

ESTABILIZACION DE SUELOS DE ALASKA CON ADITIVOS INORGANICOS

Por MANUEL MATEOS
y DONALD T. DAVIDSON
Dres. Ingenieros

Presentan los autores los interesantes resultados de los estudios de exploración de suelos en Alaska llevados a cabo por el Departamento de Ingeniería Experimental en colaboración con el Departamento de Geología de la Universidad Estatal de Iowa. Cuatro suelos limosos de Alaska fueron tratados con varios agentes estabilizadores inorgánicos: cal, cal y cenizas volantes y productos químicos. Se reseñan los efectos de estos agentes en la resistencia de los suelos.

Introducción.

Una gran extensión de las tierras de nuestro planeta se encuentran en las regiones árticas, comprendiendo parte de Alaska, Canadá, Países Escandinavos, Rusia y Siberia. Los desarrollos técnicos actuales están mejorando la habitabilidad de estas regiones, lo que trae como consecuencia la puesta en servicio de métodos de comunicación apropiados. En lo que respecta a Alaska, el paso de este antiguo territorio a Estado ha atraído a numerosos inmigrantes, los que han creado la necesidad de construir más y mejores carreteras y aeropuertos.

Estudios geológicos de Alaska indican que abundan los depósitos de materiales para construir vías de comunicación, como áridos naturales, rocas, puzolanas naturales y petróleo.

El uso de materiales locales es, generalmente, lo más económico en trabajos de construcción. Sin embargo, se encuentran a veces dificultades en el transporte de grandes cantidades de áridos locales al lugar de la construcción, lo que puede ser menos económico que importar pequeñas cantidades de agentes estabilizadores.

Desde 1954 a 1957 se realizaron unos estudios exploradores de los suelos de Alaska por el Departamento de Ingeniería Experimental en cooperación con el Departamento de Geología de la Universidad Estatal de Iowa. Los resultados de estos estudios han sido publicados por el Departamento de Ingeniería Experimental. Investigaciones de laboratorio hechas con las muestras de suelos de varias partes de Alaska,

indicaron que los depósitos de limo de las regiones de Fairbanks, Matanuska Valley y Big Delta son similares en algunas propiedades a los suelos loesiales de Iowa. Los conocimientos obtenidos en la estabilización de loes de Iowa, fueron aplicados para preparar un programa para estabilizar los suelos de Alaska. Se seleccionaron cuatro muestras de suelos para someterlas a tratamientos con varios agentes estabilizadores inorgánicos: cal, cal y cenizas volantes, cemento, cemento y cenizas volantes y aditivos químicos que fueron usados con algunos de los otros agentes estabilizadores. En esta memoria se presentan los efectos de estos agentes en la resistencia de los suelos.

Materiales.

SUELOS.

Las propiedades de las muestras de suelo empleadas se dan en la tabla 1. De los cuatro suelos limosos estudiados, tres son considerados de origen eólico, F-8, M-7 y M66, y el otro, D-25, parece ser de origen eólico-aluvial.

La muestra F-8 es representativa de la región de Fairbanks y contiene la menor cantidad de arcilla de las cuatro muestras. Los minerales arcillosos que predominan son montmorillonita, muscovita-illita, kaolinita y clorita.

La muestra D25 contiene una gran cantidad de arena y limo; proviene de la región de Big Delta y fué tomada a unos dos metros de profundidad. Los estudios petrográficos indicaron que el contenido de

TABLA 1.— *Propiedades de los suelos.*

S U E L O S	F-8	D-25	M-65	M-7
Composición textural, % en peso:				
Grava (> 2 mm.)	0	0	0	0
Arena (2 a 0,074 mm.)	1,2	47,6	19,2	5,3
Limo (0,074 a 0,005 mm.)	92,5	44,1	72,8	79,8
Arcilla (< 0,005 mm.)	6,3	8,3	88,0	14,9
Arcilla (< 0,002 mm.)	3,3	4,5	4,8	7,3
Propiedades físicas:				
Límite líquido	28	33	29	30
Límite plástico	26	31	27	27
Índice de plasticidad	2	2	2	3
Límite de contracción	22	34	26	32
Humedad equiv. centrífuga, %	8,5	9,8	5,4	13,0
Humedad equiv. de campo, %	30,2	36,6	34,2	50,7
Peso específico	2,72	2,76	2,77	2,67
Máx. densidad proctor normal	1,63	1,60	1,59	1,56
Humedad óptima proctor normal, %	17,2	19,2	18,3	20,7
Clasificación A.A.S.H.O.	A-4 (8)	A-4 (8)	A-4 (8)	A-4 (8)
Propiedades químicas:				
pH	6,7	6,4	7,7	6,6
Cap. de inter. de cat. mc./100 g.	11,4	10,9	9,6	13,3
Carbonatos, %	1,0	0,8	1,3	0,8
Materia orgánica, %	1,1	2,7	1,7	3,0
Datos mineralógicos:				
Cuarzo, %	50,5	37,5	28,1	34,7
Feldespatos, %	26,2	27,1	7,2	10,7
Mica, %	7,9	20,7	5,7	5,0
Clorita, %	2,6	3,1	—	—
Fragm. de roca alterados, %	6,9	1,1	41,1	41,0
Otros (inc. arcilla), %	5,9	10,5	17,9	8,6

mica de este suelo es muy elevado. Esta muestra contiene relativamente una gran cantidad de materia orgánica. Los principales minerales arcillosos son muscovita-illita, kaolinita y clorita.

Los otros dos limos, M-7 y M66, se tomaron en el valle Matanuska, de manera que presentaron grandes diferencias en su contenido de arcilla y de materia orgánica. De los cuatro suelos, el M-7 contiene las mayores cantidades de arcilla y materia orgánica. El análisis térmico diferencial, junto con la difracción de rayos X, parece indicar que los minerales arcillosos predominantes son clorita, illita y kaolinita.

Comparadas con muestras de loes de Iowa de origen similar, estos limos de Alaska contienen mayores cantidades de materia orgánica.

AGENTES ESTABILIZADORES USADOS.

Cales. — Se seleccionaron dos cales hidratadas comerciales, una calcítica, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, suministrada por Linwood Stone Products Company, Inc., de Davenport, Iowa, y la otra una dolomítica monohidratada, $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{MgO}$, suministrada por United States Gypsum Company, de Genoa, Ohio.

Cenizas volantes. — La muestra de cenizas volantes usadas es de bajo contenido de carbono, de la central térmica St. Clair de la compañía Detroit Edison. Estas cenizas volantes se consideran de calidad media; se dan sus propiedades en la tabla 2.

Cemento. — El cemento seleccionado fué portland, tipo I de la Hawkeye Portland Cement Company, de Des Moines, Iowa.

TABLA 2. — *Propiedades de las cenizas volantes.*

COMPUESTO O PROPIEDAD	Cantidad
Dióxido de silicio (SiO_2), %	41,9
Oxido de magnesio (MgO), %	1,0
Oxido de calcio (CaO), %	2,7
Oxido de aluminio (Al_2O_3), %	22,5
Oxido de hierro (Fe_2O_3), %	25,8
Trióxido de azufre (SO_3), %	0,8
Materiales alcalinos (como Na_2O), %	0,3
Pérdida por ignición (*), %	3,6
Peso específico	2,61
Finura, % que pasa el tamiz 325	88,7
Superficie específica Blaine, $\text{cm}^2/\text{gr.}$	2.720

(*) Aproximadamente igual al contenido de carbono.

Productos químicos. — Basados en estudios previos, se usaron pequeñas cantidades de carbonato sódico, Na_2CO_3 , o permanganato potásico, KMnO_4 , a las mezclas de suelo y cal, suelo y cemento y suelo, cal y cenizas volantes.

Métodos.

MEZCLADO Y PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.

En las mezclas de suelo con cal, cemento o cemento y cenizas volantes, estos aditivos inorgánicos se añadieron basándose en el peso seco del suelo. En las mezclas de suelo con cal y cenizas volantes, estos tres materiales se proporcionaron basándose en el peso total seco del suelo, cal y cenizas. El grado de humedad fué cercano a la humedad óptima para la compactación proctor normal. El aparato de compactación usado fué el que ha sido desarrollado en "Iowa State University" y que moldea probetas de 5,08 centímetros de altura por 5,08 cm. de diámetro.

Curado.

Las probetas se envolvieron en papel encerado y se curaron en una cámara a $21 \pm 2^\circ \text{C}$ y a una humedad relativa superior a 90 por 100.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Después de cada periodo de curado, se sumergieron las probetas en agua durante veinticuatro horas antes de ensayarlas a compresión sin confinar usando una velocidad de deformación bajo carga de 0,25 centímetros por minuto. Los ensayos se hicieron por triplicado y se da el resultado de la media aritmética.

Estabilización con cal.

En trabajos previos sobre estabilización de loes de Iowa con varios tipos de cal se halló que, tanto la cal dolomítica monohidratada como la calcítica hidratada, son buenos estabilizadores de los suelos limosos. Por consiguiente, se emplearon ambos tipos de cal.

Las resistencias obtenidas a los catorce y veintiocho días, para las distintas cantidades de cal, están indicadas en las tablas 3 y 4, y las curvas de las resistencias a los veintiocho días están dibujadas en la figura 1.^a. Las cuatro muestras de suelos ensayadas dieron mayores resistencias con la cal dolomítica que con la calcítica, para ambos periodos de curado, lo que corresponde con los resultados obtenidos con los suelos loesiales de Iowa. El suelo de Fairbanks, tratado con cal dolomítica, dió una resistencia alta, y los resultados indican que la adición de 6 por 100 de cal es cercana a la óptima para una resistencia máxima. Las muestras de Matanuska, M-7 y M-66, dieron también buenas resistencias con la cal dolomítica. En estos estudios se usaron cantidades de cal en exceso de las económicas para comprobar si existía un má-

TABLA 3. — *Resistencias de probetas de suelos estabilizados con cal calcítica.*

Suelo	Cal calcítica, %	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN KG./CM. ²		Densidad seca, gr./cm ³	Grado de humedad, %
		14 días de curado	28 días de curado		
F-8	1,5	0,4	0,5	1,52	19,3
	3,0	1,7	2,1	1,53	19,5
	4,5	2,2	2,6	1,54	19,4
	6,0	2,8	3,2	1,55	19,5
	7,5	3,4	4,6	1,56	19,5
	9,0	4,0	5,3	1,56	19,7
D-25	3,0	0	0	1,51	19,0
	4,5	0	0	1,52	18,7
	6,0	0	0	1,52	18,5
	7,5	0	0	1,54	18,9
	9,0	0	0	1,55	18,9
	10,5	0	0	1,50	18,8
M-66	3,0	0,9	1,0	1,59	18,0
	4,5	1,1	1,3	1,58	18,2
	6,0	1,3	1,5	1,56	18,0
	7,5	1,2	1,7	1,57	18,2
	9,0	1,5	1,8	1,57	18,0
	10,5	1,8	3,1	1,59	18,0
M-7	3,0	1,3	2,0	1,51	22,9
	4,5	3,1	3,3	1,53	22,8
	6,0	4,0	4,3	1,53	21,3
	7,5	4,4	4,8	1,55	21,3
	9,0	4,6	5,5	1,55	21,8
	10,5	6,1	6,1	1,55	21,9

TABLA 4. — Resistencias de probetas de suelos estabilizados con cal dolomítica.

Suelo	Cal dolomítica %	RESISTENCIA A LA COMPRESION KG./CM. ²		Densidad seca, gr./cm. ³	Grado de humedad, %
		14 días de curado	28 días de curado		
F-8	3,0	6,8	8,4	1,53	18,7
	4,5	9,2	13,5	1,54	18,7
	6,0	11,9	17,9	1,55	19,0
	7,5	12,9	18,8	1,56	18,3
	9,0	12,1	18,3	1,58	18,3
D-25	6,0	0,8	1,3	1,55	18,6
	7,5	1,2	1,5	1,56	18,8
	9,0	1,5	1,8	1,57	18,8
	10,5	5,0	6,2	1,61	18,6
	12,0	2,3	2,5	1,59	18,8
M-66	6,0	2,0	3,0	1,54	18,1
	7,5	2,9	4,6	1,59	17,9
	9,0	3,7	5,5	1,59	18,0
	10,5	4,5	6,2	1,60	18,0
	12,0	5,2	7,4	1,61	18,0
M-7	4,5	1,2	2,1	1,52	21,4
	6,0	3,2	5,3	1,52	22,3
	7,5	4,2	7,5	1,54	21,8
	9,0	5,4	8,9	1,54	21,7
	10,5	8,2	13,2	1,58	21,4
	13,0	7,1	9,1	1,42	19,2
	17,0	8,7	10,7	1,42	19,5
	21,0	10,2	13,2	1,42	19,2
	25,0	11,4	14,7	1,42	19,1

ximo en la resistencia para una cantidad óptima de cal. Se observa que los cuatro suelos alcanzaron una máxima resistencia adecuada con cantidades de cal dolomítica entre 8 y 12 por 100.

La cantidad óptima de cal calcítica parece que está también entre 8 y 12 por 100, pero las máximas resistencias obtenidas con esta cal son menores que las obtenidas con la cal dolomítica, y no son adecuadas para la construcción de bases para carreteras.

Las cantidades obtenidas con la cal dolomítica sugieren que hasta un 12 por 100 la cal actúa como un rellador de huecos. La densidad del suelo M-7 disminuye cuando la cantidad de cal dolomítica excede del 10,5 por 100 (tabla 4). Esto puede ser debido a que parte del volumen ocupado por el suelo ha sido substituído por partículas de cal, que tienen un peso específico bajo.

En algunos casos se obtuvieron resistencias menores con altos contenidos de cal; esto se puede atribuir a la baja resistencia al corte de las partículas de cal, debido a su forma laminar. Las bajas resistencias obtenidas con el suelo D-25 reflejan el efecto del alto

contenido de partículas laminares de mica que causan una pronta rotura interna al corte. La inconsistencia obtenida en las densidades para mezclas con la cal calcítica es difícil de explicar con los datos obtenidos en estos estudios.

La reacción puzolánica entre la cal y las partículas del suelo parece que aumenta con el contenido en limo de los suelos. Un aumento en la cantidad de arena tiende a reducir la resistencia. Esta tendencia puede ser debida a que la cementación producida por la reacción puzolánica entre las partículas de arena, de baja superficie específica, y la cal es insuficiente para proporcionar una cohesión entre las partículas de arena. Las resistencias obtenidas a los catorce y veintiocho días indican que el aumento en resistencia, para un cierto periodo de curado, es mayor con la cal dolomítica que con la calcítica. Es posible que el óxido

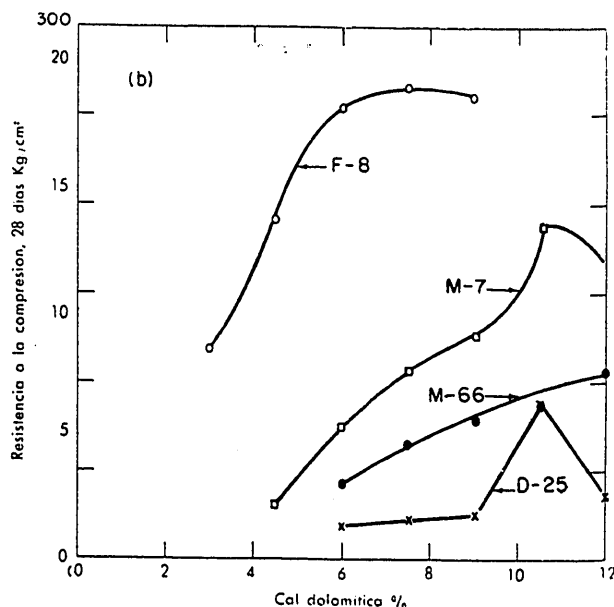
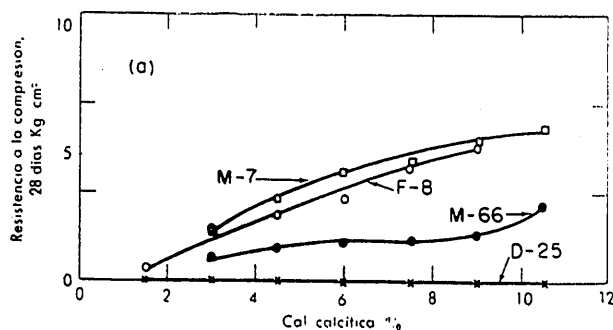


Figura 1.^a — Resistencias de suelos limosos de Alaska tratados con cal, después de veintiocho días de curado y un día de inmersión.

de magnesio actúe como un acelerador de las resistencias.

No se observaron efectos que puedan atribuirse a la presencia de materia orgánica en algunos de los suelos.

EFFECTOS DE LOS ADITIVOS QUÍMICOS EN LAS MEZCLAS DE SUELO Y CAL.

Las mezclas de suelo y cal conteniendo 3 por 100 de cal calcítica fueron tratadas con 0,5 por 100 de

permanganato potásico o carbonato sódico. (Tabla 5).

Los resultados indican que las mezclas de suelos limosos y cal, pueden mejorar la resistencia mediante la adición de permanganato potásico. El carbonato sódico mostró un efecto acelerador de la resistencia solamente con el suelo F-8. La resistencia de las mezclas con cal calcítica, aumenta con la adición de pequeñas cantidades de productos químicos hasta alcanzar resistencias comparables a las obtenidas con cantidades equivalentes de cal dolomítica.

Tabla 5. — Efectos de la adición de compuestos químicos en las resistencias de suelos estabilizados con cemento, cal y cal y cenizas volantes.

Suelo	TRATAMIENTO		Relación suelo : cal : cenizas	Compuesto químico (0,5 %)	DENSIDAD SECA gr./cm. ³		RESISTENCIA A LA COMPRESION Kg./cm. ²					
	Clase	Canti- dad %			Sin comp. químico	Con comp. químico	SIN COMP. QUIMICO			CON COMP. QUIMICO		
							7 días	14 días	28 días	7 días	14 días	28 días
F-8	Cemento	8	—	KMnO ₄	1,55	1,49	13,3	N.D.*	18,5	18,8	N.D.	25,8
	»	8	—	Na ₂ CO ₃	1,55	1,49	13,3	N.D.	18,5	21,1	N.D.	33,2
	Cal y cenizas	25	75 : 2,55 : 22,5	KMnO ₄	1,50	1,46	N.D.	14,6	21,0	N.D.	20,4	29,0
	»	25	»	Na ₂ CO ₃	1,50	1,45	N.D.	14,6	21,0	N.D.	21,2	29,2
	»	15	85 : 4,5 : 10,5	KMnO ₄	1,53	1,49	N.D.	6,8	11,0	N.D.	13,3	15,5
	»	15	»	Na ₂ CO ₃	1,53	1,50	N.D.	6,8	11,0	N.D.	22,5	26,7
	Cal calcítica	3	—	KMnO ₄	1,53	1,51	N.D.	1,7	2,1	N.D.	3,7	5,6
	»	3	—	Na ₂ CO ₃	1,53	1,54	N.D.	1,7	2,1	N.D.	10,0	14,6
D-25	Cemento	8	—	KMnO ₄	1,55	1,54	9,0	N.D.	14,5	10,4	N.D.	19,0
	»	8	—	Na ₂ CO ₃	1,55	1,56	9,0	N.D.	14,5	9,0	N.D.	14,8
	Cal y cenizas	25	75 : 2,5 : 22,5	KMnO ₄	1,53	1,48	N.D.	5,6	7,6	N.D.	12,9	23,9
	»	25	»	Na ₂ CO ₃	1,53	1,48	N.D.	5,6	7,6	N.D.	7,3	15,3
	»	15	85 : 4,5 : 10,5	KMnO ₄	1,52	1,50	N.D.	2,1	2,5	N.D.	6,1	11,2
	»	15	»	Na ₂ CO ₃	1,52	1,51	N.D.	2,1	2,5	N.D.	2,6	3,6
	Cal calcítica	3	—	KMnO ₄	1,51	1,48	N.D.	0	0	N.D.	1,1	1,3
	»	3	—	Na ₂ CO ₃	1,51	1,52	N.D.	0	0	N.D.	0	0
M-66	Cemento	8	—	KMnO ₄	1,56	1,50	11,7	N.D.	15,4	13,0	N.D.	16,9
	»	8	—	Na ₂ CO ₃	1,56	1,56	11,7	N.D.	15,4	1,8	N.D.	4,5
	Cal y cenizas	25	75 : 2,5 : 22,5	KMnO ₄	1,56	1,46	N.D.	3,0	5,3	N.D.	4,5	6,2
	»	25	»	Na ₂ CO ₃	1,56	1,49	N.D.	3,0	5,3	N.D.	3,8	4,5
	»	15	85 : 4,5 : 10,5	KMnO ₄	1,56	1,46	N.D.	3,4	5,7	N.D.	4,2	6,0
	»	15	»	Na ₂ CO ₃	1,56	1,50	N.D.	3,4	5,7	N.D.	3,7	4,5
	Cal calcítica	3	—	KMnO ₄	1,59	1,46	N.D.	0,9	1,0	N.D.	0,9	1,5
	»	?	—	Na ₂ CO ₃	1,59	1,49	N.D.	0,9	1,0	N.D.	0,6	0,9
M-7	Cemento	8	—	KMnO ₄	1,52	1,44	4,5	N.D.	5,3	8,1	N.D.	8,9
	»	8	—	Na ₂ CO ₃	1,52	1,50	4,5	N.D.	5,3	4,4	N.D.	5,6
	Cal y cenizas	25	75 : 2,5 : 22,5	KMnO ₄	1,47	1,40	N.D.	7,5	7,8	N.D.	6,7	7,9
	»	25	»	Na ₂ CO ₃	1,47	1,40	N.D.	7,5	7,8	N.D.	7,5	7,6
	»	15	85 : 4,5 : 10,5	KMnO ₄	1,48	1,41	N.D.	5,2	7,5	N.D.	5,3	6,7
	»	15	»	Na ₂ CO ₃	1,48	1,46	N.D.	5,2	7,5	N.D.	5,6	6,7
	Cal calcítica	3	—	KMnO ₄	1,51	1,41	N.D.	1,3	2,0	N.D.	1,9	2,2
	»	3	—	Na ₂ CO ₃	1,51	1,42	N.D.	1,3	2,0	N.D.	2,2	2,8

* No determinado.

Estabilización con cal y cenizas volantes.

Se ha comprobado que Alaska posee depósitos abundantes de puzolanas naturales, como por ejemplo, cenizas volcánicas. Las cenizas volantes son un producto de desecho de las centrales térmicas que queman carbón en polvo y son consideradas como una puzolana artificial; como las puzolanas naturales, reacciona con la cal en presencia de humedad para formar un material cementicio. El Departamento de Ingeniería Experimental de la Universidad Estatal de Iowa ha conducido, durante los últimos siete años, una investigación sistemática para evaluar los efectos estabilizadores de la cal y cenizas volantes en los suelos.

Estas investigaciones mostraron que los suelos limosos de Iowa se pueden estabilizar, efectivamente, mediante la adición de 15 por 100 de cal y cenizas volantes en una relación de cal a cenizas de 3 : 7, ó con la adición de 25 por 100 de cal y cenizas volantes en una relación de 1 : 9. Por lo tanto, los cuatro suelos limosos de Alaska se trataron con dichas cantidades y relaciones de cal a cenizas volantes para determinar la efectividad de las puzolanas con estos suelos. Ambas calces, calcítica y dolomítica, fueron usadas (fig. 2.^a).

Las mezclas de suelo, cal y cenizas volantes hechas con la cal dolomítica desarrollaron mayores resistencias que mezclas similares hechas con la cal calcítica. En algunos casos, las resistencias obtenidas con ambas

mezclas ensayadas con cal dolomítica y cenizas volantes y con cal calcítica y cenizas volantes son mayores que las de las mezclas conteniendo solamente cal hasta un 6 por 100. Las resistencias a los veintiocho días indican que los suelos F-8 y D-25 se pueden estabilizar con efectividad con 25 por 100 de cal más cenizas volantes en la proporción de 1 : 9, y también con otras combinaciones de cal y cenizas volantes. La estabilidad de los suelos M-66 y M-7 fué también mejorada, pero en una proporción menor. Las densidades de las mezclas hechas con cal dolomítica son mayores que las de las mezclas con cal calcítica. No se observa ninguna tendencia en relación con la variación en las cantidades de cal y cenizas volantes.

Comparando las figuras 1.^a y 2.^a se puede observar la acción puzolánica de las mezclas que contienen cenizas volantes. Lo mismo que en la estabilización con cal solamente, se observa que las mezclas hechas con cal dolomítica dan resistencias mayores que las hechas con cal calcítica. Esto parece ser debido a la presencia del óxido de magnesio en la cal dolomítica, que actúa como un activador mejorando la resistencia. Los suelos D-25 y M-7, que continen más de 2,5 por 100 de materia orgánica, son mejor estabilizados usando 25 por 100 de cal y cenizas volantes que usando 15 por 100, independiente de la relación cal-cenizas volantes. Esto puede ser atribuido a que grandes cantidades de cal y cenizas volantes diluyen la materia orgánica. Los suelos F-8 y M66, con menos de 2 por 100

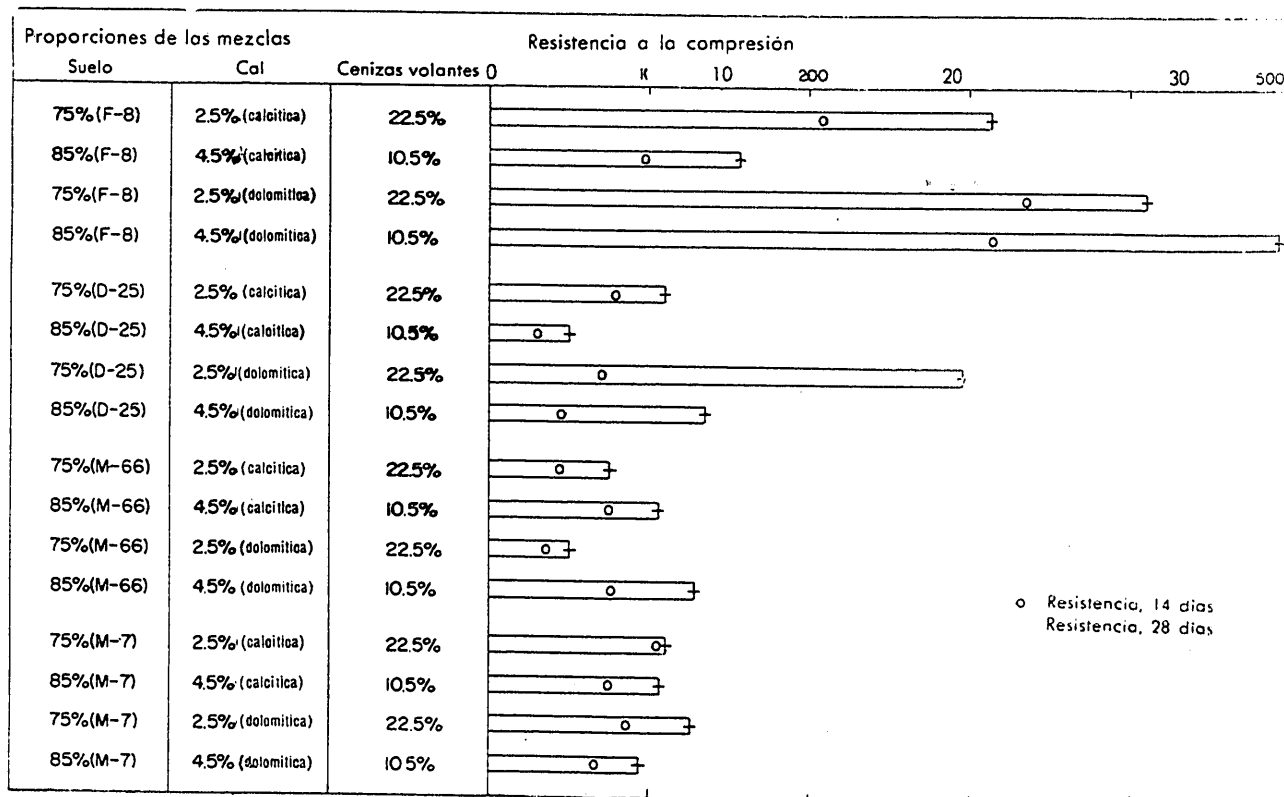


Figura 2.^a.— Resistencia de las mezclas de suelo, cal y cenizas volantes.

de materia orgánica, parece que muestran mayor mejora aumentando la cantidad de cal más bien que aumentando la cantidad de cenizas volantes. Con estos ensayos limitados es difícil predecir la relación entre la reacción puzolánica y las propiedades textuales o mineralógicas de los suelos.

EFFECTOS DE LOS ADITIVOS QUÍMICOS EN LAS MEZCLAS DE SUELO, CAL Y CENIZAS VOLANTES.

Las mezclas de suelo, cal y cenizas volantes hechas con la cal calcítica se trataron con 0,5 por 100 de carbonato sódico y permanganato potásico (tabla 5). Los resultados obtenidos indican que el permanganato potásico aumenta la estabilidad de las mezclas de suelo, cal y cenizas volantes. Las resistencias obtenidas se acercan a las de las mezclas de suelo, cal dolomítica y cenizas volantes. Ambos aditivos usados fueron efectivos en el aumento de las resistencias de las mezclas de suelo, cal calcítica y cenizas volantes preparadas con los suelos F-8 y D-25. Es interesante notar que los productos químicos fueron más efectivos en las mezclas que contenían mayores cantidades de cenizas volantes. Se observó una reducción en las densidades con la adición de los productos químicos, lo que puede ser debido a un aumento en la floculación de las partículas de arcilla de los suelos.

Estabilización con cemento.

El cemento portland es un buen estabilizador de suelos friables y de plasticidad moderada. Algunos suelos con alto contenido de materia orgánica o con ciertas características mineralógicas, no reaccionan bien con el cemento. Los cuatro suelos de Alaska se trataron con varias cantidades de cemento para determinar la manera en que reaccionan con este material (figura 3.^a).

Las resistencias obtenidas a los siete días indican que los suelos F-8, M-66 y D-25 pueden alcanzar resistencias de 22 Kg./cm.², lo que se considera adecuado para una base de carretera. El suelo M-7 no mostró grandes resistencias ni aun con la adición de 20 por 100 de cemento. Se nota una mejora importante en las resistencias entre siete y veintiocho días de curado. Al aumentar el contenido de cemento en las mezclas, se observó una disminución en las densidades.

Basándose en las resistencias obtenidas con los suelos de Alaska usados, se puede considerar que un aumento en el contenido de materia orgánica de los suelos significa una reducción en la resistencia. La materia orgánica reacciona con el calcio y los materiales alcalinos liberados en la hidratación de cemento, reduciendo el calcio disponible para reaccionar con los componentes de sílice y alúmina del cemento y formar compuestos cementicios. El aumento en arcilla de los suelos, aumenta también la cantidad de ce-

mento necesaria para alcanzar una resistencia determinada. Esto es debido a que las partículas de arcilla utilizan parte del calcio liberado en la hidratación del cemento para reemplazar parte de sus cationes intercambiables.

EFFECTO DE LOS ADITIVOS QUÍMICOS EN LAS MEZCLAS DE SUELO Y CEMENTO.

Mezclas de los cuatro suelos conteniendo 8 por 100 de cemento fueron tratadas con 0,5 por 100 de permanganato potásico o con 0,5 por 100 de carbonato sódico (tabla 5). El permanganato potásico mejoró la estabilidad de los cuatro suelos tratados con cemento. El carbonato sódico no mejoró la estabilidad de las mezclas preparadas con los suelos D-25, M-66 y M-7, pero, sin embargo, mejoró la de las mezclas preparadas con el suelo F-8, lo que puede ser debido al alto contenido de cuarzo en este suelo. Los efectos perniciosos causados por el carbonato só-

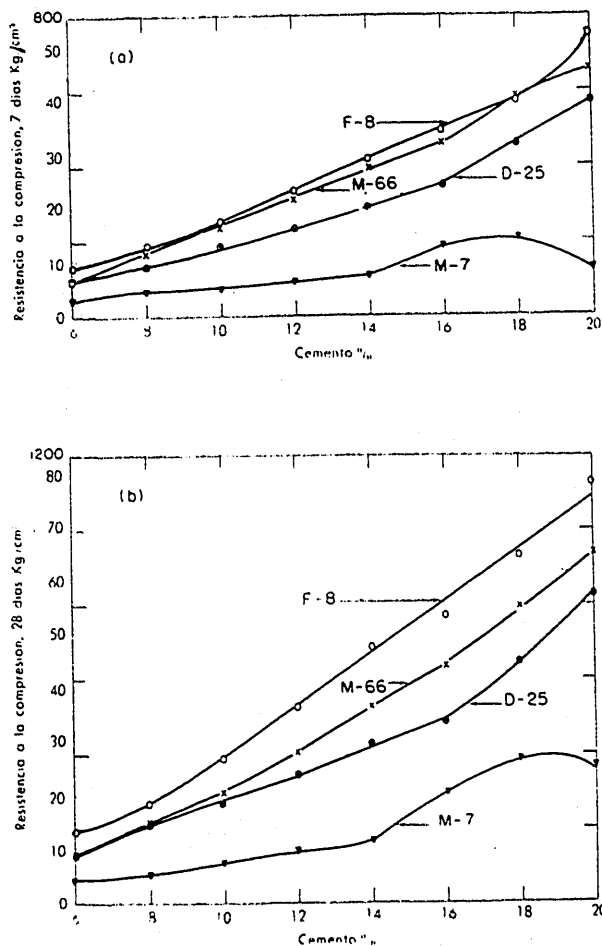


Figura 3.^a.—Resistencias de suelos limosos de Alaska tratados con cemento, después de siete (a) y veintiocho (b) días de curado y un día de inmersión.

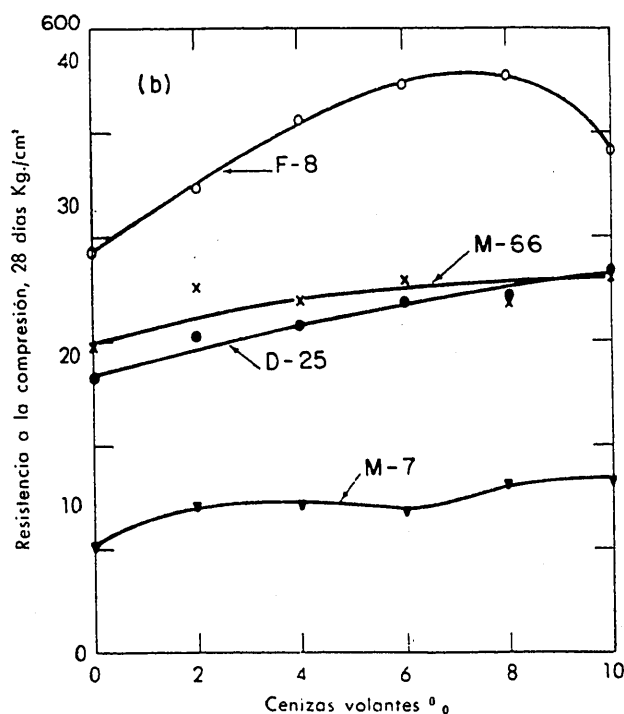
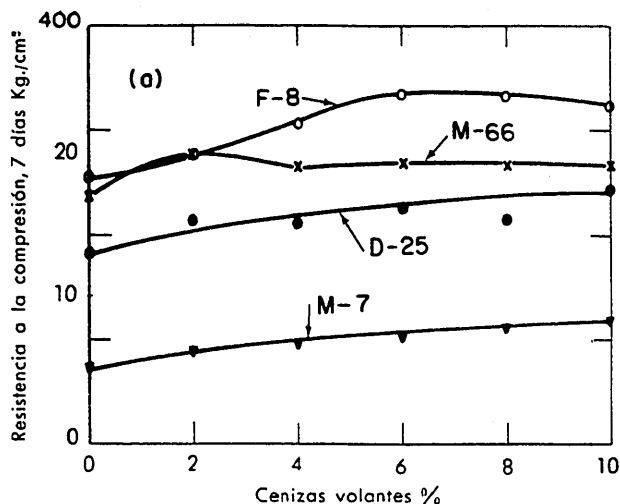


Figura 4.^a.— Efecto de la adición de varias cantidades de cenizas volantes en mezclas de suelo más 10 por 100 de cemento, después de siete (a) y veintiocho (b) días de curado y un día de inmersión.

dico en las mezclas hechas con el suelo M-66, se pueden explicar por la composición mineralógica especial de este suelo. Este suelo contiene menos cuarzo y feldspatos que los otros tres suelos, y también contiene mayor cantidad de minerales no identificados. Pueden existir en este suelo algunos minerales que, en presencia del carbonato sódico, produzcan efectos perniciosos en la estabilización con cemento.

CENIZAS VOLANTES.

En la hidratación del cemento se supone que hay una liberación de cal. Esta cal liberada puede combinarse con puzolanas para producir materiales cementicios adicionales. Este concepto se ha puesto en práctica en el hormigón, en el cual cenizas volantes u otras puzolanas se añaden o se substituyen por parte del cemento. La adición de cenizas volantes a las mezclas de suelo y cemento puede ser un procedimiento prometedor, según investigaciones hechas en la Universidad Estatal de Iowa. Por consiguiente, se estudió la adición de varias cantidades de cenizas volantes en mezclas de cada uno de los cuatro suelos, conteniendo 10 por 100 de cemento para determinar los efectos en la estabilidad de las mezclas.

Las resistencias a los siete y veintiocho días indican que se puede mejorar la estabilidad de las mezclas de suelo y cemento mediante la adición de 4 a 8 por 100 de cenizas volantes (fig. 4.^a). Las resistencias son comparables a las obtenidas con un tratamiento de 12 por 100 de cemento. Este aumento en la resistencia se puede atribuir al efecto combinado de la reacción puzolánica entre las cenizas y la cal liberada, y al aumento en la densidad observado con la adición de las cenizas volantes. Basándose en los resultados obtenidos, se puede deducir que la adición de 4 a 8 por 100 de cenizas volantes, permite una reducción de 2 por 100 de cemento en las mezclas de suelo tratadas con 12 por 100 de cemento. Un exceso de cenizas volantes reduce la resistencia de las mezclas, debido probablemente a la reducción en la fricción interna causada por el exceso de partículas esféricas de las cenizas. Parece ser que la adición de cenizas volantes a las mezclas de suelo y cemento, no reduce los efectos perniciosos de la materia orgánica. Se está llevando a cabo en la Universidad Estatal de Iowa un trabajo adicional para evaluar la adición de cenizas volantes al suelo-cemento.

Conclusiones.

Ensayos de laboratorio hechos con cuatro suelos limosos de Alaska, de las regiones de Fairbanks (muestra F-8), Big Delta (muestra D-25) y Matanuska Valley (muestras M-7 y M-66), tratados con varios agentes estabilizadores inorgánicos indican que estos suelos árticos se pueden estabilizar para mejorar su resistencia. Aunque los cuatro suelos son limos, cada uno muestra una tendencia distinta en la mejora de la estabilidad en relación con el tratamiento usado, lo que es debido a diferencias en las propiedades mineralógicas, físicas y químicas de cada suelo.

En mezclas de limo y cal se obtienen mayores resistencias con cal dolomítica que con cal calcítica. Sin embargo, las mezclas con cal calcítica pueden mejorarse, hasta alcanzar resistencias comparables a las

obtenidas con cal dolomítica, mediante la adición de pequeñas cantidades de algunos productos químicos, como permanganato potásico y carbonato sódico. Los suelos F-8 y M-8 alcanzan unos 14 Kg./cm.² de resistencia a los veintiocho días mediante la adición de la cantidad apropiada de cal.

Los estudios hechos con cal y cenizas volantes como agentes estabilizadores, indican que usando cal dolomítica se obtienen mayores resistencias que con cal calcítica. La resistencia de las mezclas de limo, cal y cenizas volantes se mejora mediante la adición de permanganato potásico. Los suelos que contienen mayores cantidades de materia orgánica dan mayores resistencias con mayores cantidades de cenizas volantes, y aquellos con pequeñas cantidades de materia orgánica dan mayores resistencias con mayores cantidades de cal. Los suelos F-8 y D-25 aumentan

grandemente su resistencia con la adición de cal y cenizas volantes. Las cenizas volantes pueden reducir la cantidad de cal necesaria para obtener una cierta resistencia o dar resistencias mayores que usando solamente cal.

Con la adición de cemento, los suelos F-8, D-25 y M-66 alcanzan, después de siete días de curado, resistencias adecuadas como para justificar su uso en bases para carreteras. Debido a que la muestra M-7 contiene una gran cantidad de materia orgánica, la adición de cemento a este suelo produce resistencias bajas. El permanganato potásico mejora la estabilidad de mezclas de limo y cemento. La adición de cenizas volantes a las mezclas de limo y cemento aumentan ligeramente las resistencias. En mezclas de limo y cemento se puede substituir un 2 por 100 de cemento por un 6 por 100 de cenizas volantes sin pérdida en la resistencia.

