
ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ESTABILIZACION DE UN SUELO
PLASTICO CON CAL Y/O CEMENTO PORTLAND

Ing. Luis M. Fossa
Ing. Carlos A. Alemán
Sr. Oscar Arrechea

INTRODUCCION

Entre los muchos problemas a que se encuentra enfrentado el técnico vial, para dar adecuada y económica solución al proyecto de un pavimento, se encuentra la carencia de materiales de alta calidad para ser utilizados como sub-base o base del perfil resistente y a la distancia de transporte no siempre conveniente.

Dicha circunstancia obliga a contemplar la posibilidad de utilizar los disponibles en el lugar. Estos, en la mayoría de los casos, no reúnen por sí solos las condiciones mínimas indispensables para ser tomados en consideración, ya que por su textura fina, características de plasticidad y reducida resistencia al corte en condiciones normales de servicio, no soportarían con eficiencia las sollicitaciones y frecuencias debidas a la carga del tránsito.

Se plantea así la necesidad de aportar medios y elementos necesarios para mejorar o cambiar sus características, aumentando su poder de sustentación para las condiciones más desfavorables o dicho en otros términos, estudiar su estabilización.

En los últimos tiempos se ha intensificado la investigación de este problema, que sin lugar a dudas representa un factor importante en la economía de la obra vial, utilizando para ello, productos asfálticos, cal, cemento portland, etc, o la combinación de los mismos, para mencionar sólo a los más ampliamente conocidos y de factible utilización.

No entraremos a considerar en esta oportunidad, la eficiencia y posibilidades de cada uno de ellos, en cuanto a la condición de agente estabilizante se refiere, sino que nos limitaremos a los dos mencionados en último término.

En cuanto a la estabilización de suelos con cemento

portland, es mucho lo reslizado tanto en escala de laboratorio como de obra, en el país como en el extranjero. No ocurre lo mismo en lo referente a la cal, ya que recién en los últimos años, ha recibido entre nosotros cierta consideración, quizás mucho menor de lo que pueden ofrecer sus posibilidades.

Los procedimientos de estabilización de suelos con cal, resultan en cierto modo similares a los empleados en la estabilización de suelos con cemento portland, aunque pueden ser consideradas algunas variantes, debido al efecto distinto de la cal y del cemento sobre el suelo.

En el proceso de estabilización de suelos con cemento portland, la hidratación de éste produce compuestos cementantes independientes del suelo. Esta resultaría la etapa primaria de la estabilización, mientras que la cal dejada libre en el proceso de hidratación del cemento puede reaccionar con la arcilla presente en el suelo.

En el caso de suelos estabilizados con cal hidratada, el elemento fundamental de la resistencia del suelo estabilizado con el cemento estaría ausente, debido a que la acción de los componentes es débil. La resistencia en el caso de la cal sería consecuencia directa de la reacción entre ésta y la fracción arcillosa del suelo.

Hay diversas reacciones químicas que tienen lugar en este proceso de por sí complejo. En una primera etapa se produce un intercambio de bases: los iones calcio, en una concentración mayor a la estrictamente necesaria teóricamente, desplazan a los otros cationes adsorbidos por la fracción arcillosa del suelo, cambiando la densidad de la carga eléctrica alrededor de las partículas de arcilla, las que en consecuencia se atraen, originando el proceso de floculación, con reducción de la plasticidad, haciendo a los suelos plásticos menos cohesivos y más trabajables.

En el caso de que el suelo sea compactado, se favorecería el desarrollo de cohesión, por las reacciones del calcio con la sílice y la alúmina que puede estar presente en la fracción coloidal del suelo, para formarse compuestos derivados de las combinaciones entre la alúmina hidratada ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$), el óxido férrico hidratado ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$),

la sílice soluble y el calcio aportado por la cal. Esta acción es conocida como reacción puzolánica, de carácter lento y que proporcionaría resistencia a la mezcla, que continuaría incrementándose por las reacciones lentas entre las superficies de las partículas del suelo y el medio alcalino que lo rodea.

Por último, la absorción por el suelo del bióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera del suelo, provoca la reacción con el calcio, para formar carbonato de calcio o magnesio, de acción cementante relativamente débil. Por esta circunstancia si se desea incrementar la resistencia, deben tomarse las providencias necesarias en obra para reducir en lo posible este último proceso.

CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

A los efectos de estudiar en forma comparativa la estabilización de un suelo plástico, con cal aérea hidratada en polvo, con cemento portland y con ambos productos a la vez, se utilizó un suelo de tercer horizonte, de textura fina, altamente plástico, cuyas características se indican en la planilla n^o 1.

Planilla n^o 1 (suelo de tercer horizonte)

Suelo	A
Horizonte	C
Profundidad, cm	60-100
Límite líquido	49,4
Límite plástico	23,8
Índice de plasticidad	25,6
Materia orgánica (C), %	0,097
CO ₂ (como CaCO ₃), %	0,3
Pasa tamiz 200, %	97,5
Clasificación	A 7-6
Índice de grupo	17

Análisis granulométrico:

Arena (mayor de 50 micrones), %	30,5
Limo (entre 50 y 5 micrones), %	60,8
Arcilla (entre 5 y 1 micrón), %	7,9
Coloides (menor de 1 micrón), %	1,0
Textura	Limo Arcilloso

Ensayo de compactación Proctor:

P.U.V.S., kg/l	1,480
Humedad óptima, %	24,8

Tipo mineralógico de la arcilla:

La determinación se realizó sobre la fracción arcilla de la muestra de sedimento, dispersada en NaOH. Se utilizó para la identificación el método de goniometría en difracción de rayos X, radiación de Cu. Se constató como único mineral del grupo de las arcillas, la presencia de illita.

Las características de la cal y del cemento portland empleados en los estudios realizados, se indican a continuación:

Planilla n^o 2 (Características de la cal)

Expansión en autoclave, %	0,05
Sutileza:	
Retenido sobre tamiz n ^o 30	Restos
Retenido sobre tamiz n ^o 100, %	1,0
Retenido sobre tamiz n ^o 200, %	6,2
Análisis químico:	
Residuo insoluble, %	4,1
Anhidrido carbónico (CO ₂), %	3,5
Sílice soluble, %	2,2
Suma de óxidos (R ₂ O ₃), %	0,5
Cal útil, en CaO, %	61,7
Oxido de magnesio (MgO), %	0,2
Oxido de calcio (CaO), %	68,5
Pérdida por calcinación, %	23,6

Planilla nº 3 (características del cemento portland)

Fineza:	
Retenido sobre tamiz 900 mallas/cm ² , %	0,2
Retenido sobre tamiz 4900 mallas/cm ² , %	7,0
Expansión en autoclave, %	0,06
Tiempo de fraguado (Vicat):	
Iniciación	3 h 50 m
Final	5 h 50 m
Agua para pasta normal, %	26,5
Análisis químico:	
Residuo insoluble, %	0,4
Pérdida por calcinación, %	1,4
Anhídrido sulfúrico, %	1,8
Oxido de magnesio (MgO), %	1,5
Sílice soluble (SiO ₂), %	23,4
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃), %	2,8
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃), %	4,7
Oxido de calcio (CaO), %	63,3
Cal libre (en CaO), %	0,0
Oxido de sodio (Na ₂ O), %	0,67
Oxido de potasio (K ₂ O), %	0,36
Resistencia a la tracción del mortero:	
A 7 días, kg/cm ²	25,5
A 28 días, kg/cm ²	31,5
Resistencia a la compresión del mortero:	
A 7 días, kg/cm ²	320
A 28 días, kg/cm ²	450

PARTE EXPERIMENTAL

El estudio se inició preparando mezclas del suelo con porcentajes del 8, 10 y 12 de cemento portland, expresado éste en peso de suelo seco. Con estas mezclas, inmediatamente de preparadas, se confeccionaron probetas cilíndricas de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura, compactadas a la densidad y con la humedad óptima correspondiente al ensayo Proc-

tor Normal del suelo solo. Las probetas fueron llevadas a cámara húmeda para su fragüe durante 7 y 28 días. Cumplidos dichos períodos, se las ensayó a la compresión sin confinar, en los dos estados siguientes: como eran retiradas de cámara y previa una hora de inmersión en agua. Al propio tiempo se determinó el índice plástico, aprovechando para ello el material de las probetas que ya habían sido ensayadas a la compresión.

En idéntica forma se prepararon probetas con mezclas de suelo y cal aérea hidratada con los porcentajes antes expresados, que fueron compactadas de inmediato y sometidas a idénticos ensayos y en las mismas condiciones que las indicadas para suelo cemento.

En las figuras 1 y 2 se indica la variación del índice de plasticidad de las mezclas compactadas de suelo cemento y suelo cal, para 7 y 28 días de curado y en las figuras 3 y 4 las resistencias a compresión sin confinar para las mismas mezclas compactadas y para idénticos períodos de fragüe.

De la observación de las figuras anteriores se puede deducir que, en lo que respecta a la reducción del índice de plasticidad, la cal resulta mucho más efectiva que el cemento portland a los siete días. Para veintiocho días, la corrección del índice continuó para el suelo cemento; en cambio con el suelo cal ocurrió lo contrario, es decir, se constató un aumento del índice en relación con el correspondiente a siete días. En lo que a resistencia a compresión se refiere, el cemento resulta más efectivo, tanto para siete como para veintiocho días de fragüe. Cabe hacer notar que los valores de resistencia a compresión con una hora de inmersión en agua, correspondientes a las probetas de suelo cemento para siete días de fragüe y a las de suelo cal para veintiocho días, son relativos por cuanto algunas de ellas experimentaron efectos de disgregación en agua, en todos los porcentajes para las estabilizadas con cemento y para los porcentajes menores en las estabilizadas con cal.

Para proceder a la estabilización del suelo utilizando simultáneamente cal y cemento portland, se siguieron dos criterios que pasamos a comentar. El primero consistió

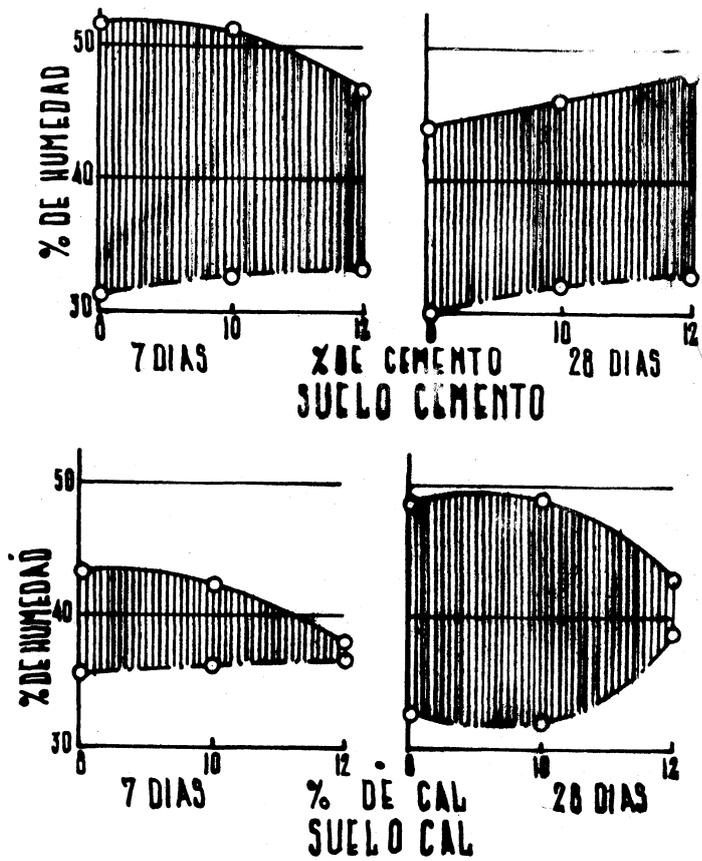


Fig. 1

Indice plástico de mezclas de suelo cemento. Límite líquido en línea llena, límite plástico en línea punteada.

Fig. 2

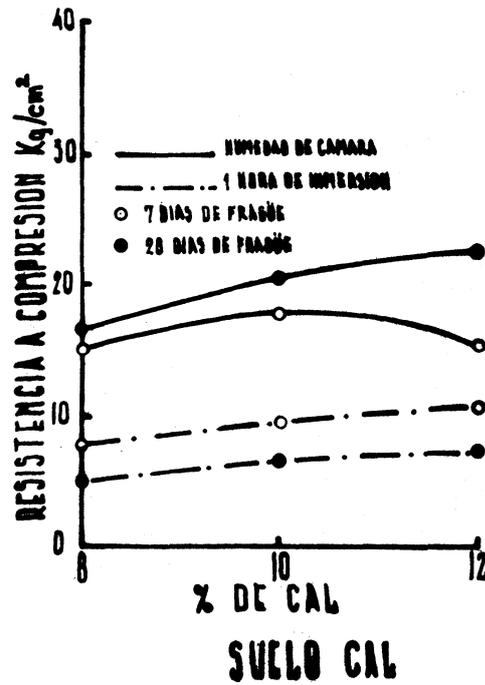
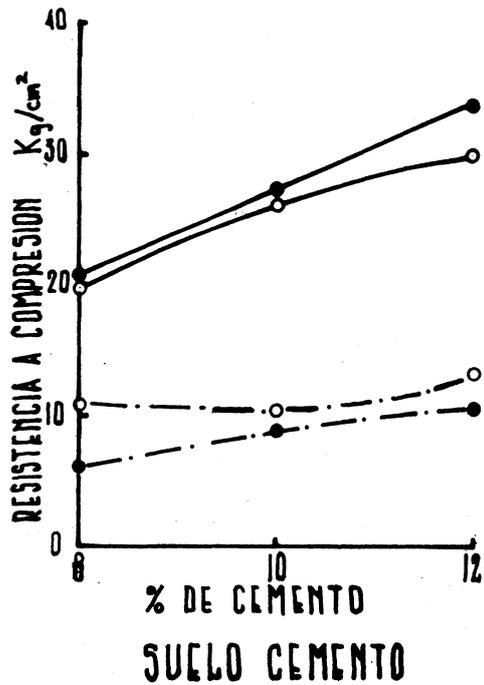


Fig. 3

Fig. 4

Resistencia a compresión de mezclas de suelo cemento y suelo cal respectivamente.

en preparar mezclas de suelo con 2 y 4 % de cal aérea hidratada en polvo. Estas mezclas se dejaron en estado suelto, en corrección, durante siete días al ambiente, con un contenido de humedad cuatro puntos sobre la óptima de compactación Proctor del suelo solo. Cumplido dicho tiempo, se efectuó el ensayo Proctor Normal y se determinó el índice de plasticidad. Los gráficos que indican la variación de la densidad máxima y humedad óptima de los suelos corregidos, se indican en la figura 5. En ella se observa, como es lógico, un descenso de la densidad y un aumento de la humedad óptima para aumento del contenido de cal.

Cumplido el período fijado de corrección del suelo con cal, se le adicionó a cada mezcla porcentajes de cemento portland, de modo que juntamente con el porcentaje de cal que ya tenía agregado se completara el 8, 10 y 12 %, para preparar de inmediato probetas cilíndricas idénticas a las ya descritas, con la densidad y la humedad óptima correspondiente al suelo corregido con cal. Dichas probetas fueron llevadas a cámara húmeda para cumplir períodos de fragüe de siete y veintiocho días, determinándose el índice plástico y la resistencia a compresión sin confinar en los dos estados ya mencionados. Los resultados se encuentran graficados en las figuras 6 y 7 y 8 y 9 respectivamente.

En este caso, las mezclas del suelo corregido con 2 % de cal y porcentajes crecientes de cemento portland, experimentaron una reducción del índice de plasticidad más efectiva que la correspondiente a la de las mezclas de suelo corregido con 4 % de cal.

En los gráficos de las figuras 8 y 9 se verifica que la resistencia a compresión resulta, en general, un poco mayor para el suelo corregido con 2 % de cal, para las distintas condiciones en que fueron ensayadas.

Como complemento de lo anteriormente comentado, debe agregarse que se efectuaron también determinaciones de índice y resistencia a compresión, sobre el suelo solo y sobre las mezclas de suelo luego de siete días de corrección con 2 y 4 % de cal, en probetas preparadas con la densidad y humedad óptima del Proctor Normal correspondiente a cada caso, ensayadas de inmediato. Los resultados obteni-

dos fueron los siguientes:

	% de Cal		
	0	2	4
Resistencia a compresión (kg/cm ²)	3,1	3,4	3,3
Índice plástico	25,6	25,8	16,2

Las probetas que debían ensayarse previa una hora de inmersión, se disgregaron, en todos los casos, al poco tiempo de sumergidas en agua.

El segundo criterio adoptado, consistió en mezclar al mismo tiempo el suelo con 2 y 4 % de cal y porcentajes crecientes de cemento portland, hasta completar con ambos, el 8, 10 y 12 %, preparando de inmediato las probetas a la densidad y con la humedad óptima correspondiente al Proctor Normal del suelo solo.

Los ensayos efectuados sobre estas probetas después de períodos de fragüe de siete y veintiocho días, fueron los mismos ya comentados para el primer criterio adoptado.

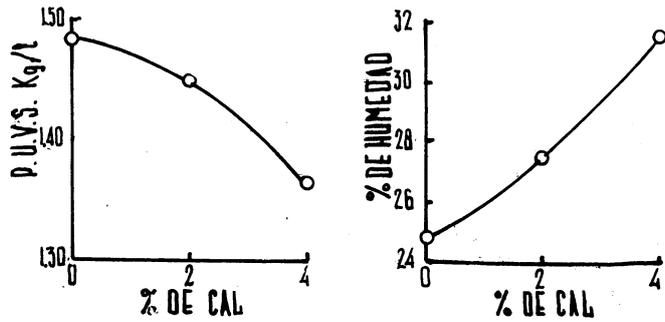
Los resultados de índice están indicados en los gráficos de las figuras 10 y 11 y los de resistencia a compresión en las figuras 12 y 13.

Los índices de plasticidad determinados para ambas mezclas, decrecen con el aumento del porcentaje de cemento utilizado, tanto para siete como para veintiocho días de fragüe, aunque los valores correspondientes a veintiocho días resultaron en ambos casos, algo superiores a los de siete días, siendo esto más manifiesto en las mezclas con 4 % de cal.

En cuanto a resistencia a compresión sin confinar, los resultados más favorables se obtuvieron para las mezclas a las que se incorporó el 2 % de cal, conjuntamente con los porcentajes de cemento, como puede observarse claramente en los gráficos correspondientes (figuras 12 y 13).

Como resumen final de todos los resultados obtenidos, se incluye la planilla n^o 4 y el gráfico de la figura 14, correspondiente a límites líquidos e índices de plasticidad.

De su observación se desprende que los resultados



	% DE CAL		
	0	2	4
P.U.V.S.	1.480	1.450	1.368
Hum. Optima	24.8	27.5	31.6

Fig. 5

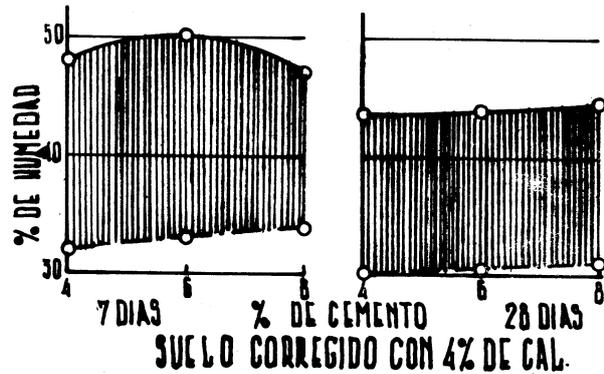
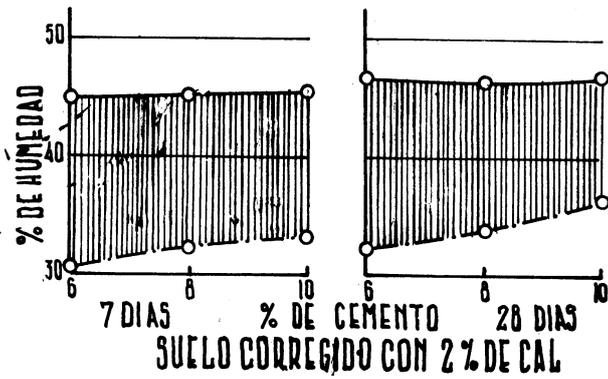


Fig. 6

Fig. 7

Indice plástico. Límite líquido en línea llena y límite plástico en línea punteada.

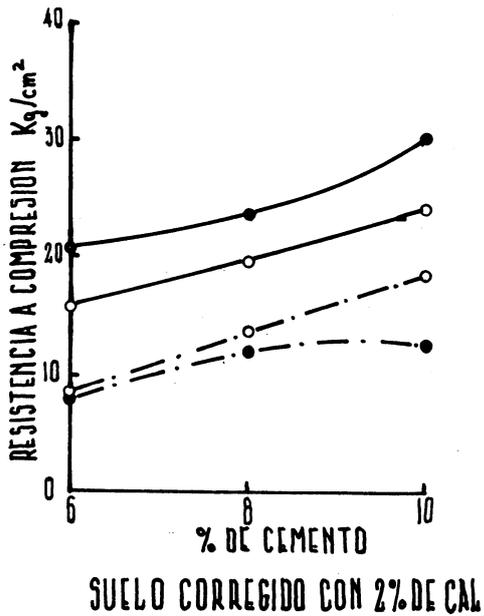


Fig. 8

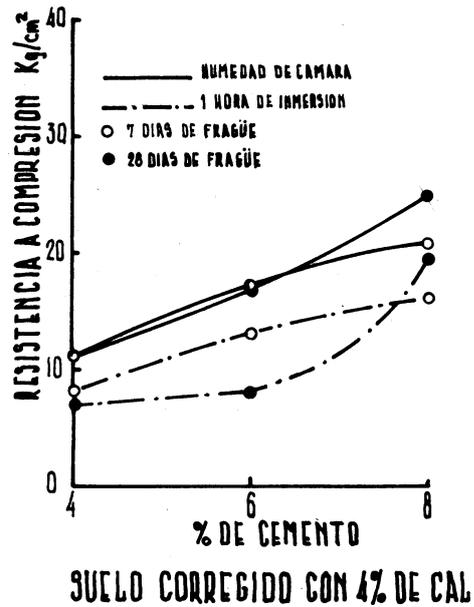


Fig. 9

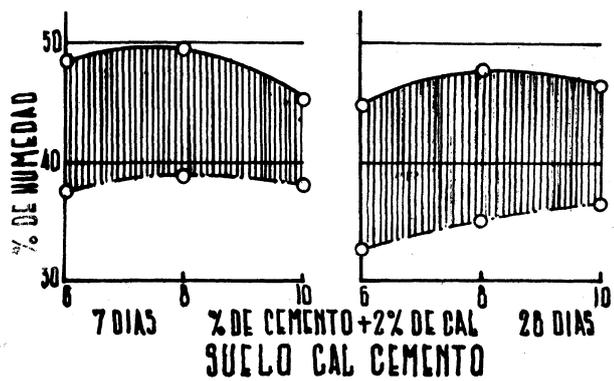


Fig. 10

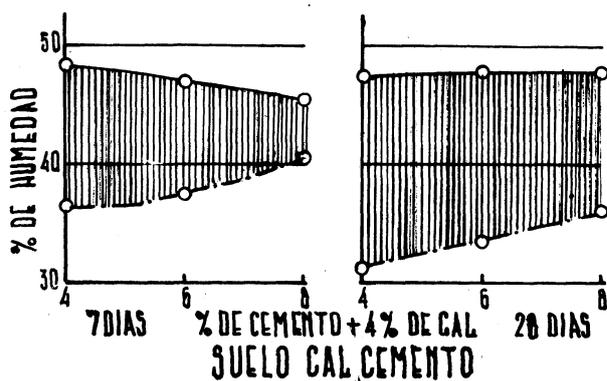


Fig. 11

Indice plástico. La línea llena indica el límite líquido, y la punteada, el límite plástico.

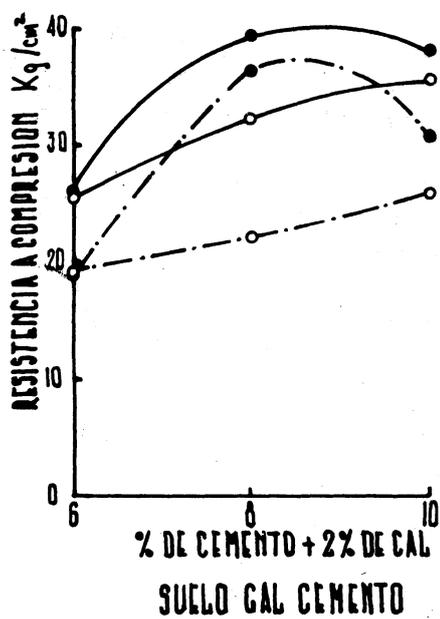


Fig. 12

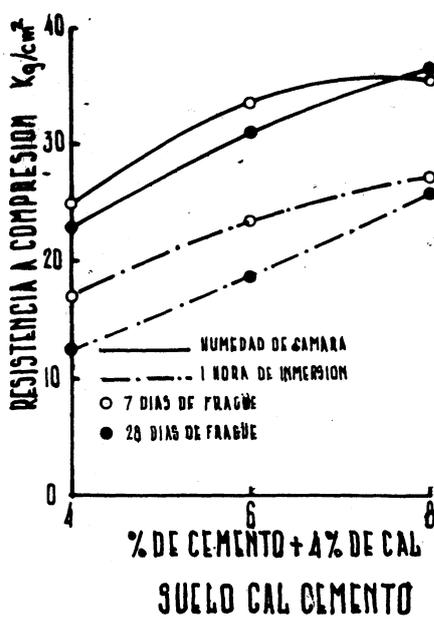
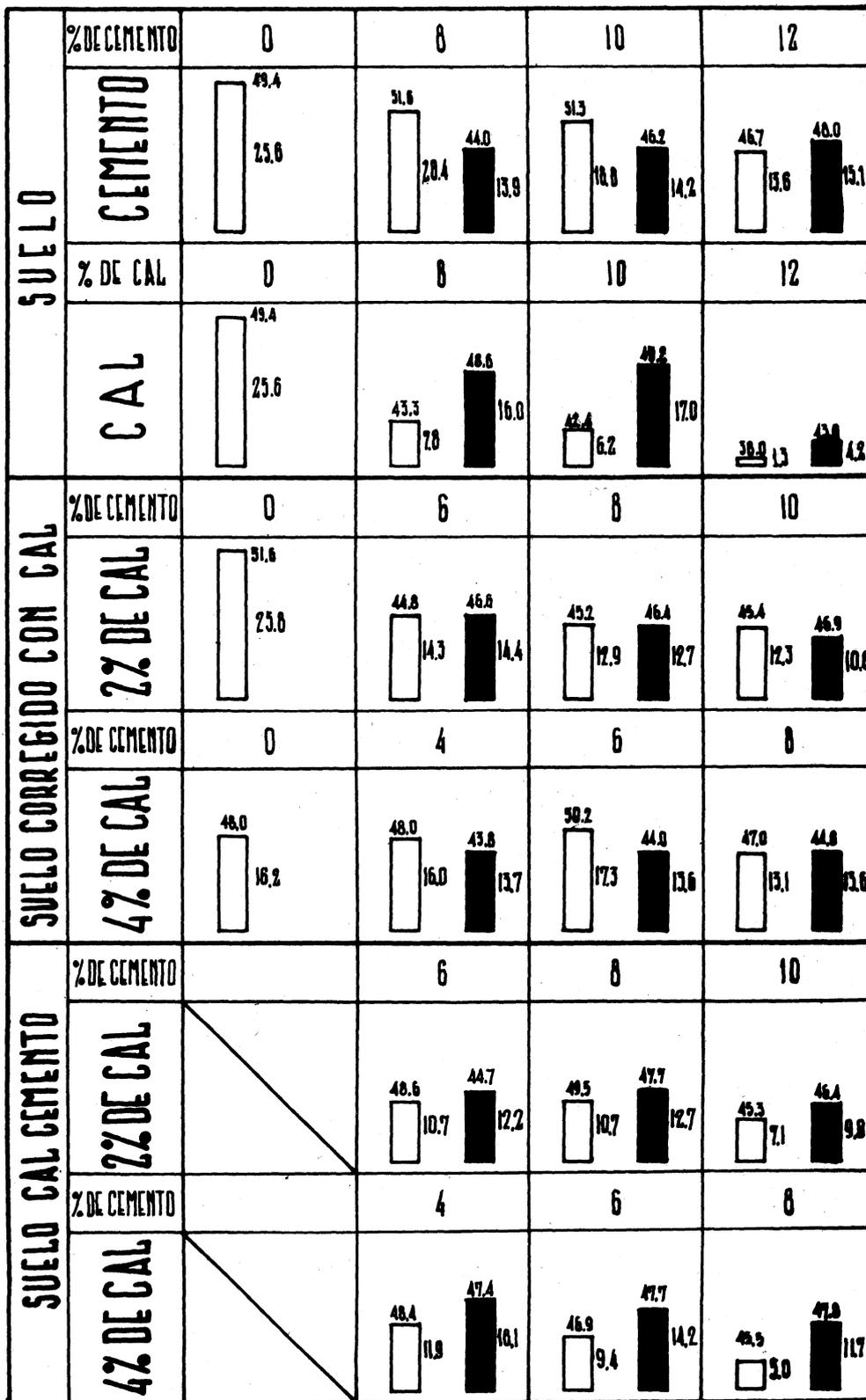


Fig. 13



□ 7 DIAS

■ 28 DIAS

Fig. 14

		7 D I A S D E F R A G Ü E RESISTENCIAS					2 8 D I A S D E F R A G Ü E RESISTENCIAS				
Suelo		Hum.de 1 hora		L.L.	I.P.	Absr.	Hum.de 1 hora		L.L.	I.P.	Abs.
		cámara	inmer.				cámara	inmer.			
Suelo cemento	8%	19.8	10.9	51.6	20.4	6.0	20.7	6.1	44.0	13.9	4.5
	10%	26.2	10.4	51.3	20.4	6.5	27.4	8.8	46.2	14.2	4.2
	12%	30.0	13.2	46.7	13.6	6.5	33.9	10.5	48.0	15.1	4.7
Suelo cal	8%	15.0	7.9	43.3	7.8	3.7	16.6	5.0	48.6	16.0	5.6
	10%	17.7	9.5	42.2	6.2	3.9	20.4	6.6	49.2	17.0	4.9
	12%	15.4	10.7	38.0	1.5	3.9	22.5	7.3	43.0	4.2	4.0
Suelo corregido con cal	6% Cem.	15.8	8.5	44.8	14.3	3.5	20.8	7.8	46.6	14.4	3.0
	8% Cem.	19.6	13.6	45.2	12.9	4.6	23.6	11.9	46.4	12.7	4.3
	10% Cem.	24.0	18.5	45.4	12.3	3.6	30.2	12.4	46.9	10.6	4.6
	4% Cem.	11.2	8.2	48.0	16.0	2.2	11.2	7.1	43.8	13.7	2.3
	6% Cem.	17.2	13.1	50.2	17.3	2.8	16.8	8.1	44.0	13.6	2.4
	8% Cem.	20.9	16.2	47.0	13.1	2.7	24.8	19.5	46.6	13.6	3.4
Suelo cal cemento	6% Cem.	25.5	19.0	48.6	10.7	3.9	26.2	18.9	44.7	12.2	4.2
	8% Cem.	32.3	22.1	49.5	10.7	4.6	39.4	36.5	47.7	12.7	4.9
	10% Cem.	35.6	25.8	45.3	7.1	4.0	35.7	30.7	46.4	9.9	4.1
	4% Cem.	25.0	17.2	48.4	11.9	3.9	22.9	12.5	47.4	16.1	4.0
	6% Cem.	33.5	23.5	46.9	9.4	3.9	31.1	18.6	47.7	14.2	3.9
	8% Cem.	35.5	27.2	45.5	5.0	3.3	36.5	25.8	47.8	11.7	3.2
Suelo solo		3.1	rotas	49.4	24.3						

Las resistencias están expresadas en kg/cm². La absorción está expresada en % de peso de suelo seco tomada a partir de la humedad de compactación.-

más favorables, en cuanto a índice de plasticidad y resistencia, se obtuvieron para las mezclas con adición conjunta de 2 % de cal y cemento portland, compactadas de inmediato.

La caída de resistencia observada en las probetas que tuvieron un período de fragüe de veintiocho días y ensayadas en las mismas condiciones, así como también el aumento del índice plástico en algunos casos, demuestra que se han producido modificaciones en sentido inverso al previsto. Esto pone en evidencia que la acción primordial de la cal y del cemento portland, no es solamente la de saturar de calcio el colóide del suelo y favorecer la formación de una matriz estructural de cohesión, sino que deben existir algunos otros fenómenos que desvían el incremento de la resistencia del suelo tratado.

Sospechamos que la calidad alcalina del medio estabilizante es un factor agresivo para las partículas del suelo y que debe seguir actuando a velocidad proporcional a la alcalinidad y cuyas consecuencias son las que expresan los resultados de las experiencias de índice y resistencia en las muestras estacionadas en cámara húmeda a veintiocho días, con respecto a las de siete días. Ensayos con mayor tiempo de fragüe, como así también verificaciones de orden químico y experimental, permitirán posiblemente, determinar a posteriori la naturaleza de este fenómeno y su continuación o estancamiento con el correr del tiempo.

Conclusiones

1.- El índice plástico de las mezclas de suelo con cemento, decrece con el aumento del porcentaje de cemento incorporado y continúa con el tiempo. Este decrecimiento es más marcado para porcentajes equivalentes de cal aérea, pero en este último caso el índice tiende a aumentar nuevamente con el tiempo.

2.- En el caso de suelos plásticos, la incorporación a los mismos de cal o de cemento portland, en porcentajes económicos, no conduciría a la obtención de valores adecuados.

3.- Para la dosificación de suelo plástico-cal-ce-

mento, sería necesario determinar además de los porcentajes convenientes de cemento portland, el porcentaje de cal más beneficioso, ya que en el caso estudiado el incremento de ésta resultó desfavorable en cierta medida.

4.- La estabilización con cemento del suelo que ha sido previamente corregido con cal, ofrece mayor constancia del valor del índice para siete y veintiocho días, que las correspondientes a las de las mezclas preparadas con la incorporación de cal y cemento al mismo tiempo. En cambio la resistencia, por el contrario, resulta mayor en este último caso.

5.- En la prosecución de los estudios iniciados en este trabajo, entendemos que resultaría conveniente complementar los mismos, con los estudios químicos que permitan explicar la razón de algunos valores hallados y que orienten en las técnicas a seguir, haciendo a la vez extensivas las determinaciones a otros suelos.

BIBLIGRAFIA

- 1.- Davidson D. T., Mateos M. y Barnes H. F.: Improvement of lime stabilization of montmorillonitic clay soil with chemical additives. Highway Research Board, boletín 262, 1960.
- 2.- Eales J. L. and Grimm R. E.: Reaction of hidrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. Highway Research Board, Bull. 262, 1960.
- 3.- Ladd G. C., Mohand E. C. and Lambe T. W.: Recent soil lime research at the Massachusetts Institute of Tecnology. Highway Research Board, Bull. 262, 1960.
- 4.- Dumbleton D. J.: Lime stabilized soil for road construction in Great Britain. Road and Road Construction, 1962.
- 5.- Remus M. D. and Davidson D. T.: Relation of strength to composition and density of lime treated clayed soil. High-

way Research Board, Bull. 304, 1961.

- 6.- Lilli Felix J.: La estabilización de suelos con cal en el Estado de Texas. Sus posibilidades en la Pcia. de Buenos Aires. Revista de la Direc. de Vialidad de la Prov. de Bs. As., nº 17, oct. 1961.
- 7.- Duarte R. A. y Marchetti C. F.: Influencia del agregado de cal en las mezclas de suelo cemento. Revista de la Direc. de Vialidad de la Prov. de Bs. As., nº 17, oct. 1961.