

estudio de las posibles reacciones y generación de nuevas formaciones minerales que tomarán lugar en el proceso de estabilización.

El diseño de estabilizaciones, empleado por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos menciona que no se deben ignorar la naturaleza de los tipos de minerales que contenga el suelo a estabilizar, ya que el no hacerlo trae como consecuencia serios fracasos.

Tabla # 1. Selección del aditivo estabilizante.
(Según Fuerza Aérea de los Estados Unidos)

Área	Clase de Suelo	Tipo de estabilizante aditivo recomendado	Restricción en el límite líquido e índice plástico del suelo	Restricción para el porcentaje que pasa la malla # 200	Observaciones
1 A	SW - SP	(1) Bituminosos (2) Cemento Pórtland (3) Cal-Cemento-Ceniza volátil	Índice Plástico < 25		
1 B	SW - SM SP - SM SW - SC SP - SC	(1) Asfálticos (2) Cemento Pórtland (3) Cal (4) Cal-Cemento-Ceniza volátil	Índice Plástico <10 Índice Plástico <30 Índice Plástico <12 Índice Plástico <25		
1 C	SM SC SM - SC	(1) Bituminosos (2) Cemento Pórtland (3) Cal (4) Cal-Cemento-Ceniza volátil	Índice Plástico <10 Índice Plástico <12 Índice Plástico <25	No exceda en 30 % en peso.	
2 A	GW - GP	(1) Bituminosos (2) Cemento Pórtland (3) Cal-Cemento-Ceniza volátil	Índice Plástico <25		Solamente material bien gradado y material que contenga hasta 45 % en peso de material que pasa la malla # 4
2 B	GW -GM GP - GM GW -GC GP - GC	(1) Bituminosos (2) Cemento Pórtland (3) Cal (4) Cal-Cemento-Ceniza volátil	Índice Plástico <10 Índice Plástico <30 Índice Plástico <12 Índice Plástico <25		Solamente material bien gradado y material que contenga hasta 45 % en peso de material que pasa la malla # 4
2 C	GM GC GM - GC	(1) Asfálticos (2) Cemento Pórtland (3) Cal (4) Cal-Cemento-Ceniza volátil	Índice Plástico <10 Índice Plástico <12 Índice Plástico <25	No exceda en 30 % en peso.	Solamente material bien gradado y material que contenga hasta 45 % en peso de material que pasa la malla # 4
3	CH CL MH ML OH OL ML CL	(1) Portland (2) Cal	Límite líquido <40 e Índice plástico <20 Índice Plástico >12		

1.2 ESTABILIZANTE (CAL).

1.2.1 Definición y Clasificación:

La cal hidratada es el agente estabilizador que se ha usado más profusamente a través de la historia, pero sólo recientemente se han hecho estudios científicos relacionados a su empleo como estabilizador de suelos y se han cuantificado sus magníficos resultados.

Cuando tenemos arcillas muy plásticas podemos disminuir dicha plasticidad y consecuentemente los cambios volumétricos de la misma asociados a la variación en los contenidos de humedad con el sólo hecho de agregarle una pequeña cantidad de cal.

La cal es el producto de la calcinación de rocas calizas, constituido principalmente por óxido de Calcio (CaO) y otros componentes. La adición de cal en los materiales arcillosos para terracerías, revestimientos, subbases y bases, por sus diferentes reacciones, en mayor o menor grado, produce aumento en el límite líquido y disminución en el índice plástico; aumenta la estabilidad volumétrica de los materiales cohesivos; aumenta la resistencia a la compresión simple y el CBR. Según su composición química se clasifica en: Cal viva, hidratada, hidráulica hidratada, hidratada al alto calcio, dolomítica.

1.2.2 Cal Viva

Producto de la calcinación de la roca caliza, constituido en su mayor parte por óxido de calcio (CaO), o bien óxido de calcio asociado con óxido de magnesio (MgO), capaces de reaccionar con el agua exotérmicamente, lo que produce su apagado o hidratación. Junto con la cal hidratada, la cal viva es la más utilizada para estabilización. Sus principales ventajas es que presenta una mayor reactividad con los materiales por estabilizar y menor generación de polvo durante su utilización.

1.2.3 Cal Apagada o Hidratada

Polvo seco, obtenido al tratar cal viva con la suficiente agua para satisfacer su afinidad química, provocando su hidratación. Consiste esencialmente en hidróxido de Calcio $[\text{Ca} (\text{OH})_2]$ o una mezcla de hidróxido de calcio, óxido de magnesio (MgO) e hidróxido de magnesio $[\text{Mg} (\text{OH})_2]$. Su principal ventaja es que ofrece menor peligro durante su transporte, manejo y utilización. Por razones ecológicas, en general no es aceptable utilizar cal viva. Se emplea preferentemente como cal apagada y en lechada, excepto cuando se requiere disminuir el contenido de agua en los suelos.

1.2.4 Cal Hidráulica Hidratada

Producto cementante seco, hidratado, obtenido al calcinar calizas que contiene sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) a una temperatura cercana a la de fusión incipiente, de tal forma que se obtiene suficiente óxido de calcio (CaO) para permitir la hidratación y, al mismo tiempo, dejando suficientes silicatos de calcio (CaSiO_3) sin hidratar, con lo que resulta un polvo seco, que cumple con las propiedades hidráulicas requeridas en algunas aplicaciones, destacándose la propiedad de fraguar y endurecer, aún bajo el agua.

1.2.5 Cal Hidratada, al alto Calcio

Cal hidratada, producta de la calcinación de calizas, contaminadas con menos del (5) cinco por ciento de carbonato de magnesio (MgCO_3).

1.2.6 Cal Dolomítica

Cal obtenida de la calcinación de calizas que contiene del treinta y cinco (35) al cuarenta y seis (46) por ciento de carbonato de magnesio (MgCO_3).

2. MATERIALES

En este capítulo se describen los materiales empleados en el estudio, así como las propiedades índice de éstos.

2.1 Características de los materiales estudiados.

2.1.1 Suelo

El suelo que se emplea en el trabajo fue obtenido en el sector del Batallón Ayacucho de la Ciudad de Manizales, junto al barrio Palermo.

En la tabla # 2, se anotan algunos aspectos físicos del material con el que se prepararon las muestras. Los ensayos se realizaron en los laboratorios de suelos y pavimentos de la Universidad Nacional Sede Manizales.

Tabla # 2 Características físico – mecánicas del suelo

ENSAYO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Humedad Natural		%	124.5
Proctor Estándar	Humedad óptima (H - S)	%	69
	Densidad Seca máxima (H - S)	Lb/ pie ³	45
Proctor Modificado	Humedad óptima (H - S)	%	84
	Densidad Seca máxima (H - S)	Lb/ pie ³	50
Límite líquido	Suelo húmedo	%	159
	Suelo Seco al Aire	%	93
Límite Plástico	Suelo húmedo	%	106
	Suelo Seco al Aire	%	77
Índice Plástico	Suelo húmedo	%	53
	Suelo Seco al Aire	%	16
Pasante Tamiz # 200		%	65.8
Clasificación SUCS	Suelo húmedo		MH
	Suelo Seco al Aire		MH
Equivalente Arena	Suelo húmedo	%	10
	Suelo Seco al Horno	%	26
Índice de Agregación			2.6
Compresión Inconfinada	qu (promedio)	Kg/cm ²	2.09
Peso unitario (?h)	(promedio)	g/cm ³	1.37
CBR	Inalterado	%	4.4
	Alterado (promedio)	%	4.8

2.1.2 Cal

Se empleó cal hidratada, con las siguientes especificaciones:

Tabla # 3 Especificaciones de la Cal

Hidróxido de calcio (*)	Ca(OH) ₂	85.00 %
*Proveniente de un óxido de calcio aprovechable.	CaO (útil)	64.57 %
Residuo insoluble en ácido.	R.I (HCl)	0.70 %
Residuo insoluble	R.I (H ₂ O)	3.00 %
Pérdidas por calcinación.	P.a.f	24.75 %
Oxido de sílice	SiO ₂	1.47 %
Oxido de aluminio	Al ₂ O ₃	0.51 %
Oxido férrico	Fe ₂ O ₃	0.48 %
Oxido de calcio total	CaO total	71.90 %
Retenido malla 325	R/325	10.00 %

Fuente: Cementos del Nare S.A.

3. PROCEDIMIENTO

3.1 Recolección de muestras.

El suelo para el análisis fue recolectado en el sector del batallón Ayacucho, en inmediaciones del barrio Palermo, de la ciudad de Manizales (Figura 2); se obtuvieron muestras alteradas e inalteradas (Figura 3). Las muestras fueron guardadas en el laboratorio de la Universidad Nacional Sede Manizales para ser ensayadas.



**Figura 2 Zona de Estudio
Recolección muestras.**



Figura 3

3.2 Caracterización del suelo.

Para la caracterización del suelo se efectuaron los siguientes ensayos: Granulometría con lavado, Equivalente Arena (Suelo húmedo – Secado al horno), Límites de Atterberg. Además se realizaron otros ensayos al suelo sin modificar como compresión inconfiada, Proctor estándar y modificado, CBR alterado e inalterado con el fin de comparar resultados con el suelo estabilizado con cal. Los resultados de los ensayos al suelo en su estado natural se muestran en la tabla # 2 perteneciente al capítulo de materiales.

3.3 Elaboración de especímenes.

Con el fin de obtener una mezcla bien homogénea, el material se disgregó casi en su totalidad, para después agregarle el estabilizante y poder mezclar más fácilmente.

Se utilizó la cal como estabilizante aplicado en 3 dosificaciones: 2%, 5% y 10%, sobre el peso del material y se mezcló con pala hasta obtener un color uniforme. (Figura 4).



Figura 4 Mezcla suelo-cal

Para cada porcentaje de cal se elaboraron 2 moldes de CBR, compactados en forma mecánica aplicando una energía de compactación de 55 golpes por capa distribuidos en 5 capas, con el martillo de Proctor Modificado (Figura 5). En total se prepararon 6 moldes de 6", de los cuales 3 de ellos fueron ensayados a los 14 días de curados y los otros 3 restantes a los 28 días.



Figura 5. Compactación CBR

Se prepararon 4 briquetas Marshall de 100 mm de diámetro por 65 mm de altura en promedio para cada % de cal establecido, para un total de 12 muestras. En cada briqueta se utilizaron 1200 gr de material (Figura 6). La compactación de dichos especímenes se llevó a cabo en la máquina Universal con una aplicación de carga de 15000 lb (Figura 7). Estas muestras se ensayaron para determinar el módulo de tensión indirecta usando el UTM en las diferentes edades de curado (14 y 28 días).



Figura 6. Briqueta Marshall



Figura 7. Aplicación Carga para elaboración briqueta.

Además se elaboraron otros 10 especímenes: 4 con el 2% de cal, 4 con el 5% y 2 con el 10% (los otros 2 especímenes con el 10% de cal no se pudieron elaborar a causa del daño del molde). Dichas muestras miden 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, cumpliendo con la relación 1:2 para muestras que se ensayaron en compresión inconfiada. La energía de compactación empleada en estas probetas fue de 25 golpes por cada capa, distribuidas en 5 capas, con el martillo de Proctor Modificado. A continuación se aprecia el molde utilizado para la elaboración de estas muestras (Figura 8).



Figura 8. Molde compresión Inconfiada

La forma de extraer el material del molde fue en la máquina universal como se aprecia en la siguiente figura (Figura 9):



Figura 9. Extracción Probeta Compresión Inconfiada

En todos los casos anteriores las mezclas fueron preparadas con la humedad natural del suelo, con el fin de mantener las condiciones del sitio en estudio.

3.4 Aplicación de cal en el sitio.

En la zona de estudio se llevó a cabo la aplicación de cal en varios puntos, sin mezclarla, esperando que por difusión de la misma cambie o modifique el suelo (Figura 10). Con el fin de establecer si se presenta algún cambio en las propiedades del suelo a los 28 días de aplicada se tomaron muestras en dicho tiempo y se ensayaron. Se sacaron muestras en lugares adyacentes a los puntos de aplicación de la cal para realizar ensayos de compresión inconfiada.

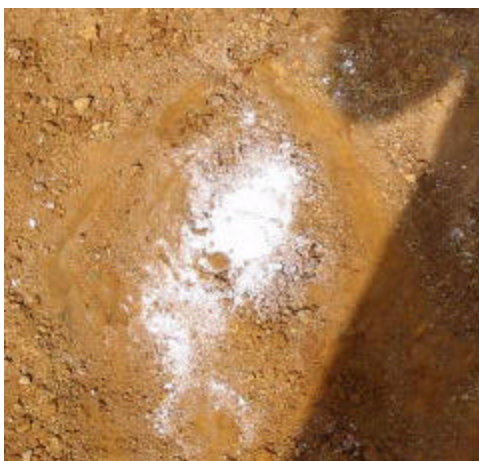


Figura 10. Aplicación de cal en el sitio

3.5 Tiempo de curado

Una de las variables en el procedimiento de preparación de probetas, es el tiempo de curado del material, el cual es el lapso transcurrido entre el momento de la compactación y el inicio de la prueba. Los tiempos de curado fijados para los diferentes ensayos fueron de 14 y 28 días respectivamente. Los moldes de CBR se dejaron reposar en un tanque con agua con el fin de saturar la mezcla completamente durante los días antes mencionados (Figura 11). Los demás moldes para ensayar a compresión inconfiada y tensión indirecta fueron guardados en el laboratorio de la Universidad Nacional en un lugar donde las

pérdidas de humedad fueran pocas. A continuación se muestran los diferentes especímenes con su respectivo contenido de cal (Figuras 12,13 y 14).



Figura 11. Curado muestras CBR de Cal



Figura 12. Muestras con 2% de Cal



Figura 13. Muestras con 5% de Cal.



Figura 14. Muestras con 10% de Cal.

3.6 Ensayo de muestras.

Pasados los días de curado de las muestras se procedió a realizar los diferentes ensayos (CBR, Tensión indirecta con el UTM, compresión inconfiada), con el fin de comparar los resultados obtenidos.

Se ensayaron 3 moldes de CBR a los 14 días, los otros 3 moldes fueron ensayados a los 28 días.

Se ensayaron 2 briquetas a tensión indirecta por cada porcentaje de cal mezclado para cada edad de curado. En el momento del ensayo una de las 2 briquetas del 5% de cal ensayadas a los 14 días se dañó y la otra se destruyó después de ser

girada, tal vez a causa del resentimiento sufrido previamente en el ensayo por la aplicación de carga.

Los especímenes ensayados a compresión inconfiada fueron 5 a los 14 días y 4 a los 28, ya que 1 de ellos se desechó porque se encontraba dañado o resquebrajado. A continuación se muestran los diferentes ensayos (Figuras 15, 16 y 17).



Figura 15. Ensayo de CBR.



Figura 16. Ensayo de Tensión Indirecta



Figura 17. Ensayo de Compresión Inconfiada.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Descripción del suelo

De los resultados obtenidos en el laboratorio, podemos decir que el suelo en estudio es susceptible a cambiar sus propiedades con el secado, y esto se observó en el límite líquido el cual bajó del 159% ensayado en su humedad natural, al 93% después de secado al aire.

También se puede decir que es un material débil, ya que posee un CBR inalterado de 4.4 % y un CBR promedio de 4.8% para muestras compactadas en el laboratorio.

A continuación se muestran los resultados de los ensayos de CBR, tensión indirecta y compresión inconfinaada.

4.2 Resultados Ensayos CBR.

Tabla # 4 Resultados ensayos CBR

ESTABILIZANTE		EDAD DE CURADO (días)	CBR Corregido (%)			HUMEDAD DE MEZCLADO (%)	HUMEDAD DE PENETRACIÓN (%)			DENSIDAD SECA (Lbs/pie ³)		
			Muestra				Muestra			Muestra		
			1	2	3		1	2	3	1	2	3
NINGUNO	ALTERADO	4	5.2	5.8	4.1	-	102	89.64	83.3	46.48	50.76	47.63
			6.7	3.7	3.5	-	66	69.36	72	57.30	53.08	50.59
	INALTERADO	4	4.4	-	-	-	103.3	-	-	45.92	-	-
CAL	2%	14	10.4	-	-	103	96.7	-	-	44.99	-	-
	5%	14	17.3	-	-		98.1	-	-	44.91	-	-
	10%	14	25.3	-	-		85.48	-	-	49.50	-	-
	2%	28	14.7	-	-	103	103	-	-	44.68	-	-
	5%	28	17.5	-	-		96.7	-	-	45.49	-	-
	10%	28	46.4	-	-		89	-	-	47.99	-	-

Todos los moldes estuvieron sumergidos según el tiempo de curado hasta el momento de la penetración de cada uno.

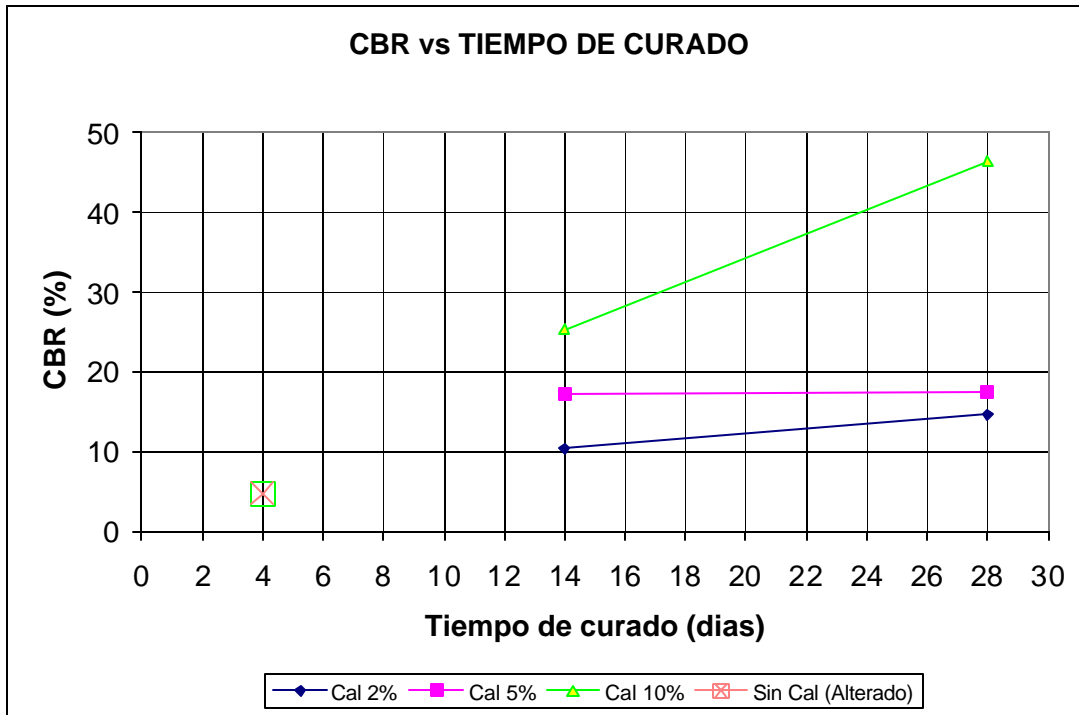


Figura 18. Variación del CBR con el tiempo de curado.

En la figura 18 se observa que existe un incremento en la resistencia del suelo con cualquier porcentaje de contenido de cal. También se puede deducir de dicha gráfica que a medida que aumenta el contenido de cal también aumenta la capacidad portante del suelo, mostrando que con el 2% de cal el CBR aumentó de 4.4% a 10.4% a los 14 días de curado y a 14.7% a los 28 días, por lo tanto se produjo un aumento en la resistencia del 234% a los 28 días. Con el 5% de cal se dio un aumento del 297% a los 28 días de curado. Pero del 5% al 10% se tuvo un aumento muy significativo, con lo cual el suelo tratado con el 10% y con un tiempo de curado de 28 días se obtuvo un aumento de resistencia de aproximadamente 954 %, pasando de un CBR de 4.4% a 46.4%, lo que es significativamente muy bueno, con el fin de disminuir espesores de las capas de la estructura del pavimento.

El tiempo de curado fue una variable muy importante, ya que se observó que mientras más tiempo se dejó la muestra curando, mejores resultados de resistencia se obtuvieron, sobretodo en los porcentajes del 2% y 10%.

4.3 Resultados Ensayos Compresión Inconfinada.

Tabla # 5. Resultados ensayos compresión inconfinada

ESTABILIZANTE		DIAS DE CURADO		qu (Kg/cm ²)		Peso Unitario (g/cm ³)	
		Muestra		Muestra		Muestra	
		1	2	1	2	1	2
Ninguno		0	0	2,58	1,61	1,32	1,42
Aplicación de cal en el sitio de estudio.		0	0	3.01	1.93	1.35	1.28
		0	0	3.30	-	1.34	-
Cal	2%	14	14	2,54	2,80	1,23	1,2
	5%	14	14	3,30	3,12	1,25	1,25
	10%	14	14	4,68	-	1,16	-
	2%	28	28	1.13	1.13	1.05	1.06
	5%	28	28	1.59	-	1.05	-
	10%	28	28	1.27	-	1.01	-

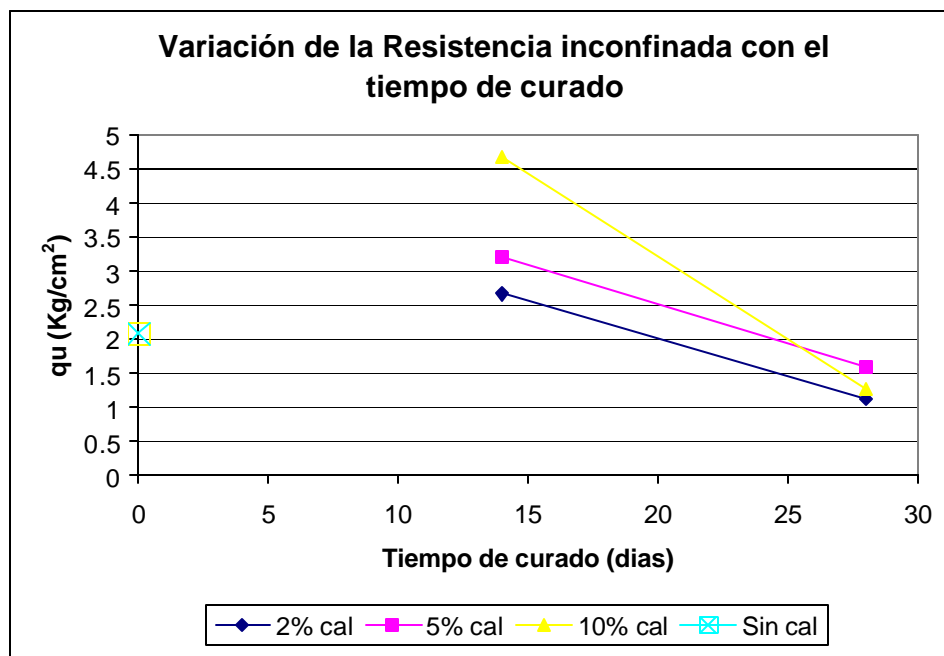


Figura 19. Variación de la resistencia inconfinada con el tiempo de curado.

En la gráfica se observa que la resistencia a la compresión inconfiada del suelo aumenta con el contenido de cal hasta los 14 días de curado, y luego disminuye drásticamente a los 28 días. Dicho comportamiento se debió a que las muestras al ser ensayadas a los 28 días presentaban grietas, lo que pudo afectar la resistencia.

Es importante destacar que con el 10% de cal la resistencia a la compresión aumentó en un 124% de su valor en su estado natural, pasando de 2.09 kg/cm² a 4.68 Kg/cm².

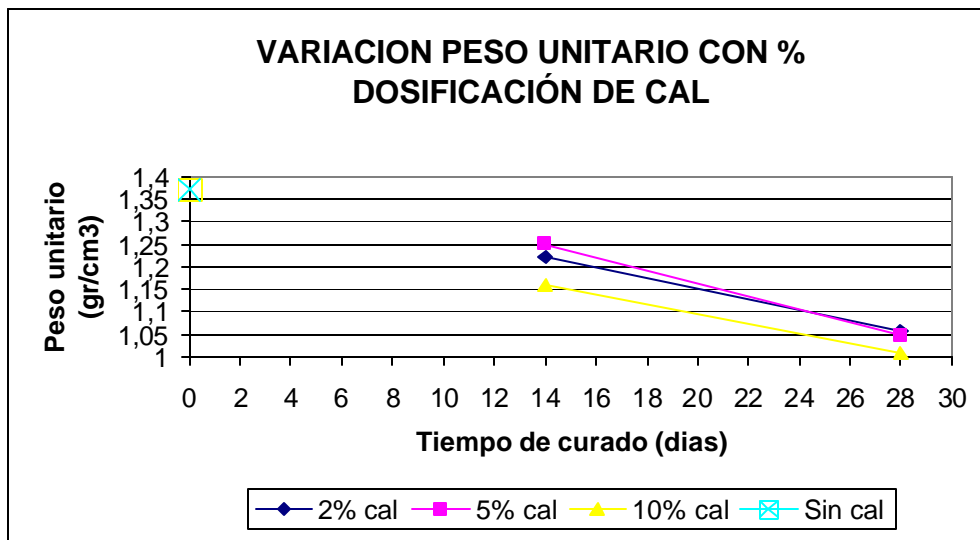


Figura 20. Variación del peso unitario con % de dosificación de cal.

En la figura anterior se puede observar que el peso unitario del suelo, aunque no varió demasiado, éste disminuyó un poco su valor con el contenido de cal en las muestras. Los especimenes con el 10% de cal obtuvieron el peso unitario más bajo.