño de partícula, la influencia puede ser importante basado en los cálculos provenientes de la mina (tabla 3). Una explicación tentativa de acuerdo al presente análisis, está situado en el valor numérico formado por el producto $\bar{d}_{\alpha P}$; la resistencia Talbot es óptima debido a un valor mínimo de $\bar{d}_{\alpha P}$; (el valor de \bar{d}/u_{50} puede puede describir mejor la granulometría óptima). Se da el logro de tales valores por reclasificación, la ecuación (9) predice el contenido de cemento para la resistencia deseada de acuerdo a la tabla (3). Dependiendo de la resistencia deseada del relleno, se indica un ahorro de cemento hasta del 20%. en la práctica la forma de sobre-estimar los beneficios de la clasificación debido a las dificultades de colocación de una mezcla de Talbot. Tal vez más convincente es el efecto

sobre la resistencia del incremento al máximo del tamaño de las partículas por el contenido de cemento examinado por talbot (tabla 1). La mejora de la resistencia se logra por la reducción de porosidad con el tamaño máximo de partícula.

Teniendo en cuenta los factores anteriores se puede realizar las siguientes observaciones con respecto al diseño del relleno.

Para cualquier material de relleno. los 28 días, 20°C en laboratorio, la resistencia compresiva no confinada se relaciona empíricamente con el contenido de cemento por:

$$\sigma_c \propto C_v^{2.36} \dots \dots \dots (10)$$

El contenido de agregado grueso sirve al relleno para fijar el contenido de cemento.

Dependiendo de la facilidad de colocación y costo de relleno, el consumo de cemento puede ser favorablemente reducido para proveer un costo de beneficio para el uso juiciosos de la disponibilidad de material. Esto inevitablemente requerirá planear cuidadosamente desde el inicio de una mina en proyecto.

Un cálculo empírico de más de 30 rellenos y concretos de mina (fig. 7), indica que existe una relación general entre el módulo de deformación y resistencia dado por:

$$E = 0.21 \sigma_c^{1.44} \dots \dots \dots (11)$$

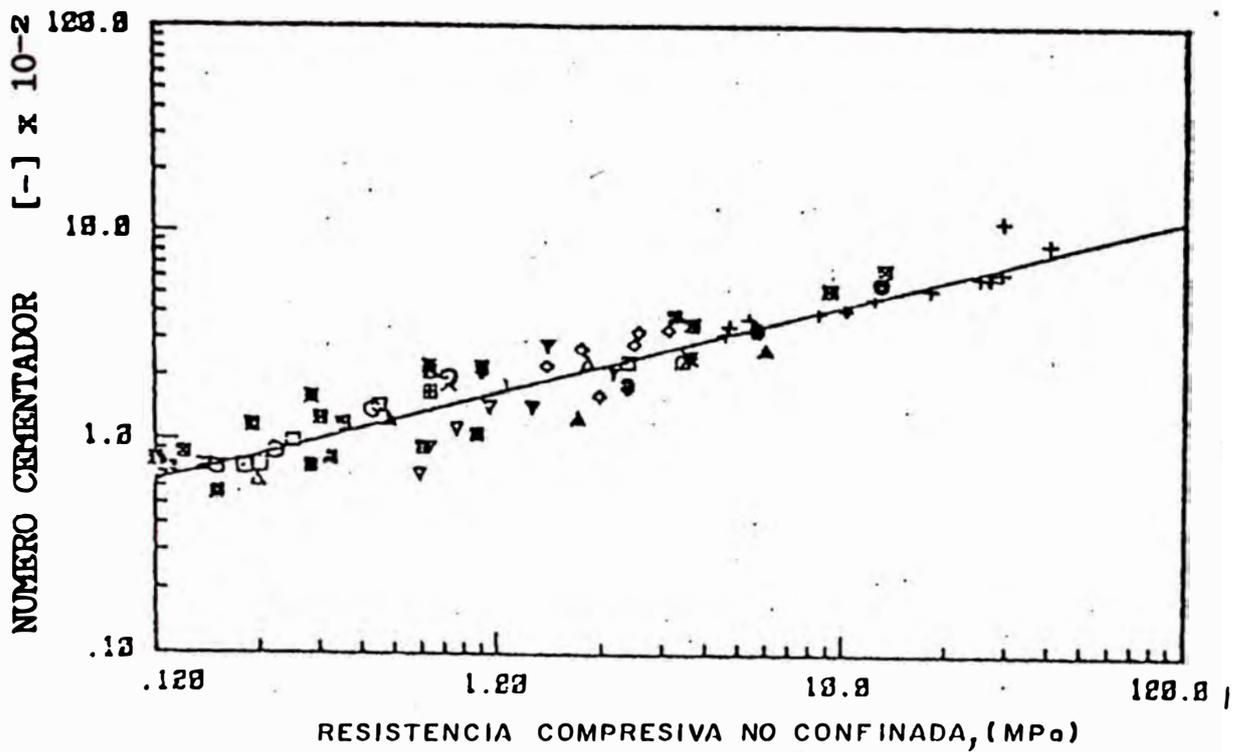


Figura 6

- Selección de la resistencia compresiva no confinada de selección del relleno de mina y concretos versus el número cementador $Cv/\bar{d}ap$ (ver tabla para los códigos de símbolos).

Ref. Datos de Resistencia y aplicación de ecuación (9) a $Cv/\bar{d}ap$ obtenidos de las publicaciones de 68 rellenos y concretos.

EJEMPLO DE DISEÑO.- Los principios mencionados anteriormente están relacionados por un diseño de relleno. Los efectos de temperatura de curado, tamaño de la partícula y gradación del consumo de cemento serán demostrados.

La mina en estudio fue posible proveer las cantidades suficientes de relave clasificado y -100mm de desmote grueso para colocar desde un relleno hidráulico cementado (CHF) hasta un relleno de roca cementada (CRF) con 3.5 : 1 (estéril : relave) en peso. Una resistencia compresiva no confinada de 1MPa se requiere basado en las consideraciones de altura libre estandarizada.

Sin llevar a cabo ningún ensayo, 6 posibles gradaciones fueron analizadas para obtener los valores estimados de \bar{d}_{ap} (tabla 4). Fué tomado en esta fase para evaluar el costo para efectos de la gradación respectiva. Los valores asumidos muestran para V_p , la fracción de volumen agregado, se basa estrictamente en la experiencia y son solamente estimados. Luego usando la ecuación (9), un valor para el requerimiento de cemento C_v para lograr 1MPa de resistencia puede ser calculado por los 6 casos (tabla 4). Estas formas de diseño inicial sirve para dar una indicación de la mezcla requerida, en este caso el CRF es 3.5 : 1. Conociendo el volumen del tajo de la mina para la cual el relleno se destina, puede calcularse un estimado del consumo total de cemento

Las siguientes consideraciones para un estudio del diseño donde se considera los efectos de la temperatura

ambiental a 6°C. en este caso la ecuación general (9) se modifica hasta un grado que requiere pruebas a 6°C para cerciorarse. Se limitó las pruebas, por lo tanto se llevó a cabo para establecer algunas observaciones sobre el $C_v/d\alpha_p - \sigma_o$ diagrama para las condiciones relevantes (fig. 8). Los resultados son observados a causa de la línea general (recta) por razones de llegar a ser en la sección un cálculo empírico. Sin embargo una comparación de datos con gradación idéntica y contenido de cemento demuestran una diferencia en la resistencia debido a la temperatura de curado (fig. 8). Dando como resultado mayor consumo de cemento. realmente los valores de cemento se calculan usando los datos de ensayo y asumiendo la ecuación 10.

Las predicciones de ajuste para el consumo de cemento se muestra en la tabla 5. También se muestra una clasificación, se calcula por colocación de la mezcla óptima del contenido de cemento a mezclar y ajustando los otros en relación a el. Esta forma de clasificación demuestra para esta mina en particular que:

- Para una gradación particular, el requerimiento de cemento se incrementa hasta un 40% dando como resultado una temperatura de curado de 6°C en vez de 20°C;
- El uso óptimo del cemento se logra por la relación máxima de desmonte: relave, ejemplo 3.5:1.
- Un relleno hidráulico cementado consumirá sobre el 300% más cemento que un óptimo relleno de roca cementado para proveer 1 MPa de resistencia.

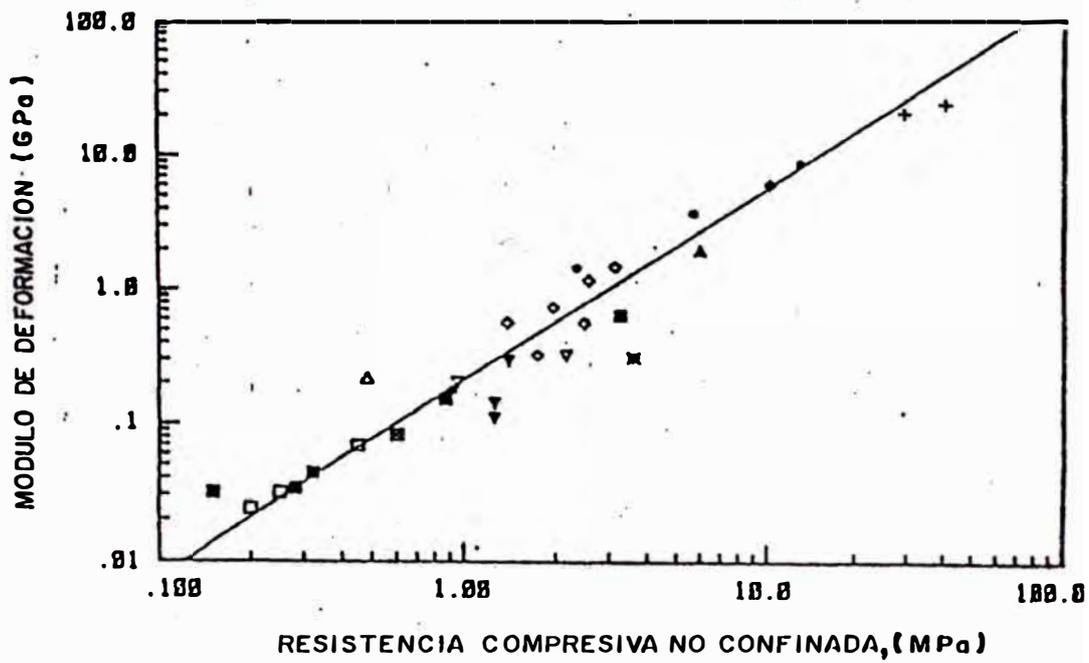


Figura 7 - Resistencia compresiva no confinada de selección de relleno y concretos de mina versus el módulo de deformación (ver tabla 2 para código de símbolos)

Ref. Gráfico generado de datos de resistencia y la ecuación (11).

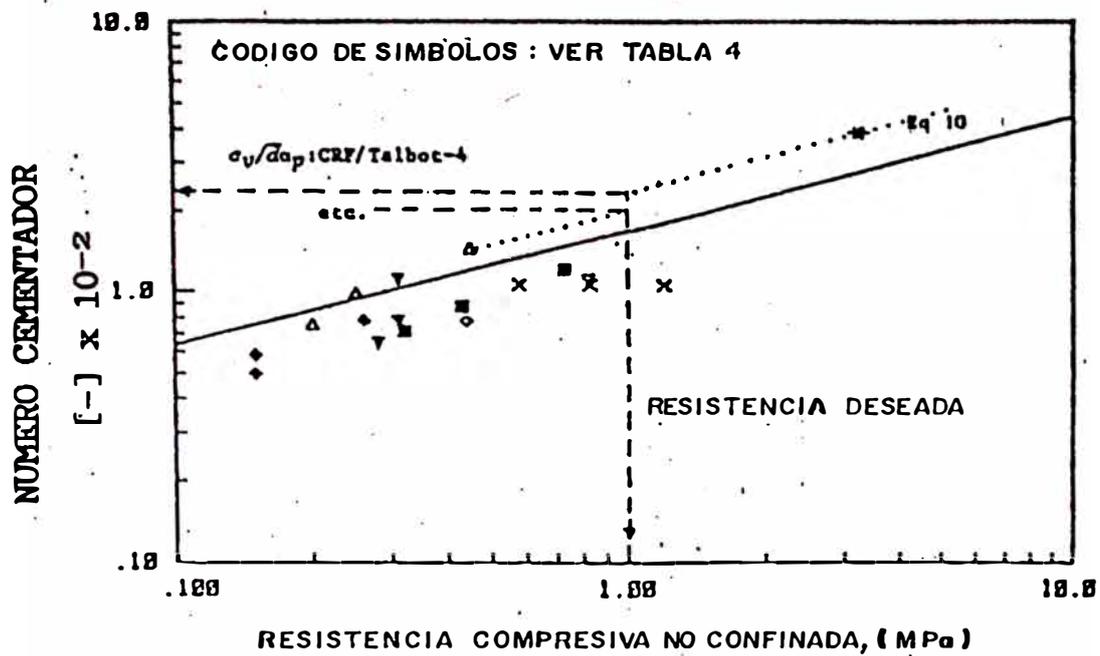


Figura 8. - Datos de prueba para diversos materiales usados para el diseño de relleno de mina. Los símbolos sombreados indican temperatura de curado de 6°C / 70 días; la línea continua representa la relación general.

TABLA 3. Efectos de la reclasificación sobre la resistencia

Mina	Contenido de Cemento (% Vol)	Resistencia Compresiva		Contenido Optimo de Cemento (% Vol)
		Actual-Mina (MPa)	Predicho Talbot (MPa)	
Uludag	10.4	12.90	26.40	8.3
Lockerby	8.5	2.50	4.60	6.7
Selvaie	1.2	0.32	0.87	1.1

Tabla 4 detalles de 6 gradaciones, estudio inicial del diseño

Material; Símbolo	μ_m (mm)	Vp (asumido)	$\bar{d}_{\alpha p}$	Cv ($\sigma_c=1\text{MPa}$)
Gradación de Talbot n = 0.5; X	100	0.45	1.142	1.95
Gradación de Talbot n = 0.5; +	4	0.38	1.376	2.35
Desmorte : Relave 1.3; □	100	0.47	1.385	2.36
Desmorte : Relave 2.1; ▽	100	0.49	1.175	2.00
Desmorte : Relave 3.5; ◇	100	0.50	1.066	1.82
Sólo Relave; Δ	0.25	0.38	2.200	3.75

Tabla 5 Contenido de cemento y Rango para diversos rellenos todos proveen 1MPa de resistencia

Relleno: tipo, temperatura de Curado	Cv (Vol%)	Rango
CHF, 20°C/28 d	3.75	3.21
CRF/Talbot-100, 20°C/28 d	1.48	1.26
CRF/Talbot-4, 20°C/28 d	3.16	2.70
CRF/1.2 : 1, 06°C/70 d	1.87	1.60
CRF/2.1 : 1, 06°C/70 d	1.76	1.50
CRF/2.1 : 1, 20°C/28 d	1.53	1.31
CRF/3.5 : 1, 06°C/70 d	1.60	1.37
CRF/3.5 : 1, 20°C/28 d	1.17	1.00

3.1.2 PROGRAMA DE CALCULO

El programa de cálculo será desarrollado con el paquete matemático mathCAD y aplicado a la Mina Juanita, para lo cual se a desarrollado el siguiente resumen de fórmulas:

El Método basado en el Análisis Granulométrico considera que todos los agregados de las partículas son esféricos, de tamaño variable y dispuestos en una matriz aleatoriamente.

- % en peso que pasa el tamiz de tamaño μ .

$$P(\mu) = 100 (\mu/\mu_m)^n \dots\dots\dots (1)$$

μ_m : Tamaño de la partícula

- $\sigma_c \propto (Cv/\bar{d} \alpha_p)^k \dots\dots\dots (2)$

\bar{d} : Distancia interpartícula promedio libre [m]

α_p : Area superficial de los agregados [m]⁻¹

Cv : Contenido de cemento o volumen de cemento por unidad de volumen seco de relleno colocado recientemente.

- $\alpha_p = 6 [N]_2/[N]_3 \dots\dots\dots (3)$

- $V_p(1+\frac{1}{2}\bar{d}\alpha_p+\frac{1}{2}\bar{d}^2\alpha_p[N]_1/[N]_2+1/6\bar{d}^3\alpha_p[N]_0/[N]_2)=1 \dots\dots(4)$

$$- [N]_1 = \int_{\mu_0}^{\mu_m} \mu^1 * f(\mu) d\mu \dots\dots\dots (5)$$

$f(\mu)$: función de probabilidad de la densidad del total de diámetro de partículas.

μ_o, μ_m : diámetro mínimo y máximo respectivamente.

$\mu_o = \mu_{10} \rightarrow P(\mu_{10}) = 10\%$ en peso que pasa.

V_p : fracción de volumen agregado del total de volumen relleno.

$$- V_p = 0.6(1-p-C_v/100) \dots\dots\dots (6)$$

p : porosidad del relleno.

$C_v/(\bar{d}_{\alpha p})$: número cementador.

$$- f(\mu) = n(1/\mu_m)^n(\mu)^{n-1} \dots\dots\dots (7)$$

n : se determina en la tabla 1

$$- C_u = \mu_{80}/\mu_{10} \dots\dots\dots (8)$$

$$- \sigma_c = 0.283 (C_v/\bar{d}_{\alpha p})^{2.36} \dots\dots\dots (9)$$

- para 28 días y 20°C

$$\sigma_c \propto C_v^{2.36} \dots\dots\dots (10)$$

$$- E = 0.21 \sigma_c^{1.44} \dots\dots\dots (11)$$

E : módulo de elasticidad.

**METODOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA COMPRESIVA
DEL RELLENO CEMENTADO PARA LA MINA JUANITA**

=====

METODO I : (Basado en el análisis granulométrico)

Datos :

Tamaño de las partículas en mm.

$$\mu_0 := 0.017 \quad \dots\dots\dots D_{10}$$

$$\mu_m := 0.841 \quad \dots\dots\dots D_{max}$$

Contenido de cemento

$$V_c := 1 \quad \dots\dots\dots \text{Volumen de cemento}$$

$$V_{rs} := 20 \quad \dots\dots\dots \text{Volumen de relleno seco}$$

Número Adimensional encontrado experimentalmente por Talbot

$$n := 1.5$$

Porosidad para el material de relleno

$$p := 0.55$$

Programa de Cálculo

$$C_v := \frac{V_c}{V_{rs} + V_c} \cdot 100 \quad \quad \quad C_v = 4.762$$

$$V_p := 0.6 \cdot \left[1 - p - \frac{C_v}{100} \right] \quad \quad \quad V_p = 0.241$$

$$i := 0 \dots 3$$

$$N_i := \int_{\mu_0}^{\mu_m} \mu^i \cdot n \cdot \left[\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu_m} \right]^n \cdot \mu^{n-1} d\mu$$

N

1

0.997
0.505
0.303
0.198

v := 0.997
x := 0.505
y := 0.303
z := 0.198

$$\alpha_p := 6 \cdot \begin{bmatrix} y \\ - \\ z \end{bmatrix}$$

$$\alpha_p = 9.182$$

$$\bar{d} := 3$$

$$\text{root} \left[V_p \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \bar{d} \cdot \alpha_p + \frac{1}{2} \bar{d}^2 \cdot \alpha_p \cdot \frac{x}{y} + \frac{1}{6} \bar{d}^3 \cdot \alpha_p \cdot \frac{v}{y} \right] - 1, \bar{d} \right] = 0.381$$

$$A := 0.381$$

$$\sigma_c := 0.283 \cdot \left[\frac{C_v}{A \cdot \alpha_p} \right]^{2.36}$$

$$\sigma_c = 0.586 \quad \text{Mpa}$$

**METODOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA COMPRESIVA
DEL RELLENO CEMENTADO PARA LA MINA JUANITA**

=====

METODO I : (Basado en el análisis granulométrico)

Datos :

Tamaño de las partículas en mm.

$$\mu_0 := 0.017 \quad \dots\dots\dots D_{10}$$

$$\mu_m := 0.841 \quad \dots\dots\dots D_{max}$$

Contenido de cemento

$$V_c := 1 \quad \dots\dots\dots \text{Volumen de cemento}$$

$$V_{rs} := 24 \quad \dots\dots\dots \text{Volumen de relleno seco}$$

Número Adimensional encontrado experimentalmente por Talbot

$$n := 1.5$$

Porosidad para el material de relleno

$$p := 0.55$$

Programa de Cálculo

$$C_v := \frac{V_c}{V_{rs} + V_c} \cdot 100 \quad \quad \quad C_v = 4$$

$$V_p := 0.6 \cdot \left[1 - p - \frac{C_v}{100} \right] \quad \quad \quad V_p = 0.246$$

$$i := 0 \dots 3$$

$$N_i := \int_{\mu_0}^{\mu_m} \mu^i \cdot n \cdot \left[\frac{1}{\mu} \right]^n \cdot \mu^{n-1} \cdot d\mu$$

N	i
0.997	
0.505	
0.303	
0.198	

$v := 0.997$
 $x := 0.505$
 $y := 0.303$
 $z := 0.198$

$$\alpha_p := 6 \cdot \begin{bmatrix} y \\ - \\ z \end{bmatrix}$$

$$\alpha_p = 9.182$$

$$\bar{d} := 3$$

$$\text{root} \left[V_p \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \bar{d} \cdot \alpha_p + \frac{1}{2} \cdot \bar{d}^2 \cdot \alpha_p \cdot \frac{x}{y} + \frac{1}{6} \cdot \bar{d}^3 \cdot \alpha_p \cdot \frac{v}{y} \right] - 1, d \right] = 0.375$$

$$A := 0.375$$

$$\sigma_c := 0.283 \cdot \left[\frac{C_v}{A \cdot \alpha_p} \right]^{2.36}$$

$$\sigma_c = 0.403 \text{ Mpa}$$

**METODOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA COMPRESIVA
DEL RELLENO CEMENTADO PARA LA MINA JUANITA**

=====

METODO I : (Basado en el análisis granulométrico)

Datos :

Tamaño de las partículas en mm.

$$\mu_0 := 0.017 \quad \dots \quad D_{10}$$

$$\mu_m := 0.841 \quad \dots \quad D_{max}$$

Contenido de cemento

$$V_c := 1 \quad \dots \quad \text{Volumen de cemento}$$

$$V_{rs} := 30 \quad \dots \quad \text{Volumen de relleno seco}$$

Número Adimensional encontrado experimentalmente por Talbot

$$n := 1.5$$

Porosidad para el material de relleno

$$p := 0.55$$

Programa de Cálculo

$$C_v := \frac{V_c}{V_{rs} + V_c} \cdot 100 \quad C_v = 3.226$$

$$V_p := 0.6 \cdot \left[1 - p - \frac{C_v}{100} \right] \quad V_p = 0.251$$

$$i := 0 \dots 3$$

$$N_i := \int_{\mu_0}^{\mu_m} \mu^i \cdot n \cdot \left[\frac{1}{\mu_m} \right]^n \cdot \mu^{n-1} \cdot d\mu$$

N
1
0.997
0.505
0.303
0.198

$v := 0.997$
 $x := 0.505$
 $y := 0.303$
 $z := 0.198$

$$\alpha_p := 6 \cdot \begin{bmatrix} y \\ - \\ z \end{bmatrix}$$

$$\alpha_p = 9.182$$

$$\bar{d} := 3$$

GIVEN

$$v_p \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \bar{d} \cdot \alpha_p + \frac{1}{2} \cdot \bar{d}^2 \cdot \alpha_p \cdot \frac{x}{y} + \frac{1}{6} \cdot \bar{d}^3 \cdot \alpha_p \cdot \frac{v}{y} \right] \approx 1$$

$$\text{FIND}(\bar{d}) = 0.369$$

$$A := 0.369$$

$$\sigma_c := 0.283 \cdot \left[\frac{Cv}{A \cdot \alpha_p} \right]^{2.36}$$

$$\sigma_c = 0.252 \text{ Mpa}$$

3.2 METODO BASADO EN LAS PROPIEDADES FISICAS Y MINERALOGICAS

En esta parte se describiera los efectos de la adición de cemento para diferentes dosajes, 6 materiales diferentes de relleno, cada uno con 3 contenidos de cemento, se ensayaron para determinar que propiedades del relleno tienen efecto importante sobre resistencia. Basado en las propiedades físicas y mineralógicas del relleno, se formuló 2 ecuaciones para la predicción de la resistencia compresiva, y estas son consideradas para un 96 a 99% de la variabilidad de los datos para ensayos de resistencia compresiva no confinada del relleno cementado.

3.2.1 FUNDAMENTO TEORICO

INTRODUCCION.- El buró de minas se a encargado de la investigación del relleno hidráulico desde 1961. La primera fase de esta investigación se a ocupado de la resistencia de los materiales de relleno por compactación vibratoria y por adición del cemento al relleno. El uso de relleno cementado se a incrementado para facilitar la explotación debajo a adyacentes a áreas rellenadas, los métodos de explotación descendentes para proveer una resistencia a la abrasión de los pisos e incrementar la capacidad de transporte del relleno. En el presente estudio se ensayaron con más de 7 materiales de relleno para determinar el efecto de sus características físicas y mineralógicas sobre la estabilización.

MATERIALES DE ENSAYO .- Se usaron en este estudio 8 materiales de relleno, generalmente relaves como relleno hidráulico. Las propiedades físicas y mineralógicas de el relave se dan en la tabla 6.

TABLA 6 PROPIEADES DEL RELLENO

MINA	PROPIEADES FISICAS					PROPIEADES MINERALOGICAS CONTENIDO DEL MINERAL PRINCIPAL (%)					
	menos del 20%	de 10% finos (mm)	de 10% finos (mm)	Cu	GE	Si	Fe	Al	Mg	Ca	Mn
A	11.5	.110	.0165	6.67	2.85	32.1	8.11	3.05	0.57	0.16	1.10
B	3.2	.148	.0304	4.87	2.83	33.8	7.94	2.87	0.03	0.16	1.10
D	(1)	.132	.0420	3.14	3.15	18.6	22.40	1.82	0.67	0	2.04
G	3.5	.106	.0360	2.94	3.35	11.1	25.00	0.50	0.48	6.30	1.34
C	5.8	.114	.0320	3.56	3.31	17.4	24.00	0.95	0.67	0.17	2.06
E	2.2	.058	.0288	2.01	2.82	31.6	9.84	1.37	0.38	0.17	1.11
H	.0	.280	.1180	2.37	2.96	29.0	6.45	4.37	0.37	0.13	1.10
J	5.5	.105	.0250	4.20	2.80	29.7	4.42	6.36	1.91	1.62	0.13

(1) no determinado

En el estudio inicial se estableció el siguiente procedimiento. Toda muestra de relleno ó aditivo se mezcla con un contenido de agua de 30% en peso de material seco. En los ensayos de la resistencia compresiva no confinada, previamente la muestra se cura, en un horno.

RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE LA RESISTENCIA COMPRESIVA NO CONFINADA .- En este estudio, el relave se mezcló con arena y cemento en cilindros. El promedio de resistencia compresiva no confinada de los 8 diferentes materiales de relleno, para 3 relaciones de arena - cemento. Se muestra en la tabla 7.

TABLA 7 Resistencia Compresiva no Confinada del Relleno Cementado después de 7 días, PSI.

Relac. arena cemento	Relleno							
	A	B ¹	D	G	C	E	H	J
40 a 1	40.6	24.8	20.2	26.0	22.7	16.1	(2)	26.6
20 a 1	99.3	72.9	42.2	75.2	65.3	45.2	5.8	55.4
5 a 1	404.2	711.1	434.6	250.6	373.3	540.1	33.	380.4

- (1) Resultados obtenido con previa investigación.
 (2) Resultado insuficientes para permitir el ensayo.

La variedad extremo de estos resultados se inició con un análisis de regresión para determinar que propiedades físicas y mineralógicas del relleno a tenido el mayor efecto significativo sobre la resistencia del relleno cementado. Se incluyeron en el análisis 6 de los materiales de relleno para el ensayo (todos menos las minas D y H). Se muestran en la tabla 6 las propiedades físicas y el contenido principal de minerales en porcentaje; se

incorporó en el análisis el contenido de cemento y la resistencia correspondiente.

Corridas sucesivas usando estos valores, así como transformación a logaritmo de los valores y sus iteraciones, se desarrolló una iteración que se adecua mejor a los datos. Esto resultó en la formulación de 2 ecuaciones.

La primera es una ecuación relativamente fácil, que cuenta con el 96% de la variabilidad de los datos:

$$\ln \text{ strength}(\text{psi}) = 8.271565 + 1.482918 \ln \text{ cement} + 0.1129835\text{Cu} \dots\dots\dots(12)$$

Donde: Cu: Coeficiente de Uniformidad (D_{60}/D_{10}),

D_{60}, D_{10} : Tamaño del diámetro de 60%, 10% de finos en milímetros, respectivamente.

Una comparación con los resultados de laboratorio con la resistencia determinada por la ecuación (12) se muestra gráficamente en la figura 9.

La segunda ecuación más sofisticada, que cuenta con el 99% de la variabilidad de los datos.

$$\begin{aligned} \ln \text{ strength}(\text{psi}) = & 10.31302 + 2.3168941 \ln \text{ cmt} + 2.617651 \\ & (D_{60} \times \text{Cu}) + 0.4686402 (\text{cmt} \times \text{Si}) + 2.617396 (\text{cmt} \times \text{Cu}) \\ & 0.88506271 \ln (\text{cmt} \times \text{Si}) - 11.59489 D_{60} + 62.96924 (\text{cmt} \times D_{60}) \\ & 8.250270 \text{ cmt} - 0.3077579 \ln D_{10} \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

Donde: cmt = contenido de cemento y

Si = contenido de silicio en el relave.

Una comparación de la resistencia estimada usando la ecuación (13) y la resistencia determinada en el laboratorio se muestra en la figura 10.

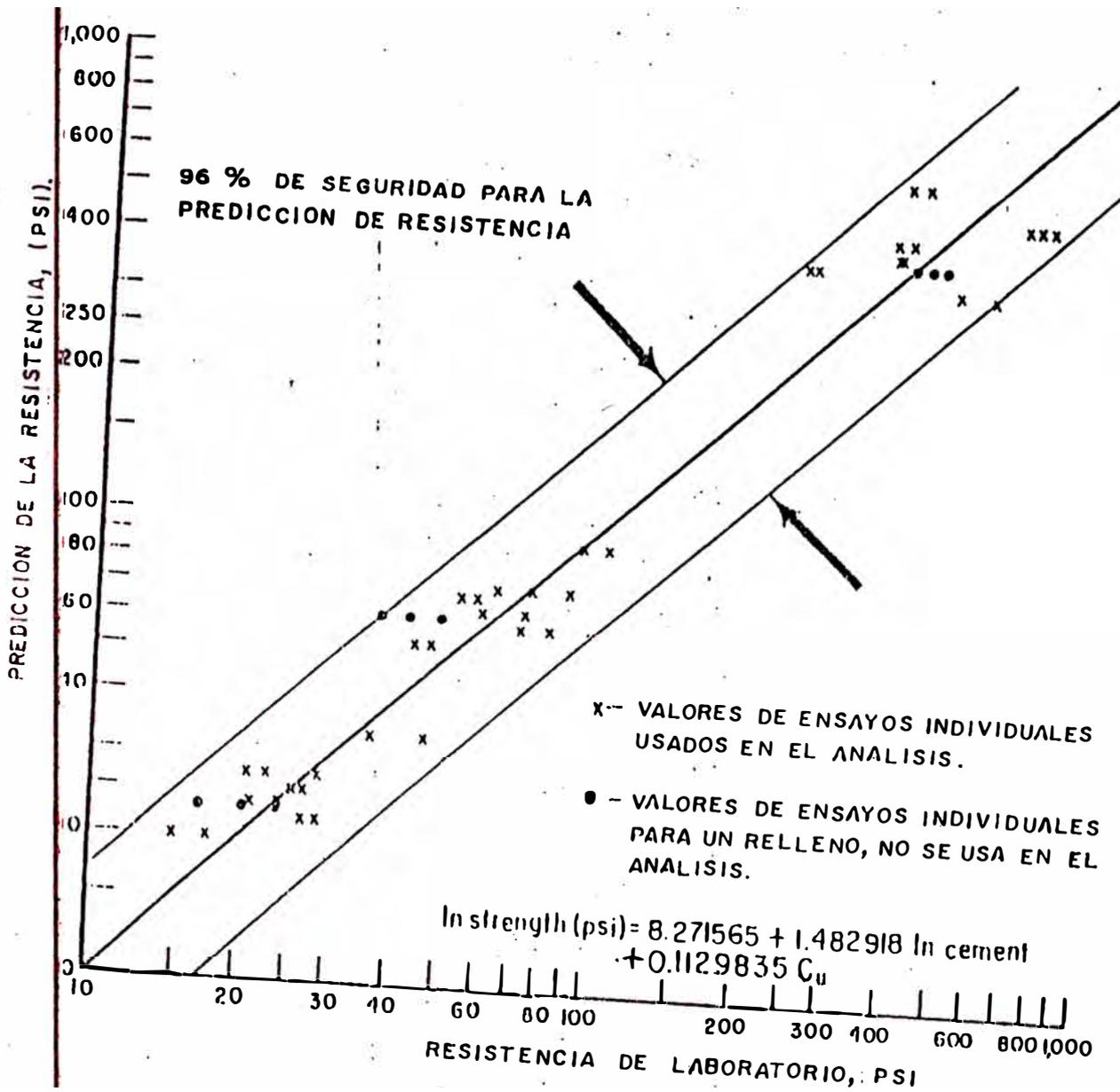


FIGURA N° 9 - COMPARACION DE LA RESISTENCIA VERDADERA Y LA PREDICHA (Ec.12).

Ref. Gráfico generado en base a la tabla 6, tabla 7 y la ecuación (12).

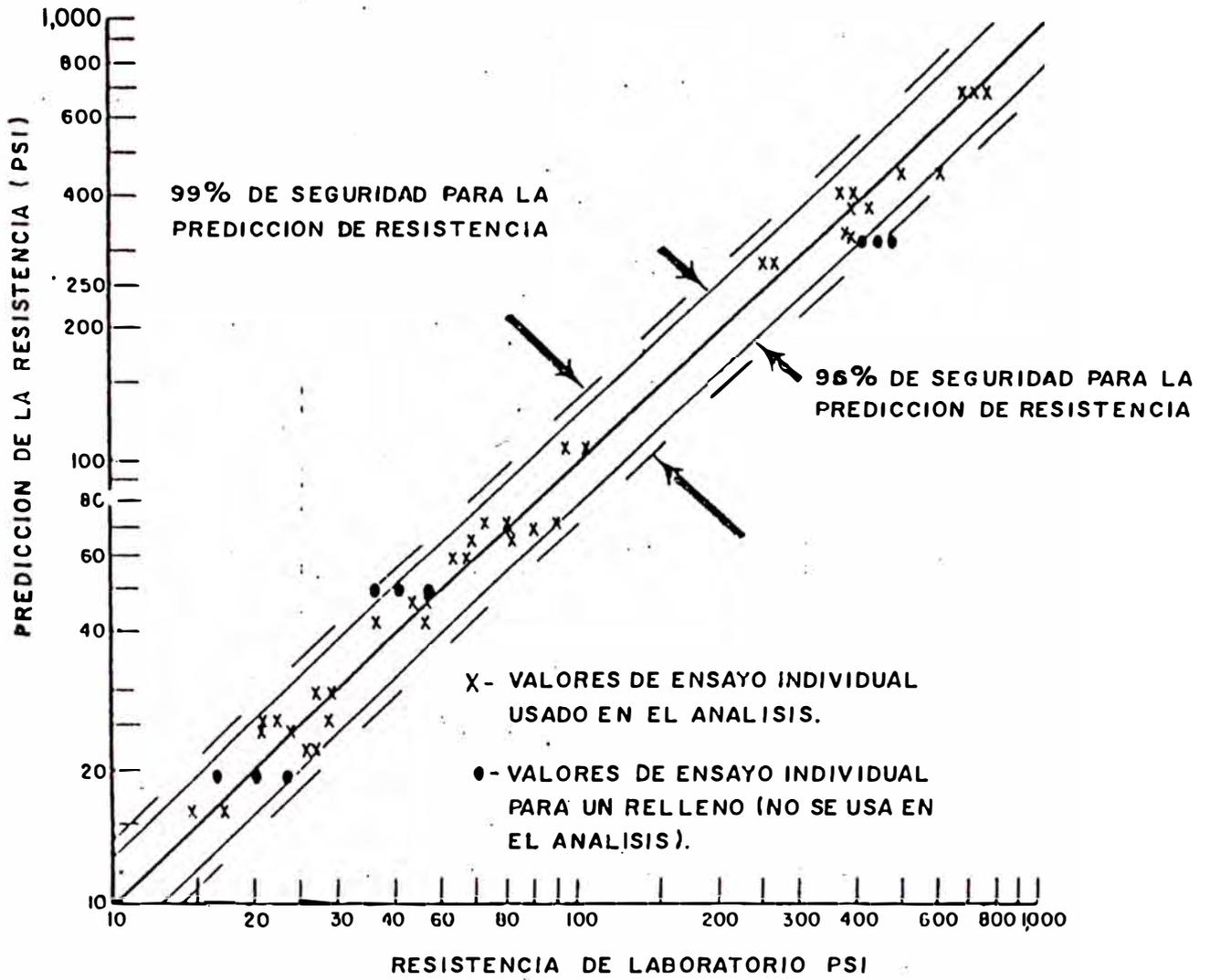


FIGURA Nº 10 - COMPARACION DE LA RESISTENCIA VERDADERA Y PREDICHA (Ec.13).

3.2.2 PROGRAMA DE CALCULO

El programa de cálculo sera desarrollado con el paquete matemático mathCAD y aplicado a la Mina Juanita, para lo cual se ha desarrollado el siguiente resumen de fórmulas:

El Método basado en las Propiedades Físicas y Mineralógicas, considera un análisis de regresión para determinar las propiedades físicas y mineralógicas que producen estimados razonables de resistencia para rellenos que caen dentro de los rangos usados en el análisis.

- La ecuación 12 cuenta con un 96% de la variabilidad de los datos.

$$\ln \text{ strength (psi)} = 8.271565 + 1.482918 * \ln(\text{cmt}) + 0.1129835 * \text{Cu} \dots\dots\dots (12)$$

Donde:

Cu : coeficiente de uniformidad.

cmt: contenido de cemento

- La ecuación 13 cuenta con un 99% de la variabilidad de los datos.

$$\begin{aligned} \ln \text{ strength (psi)} = & 10.31302 + 2.316894 * \ln(\text{cmt}) + \\ & 2.617651(\text{D}_{60} * \text{Cu}) + 0.4686402(\text{cmt} * \text{Si}) - 2.617396(\text{cmt} * \text{Cu}) - \\ & 0.8850627 * \ln(\text{cmt} * \text{Si}) - 11.59489\text{D}_{60} + 62.96924(\text{cmt} * \text{D}_{60}) - \\ & 0.250270\text{cmt} - 0.3077579 * \ln(\text{D}_{10}) \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

Donde:

$\text{D}_{60}, \text{D}_{10}$: tamaño del diámetro de 60%, 10% de finos en milímetros respectivamente.

Si : contenido de silicio en el relave.

**METODOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA COMPRESIVA
DEL RELLENO CEMENTADO PARA LA MINA JUANITA**

=====

METODO II : (BASADO EN LAS PROPIEDADES FISICAS Y MINERALOGICAS)

Datos :

Contenido de Cemento y Silice

$$cmt := \frac{1}{21} \quad cmt = 0.048$$

$$Si := 10.38$$

Tamaño de las partículas en mm.

$$\mu_{60} := 0.179353$$

$$\mu_{10} := 0.017064$$

Programa de cálculo

Coefficiente de Uniformidad

$$Cu := \frac{\mu_{60}}{\mu_{10}} \quad Cu = 10.511$$

Ecuación I que cuenta con el 96 % de seguridad de la variabilidad de los datos.

$$R1 := 0.006895 \cdot \exp(8.271565 + 1.482918 \cdot \ln(cmt) + 0.1129835 \cdot Cu)$$

$$R1 = 0.968 \text{ MPa}$$

Ecuación II, que cuenta con el 99% de seguridad de la variabilidad de los datos.

$$R2 := 0.006895 \cdot \exp \left[\begin{array}{l} 10.31302 + 2.316894 \cdot \ln(cmt) \dots \\ + 2.617651 \cdot \mu_{60} \cdot Cu + 0.4686402 \cdot cmt \cdot Si \dots \\ + (-2.617396 \cdot cmt \cdot Cu) - 0.8850627 \cdot \ln(cmt \cdot Si) \dots \\ + \left[-11.59489 \cdot \mu_{60} \right] + 62.96924 \cdot cmt \cdot \mu_{60} \\ + (-8.25027 \cdot cmt) - 0.3077579 \cdot \ln \left[\mu_{10} \right] \end{array} \right]$$

$$R2 = 8.006 \text{ MPa}$$

**METODOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA COMPRESIVA
DEL RELLENO CEMENTADO PARA LA MINA JUANITA**

=====

METODO II : (BASADO EN LAS PROPIEDADES FISICAS Y MINERALOGICAS)

Datos :

Contenido de Cemento y Silice

$$cmt := \frac{1}{25} \quad cmt = 0.04$$

$$Si := 10.38$$

Tamaño de las partículas en mm.

$$\mu_{60} := 0.179353$$

$$\mu_{10} := 0.017064$$

Programa de cálculo

Coefficiente de Uniformidad

$$Cu := \frac{\mu_{60}}{\mu_{10}} \quad Cu = 10.511$$

Ecuación I que cuenta con el 96 % de seguridad de la variabilidad de los datos.

$$R1 := 0.006895 \cdot \exp(8.271565 + 1.482718 \cdot \ln(cmt) + 0.1129835 \cdot Cu)$$

$$R1 = 0.747 \text{ MPa}$$

Ecuación II, que cuenta con el 99% de seguridad de la variabilidad de los datos.

$$R2 := 0.006895 \cdot \exp \left[\begin{array}{l} 10.31302 + 2.316894 \cdot \ln(cmt) \dots \\ + 2.617651 \cdot \mu_{60} \cdot Cu + 0.4686402 \cdot cmt \cdot Si \dots \\ + (-2.617396 \cdot cmt \cdot Cu) - 0.8850627 \cdot \ln(cmt \cdot Si) \dots \\ + \left[-11.59489 \cdot \mu_{60} \right] + 62.96924 \cdot cmt \cdot \mu_{60} \dots \\ + (-8.25027 \cdot cmt) - 0.3077579 \cdot \ln \left[\mu_{10} \right] \end{array} \right]$$

$$R2 = 7.242 \text{ MPa}$$

MÉTODOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA COMPRESIVA
DEL RELLENO CEMENTADO PARA LA MINA JUANITA

MÉTODO II : (BASADO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MINERALÓGICAS)

Datos :

Contenido de Cemento y Silice

$$cmt := \frac{1}{31} \quad cmt = 0.032$$

$$Si := 10.38$$

Tamaño de las partículas en mm.

$$\mu_{60} := 0.179353$$

$$\mu_{10} := 0.017064$$

Programa de cálculo

Coefficiente de Uniformidad

$$Cu := \frac{\mu_{60}}{\mu_{10}} \quad Cu = 10.511$$

Ecuación I que cuenta con el 96 % de seguridad de la variabilidad de los datos.

$$R1 := 0.006895 \cdot \exp(8.271565 + 1.482918 \cdot \ln(cmt) + 0.1129835 \cdot Cu)$$

$$R1 = 0.543 \text{ MPa}$$

Ecuación II, que cuenta con el 99% de seguridad de la variabilidad de los datos.

$$R2 := 0.006895 \cdot \exp \left[\begin{array}{l} 10.31302 + 2.316894 \cdot \ln(cmt) \dots \\ + 2.617651 \cdot \mu_{60} \cdot Cu + 0.4686402 \cdot cmt \cdot Si \dots \\ + (-2.617396 \cdot cmt \cdot Cu) - 0.8850627 \cdot \ln(cmt \cdot Si) \dots \\ + \left[-11.59489 \cdot \mu_{60} \right] + 62.96924 \cdot cmt \cdot \mu_{60} \dots \\ + (-8.25027 \cdot cmt) - 0.3077579 \cdot \ln \left[\mu_{10} \right] \end{array} \right]$$

$$R2 = 6.195 \text{ MPa}$$

OTROS METODOS

A continuación describimos otros métodos para determinar la resistencia compresiva uniaxial para la operatividad del relleno cementado, los cuales dependen fundamentalmente del contenido de cemento, la relación (agua/cemento) y el número de rebotes del martillo Schmidt.

El máximo valor de resistencia que pueden tener el relleno cementado está dado por:

$$\sigma_c = 0.037 (M_c)^{1.39}$$

Donde:

σ_c : Resistencia compresiva uniaxial Kg/cm²

M_c : Cantidad de cemento Kg/m³

El mínimo valor de resistencia que puede alcanzar un relleno cementado está dado por:

$$\sigma_c = 80.27 (\alpha)^{-1.53}$$

Donde:

α : Relación Kg/m³ de agua/cemento.

Para el cálculo de la resistencia insitu del relleno cementado sin destruir muestras y determinarlo en cuestión de minutos se realiza con el martillo Schmidt y viene dado por:

$$\sigma_c = 0.00255 (\gamma R^2)^{1.47}$$

Donde:

γ : densidad del relleno cementado

R : número de rebotes del martillo schmidt.

3.3 COMPARACION ENTRE LOS METODOS PRACTICOS Y EXPERIMENTALES CALCULADOS EN EL LABORATORIO

De reportes de ensayos en el laboratorio para la resistencia compresiva no confinada del relleno hidráulico cementado y de los cálculos realizados por los métodos prácticos aplicados a la Mina Juanita se tiene el siguiente cuadro:

MEZCLA	RESISTENCIA COMPRESIVA NO CONFINADA DEL RELLENO HIDRAULICO CEMENTADO		
	Laborat. (MPa)	Método 1 (MPa)	Método 2 (MPa)
1/20	0.573	0.586	0.968
1/24	-----	0.403	0.747
1/30	0.207	0.252	0.543

Una característica importante para el cálculo de la resistencia del relleno cementado es el tiempo de curado; en tecnología del concreto y en algunas minas se asume como tiempo estándar de curado 28 días, en otras minas se asume como tiempo de curado del relleno cementado hasta 120 días (caso de Mina Juanita).

Para el caso en la Mina Juanita; a partir de los reportes de los ensayos de laboratorio para determinar las propiedades mecánicas del relleno cementado en especial de la resistencia compresiva no confinada versus el tiempo de curado, se tiene que a los 28 días, se alcanza aproximadamente el 70% de la resistencia correspondiente a los 56 días; y a partir de los 56 días, la resistencia tiende a estabilizarse ó experimenta un incremento muy pequeño.

Del cuadro referente a la comparación entre los Métodos Prácticos y experimentales se observa que el Método 1 (basado en el ANALISIS GRANULOMETRICO). se aproxima a los datos de laboratorio con un error promedio del 15%.

Por otro lado el método 2 (basado en las propiedades FISICAS Y MINERLOGICAS), se obtienen resistencias altas, esto se debe a que los parámetros ó propiedades del Relleno de la Mina Juanita no caen dentro de los rangos establecidos por este método, por lo tanto no es aplicable para este caso.

RESUMEN HISTORICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS ASOCIADOS AL RELLENO CEMENTADO PARA LA MINA JUANITA (periodo 1989-1990)

Mezclas	ANALISIS GARNULOMETRICO (mallas)					σ_c MPa	CARACTERISTICAS DE LOS RELAVES	
	+50	+100	+200	+325	-325			
1/24	9.16	15.06	21.00	12.33	42.45	1.41	RED RELAVES	40%
1/24	7.09	14.83	33.54	11.94	32.60	0.68	RED RELAVES ARENA	30% (3) (1)
1/23	11.47	18.70	20.73	11.41	37.89	0.77	RED RELAVES ARENA	30% (4) (1)
1/23	3.00	10.08	29.26	12.46	45.20	1.02	RED RELAVES ARENA	30% (3) (1)
1/22	7.19	13.19	33.64	12.57	33.41	1.17	RED RELAVES ARENA	30% (3) (1)
1/21	13.10	10.84	23.24	13.36	39.46	0.93	RED RELAVES ARENA	30% (2) (1)
1/20	4.44	17.62	27.99	11.96	37.99	0.98	RED RELAVES ARENA	30% (3) (1)
1/29	16.02	12.52	20.22	12.64	28.60	0.77	RED RELAVES ARENA	30% (2) (1)

Del cuadro de datos de resumen Histórico se observa que para el caso de análisis granulométrico el relleno que entra a mina en la malla -325 tiene alrededor del 40% de finos parámetros que diariamente es controlado. En caso que exceda el 40% finos, entonces se mezcla con arena gruesa para bajar el porcentaje de finos en el relleno, esto implica que hay que pedir más viajes de arena gruesa. En caso que sea inferior al 40% de finos se adiciona arena fina.

El control de calidad del relleno se lleva cabo en planta (control de dosaje y densidad) y en mina (dando el requerimiento de resistencia, determinando si el material de relleno es óptima y extrayendo 6 muestras como mínimo por tajo relleno para ensayos a la compresión).

La variación de resistencia para un mismo tipo de mezcla se debe ya sea a la variación de densidad, contenido de finos y fundamentalmente al control de dosaje.

CAPITULO IV

OPERATIVIDAD DEL RELLENO HIDRAULICO CEMENTADO

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE RELLENO

En un proceso de relleno hidráulico siempre conlleva un ciclo de trabajo, iniciándose cuando en el ciclo de minado del método de explotación indica la fase de relleno del tajo o cavidad que se encuentra limpio de mineral.

4.1.1 PREPARACION DEL TAJEO O CAVIDAD POR RELLENAR

La preparación del tajeo o cavidad por rellenar es un trabajo previo que consiste en efectuar determinados trabajos bajo ciertos criterios técnicos a fin de evitar posibles escapes de relleno durante el proceso de rellenado y/o en el drenaje para esto se realiza:

Construir tapones de contención; se realizan con tablas y redondos tapando el crucero de drenaje; para garantizar la presión hidrostática que ejerce el relleno, los redondos son fijados con grampas de fierro de 1 pulgada.

Colocar tejido permeable; la construcción de los tapones es cubierta con tela permeable (Terram ICI).

Esto evita la fuga del material de relleno, por este motivo se dejan ventanas de 60 cm. de ancho por 40 cm de altura; fuga de relave a consecuencia de no estar bien sellado los bordes del tapón con mezcla de cemento-yeso en igual proporción y por estar fugando el relave por fracturas.

Dispositivos de drenaje; con el propósito de ayudar y mejorar el drenaje se colocan tubos.

Rellenado de la labor; se procede al envío de relleno teniendo en cuenta que a la altura del tapón se debe tener mayor cuidado de fugas y posible rotura del tapón.

4.1.2 REQUERIMIENTO DE RELLENO

Esto se refiere a calcular el requerimiento de resistencia compresiva no confinada del R/H C para de esta manera asegurar la estabilidad de la labor. También se calcula la cantidad de relleno necesario para una producción diaria determinada.

REQUERIMIENTOS DE RESISTENCIA.- los requerimientos de resistencia del relleno cementado para los tajos primarios, ha sido determinado utilizando los conceptos de pared vertical y talud vertical.

La figura 11, muestra las condiciones de falla de un bloque confinado de relleno cementado en un tajo primario, en este bloque, cuando se recupera el pilar adyacente el relleno cementado quedará expuesto en su superficie ABCD, la cual es asemejada a un talud vertical. El asegurar la

estabilidad de este talud, mediante un análisis a través de la superficie potencial de falla asumida, significará el dimensionamiento de la resistencia del relleno para mantener auto estable la pared vertical. De este modo, el relleno cementado brindará soporte al área global de minado y asistirá a la recuperación de pilares.

El talud vertical lo analizamos por equilibrio límite, utilizando el criterio de falla de Coulomb para condiciones drenadas; el factor de seguridad F.S. estará dado por la relación:

$$FS = \frac{\text{fuerzas estabilizadoras}}{\text{fuerzas desestabilizadoras}}$$

Las fuerzas estabilizadoras están asociadas a la resistencia al corte en la superficie potencial de falla de relleno cementado y a la cual contribuyen la cohesión y el ángulo de fricción; las fuerzas desestabilizadoras están asociadas a la componente del peso del bloque a lo largo de la superficie de falla.

Luego:

$$F.S. = \frac{\frac{C.L.W.}{\cos\alpha} + W_n \cos\alpha \operatorname{Tg}\phi}{W \operatorname{sen}\alpha} \dots\dots\dots (14)$$

donde:

$$W_n = WH^* (L - 2 C_b)$$

$$H^* = H - (W \operatorname{tg}\alpha)/2$$

C = Cohesión aparente en la superficie potencial de falla

γ = Densidad insitu del relleno cementado.

Asumiendo en el equilibrio límite que $C=C_b$ y que $H>W$, para cualquier valor de ϕ , la resistencia al corte requerida para el relleno cementado vendrá dado por:

$$(2C_b) = \frac{H^*}{\frac{H^*}{L} + \frac{1}{1 - \frac{Tg\phi}{tg\alpha} SEN2\alpha}} \dots\dots\dots (15)$$

Para determinar los requerimientos de resistencia de relleno cementado, la resistencia compresiva no confinada " σ_c ", y de la relación teórica:

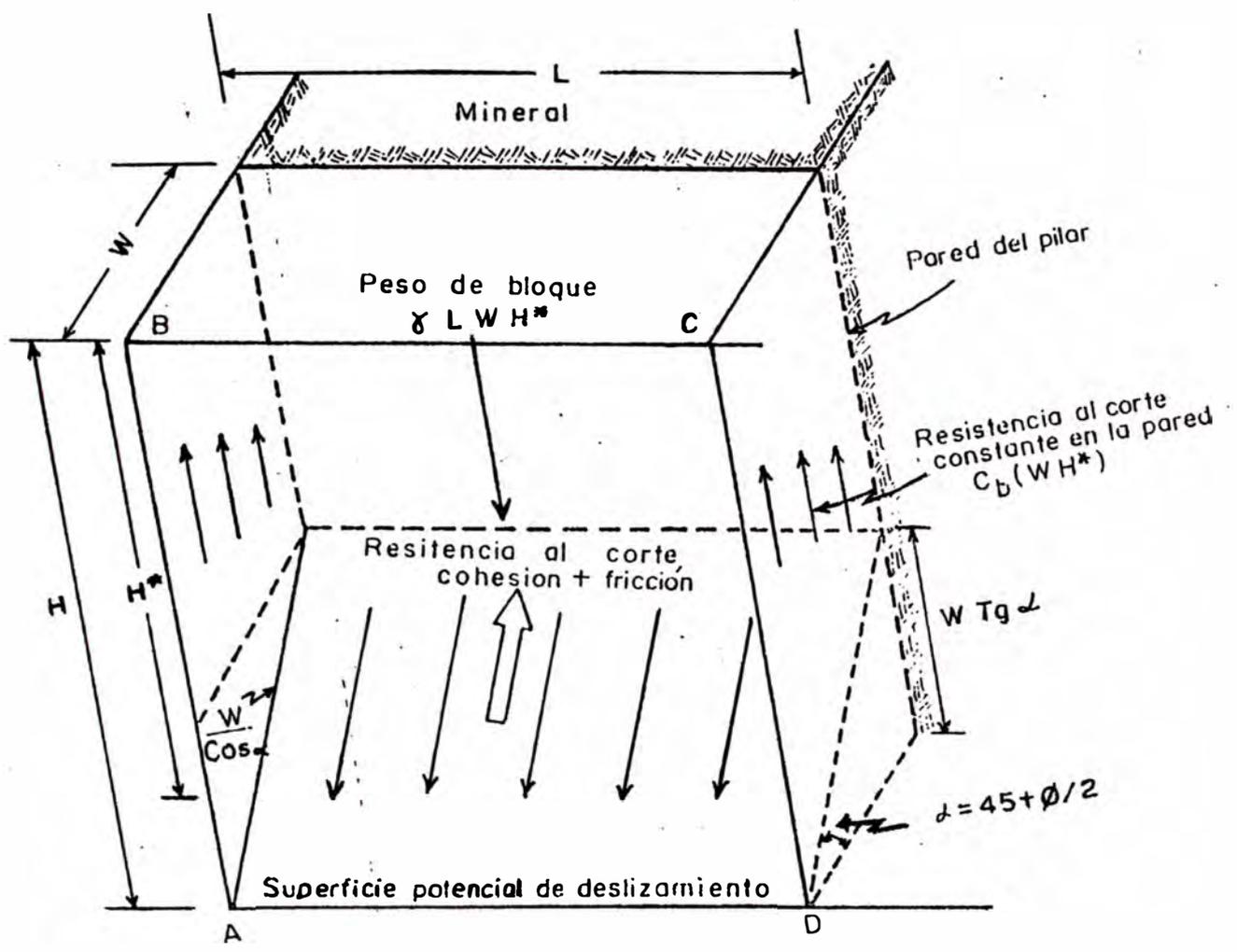
$$\sigma_c = 2C_b$$

Luego de la ecuación (15) y considerando $\phi=0$ tendremos:

$$\sigma_c = \frac{\gamma H}{1 + \frac{H}{L}} \dots\dots\dots (16)$$

Según la experiencia de relleno en otras minas como el Tara Mine en Irlanda y Black Mountain en Sudáfrica que utilizan la ecuación (16) para cálculos de sus requerimientos de resistencia de relleno cementado.

En la mina Juanita el requerimiento de resistencia va desde 0.3 a 0.6 MPa.



H = Altura de la pared vertical del relleno expuesto.
 H^* = Altura promedio de la superficie potencial de deslizamiento.
 W = Ancho del tajeo primario.
 L = Longitud del panel (tajeo).
 γ = Densidad insitu del relleno cementado.
 C_b = Resistencia al corte del relleno cementado.
 ϕ = Angulo de fricción del relleno cementado.

Figura 11.- Condiciones de falla de un bloque confinado de relleno cementado en un tajeo primario.

CANTIDAD DE RELLENO REQUERIDO.- Esto se refiere a asegurar el relleno hidráulico cementado necesario para una producción diaria determinada en una mina. Debiéndose cumplir la siguiente relación:

Volumen por día extraído = volumen por día de relleno

La recuperación en peso del mineral tratado en concentrados hace que en minería subterránea no abastece el relleno al volumen debajo por el mineral extraído.

En la mina Juanita el requerimiento de relleno es abastecida por relaves provenientes de la Mina Graciela además de relave seco como agregado.

Para el cálculo en galones por minuto de pulpa de mezcla y considerando 6 hr. efectivas de operación por día, luego teniendo los datos de densidad de pulpa y porcentaje de sólidos en peso, utilizando la siguiente relación:

$$GPM = \frac{18.3473 \times TPD}{Gp \times \%Sp}$$

donde;

GPM : Galones por minuto de pulpa de mezcla

TPD : Tonelaje por día de relleno

%Sp : Porcentaje de sólidos en peso

Luego tenemos:

$$GPM = \frac{18.3473 \times 774 \text{ TM/día}}{2.4 \text{ kg/lt} \times 79.17}$$

Se aclara que este volumen de pulpa por unidad de tiempo es referido a 24 hr. de operación por día. Para efectos de cálculo de la productividad de la planta de relleno cementado se ha considerado 6 hr. efectivas de operación por día, por lo tanto tendremos un caudal de 238 GPM.

4.1.3 VERIFICACION DE OPERATIVIDAD DEL SISTEMA DE RELLENO

Luego de concluir la etapa de preparación se pasa a la operación de rellenado propiamente dicho en el cual, para iniciar el envío de relleno se procede a:

- Verificar el equipo principal (bomba) enviando agua previamente hacia el tajo.
- Verificar la limpieza de tubería y fugas que podrían haber, en el recorrido del primer envío de agua, se verifica con la llegada de agua al tajo.
- Para verificar el estado del equipo principal y la red de tubería es necesario contar con un sistema de comunicación.

Los operadores del tajo por rellenar se comunican con los de planta de relleno; avisando la conformidad de recepción del relleno cuando el tajo está preparado, estos luego de recibir la comunicación envía agua consecutivamente y se vuelve a comunicar para indicar la conformidad y se procede al rellenado.

PARAMETROS DE PLANTA DE RELLENO CEMENTADO

Total de pulpa a transportar	TM/mes	19350
Total de pulpa por día *	TM/día	774
Total de pulpa por hora **	TM/hr	129
Producción que necesita R/H C	TM/mes	12375
Volumen de mineral que necesita R/H C	m ³ /mes	3094
Concentración de sólidos por peso	%	79.17
Concentración de agua por peso	%	20.83
Volumen total de pulpa por mes	m ³ /mes	8062.5
Concentración de sólidos en volumen	%	50
Concentración de agua en volumen	%	50
Volumen de pulpa por día	m ³	322.5
Volumen de pulpa por hora **	m ³	53.75
Volumen de pulpa por minuto	m ³	0.896
GPM de pulpa a enviar a mina	GPM	238
Eficiencia mínima sólidos secos	TM/hr	102.129

* Mes = 25 días

**Guardia = 6 hr/día

Pulpa = Mezcla de relave, cemento y agua.

4.1.4 DOSIFICACION DE LA MEZCLA

La dosificación de la mezcla tiene como objetivo asegurar la calidad requerida de relleno cementado, concretamente la calidad del relleno cementado está relacionado con los siguientes factores:

- Calidad requerida con relación en peso entre cemento y material de relleno.

Realizar una mezcla de relave con relave seco y agua a fin de alcanzar la densidad de mezcla de 2.4 Kg/lt.

La cantidad de cemento a echar se calcula de acuerdo al caudal insitu. El número de bolsas a echar por minuto viene dado por:

$$N = (P \times C \times d / d_1) (C_1 / 42.5) / 60$$

Donde:

N : Número de bolsas por minuto a echar de cemento

P : Porcentaje en peso de los sólidos

C : Caudal (m³/hr)

d : Densidad de la mezcla

d₁ : Densidad insitu

C₁ : kg/m³ de cemento.

42.5 : peso de una bolsa de cemento en Kg.

Luego para una mezcla relave-cemento 1/23 con 4.46 TPH de cemento tenemos:

$$P = 79.17\%$$

$$C = 53.75 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$d = 2.4 \text{ TM}/\text{m}^3$$

$$d_1 = 2.3 \text{ TM}/\text{m}^3$$

$$C_1 = 82.98 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$N = (0.7917 \times 53.75 \times 2.4 / 2.3) (82.98 / 42.5) / 60$$

$$N = 1.44 \text{ bolsas/min } \bullet$$

$$N = 61.41 \text{ Kg/min}$$

Si se tuviera una concentración de 60% para el mismo caudal se tendría :

$$N = 1.10 \text{ bolsas/min } \acute{o}$$

$$N = 46.54 \text{ Kg/min}$$

De donde se observa el error que se puede cometer.

El control del dosaje se realiza en la planta de relleno donde se calcula cada 15 minutos; el tiempo en segundos para que se llene el acondicionador que se encuentra debajo de los silos, se mide la densidad de la mezcla, luego para un tiempo promedio de 5 segundos se llena una bandeja con cemento proveniente del sin fin para después ser pesado, y finalmente cada hora se controla la densidad de pulpa.

Todos estos datos se vacían a la hoja de control y se realiza los cálculos para determinar los demás parámetros utilizando las siguientes fórmulas.

$G_s = 3.9$ (gravedad específica de los sólidos provenientes de la mina Graciela)

$$TPH(\text{pulpa}) = \frac{\frac{\text{Lit}}{\text{Cilind}}}{\frac{\text{seg}}{\text{Cilind}}} \times 3.6 \times \text{Densid. Pulpa}$$

$$\% \text{Peso(sólidos)} = \frac{100 \times G_s (\text{Densid. Pulpa} - 1)}{\text{Densid. Pulpa} (G_s - 1)}$$

$$\text{TPH(sólidos)} = \text{TPH(pulpa)} \times \% \text{PESO(sólidos)}$$
$$\text{TPH(cemento)} = \text{Kg/cemt} \times 3.6 / (\text{seg/cemt})$$
$$\text{MEZCLA} = \text{TPH(sólidos)} / \text{TPH(cemento)}$$

En la hoja de control también se tiene la especificación de donde proviene la mezcla y es como sigue:

RSR : relave seco de cancha

RSF : Relave fresco de faja

AF : Arena fina

RED : Relave espesador directo.

A continuación se muestra una hoja modelo de control del R/H C; donde cabe hacer mención que la hoja de control es sólo referencial cada 15 minutos, puesto que el trabajo del chutero es intermitente, originando esto que se consuma más toneladas de cemento.

PERUBAR S.A.

TURNO 8AM - 4PM

FECHA 07-10-92 CONTROL POR: M. ESPINOZA

RELLENO HIDRAULICO CEMENTADO

MINA JUANITA

DATOS						TPH	TPH	% Peso	T.P.H.	MEXCLA	HORA	OBSERVACION				
Lit/ Cínd	Seg/ Cínd	Omid Pulpa	g Tuberia	Kg/ Comf.	Seg/ Comf.	Pulpa	Solidos	Solidos	CEMENTO							
208	14.48	2330				120.49	92.49	76.76			9:15	Medición silos (vacío)	Nº 1	Nº 2		
	13.50	2200				122.02	89.50	73.35			9:30	Entrada	1.20 MTS	4.60 MTS		
	12.42	2120				128.41	91.61	71.34			9:45	Salida	1.20 MTS	CONC		
	12.80	2000				117.00	78.67	67.24			10:00					
	11.44	1800				117.81	70.41	59.77			10:15	Mescla relaves:	RSRancho ()			
	11.40	1710				112.32	62.71	55.83			10:30		RSF ()	RSFajo ()		
	11.66	1780				114.31	67.36	58.93			10:45		AF ()			
	12.55	1900				113.36	72.21	63.70			11:00	RED	si (✓)	no ()		
	13.19	2080				118.08	82.44	69.82			11:15	Agua Juanito	si ()	no ()		
	14.50	2250				116.19	86.80	74.71			11:30					
	14.30	2210				119.38	90.13	75.48			11:45	Tajeo a rellenar	9:08	P24/27		
							80.39					Hr inicio RHC	9:08	1.12 PM		
												Inicio / Parada	9:08	11:55	1:12	3:55
208	13.24	2220		4.43	5.05	125.55	92.78	73.90	3.15	1/29	1:20	Inicio / Parada				
216	23.09	2130				61.14	43.62	71.34			1:30	Inicio / Parada				
208	13.56	2230		4.20	5.83	122.14	91.34	74.17	3.00	1/30	1:35	Inicio / Parada				
	14.20	2280		3.80	4.95	120.22	90.76	75.49	2.76	1/33	1:50	Inicio / Parada				
	14.51	2330		4.55	5.06	120.24	92.30	76.76	3.23	1/29	2:10	Hr final RHC	11:55	3:55		
	14.95	2340		4.60	5.05	117.20	90.25	77.01	3.27	1/28	2:25	Cota piso al inicio RHC				
216	29.30	1920				50.95	32.83	64.93			2:30	Cota al final RHC				
208	15.15	2350		3.95	4.98	116.15	89.73	77.25	2.85	1/31	2:40	Mescla Cemento		1/30		
	15.05	2340		4.26	5.03	116.42	89.65	77.01	3.04	1/29	3:00	Muestra Frecbeta Nº				
	14.93	2370		4.78	5.08	118.86	92.40	77.73	3.38	1/27	3:15	Hr que se toma la muestra de-o				
	14.80	2400		4.52	5.05	121.42	95.25	78.44	3.22	1/30	3:30	Condicion piso tajeo suelto-duro-c/s crua				
	15.25	2420		4.10	5.01	118.82	93.76	78.91	2.94	1/32	3:45	Hrs operacion				
							91.82		3.08	1/30		Bombona descarga en silo Nº	Nº 1 (X)	Nº 2 ()		

4.1.5 PRECAUCIONES EN EL PROCESO DE RELLENO

PRECAUCIONES EN PARADAS INTEMPESTIVAS.- En toda parada de operación por diferentes motivos es necesario contar con algunas indicaciones de precaución entre estas se considera:

- Para cortar el envío de pulpa habiendo recibido la comunicación respectiva se debe cambiar por agua hasta completar el lavado del material sólido hacia el tajo.
- Se completa la operación de limpieza dejando por 2 minutos abierto la válvula de agua limpia de la planta para la limpieza de la tubería de la red inicial.

PRECAUCIONES PARA CONCLUIR EL RELLENADO.- Antes de concluir el rellenado, los operadores de mina comunican a la planta de relleno que debe cortar el envío de la pulpa dando tiempo así para que tomen las precauciones necesarias y estas son:

- Determinar la parada del repulpeo de alimentación.
- Seguir los pasos de paradas intempestivas.

4.1.6 MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE RELLENO

Para garantizar la cantidad de funcionamiento del sistema de relleno y/o la conservación del mismo se programa regularmente un mantenimiento preventivo que debe ser por lo menos una vez por mes, por lo general se programa en días sabados ó domingos para evitar paradas no programadas ó paradas intempestivas.

4.2 TRANSPORTE HIDRAULICO

El transporte hidráulico es un aspecto relativamente complejo de la mecánica de Fluidos como tal, el diseño de sistemas para transporte de sólidos cae en una base empírica.

La facilidad de un sistema particular para transporte hidráulico depende de factores que no tienen relación directa con consideraciones del sistema, tales como: el grado de reacción química entre el sólido y el líquido que lo transporta, el grado de rozadura de las partículas solidas, el tamaño de las partículas más grandes relativo a los pasajes de la bomba (y diámetro de tubería), y la facilidad con que los sólidos se mezclan y con que pueden ser separados del líquido que los transporta.

El diseño de un sistema para manejo de sólidos incluye la consideración de más variables que aquellas que son necesarias en el diseño de un sistema para un líquido limpio. Estas variables son:

- Propiedades físicas de los sólidos: distribución de tamaños de partícula, forma de partícula y gravedad específica
- Propiedad del medio de transporte: viscosidad y densidad.
- Propiedad de la mezcla: velocidad, pH, grado de floculación de las partículas sólidas.
- Propiedad de la tubería; largo, diámetro y cambios de elevación.

Para determinar el transporte más económico de un volumen dado de sólidos, hay necesidad de investigar diferentes

combinaciones de concentraciones y de diámetro efectivo de las partículas deo para calcular la velocidad óptima de transporte y las perdidas por fricción.

El calculo de las velocidades de transporte, de diseño y reales para diferentes diámetros asumidos de tubería, selección de la velocidad real y diámetro de tubería. perdidas por fricción y altura de descarga requerida.

La altura de descarga requerida debe determinarse conjuntamente con las condiciones de succión del sistema de bombeo seleccionado.

En el caso de slurries se requiere una velocidad de flujo mínimo (generalmente entre 2 y 8 pies/seg) para permitir que se depositen los solidos en la tubería.

El diseño de un sistema de transporte hidráulico se dictamina al utilizar los costos totales de capital y operación, lo que incluye una análisis económico del sistema de bombeo y del sistema de tuberías, y en algunos casos, el preparar y secar un slurry. Las perdidas por fricción son una función de la velocidad de transporte, del diámetro de la tubería, del tamaño de las partículas y de la concentración.

4.2.1 TUBERIA

Es el conducto por el cual circulará la pulpa desde la planta de bombeo hacia lamina.

Las líneas de circuito de relleno hidráulico desde la salida de la bomba hasta los tajos es tubería plástica (pvc: polyvinyl chloride) siendo estas tuberías unidas por acoplamientos victaulic ó uniones embridadas.

La tubería plástica por ser un elemento flexible permite, en el curso del relleno del tajo, desplazar el punto de llegada y mejorar así su cohesión. La razón es la siguiente en la proximidad del punto de llegada se acumulan los productos más gruesos y más densos, mientras lejos de este, pueden formarse "charcos" donde se acumulan los productos finos

No es recomendable usar relleno completamente desprovisto de elementos finos, siendo conveniente desplazar el punto de llegada del relleno de tal manera que cada punto del tajo sea lugar de sedimentación de gruesos y finos.

CALCULO DE LA VELOCIDAD CRITICA.-El relleno es conducido por tuberías a una velocidad tal que se evita la deposición de las partículas; esta velocidad, sin embargo, debe ser eliminada para prevenir el deterioro de las líneas a causa de la acentuada erosión.

La granulometría y el peso específico de los sólidos son parámetros que definen la velocidad crítica ó velocidad mínima, se define como el promedio de velocidades bajas ó límites que permiten que una partícula durante su transporte en un medio líquido no se sedimente. Una velocidad de viaje de las partículas menor a la velocidad crítica significa una deposición de esta 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, crea la necesidad

de conocer la velocidad crítica de las partículas sólidas en función del diámetro de tubería y el grado de dilución de la pulpa a conducirse. A raíz de esta operación, los investigadores DURAND Y CONDOLIOS formulan una ecuación donde reúnen varios parámetros relevantes:

$$V_C = F_1 \sqrt{\frac{2gd (G E - D)}{D}}$$

donde:

V_C : velocidad crítica

F_1 : constante adimensional

GE : gravedad específica de los sólidos

D : densidad de pulpa

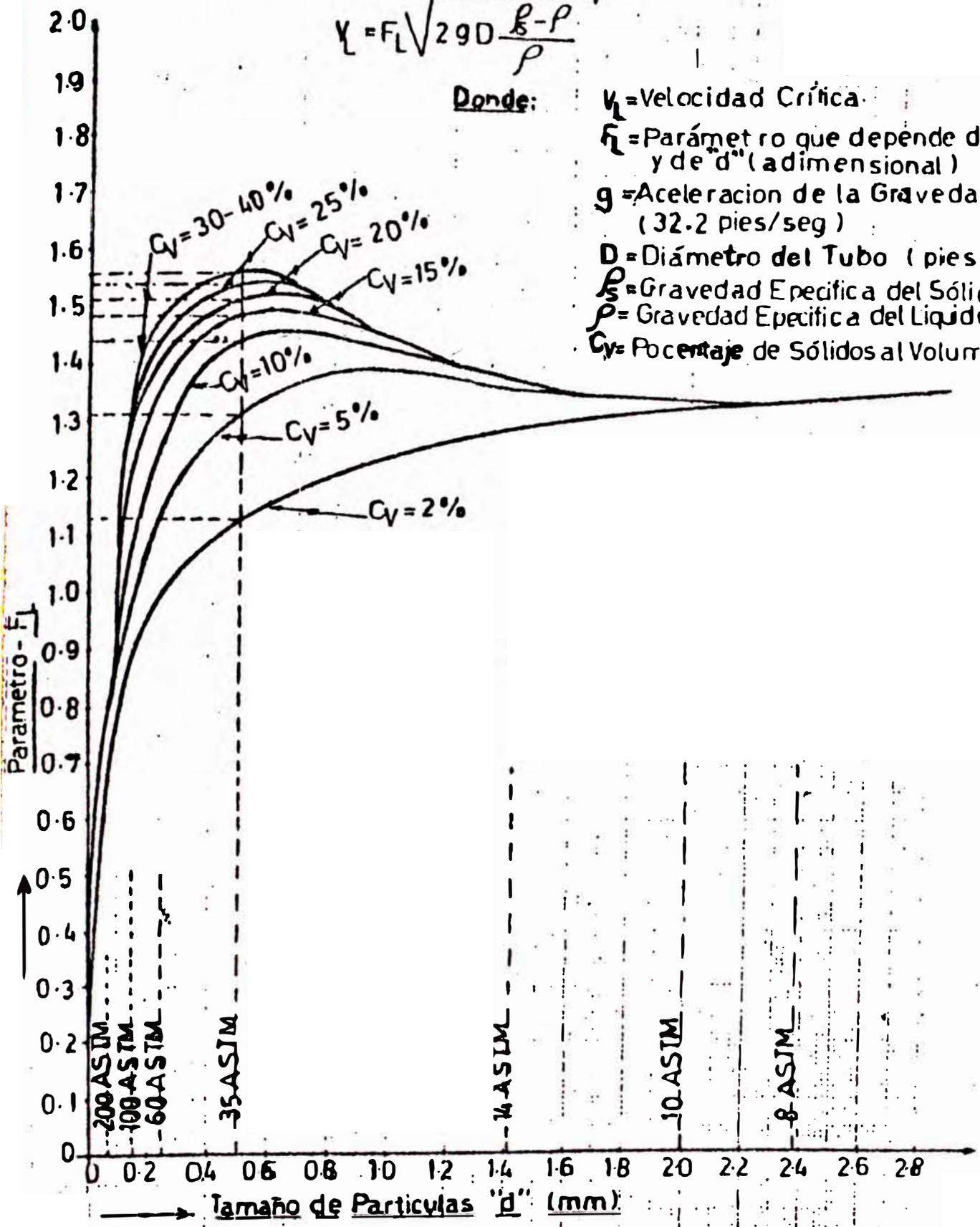
d : diámetro de tubería

LA VELOCIDAD CRITICA EN (Pies/seg.)

$$V_c = F_L \sqrt{290 \frac{\rho_s - \rho}{\rho}}$$

Donde:

- V_c = Velocidad Crítica
- F_L = Parámetro que depende de C_v y de d (adimensional)
- g = Aceleración de la Gravedad (32.2 pies/seg)
- D = Diámetro del Tubo (pies)
- ρ_s = Gravedad Específica del Sólido
- ρ = Gravedad Específica del Líquido
- C_v = Porcentaje de Sólidos al Volumen %



F_L como Funcion del Tamaño de Partículas (d) y de la Concentración (C_v) — Hecho por DURAND

Para el cálculo de la velocidad de diseño se deduce aplicando la fórmula del caudal.

$$Q = V \times A$$

$$V = 1.2732Q/d^2$$

Luego definiendo las condiciones de flujo se calcula una velocidad que garantice el arrastre de las partículas que para usos prácticos se debe tener una velocidad que sea superior por lo menos en una unidad a la velocidad de transporte (v_t).

$$V_t = V_c + 1 \text{ pies/s}$$

Aplicando para el cálculo teórico de la velocidad crítica la fórmula de DURAND Y CONDOLIOS, tendremos :

Concentración de sólidos por volumen	: 50%
Gravedad específica de sólidos	: 3.8
Gravedad específica de líquidos	: 1
Diámetro efectivo de partículas	: 0.2 mm

Entonces del gráfico de Durand y Condolio (F1) es 1.4 de lo mencionado anteriormente tenemos:

d pulg	Vc pies/s	Q m ³ /s	Vt pies/s	Vd pies/s
3	9.39	0.0150	10.39	10.79
4	10.85	0.0150	11.85	6.07
6	13.29	0.0150	14.85	2.70

los resultados de V_c son bastante elevados, por lo cual se obliga a efectuar un análisis experimental para conocer la velocidad crítica. No obstante se observa que la velocidad de diseño es ligeramente mayor que la velocidad de transporte para un diámetro de tubería de 3 pulg.

La velocidad crítica fluctúa entre 2 pies/s y 8 pies/s lo cual asumiremos para este caso. De esta velocidad tenemos que el diámetro de la tubería puede ser de 3" ó 4".

4.2.2 BOMBA

La bomba es una máquina que absorbe energía mecánica que puede provenir de un motor eléctrico, térmico, etc., y la transforma en energía que la transfiere a un fluido en forma de presión ó de velocidad y que permite trasladar el fluido de un lugar a otro, a un mismo nivel y/o a diferentes niveles.

Con el fin de reducir los costos de operación de una planta de relleno es muy importante hacer una selección correcta de la capacidad de la bomba de impulsión de pulpas, para la cual se harán los cálculos de;

- Coeficiente de fricción
- Perdidas de carga
- Potencia requerida en el eje de la bomba.

CALCULO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.- En primer lugar se determina el número de Reynolds que de acuerdo al principio de mecánica de fluidos el cálculo viene dado por:

$$R = V.D/v$$

Donde:

V = velocidad de transporte

D = Diámetro interior de tubería (4")

v = Viscosidad cinemática

(1.089×10^{-5} ft²/s) a 20°C

$$R = (1.85 \times 0.102 \text{ m}^2/\text{s}) / 1.012 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$R = 1.87 \times 10^5$$

Como el número de Reynolds ($R > 2000$) entonces se trata de un flujo turbulento

Luego el coeficiente de oposición al flujo ó transporte de pulpa se calculara a partir de Hazen y William, el nomograma de perdidas por fricción esta referida al equivalente de pies de cabeza estática, que hace perder el trabajo de 100 pies de longitud. Entonces utilizando el respectivo nomograma obtenemos:

$$\text{Para } Q = 238 \text{ GPM}$$

$$D = 4''$$

Luego determinamos la perdida de carga para $C=100$

$$cF = 6.4$$

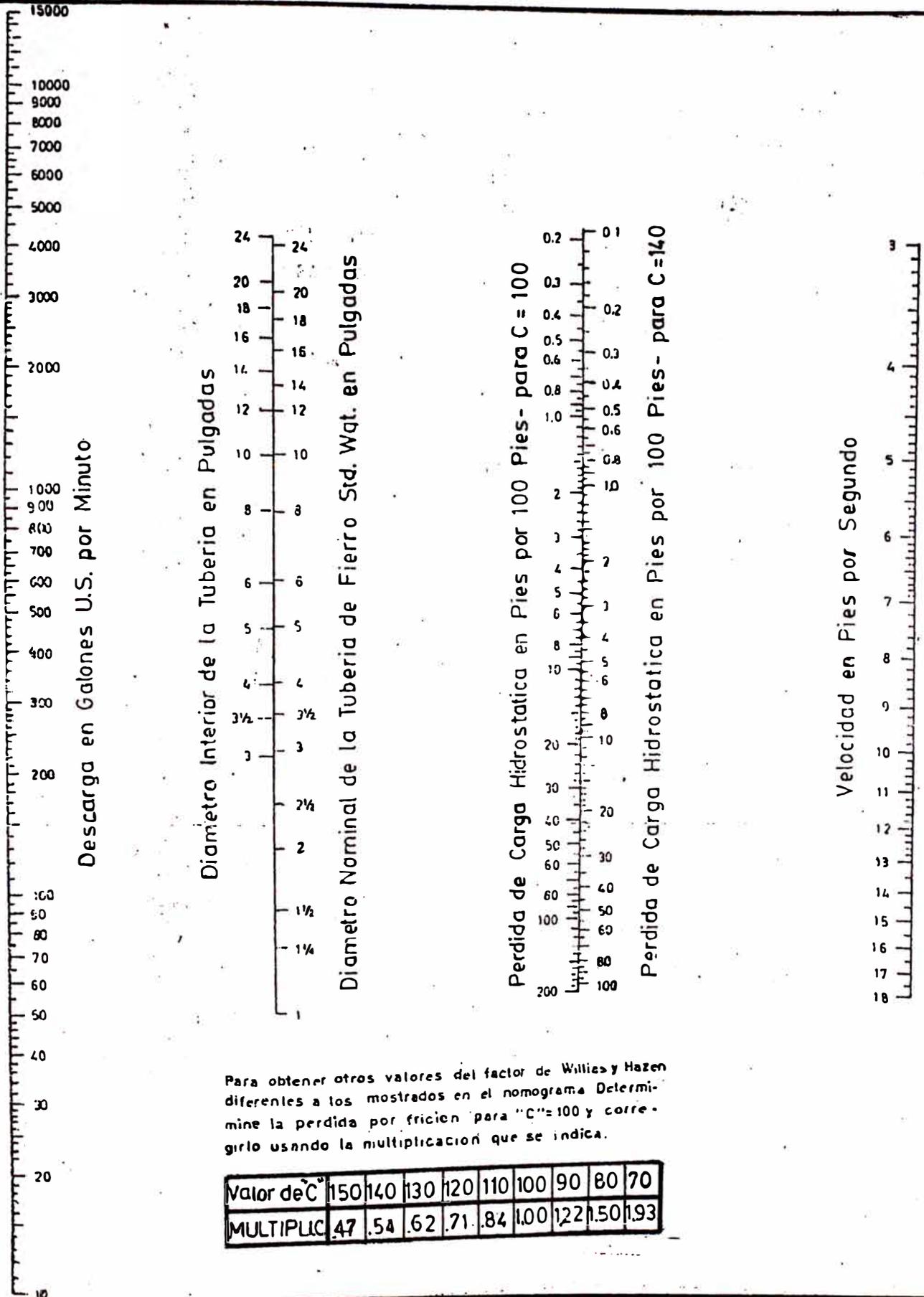
La perdida de fricción para la tubería plástica se obtiene corrigiendo el factor William y Hazen para:

$$C = 150$$

$$cF = 0.47 (6.4)$$

$$cF = 3.01/100 \text{ pies}$$

NOMOGRAMA PARA LA PERDIDA POR FRICCIÓN



CALCULO DE PERDIDA DE CARGA (CABEZA DINAMICA TOTAL).-

La perdida total de carga que se tendrá al bombear la pulpa desde la planta de relleno a la mina (como se muestra en el flow sheet) estará dado por;

$$H_T = H_E + H_F + H_e + H_a$$

donde:

H_E : Cabeza estática (pies)

H_F : Perdida de carga por fricción (pies)

H_e : Cabeza de entrada a la bomba

H_a : Cabeza por velocidad de descarga.

Procedemos al cálculo

Para:

$$L = 984.25 \text{ pies (300 m)}$$

$$G_p = 2.4$$

$$V = 10.39 \text{ pies/s}$$

Cabeza estática:

$$H_e = 22.50 \text{ pies (7.5 m)}$$

- Cabeza de fricción de tuberías y accesorios:

$$H_F = \frac{cf \times L \times G_p}{0.9}$$

$$H_F = \frac{3.01 \times 984.25 \times 2.4}{100 \times 0.9} = 79.00 \text{ pies}$$

- Cabeza de entrada a la bomba

$$H_e = \frac{kV^2}{2g}$$

k= 0.5 (perdida de carga en conexión redondeada)

$$H_e = \frac{0.5(10.39)^2}{2 \times 32.2} = 0.84 \text{ pies}$$

- Cabeza por velocidad de descarga

$$H_d = \frac{kV^2}{2g}$$

k=1

$$H_d = \frac{(10.39)^2}{2 \times 32.2} = 1.68 \text{ pies}$$

CABEZA DINAMICA TOTAL

Cabeza estática	22.50 pies
Cabeza por fricción	79.00 pies
Cabeza por entrada	0.84 pies
Cabeza por descarga	1.68 pies
CABEZA DINAMICA	104.02 pies

POTENCIA REQUERIDA EN EL EJE DE LA BOMBA.- La potencia requerida en el eje de la bomba para producir el desplazamiento del caudal deseado a la cabeza calculada, viene dada por:

$$BHP = \frac{Q \cdot Gp \cdot H}{3960 \cdot ef \cdot fs}$$

$$BHP = \frac{238 \times 2.4 \times 104.02}{3960 \times 0.5 \times 0.9} = 33 \text{ HP}$$

En la mina Juanita con el objeto de trasladar la pulpa a los tajos se utiliza una bomba marca Denver S.R.L. de 5" x 4" cuya potencia es 36 HP y transporta un caudal de 238 GPM.

4.2.3 FLUJO DE RELLENO

El relleno es transportado con una velocidad de 6.07 Pies/s y es dispuesta por una bomba marca Denver.

En la superficie para el transporte del relleno se utiliza una tubería de diámetro 4 pulg. y una longitud de 300m, luego para el transporte interior mina una tubería de diámetro 3 pulg. y una longitud de 250 m donde de nivel a nivel desde exterior mina se han realizado perforaciones diamantinas de 5 pulg. de diámetro y una inclinación de taladro con respecto a la horizontal de 54° por donde pasa la tubería de 3 pulg. de diámetro.

CALCULO DEL TIEMPO DE RELLENO EN UN TAJEO.- Para conocer el volumen rellenado en una hora se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P \times C \times d / d1$$

donde:

P : % en peso de los sólidos

C : caudal (m^3 /hr)

d : densidad de la mezcla

d1 : densidad insitu

Luego tenemos:

$$P = 79.17\%$$

$$C = 53.75 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$d = 2.4 \text{ TM}/\text{m}^3$$

$$d1 = 2.3 \text{ TM}/\text{m}^3$$

En la mina Juanita con un caudal de $53.75 \text{ m}^3/\text{hr}$ en realidad se rellena:

$$0.7917 \times 53.75 \times 2.4/2.3 = 44 \text{ m}^3/\text{hr} \text{ de relleno insitu.}$$

Además la cantidad de agua introducida a la mina será de:

$$0.2083 \times 53.75 \times 2.4 = 26.87 \text{ m}^3/\text{hr}$$

Luego para la operatividad del R/ H C referido al cuadro de resumen histórica para una mezcla de 1/23 y aplicando los métodos prácticos para determinar la resistencia compresiva uniaxial del relleno cementado tenemos:

$$\text{TPH cmt} = 4.46$$

$$C = 53.75 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$A = 26.87 \text{ m}^3/\text{hr}$$

donde:

TPH cmt = toneladas por hora de cemento

C = caudal (m^3 /hr)

A = Cantidad de agua introducida a la mina

La cantidad de cemento estará dado por:

$$M_c = 4.46 \text{ TPH}/53.75 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$M_c = 82.98 \text{ Kg/m}^3$$

La cantidad de agua estará dado por:

$$B = 26.87 \text{ m}^3/\text{hr} \times 1000 \text{ kg/m}^3/53.75 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$B = 499.91 \text{ Kg/m}^3$$

Entonces la relación agua cemento será de:

$$\alpha = 499.91 \text{ Kg/m}^3 / 82.98 \text{ Kg/m}^3$$

$$\alpha = 6.02$$

El máximo valor de la resistencia que puede tener esta mezcla esta dado por:

$$\sigma_{cmax} = 0.037 (M_c)^{1.39}$$

$$\sigma_{cmax} = 17.20 \text{ kg/cm}^2 \text{ o sea } \sigma_{cmax} = 1.69 \text{ MPa}$$

El valor mínimo de resistencia que puede tener esta mezcla esta dado por:

$$\sigma_{cmin} = 80.27 (\alpha)^{-1.53}$$

$$\sigma_{cmin} = 5.14 \text{ kg/cm}^2 \text{ o sea } \sigma_{cmin} = 0.5 \text{ MPa}$$

Finalmente la resistencia compresiva uniaxial promedio del relleno cementado para una mezcla 1/23 estará dado por:

$$\sigma_{cprom} = (\sigma_{cmax} + \sigma_{cmin})/2$$

$$\sigma_{cprom} = 1.1 \text{ MPa}$$

4.3 DRENAJE

Un adecuado sistema de drenaje se requiere para sacar el agua residual de los tajos mientras son retenidos los sólidos del relleno. El mismo relleno es permeable y libera el agua por tuberías instaladas en el relleno. Estas

tuberías permiten la captación directa del agua desde el piso del tajo.

En la Mina Juanita para el sistema de drenaje se colocan tuberías verticales/ paradas formados por mallas de alambre de 4" x 2", forrados con el terran ICI espaciados cada 12 m. En la base del corte se coloca tubería plástica de 4" de diámetro que poseen pequeños orificios y también son forrados con tela porosa, esta tubería es conectada ó unida a las tuberías verticales de 12" de diámetro. La tubería de la base es a su vez conectada a un crucero de drenaje el cual se taponea totalmente con tablas y forradas también con tela porosa, el agua finalmente es desalojada del tajo siendo captada por cunetas que se encuentran fuera del tajo.

4.4 EFICIENCIA DEL RELLENO HIDRAULICO CEMENTADO

Para las condiciones de diseño de la mina Juanita, se obtiene la productividad de la planta de relleno Cementado de 120 TM/hr o sea 50.75 m³/hr de pulpa, lo cual equivale a 95 TM/hr de sólidos secos de relleno a ser introducidos a los tajos de mina.

CAPITULO V
COSTO DEL RELLENO HIDRAULICO CEMENTADO

(Para entender mejor lo que cuesta colocar el material de relleno en los tajeos de una determinada mina, vamos agruparlos bajo los siguientes aspectos:)

COSTOS FIJOS: En este rubro se consideran los costos de los equipos requeridos en el sistema de relleno hidráulico cementado tales como; agitadores, bombas, tuberías y accesorios.

En la evaluación de este renglón y dado que la vida promedio de los equipos depende de su naturaleza, se ha traducido todo al valor anual equivalente: Costo de instalación.

COSTOS VARIABLES: que comprende los siguientes costos:

- Mano de obra
- Materiales
- Energía requerida.

(# 1 = \$ 1.5)

5.1 COSTOS FIJOS

1 Tanque de acero para relaves (espesador)	\$ 70,000
2 silos de acero para cemento de 41 TM c/u	\$ 40,000
4 tanques metálicos; acondicionador, tanque mezclador y 2 tanques de pruebas	\$ 1,000
1 filtro de 3 cuerpos, c/cuerpo con tolva; faja y motor	\$ 10,000
faja transportadora de 16' x 4 m, motor y tolva incorporada	\$ 7,500
faja transportadora de 16" x 30 m con estructura de soporte, poleas y motor	\$ 40,800
2 vibradores magnéticos, motor y accesorios	\$ 5,000
faja transportadora con alimentador helicoidal sin fin y motor de tornillo	\$ 15,000
1 bomba centrífuga de pulpas 5"x4" sello mecánico, para bombeo de relleno, motor y otros	\$ 10,000
1 bomba centrífuga de 3" x 3" sello mecánico, para bombeo de la pulpa a los filtros ó al acondicionador	\$ 15,000
Control de densidad de relaves	\$ 1,000
Tubería de polietileno de 4" de diámetro y 1000m	\$ 5,000
1 sub-estación transformador	\$ 15,000
Motores diversos	\$ 5,000
Equipo de comunicación	\$ 5,000
Válvulas diversas	\$ 2,000
SUB TOTAL	\$ 247,300
OTROS 10%	24,730
TOTAL INVERSION	\$ 272,030

Luego depreciando la planta de relleno cementado para una vida útil de 11 años.

$$D = \$ 272,030 / 11 \text{ años} = \$ 24,730 / \text{año}$$

Producción de mineral:

$$148,500 \text{ TM/año } \text{ ó } 12,375 \text{ TM/mes}$$

Depreciación de planta de relleno cementado por tonelada producida de Mina Juanita.

$$\$ 24,730 / \text{año} / 148,500 \text{ TM/año} = \$ 0.17 / \text{TM}$$

5.2 COSTO VARIABLE**Mano de Obra****Planilla mensual**

1 Ingeniero jefe de relleno	\$	500.00
1 sobrestante	\$	350.00
	SUB-TOTAL \$	850.00
5 Obreros \$ 8 c/u/día	\$	1000.00
	TOTAL	\$ 1850.00

Materiales

Cemento para una mezcla 1/23 82.98 kg/m³ x 3094 m³/mes x
 \$ 100.00/TM/1000 \$ 25,674.00

Madera 11 tablas de 2" x 8" x 3m

5 Postes 8" x 8" x 3 m,

\$ 0.3/pie², en 5 tapones \$ 610.00

Tela filtrante Sintético "ICI Terran 1000"

(150 m²por panel) \$ 0.4/m²en 30m² \$ 42.00

Tubería PVC 3" 30m/paño, \$ 2.97/m \$ 89.00

Tubería perforada para drenaje

(especial 3") \$ 4.81/m x 23 m \$ 111.00

Cables, rieles para sostenimiento

y amarre de puntales \$ 56.00

Alambres clavos \$ 10.00

SUB-TOTAL \$ 26,562.00

10% Imprevistos \$ 2,656.00

TOTAL	\$ 29,218.00
Mantenimiento, energía, aire comprimido, lubricantes, etc., 10% de costo directo (mano de obra y materiales)	\$ 3,107.00
COSTO VARIABLE	\$ 34,175.00

5.3 COSTO TOTAL

Costo de relleno Hidráulico Cementado por tonelada de relleno producido.

Costos fijos	\$ 2,061.00
Costos variables	\$ 34,175.00
Costo total de relleno por mes	\$ 36,236.00
Producción de relleno por mes	3,094 m ³
	7,735 TM
Costo por m ³ de relleno hidráulico cementado	\$ 11.71
Costo por tonelada de R/ H c	\$ 4.68

Costo de Relleno Hidráulico Cementado por tonelada de Mineral producido.

Tonelaje producido por mes:	12,375 TM
Costos Fijos	\$ 0.17
Costos Variables	\$ 2.76
Costo de R/H C	\$ 2.93/TM

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

La función principal del R/H C en la mina Juanita es prevenir la subsidencia, asegurando de esta manera la estabilidad general de la mina.

Del análisis granulométrico del material de relleno se obtiene el Coeficiente de Uniformidad y la Velocidad de Percolación, siendo este último parámetro variable y dependiente del contenido de cemento por lo tanto carece de importancia en la tecnología del R/H C.

Es importante evitar la segregación de las partículas durante la colocación del relleno para lograr una máxima densidad y minimizar la pérdida de partículas de cemento que son factores importantes para la resistencia del relleno cementado.

La concentración de sólidos es un factor importante para determinar:

- Tiempo de relleno de un tajeo.
- Cantidad de agua introducida a la mina.

Cantidad de cemento a echar según el dosaje.

Una variación de la concentración de sólidos originara resultados erróneos en la determinación de dichos factores.

Utilización de relave general de planta concentradora en forma total, con la condición de mantener constante la densidad de pulpa. Ya que a mayor densidad de pulpa menor contenido de cemento.

Se concluye que el método basado en el análisis granulométrico para determinar la resistencia compresiva del R/H C es aplicable para el caso de la Mina Juanita.

Con los métodos empíricos se tiene un error del 20% en comparación con los datos experimentales.

El costo de relleno hidráulico cementado para la mina Juanita es bastante representativo en comparación con el costo total de operación mina, y depende del dosaje utilizado.

6.2 RECOMENDACIONES

Conforme aumenta la profundidad en la explotación de minas en el Perú se presentaran problemas de subsidencia y/o convergencia de las excavaciones subterráneas, siendo la tecnología del relleno hidráulico cementado una alternativa importante a considerar.

Es recomendable tener cuidado en el diseño para la aplicación del R/H C por el alto costo que representa el cemento.)

Las alternativas de cálculo de la resistencia compresiva no confinada del R/H C, se dividen en 2 campos de aplicación como sigue:

Para el diseño y selección del material de relleno se recomienda aplicar el método basado en el análisis granulométrico y/o el método basado en las propiedades físicas y mineralógicas (según su rango de aplicación).

- Para la operatividad del relleno hidráulico cementado se recomienda aplicar los métodos basados en la cantidad de cemento (kg/m^3), relación agua/cemento; y el número de rebotes del martillo schmidt.

Se recomienda tener extremo cuidado cuando se adiciona agua para lavar las tuberías. Nunca esta medida debe exceder de 2 minutos y deberá tratarse en lo posible de no efectuar paradas innecesarias que obliguen a lavar las tuberías y, por ende, a adicionar agua extra que perjudica la calidad de relleno.

En cuanto a Medio Ambiente se preserva la Ecología con la deposición de relaves en su totalidad a interior mina.

REFERENCIAS
BIBLIOGRAFICAS

RESUMEN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE RELLENO HIDRÁULICO EN LA
MINA ATACOCHA.

ING. WILFREDO BELTRAN C.

INCITEMI

RELLENO HIDRÁULICO CEMENTADO EN MINAS

ING. URBANO MACAZANA VALENCIA

INGEMET

UNDERGROUND MINING METHODS HANDBOOK

PREPARATION AND PLACEMENT OF HIDRAULIC CEMENTED TAILINGS FILL

WILLIAM R. WAYMENT AND

WAYMET S. CUSITAR

HYDRAULIC FILLING -- AN EFFECTIVE WAY OF GROUND CONTROL

BY B.B. DHAR, K.V. SHAKER & V.R. SASTRY

PROYECTO RELLENO HIDRÁULICO CEMENTADO - MINA "JUANITA"

INGEMET - 1987

USO DEL RELLENO HIDRÁULICO EN LA MINA MOROCOCHA

JAIME TUMIALAN

XII CONVENCION DE INGENIEROS DE MINAS

ANÁLISIS DEL ESTADO TECNOLÓGICO DE LOS METODOS DE EXPLOTACIÓN
SUBTERRANEA APLICADOS EN LAS MINAS DEL PERÚ.
INGEMMET

MECÁNICA DE SUELOS -- TOMO I
JUAREZ BADILLO

INFLUENCE OF TAILINGS PARTICLES ON PHYSICAL AND MECHANICAL
PROPERTIES OF FILL
BY LIU KEREN & SUN KAINIAN

MECÁNICA DE ROCAS APLICADA A LA MINA JUANITA
CORDOVA ROJAS DAVID
XIX CONVENCION DE INGENIEROS DE MINAS

STABILIZATION OF HYDRAULIC BACKFILL WITH PORTLAND CEMENT BY
DONAL R. CORSON

ROCK MECHANICS - A NEW APPROACH TO CEMENTED BACKFILL DESIGN
BY G. SWAN

ENGINEERING PROPERTIES OF CEMENTED AGREGATE FILL FOR ULUDAG
TUNGSTEN MINE OF TURKEY BY ERGIN ARIOGLU

HIDROTRANSPORTE
CENTROMIN PERÚ S.A.

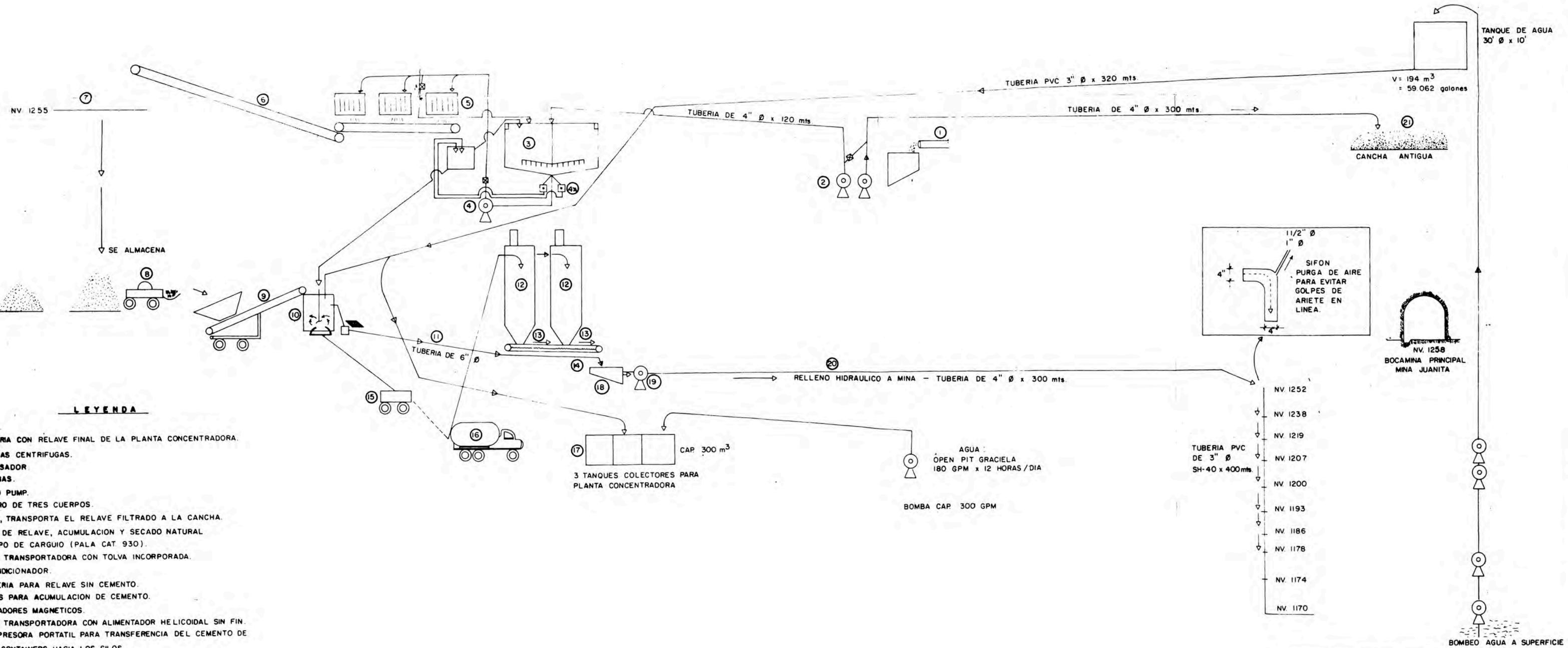
BOMBAS HIDRÁULICA

ING. EDUARDO MENDOZA G.

ESTIMACIÓN DEL COSTO DE UN SISTEMA DE RELLENO HIDRÁULICO

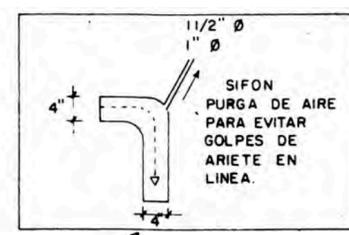
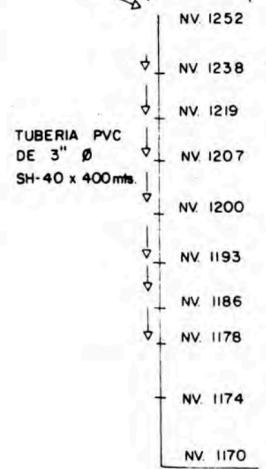
ESTELA ASSUREIRA ESPINOZA

XVIII CONVENCION DE INGENIEROS DE MINAS



LEYENDA

- 1- TUBERIA CON RELAVE FINAL DE LA PLANTA CONCENTRADORA.
- 2- BOMBAS CENTRIFUGAS.
- 3- ESPESADOR
- 4- BOMBAS.
- 4A- SAND PUMP.
- 5- FILTRO DE TRES CUERPOS.
- 6- FAJA, TRANSPORTA EL RELAVE FILTRADO A LA CANCHA.
- 7- PILA DE RELAVE, ACUMULACION Y SECADO NATURAL
- 8- EQUIPO DE CARGUIO (PALA CAT 930).
- 9- FAJA TRANSPORTADORA CON TOLVA INCORPORADA.
- 10- ACONDICIONADOR.
- 11- TUBERIA PARA RELAVE SIN CEMENTO.
- 12- SILOS PARA ACUMULACION DE CEMENTO.
- 13- VIBRADORES MAGNETICOS.
- 14- FAJA TRANSPORTADORA CON ALIMENTADOR HELICOIDAL SIN FIN.
- 15- COMPRESORA PORTATIL PARA TRANSFERENCIA DEL CEMENTO DE LOS CONTAINERS HACIA LOS SILOS.
- 16- CONTAINER PARA EL TRANSPORTE DE CEMENTO A GRANEL.
- 17- TANQUES COLECTORES.
- 18- TANQUE MEZCLADOR DE RELAVE MAS CEMENTO
- 19- BOMBA IMPULSADORA DE RELLENO CEMENTADO A LA MINA.
- 20- TUBERIA TRANSPORTADORA DE RELLENO HIDRAULICO A LA MINA.
- 21- CANCHA ANTIGUA DE RELAVE DE LA MINA JUANITA.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA			
TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO DE MINAS			
FLOW SHEET RELLENO HIDRAULICO CEMENTADO			
MINA JUANITA - PERUBAR S. A.			
F. I. G. M. M.	ESCALA: S/N	FECHA: MARZO-93	POR: DAVID M. OSANDO PACHECO

5050N

P24/17

REDUCCION
4"φ - 3"φ
① SUPERR
1250.6
MINA 1207

REDUCCION
4"φ PVC
4"φ - 3"φ
② SUPERR
1250.6
MINA 1220

P18/21

15/18

P15/18

PLANTA
RHC
ESPESADOR
RELAVES

ESPESADOR
RELAVES

1253.4

REDUCCION
4"φ - 3"φ
③

4950 N

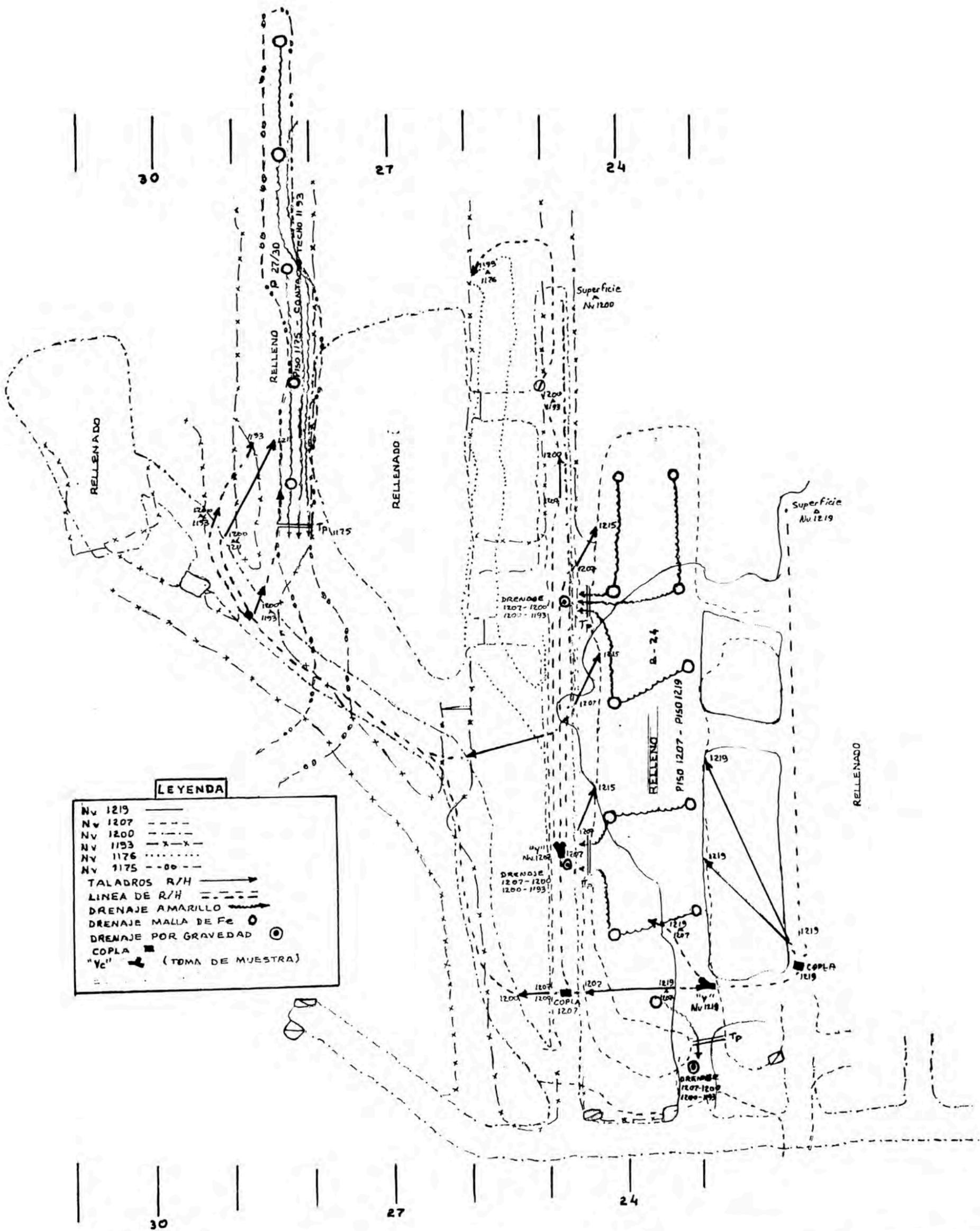
10000 E

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA METALURGICA

MINA JUANITA
RED DE DISTRIBUCION RELLENO

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO DE MINAS

DAVID H. OBANDO PACHECO MARZO-93 ESC.1/500



LEYENDA	
Nv 1219	—
Nv 1207	---
Nv 1200	----
Nv 1193	-x-x-
Nv 1176
Nv 1175	-oo-
TALADROS R/H	→
LINEA DE R/H	---
DRENAJE AMARILLO	→
DRENAJE MALLA DE FE	○
DRENAJE POR GRAVEDAD	⊙
COPLA	■
"Yc"	← (TOMA DE MUESTRA)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
 FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA METALURGICA
MINA JUANITA
 SISTEMA DE DRENAJE Y
 RELLENO DEL R. H. C.
 TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO DE MINAS
 DAVID H. OBANDO PACHECO MARZO - 93 ESC. 1/500