

11.- ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

Se llevaron bloques pequeños de roca al laboratorio para la obtención de cilindros con los que se determinó el ángulo de fricción mediante el deslizamiento de los mismos y el índice de carga puntual.

Para las pruebas de carga puntual, se obtuvieron poco más de 70 núcleos de los bloques de roca que se colectaron para ese fin, pero solo 64 núcleos cumplieron las condiciones de dimensión para las pruebas de carga puntual.

Antes de realizarse las pruebas, se tuvieron que preparar cuidadosamente los núcleos a ensayar, esto es de gran importancia en el estudio, pues si un núcleo extraído está mal elaborado, los resultados arrojados serán erróneos, y por lo tanto, el primer paso que dimos, fue definir las dimensiones óptimas así como sus tolerancias.

Primeramente se debía guardar una relación de longitud / diámetro (L/D) de al menos 1.4, y no tener un diámetro menor de 47 mm según los estándares del ASTM¹.

Estas condiciones nos redujeron bastante el número de muestras óptimas a ensayarse, pues debido a la fragilidad del yeso y más aún, cuando éste está sujeto a condiciones de humedad excesiva como es en el caso de la obtención de núcleos, estos se quiebran con gran facilidad. Los núcleos que no cumplían esta condición de (L/D) fueron ensayados también, y observamos que los resultados de los núcleos con relación hasta de ($L/D > 1.1$) son muy aproximados a los de los núcleos con relaciones L/D mayores. Entonces, creímos conveniente agregar estos ensayos a núcleos con relación de $L/D > 1.1$ debido a que la cantidad de núcleos con relación óptima, era un número bajo.

¹ ASTM = American Standard Testing for Materials

Otro factor a tomar en cuenta fue la desviación de las paredes del núcleo, pues estas deben ser lisas y libres de irregularidades. Ninguna irregularidad deber ser mayor de 0.5 mm. Para determinar las desviaciones, existen dos métodos a utilizar, uno consiste en rodar el núcleo sobre una superficie plana y medir las profundidades de los huecos dejados por las irregularidades. Si el hueco excede a 0.5 mm., el núcleo **no** debe ser utilizado . El otro procedimiento consiste en colocar el núcleo en un bloque ya sea metálico o de cristal en forma de escuadra, el cual tiene sus superficies pulidas con un ángulo de 90°, las tolerancias son las mismas que para el método anterior.

En nuestro caso, utilizamos el segundo método, ya que la maquina de corte con disco del laboratorio de mecánica de rocas, tiene una base de acero inoxidable para este propósito. Se dio el caso en que la desviación era en ocasiones hasta de 0.7mm las cuales eran medidas con un vernier al deslizar el núcleo sobre la base de acero.

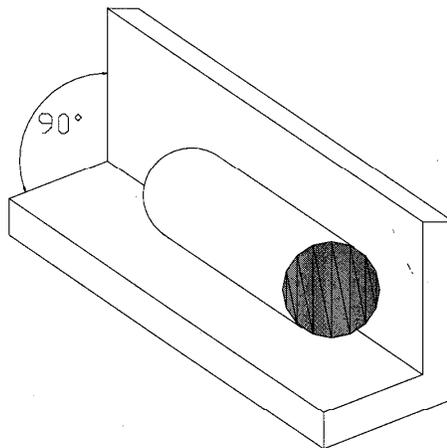


Fig. 11.1.- Bloque de metal utilizado para medir las desviaciones en las paredes del núcleo.

Los núcleos que rebasaban la tolerancia, fueron también ensayados, pero observamos que debido a su desviación, la carga puntual no era exactamente perpendicular, y esto hacía que el núcleo se rompiera de una manera diferente y

los valores arrojados fueron mas bajos que los normales, por lo tanto, estos núcleos fueron desechados.

Se sabe que las pruebas de carga puntual proporcionan un método indirecto para determinar la resistencia. En este método se aplica carga mediante un prensa modificada en la que un par de puntos de acero aplican la presión proveniente de un gato hidráulico, produciendo la rotura del espécimen bajo prueba. La resistencia se obtiene mediante una gráfica en la que se entra con el valor de la carga puntual de rotura. Este tipo de prensa es ligera para llevarse al campo. Una ventaja de este tipo de prueba es que se pueden usar en la misma, núcleos preparados, o muestras de roca de forma irregular.

El aparato de carga puntual, consiste en un sistema que permite aplicar una carga axial y quebrar la muestra. Este equipo se compone de un marco de acero, un gato hidráulico, medidores de presión y dos puntas de contacto cónica. Los contactos cónicos terminan en una punta redondeada. El ángulo del cono es de 60° y el radio esférico de contacto es de 5 mm, con estas dimensiones, se tiene solamente un contacto tangencial con la muestra. Esta prueba tiene un rango de precisión de $\pm 5\%$ respecto del valor obtenido en el laboratorio con prensas normales.

Existen dos maneras de aplicar la prueba de estas muestras, una es en su forma axial, y la otra es en su forma diametral, nosotros por cuestiones prácticas y de confiabilidad elegimos la prueba diametral. A continuación expondremos cuales son las dimensiones a cumplir para cada prueba.

En los ensayos de carga axial se maneja una relación diámetro longitud de $D/L=1.1$, para los ensayos diametrales se maneja la relación $L=1.4D$.

Una vez que se ha comprobado la condición de dimensión, se somete el núcleo a la carga, esta carga debe realizarse a un ritmo tal que la falla del

espécimen ocurra en un rango de 10 a 60 seg. Si el núcleo se rompe en la primera carga, el resultado de la prueba se invalida.

Para tener un resultado mas confiable, se recomienda hacer cuando menos 10 pruebas para cada tipo de roca. Cuando la roca es anisotrópica, se obtendrán valores máximos y mínimos, esto se hace probando en varias direcciones por lo general paralelos y normales a los planos de anisotropía. Obviamente se obtienen mejores resultados cuando los planos de debilidad son perpendiculares al eje axial del núcleo, pero el ángulo entre el eje axial y la normal de los planos de debilidad no debe exceder los 30°. Para obtener los valores mínimos, se obtienen aplicando la carga paralela a los planos de debilidad y para obtener los valores máximos, la carga se debe aplicar perpendicularmente a los planos de debilidad.

Afortunadamente, en nuestro caso, el mineral de yeso a estudiar, se presentó muy homogéneo y no presentó planos de debilidad visibles. Por lo que fue mas sencilla la operación. Solo cuatro de la totalidad de los núcleos fueron desechados por que el ángulo formado entre la normal de los planos de debilidad y el eje de la carga axial, era de 45°.

La ecuación de compensación es la siguiente:

$$I_s = P / D^2$$

Donde:

I_s es el índice de carga

P es la carga máxima aplicada

D es el diámetro del espécimen

Pero el calcular el índice de carga no nos dice exactamente cual es la resistencia de la roca, por lo que ésta tiene que ser calculada y para esto, se usa la siguiente expresión: $c = (14+0.175D)I_s$.

En donde:

c es la resistencia al esfuerzo de compresión uniaxial.

I_s es el índice de carga

D es el diámetro del espécimen.

De la tabla de resultados de las pruebas de carga puntual podemos verificar la relación directa que existe entre el contenido de yeso en la roca y su resistencia a la compresión simple (siendo que entre mayor sea el contenido de yeso menor será la resistencia).

Tabla 11.1 Resultados de las 63 pruebas de carga puntual realizadas a núcleos en el laboratorio

MUESTRA	TIPO PROVA	D (mm)	L (mm)	P (kN)	f _s (Mpa)	G _c (Mpa)
M1 1	anhidrita gris banco 570	54.4	60.0	12.5	4.223886	99.3458045
M1 2	anhidrita gris banco 570	54.4	62.0	9.8	3.311527	77.88711073
M1 3	anhidrita gris banco 570	54.4	120.0	12.8	4.325260	101.7301038
M1 4/C4	anhidrita gris banco 570	54.4	111.0	12.8	4.325260	101.7301038
M1 5	anhidrita gris banco 570	54.4	94.0	11.5	3.885975	91.39814014
M1 6	anhidrita gris banco 570	54.4	109.0	12.0	4.054931	95.37197232
M1 7	anhidrita gris banco 570	54.4	52.0	11.0	3.717020	87.42430796
M2 1	Yeso blanco banco 570	54.4	100.0	3.8	1.284061	27.81682526
M2 2	Yeso blanco banco 570	54.4	83.0	1.3	0.439284	10.33196367
M2 3	Yeso blanco banco 570	54.4	122.0	3.4	1.148897	27.02205882
M2 4	Yeso blanco banco 570	54.4	121.0	3.5	1.182688	27.81682526
M2 5/B5	Yeso blanco banco 570	54.4	120.0	3.5	1.182688	30.20112457
M10 1/L1	Yeso blanco puro del banco 530	54.4	88.0	2.3	0.777195	27.81682526
M10 2	Yeso blanco puro del banco 530	54.4	60.0	3.5	1.182688	18.27962803
M10 3	Yeso blanco puro del banco 530	54.4	52.0	3.3	1.115106	26.22729239
M10 4	Yeso blanco puro del banco 530	54.4	59.0	2.1	0.709613	16.69009516
M6/1/D1	yeso blanco puro, bandeado café claro. Banco 570	54.4	108.0	5.5	1.858510	43.71215398
M62	yeso blanco puro, bandeado café claro. Banco 570	54.4	100.0	5.2	1.757137	41.32785467
M63	yeso blanco puro, bandeado café claro. Banco 570	54.4	160.0	5.6	1.892301	44.50692042
M64	yeso blanco puro, bandeado café claro. Banco 570	54.4	135.0	5.5	1.858510	43.71215398
M51	yeso bandeado contacto anhidrita banco 570	54.4	91.0	1.1	0.371702	8.742430796
M52	yeso bandeado contacto anhidrita banco 570	54.4	85.0	3.1	1.047524	24.63775952
M81	yeso con cristales, bandeado gris claro. Banco 550	54.4	106.0	3.4	1.148897	27.02205882
M82	yeso con cristales, bandeado gris claro. Banco 550	54.4	101.0	3.3	1.115106	26.22729239
M83	yeso con cristales, bandeado gris claro. Banco 550	54.4	109.0	3.2	1.081315	25.43252595
M84	yeso con cristales, bandeado gris claro. Banco 550	54.4	112.0	3.2	1.081315	25.43252595
M85	yeso con cristales, bandeado gris claro. Banco 550	54.4	110.0	3.4	1.148897	27.02205882
M86	yeso con cristales, bandeado gris claro. Banco 550	54.4	116.0	1.5	0.506866	11.92149654
M71	yeso blanco cristalizado con bandas grises. Banco 550	54.4	101.0	2.5	0.844777	19.8691609
M72	yeso blanco cristalizado con bandas grises. Banco 550	54.4	81.0	1.1	0.371702	8.742430796
M73	yeso blanco cristalizado con bandas grises. Banco 550	54.4	113.0	2.8	0.946151	22.25346021
M74	yeso blanco cristalizado con bandas grises. Banco 550	54.4	113.0	3.5	1.182688	27.81682526
M75	yeso blanco cristalizado con bandas grises. Banco 550	54.4	122.0	2.2	0.743404	17.48486159
M76	yeso blanco cristalizado con bandas grises. Banco 550	54.4	125.0	3.0	1.013733	23.84299308
M77	yeso blanco cristalizado con bandas grises. Banco 550	54.4	116.0	1.8	0.608240	14.30579585
M78	yeso blanco cristalizado con bandas grises. Banco 550	54.4	120.0	4.2	1.419226	33.38019031

MUESTRA	TIPO ROCA	D (mm)	L (mm)	P (KN)	s (Mpa)	Gc (Mpa)
M79	yeso blanco cristalizado con bandas grises. Banco 550	54.4	115.0	2.4	0.810986	19.07439446
M7 10	yeso blanco cristalizado con bandas grises. Banco 550	54.4	102.0	2.3	0.777195	18.27962803
M7 11	yeso blanco cristalizado con bandas grises. Banco 550	54.4	112.0	2.4	0.810986	19.07439446
M11 1	yeso blanco, bandas cafés y grises. banco 530	54.4	86.0	4.6	1.554390	36.55925606
M11 2/A2	yeso blanco, bandas cafés y grises. banco 530	54.4	81.0	3.9	1.317853	30.995891
M11 3	yeso blanco, bandas cafés y grises. banco 530	54.4	103.0	3.8	1.284061	30.20112457
M11 4	yeso blanco, bandas cafés y grises. banco 530	54.4	116.0	2.0	0.675822	15.89532872
M11 5	yeso blanco, bandas cafés y grises. banco 530	54.4	105.9	6.5	2.196421	51.65981834
M11 6	yeso blanco, bandas cafés y grises. banco 530	54.4	124.0	4.6	1.554390	36.55925606
M11 7	yeso blanco, bandas cafés y grises. banco 530	54.4	118.0	5.6	1.892301	44.50692042
M11 8	yeso blanco, bandas cafés y grises. banco 530	54.4	124.0	5.6	1.892301	44.50692042
M11 9	yeso blanco, bandas cafés y grises. banco 530	54.4	105.9	6.5	2.196421	51.65981834
M11 10	yeso blanco, bandas cafés y grises. banco 530	54.4	124.0	4.6	1.554390	36.55925606
M11 11	yeso blanco, bandas cafés y grises. banco 530	54.4	118.0	5.6	1.892301	44.50692042
M11 12	yeso blanco, bandas cafés y grises. banco 530	54.4	124.0	5.6	1.892301	44.50692042
M15 1	yeso blanco sin bandas. banco 550	54.4	88.0	5.6	1.892301	44.50692042
M15 2	yeso blanco sin bandas. banco 550	54.4	102.0	3.9	1.317853	30.995891
M15 3	yeso blanco sin bandas. banco 550	54.4	82.0	5.2	1.757137	41.32785467
M15 4	yeso blanco sin bandas. banco 550	54.4	105.0	6.0	2.027465	47.68598616
M15 5	yeso blanco sin bandas. banco 550	54.4	83.0	5.0	1.689554	39.7383218
M12 1	yeso blanco cristalizado, bandeado gris. banco 530	54.4	114.0	4.5	1.520599	35.76448962
M12 2	yeso blanco cristalizado, bandeado gris. banco 530	54.4	109.0	4.3	1.453017	34.17495675
M12 3	yeso blanco cristalizado, bandeado gris. banco 530	54.4	105.0	4.6	1.554390	36.55925606
M12 4	yeso blanco cristalizado, bandeado gris. banco 530	54.4	103.0	3.6	1.216479	28.6115917
M12 5	yeso blanco cristalizado, bandeado gris. banco 530	54.4	140.0	4.5	1.520599	35.76448962
M12 6	yeso blanco cristalizado, bandeado gris. banco 530	54.4	114.0	4.6	1.554390	36.55925606
M12 7	yeso blanco cristalizado, bandeado gris. banco 530	54.4	121.0	5.2	1.757137	41.32785467
M12 8	yeso blanco cristalizado, bandeado gris. banco 530	54.4	112.0	4.7	1.588181	37.35402249

NOTA: Los sitios de muestreo están ubicados en el plano.

D es el diámetro del espécimen ensayado en milímetros

L es la longitud del espécimen ensayado en milímetros

P es la presión aplicada al espécimen en kilo newton

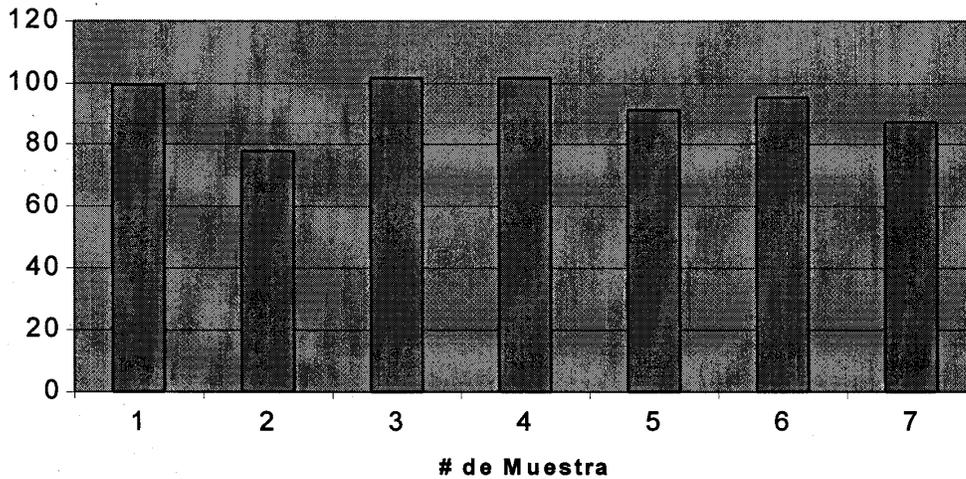
s es el índice de carga aplicado en mega pascuales

Gc es la resistencia a la compresión uniaxial en megapascuales

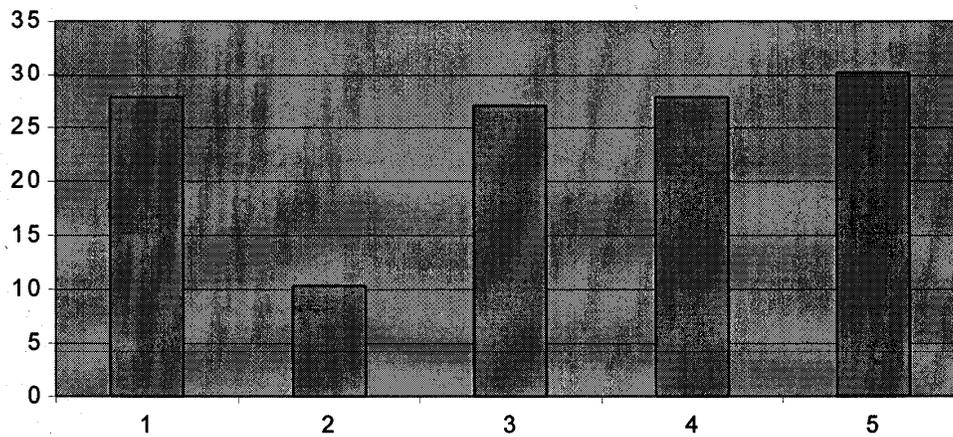
M1 4/C4 M14 Es la coordenada, C4 es muestra del análisis petrográfico

De la tabla 11.1, graficamos los valores de las resistencias de cada uno de los núcleos ensayados, en las cuales se compara el valor de la resistencia compresiva en megapascales contra el numero de muestra de cada tipo de roca.

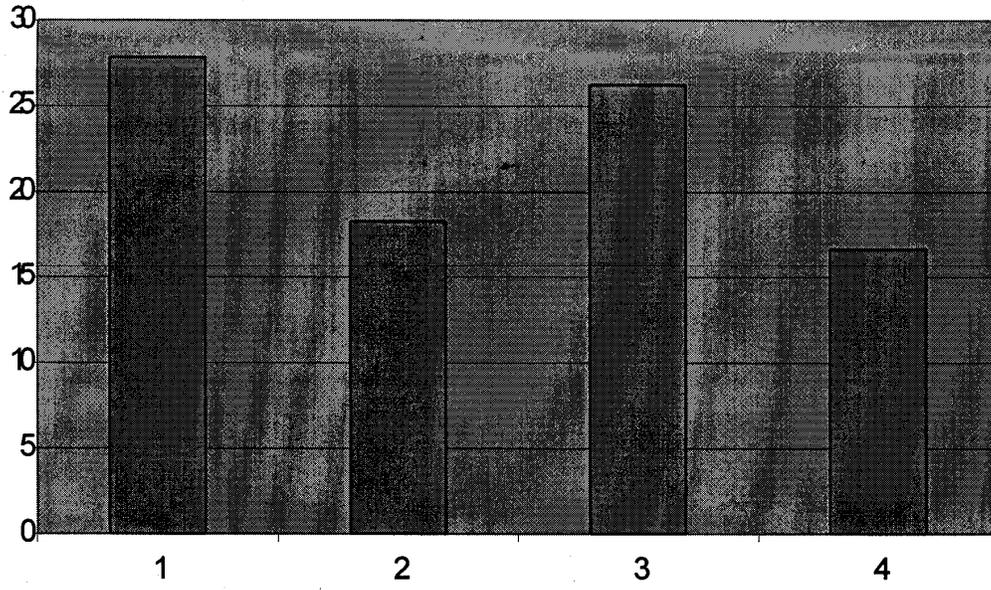
RESISTENCIA A LA COMPRESION UNIAXIAL EN MEGAPASCALES



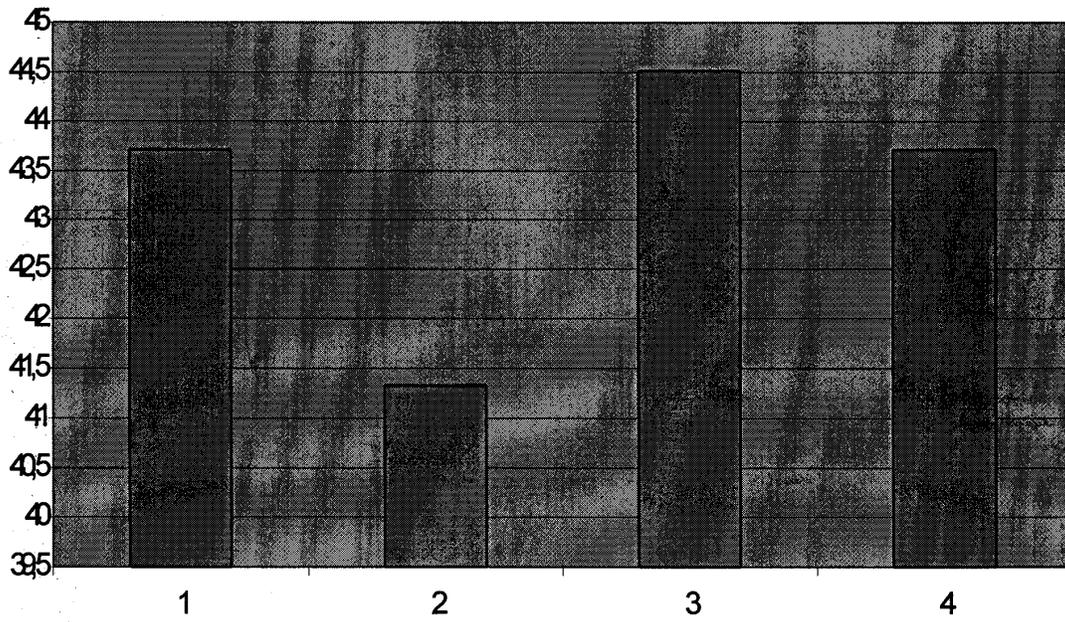
ANHIDRITA GRIS BANCO SUPERIOR (M1)



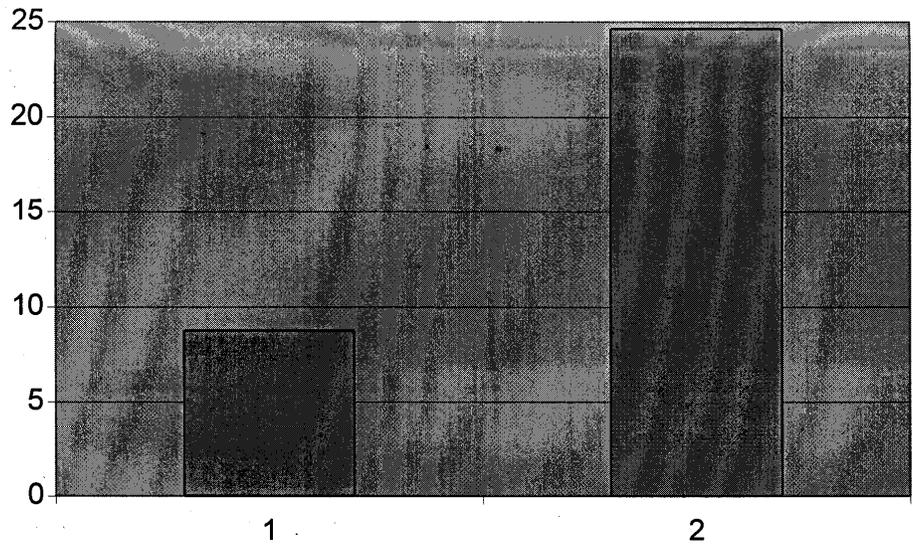
YESO BLANCO DEL BANCO SUPERIOR (M2)



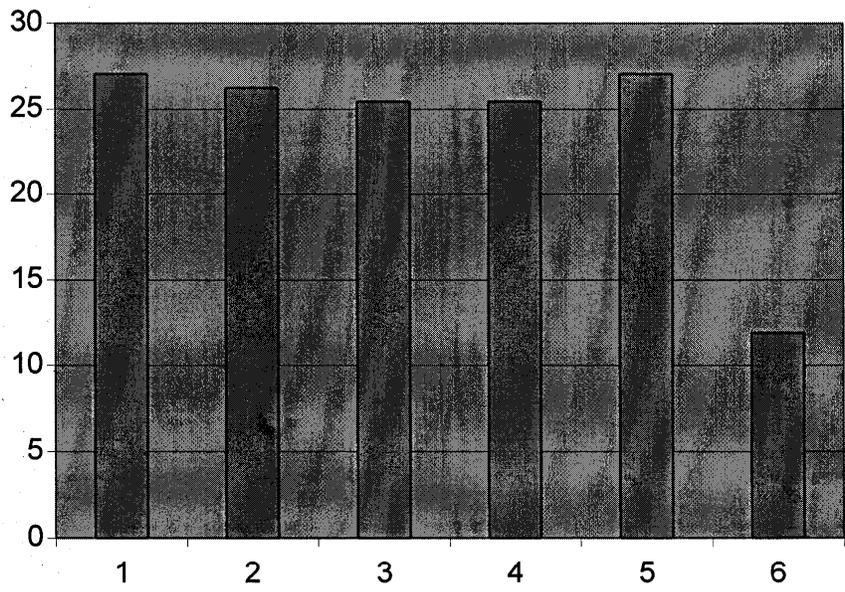
YESOBLANCO PURO BANCOS SUPERIOR (MIO)



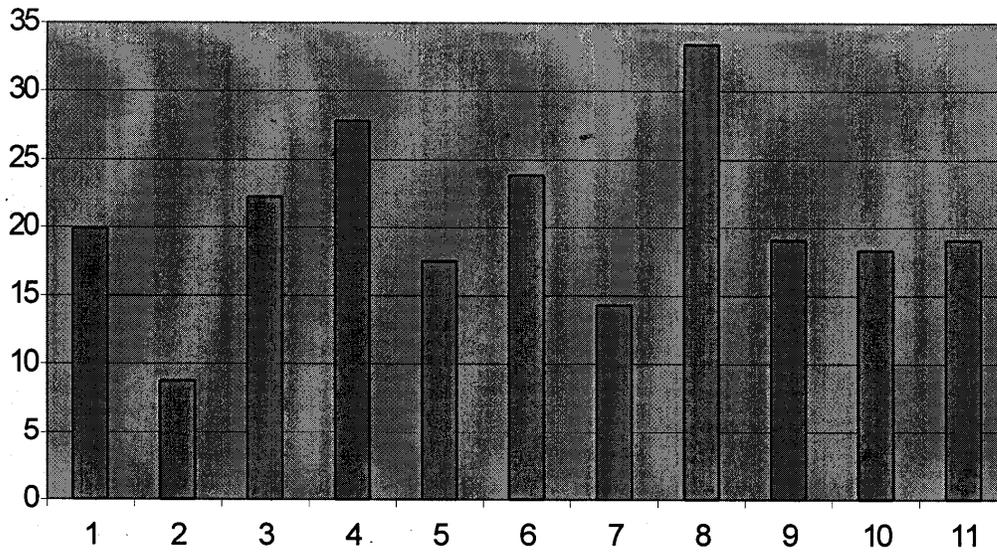
YESOBLANCO PURO CON BANDAS CAFES, BANCOS SUPERIOR (MIO)



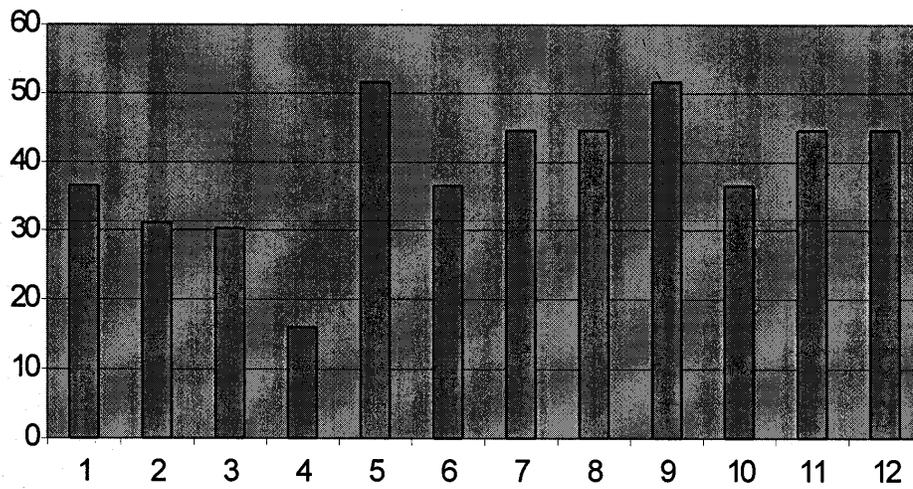
YESO BANDEADO CONTACTO ANHIDRITA, BANCO SUPERIOR (M5)



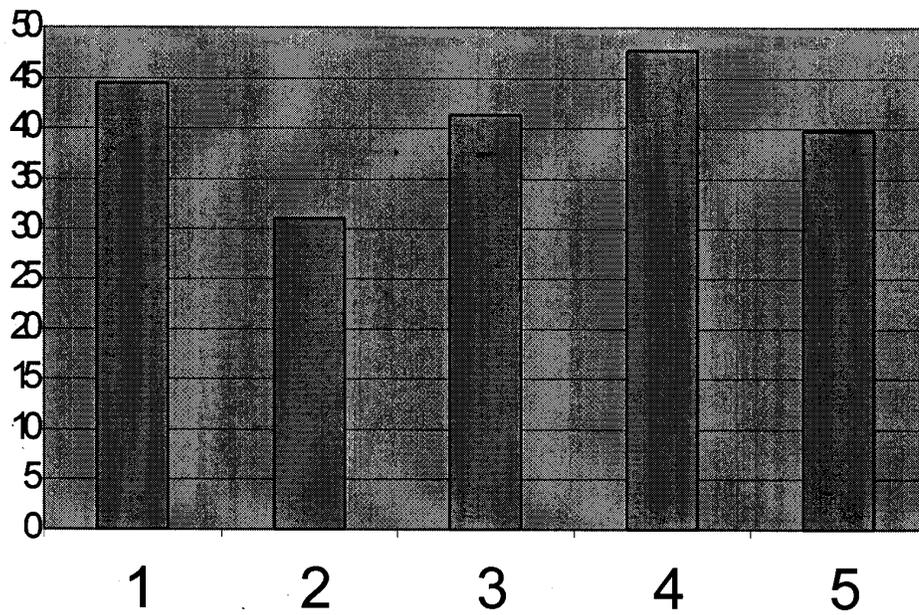
YESO CON CRISTALES, BANDEADO GRIS CLARO. BANCO INTERMEDIO (M8)



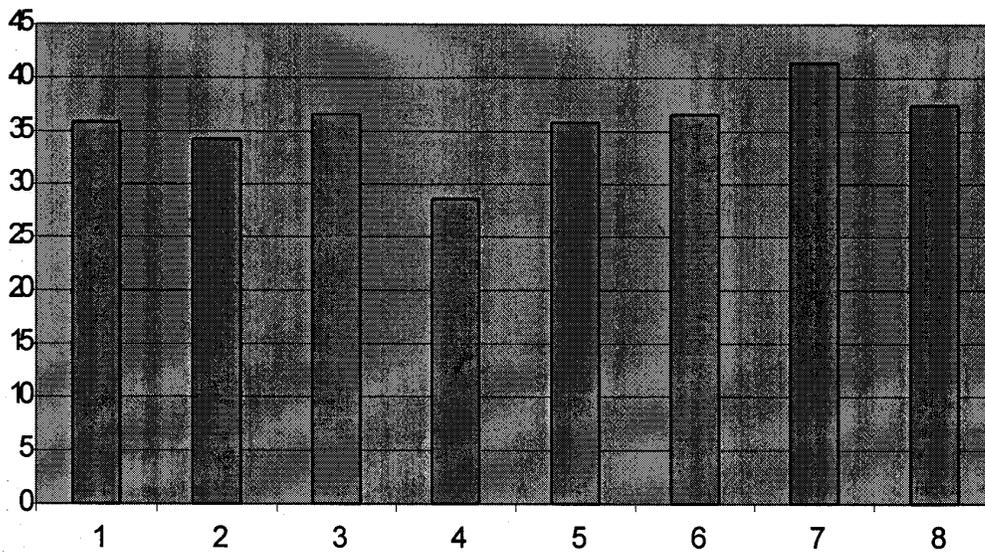
YESO BLANCO CRISTALIZADO CON BANDAS GRISES.
BANCO INTERMEDIO NORTE (M7)



YESO BLANCO CRISTALIZADO, BANDAS CAFES Y GRISES.
BANCO INFERIOR (M11)



YESO BLANCO SIN BANDAS BANCO INTERMEDIOSUR (M15)



YESO BLANCO CRISTALIZADO, BANDA DOGRIS
BANCO INTERIOR (M2)

En la siguiente tabla mostraremos según los análisis minerográficos los porcentajes de yeso y las resistencias de las muestras analizadas.

Tabla 11.2 Comparación entre el % de yeso de la roca y su resistencia compresiva.

Muestra	Coord.	Tipo de Roca	% de yeso	Gc (MPa)
A2	M11	Roca de yeso	97	30.99
B5	M2	Roca de Yeso	97	30.20
C4	M1	Roca de Anhidrita y yeso	23	101.73
D1	M6	Roca de Yeso	97	43.71
L1	M10	Caliza Micrítica	> 4%	27.81

Nota: en la tabla de las resistencias compresivas podemos localizar las coordenadas de las muestras analizadas Petrográficamente con las letras A,B,C,D y L

Nota2: estudio petrográfico realizado por: Geol. Elizabeth Araux

Como observamos en la tabla 11.1 y en la tabla así como en las gráficas, el contenido de yeso en la roca juega un papel importante en la resistencia a la compresión simple, pues mientras mas cantidad de yeso tenga la roca, su resistencia disminuye, pero aún así, la resistencia de la roca está por encima de normal para mineral de yeso que es de 10 a 25 megapascales. La anhidrita que esta en haciendo contacto con el yeso del banco 570, más exactamente en la coordenada M1, ayuda a tener un buen soporte de la columna de roca que esta sobre ella, pues su resistencia compresiva, fue la más alta que encontramos en la mina. Pero hay que tener en cuenta que este tipo de contactos son a los que hay que prestar mayor atención en su geometría con respecto al talud ya que puede representar una zona potencial de falla.