

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Suelo-Cal



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Dr. Ing. Leonardo Behak
Instituto de Estructuras y Transporte

LA CAL

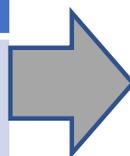
Material resultante de calcinación de rocas calcáreas a temperaturas entre 850°C - 900°C

Rocas calcáreas: constituidas por carbonato de calcio y/o carbonato de magnesio



CAL CÁLCICA

CALCINACIÓN



HIDRATACIÓN



Exotérmica con gran liberación de calor

CaO (Óxido de Calcio): Cal Viva o Virgen

Ca(OH)₂ (Hidróxido de Calcio): Cal Hidratada o Apagada

CAL DOLOMÍTICA

Mezcla de Óxidos o Hidróxidos de Calcio y de Magnesio

$\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO}$	Cal Dolomítica Mono-Hidratada
$\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$	Cal Dolomítica Bi-Hidratada

National Lime Association (2004)

Cal cálcica puede tener hasta 5% de MgO o Mg(OH)_2

Cal dolomítica tiene entre 35% y 46% MgO o Mg(OH)_2

REACCIONES ALCALINAS

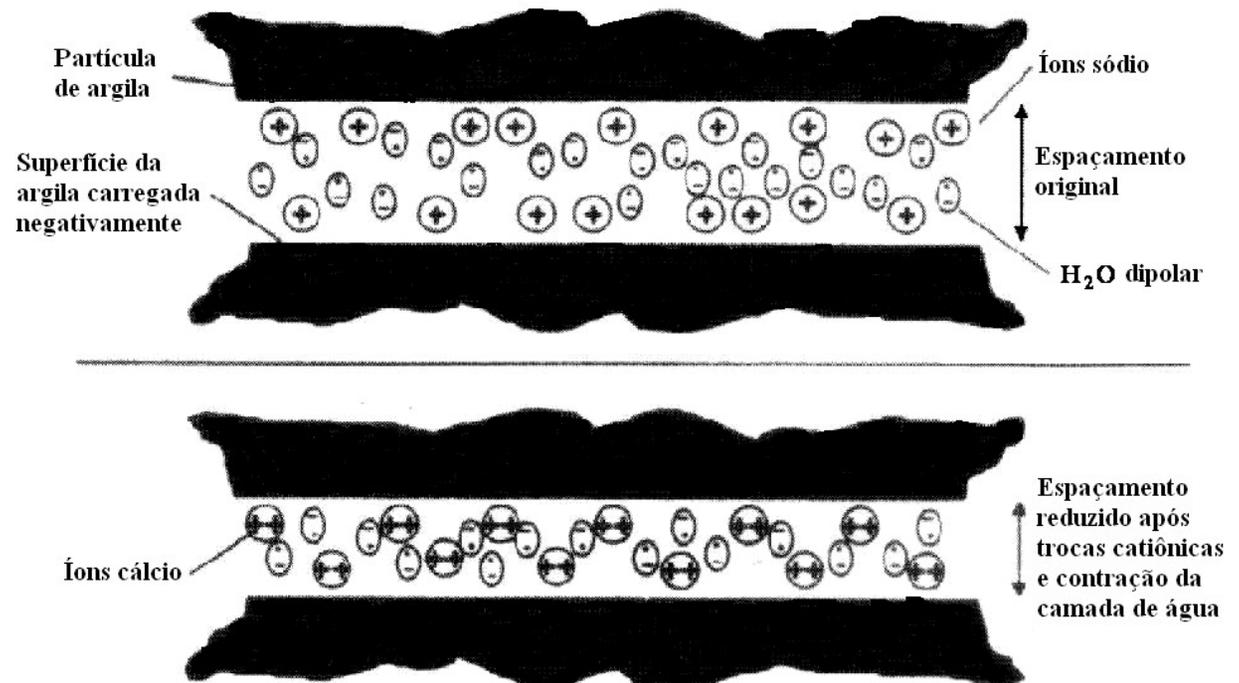
Reacciones químicas desarrolladas por los iones calcio (Ca^{++}) liberados por la hidratación de la cal



REACCIONES RÁPIDAS (minutos a días)	REACCIONES LENTAS (tiempo dependientes)
Intercambio Catiónico	Reacciones Puzolánicas
Floculación-Aglomeración	Carbonatación

REACCIONES ALCALINAS

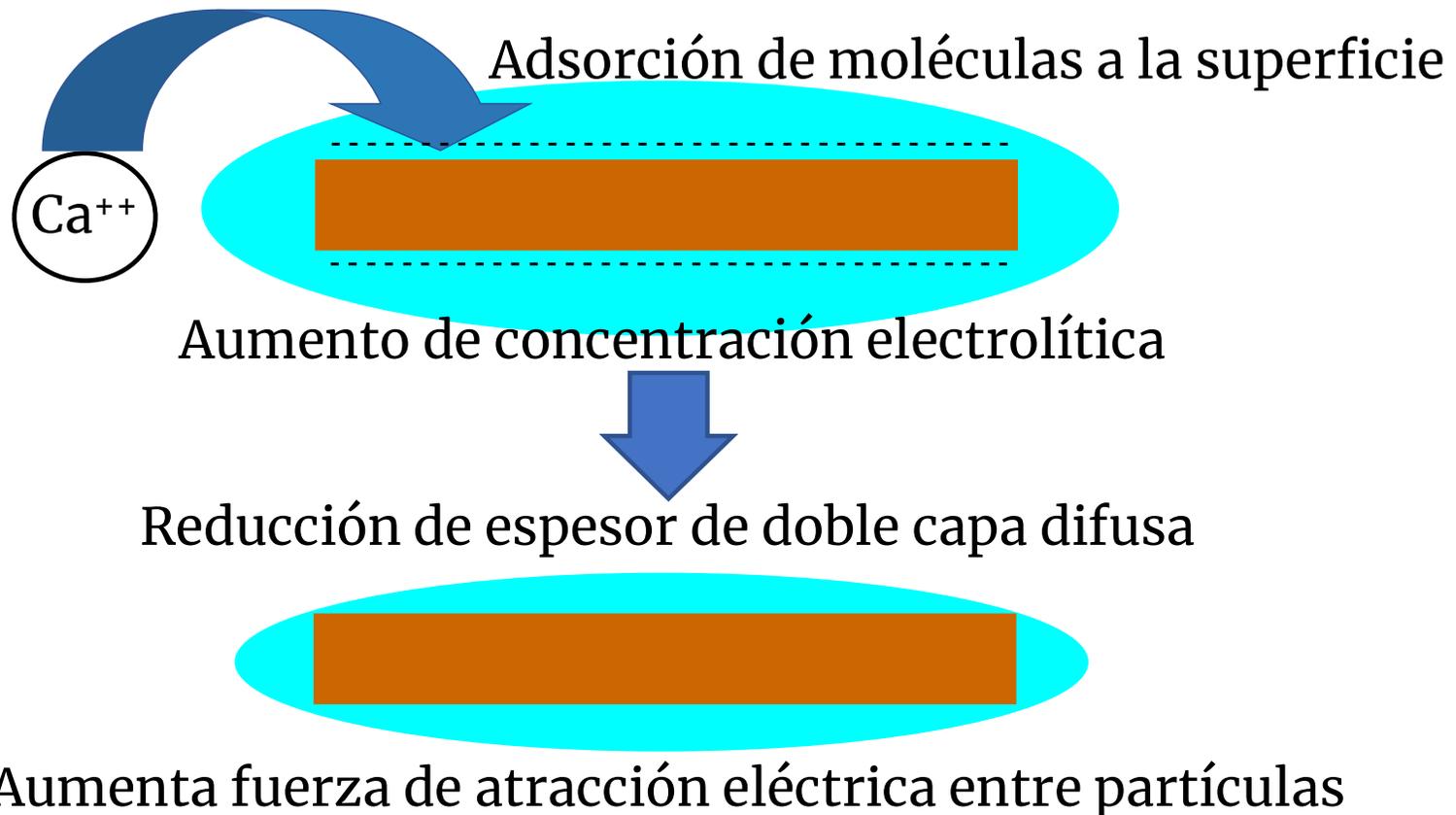
Intercambio Catiónico



Proceso Instantáneo
Inicia las Reacciones

REACCIONES ALCALINAS

Floculación-Aglomeración



REACCIONES ALCALINAS

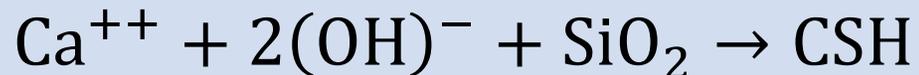
Reacciones Puzolánicas

Aumento de pH \approx 12,4

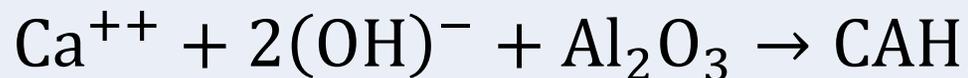


Disolución de sílice y alúmina de minerales arcillosos

Reacciones entre sílice y/o alúmina con Ca^{++}



Silicato de Calcio Hidratado



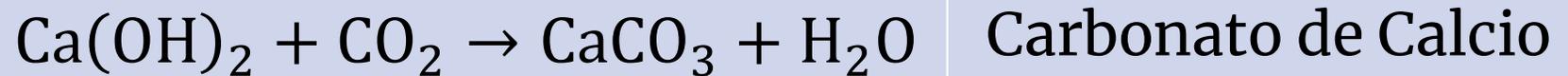
Aluminato de Calcio Hidratado

CASH: Sílico-Aluminato de Calcio Hidratado

REACCIONES ALCALINAS

Carbonatación

Reacción entre la Cal y el Dióxido de Carbono de la Atmósfera



Mineral sólido perjudicial para estabilización

Reduce cal disponible para reacciones puzolánicas

Reduce intercambio catiónico

Compactación inmediata para evitarla al reducir poros

REACCIONES ALCALINAS

Efectos en las Propiedades de los Suelos

Reacciones Rápidas

Modifican la Estructura de las Arcillas

Modificación

Plasticidad

Textura

Trabajabilidad

Estabilidad Volumétrica

Reacciones Lentas

Generan Productos Cementantes

Estabilización (Aumenta)

Resistencia Instantánea

Resistencia con el Tiempo
(cristalización)

Durabilidad

Reacciones continúan mientras haya cal y sílice disponible

FACTORES QUE AFECTAN LAS REACCIONES ALCALINAS

Materia Orgánica

Retarda las Reacciones

Reduce los Efectos de la Estabilización (Menor Aumento de Resistencia)

Causas

pH Ácido del Orgánico

Avidez por Agua

Avidez por Iones Ca^{++} (Petry y Glazer, 2005)

Suelos con Orgánico > 1% no responde a estabilización (Thompson, 1964)

Estabilización de Suelos con Orgánico > 6% es económicamente inviable
(Petry y Glazer, 2005)

FACTORES QUE AFECTAN LAS REACCIONES ALCALINAS

Temperatura

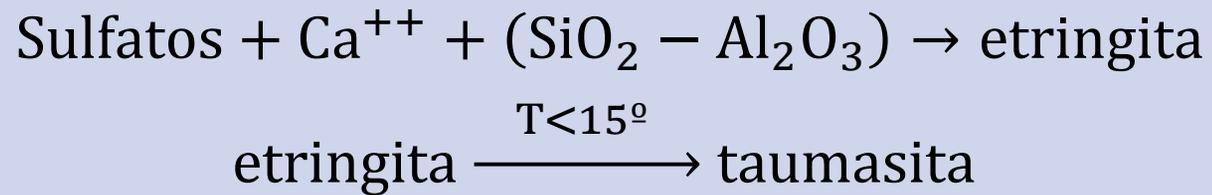
La velocidad de cristalización del gel depende de la temperatura ambiente

Temperaturas $< 13^{\circ}\text{C}$ prácticamente inhiben el desarrollo de la resistencia y durabilidad

Mayor temperatura de curado acelera las reacciones y la tasa de aumento de resistencia (Bhattacharja et al., 2003)

FACTORES QUE AFECTAN LAS REACCIONES ALCALINAS

Sulfatos



Minerales
Expansivos

Expansión Inducida se da en Suelos con > 10% Arcilla
(Hunter, 1988)

Etringita causa caída del pH lo que inhibe las reacciones
(Petry y Little, 1992)

SUELOS APROPIADOS PARA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Suelos con alto contenido de sílice y alúmina reactivas
(minerales arcillosos)

Thompson (1966)	Suelos reactivos a la cal son los que tienen un incremento de RCI a 28 días a temperatura ambiente de 345 kPa
Epps, Dunlap y Gallaway (1971)	Suelos medios, moderadamente finos y finos Suelos A-5, A-6 y A-7; algunos A-2-6 y A-2-7 Suelos CH, CL, MH, CL-ML, SC, GC y GM
Robbnet y Thompson (1969)	Suelos con pasa 2mm > 7% e IP > 8%
Thompson (1975)	Suelos más finos reaccionan más favorablemente (2 mm > 10%)
Arabani y Karami (2005)	Arenas arcillosas (arcilla > 15%)

MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

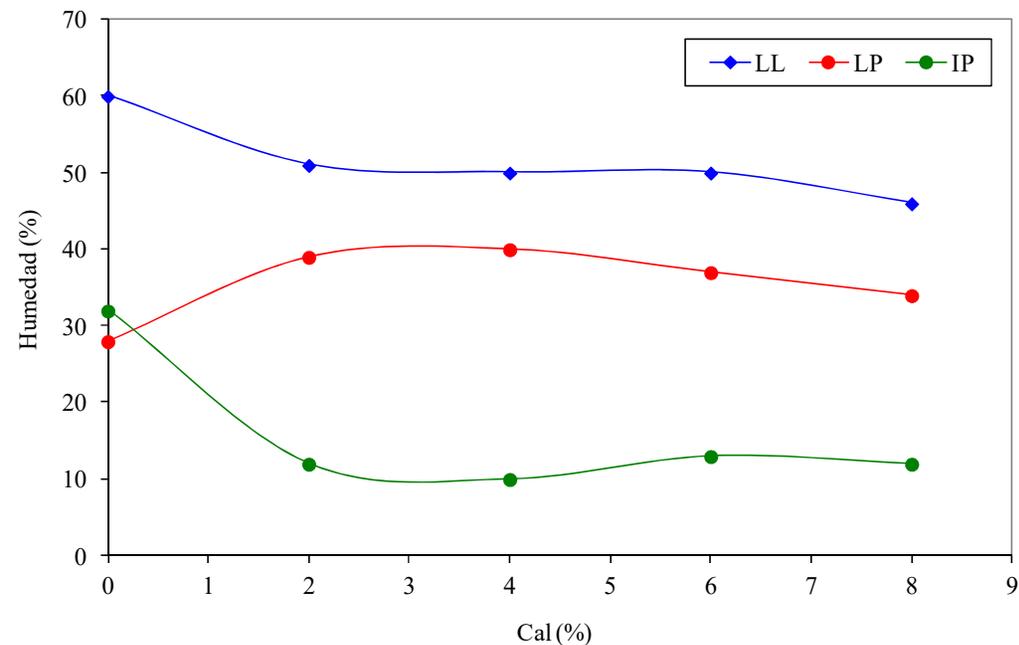
Punto de Fijación de Cal (Lime Fixation Point, LFP)
(Hilt & Davidson, 1960)

Tenor máximo de cal que mejora trabajabilidad sin ganancia de resistencia

Basado en modificación del Índice Plástico (IP) del suelo tratado con cal

LFP: Porcentaje de cal a partir del cual no se observa variación de IP

Para %Cal > LFP: Ganancia de resistencia sin variación de IP y trabajabilidad



MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

Método del pH
(Eades & Greem, 1966)

Contenido mínimo (óptimo) de cal para estabilizar un suelo es aquél que produce un pH = 12,4

Norma ASTM D6276

Colocar en un recipiente 25 g de suelo seco pasante por #40

Mezclar suelo con 2%, 3%, 4%, 5%, 6% de cal

Adicionar 100 ml de agua destilada

Agitar las mezclas por 30 seg cada 10 min durante 1 h

Medir el pH de cada mezcla

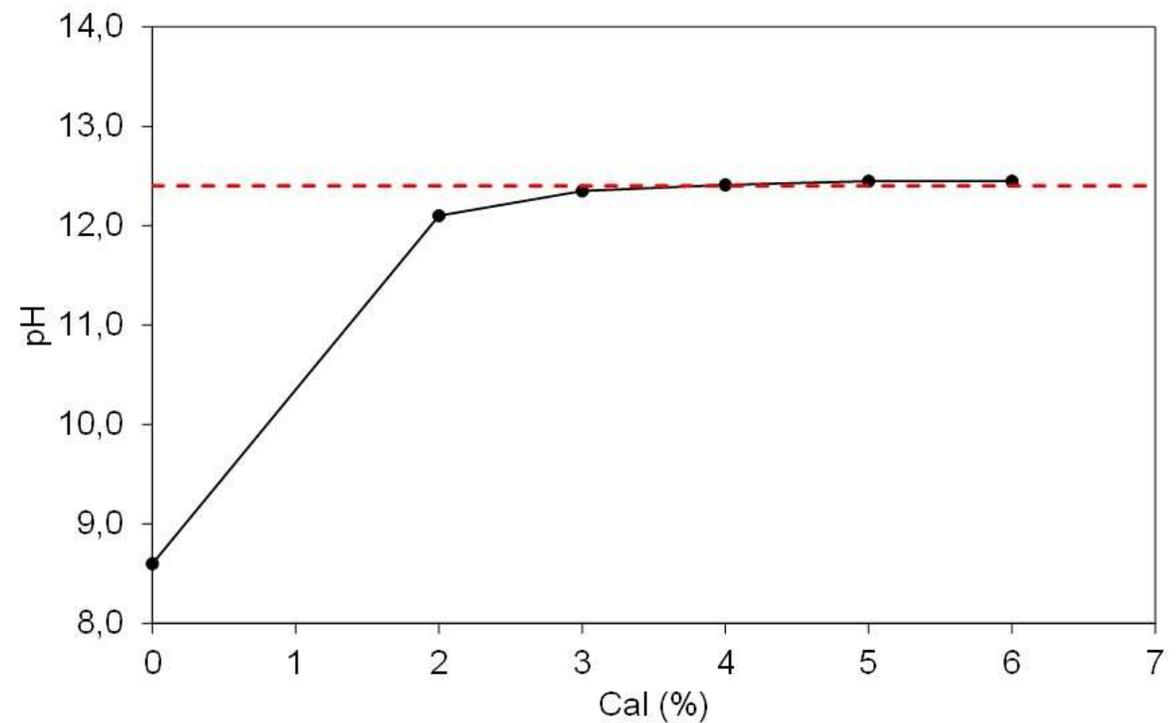
Realizar las mismas operaciones para una solución de 25 g de suelo (0% cal) y de 2 g de cal (100% cal)

MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

Método del pH

Suelo de Cebollatí (CL) (Behak, 2011)

Cal (%)	pH
0	8,6
2	12,10
3	12,35
4	12,41
5	12,45
6	12,45
100	12,60



MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

Método de la Resistencia a la Compresión Inconfinada (RCI) (Thompson, 1966)

El contenido óptimo de cal es aquél que garantiza un aumento de RCI del suelo de por lo menos 345kPa

Moldear probetas de suelo tratado con diferentes contenidos de cal
Curar las probetas durante 28 días a temperatura ambiente (22,8°C) o 48 h a temperatura controlada de 48,9°C

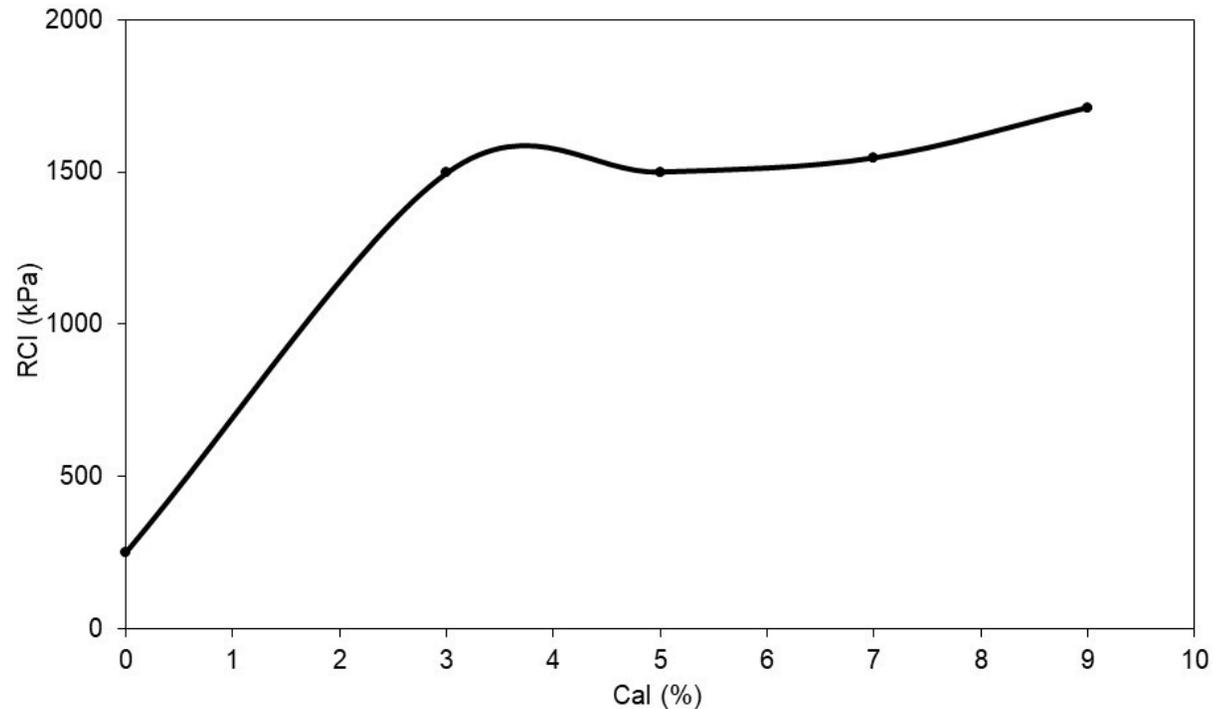
Ensayar las probetas a compresión inconfinada

MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

Método RCI

Suelo de Cebollatí (CL) (Behak, 2011)

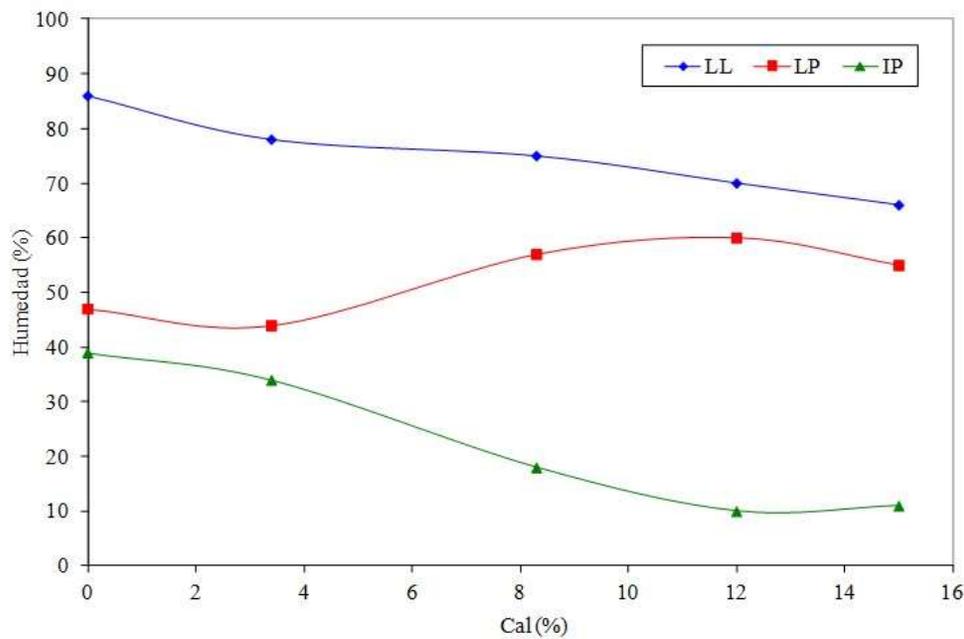
Cal (%)	RCI (kPa)
0	252
3	1497
5	1500
7	1547
9	1772



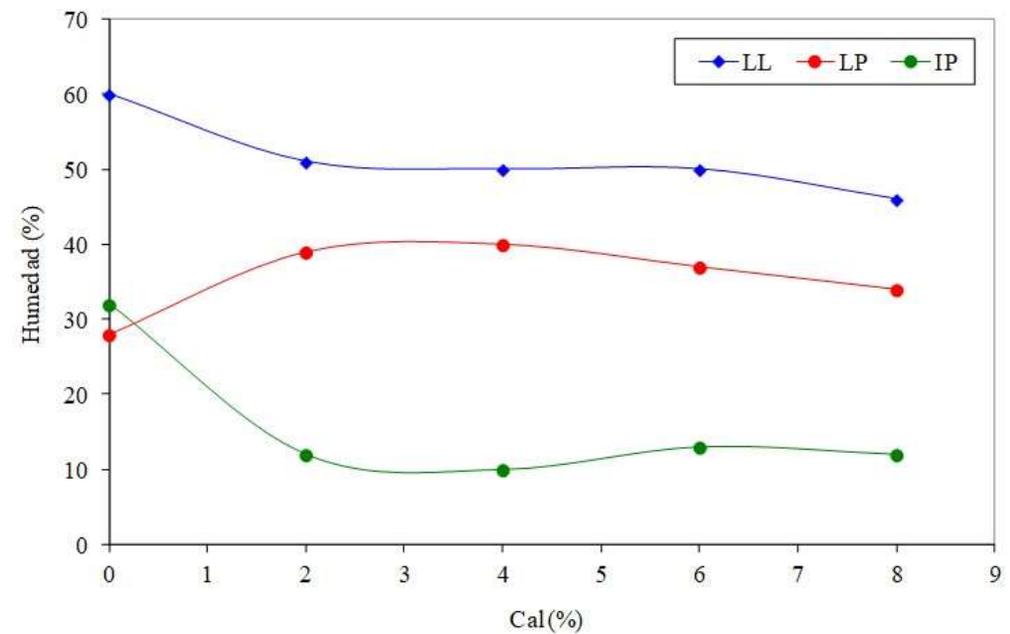
EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Plasticidad

Núñez (1991)



Suelo CH (Akawwi & Al-Kharabsheh, 2005)



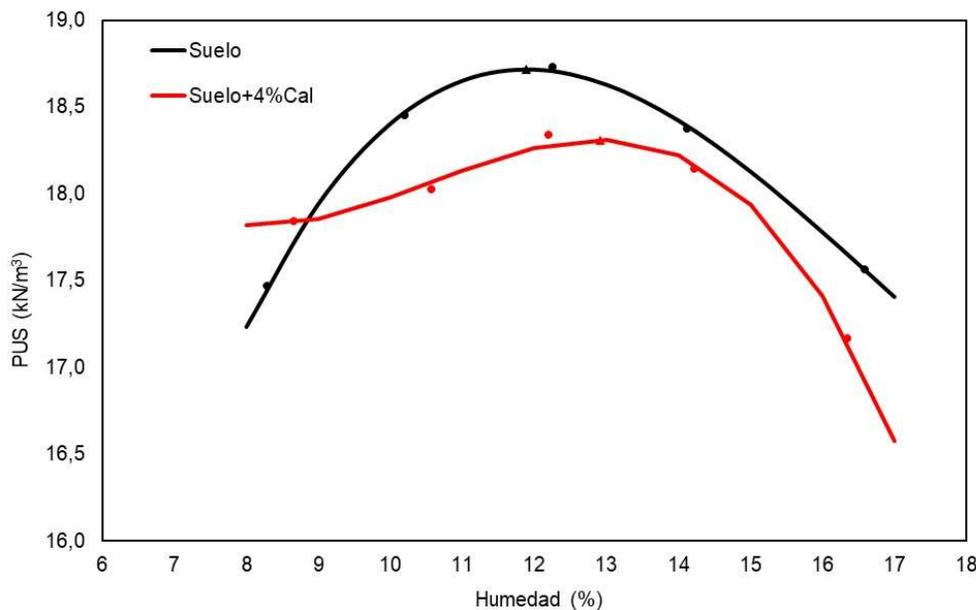
EFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Plasticidad

Herrin y Mitchell (1961)	El Límite Líquido aumenta en algunos casos
Núñez (1991)	El Límite Líquido disminuye en arcillas muy plásticas y aumenta en arcillas poco plásticas
Hilt y Davidson (1969)	Aumento acentuado de Límite Plástico en suelos con montmorillonita y poco afectado en los que contienen caolinita
Basma y Tuncer (1991)	El tiempo de curado de mezclas suelo-cal no tiene efecto en las modificaciones de las propiedades plásticas

EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Compactación



Suelo Cebollatí (CH) (Behak, 2013)

PUSM disminuye con contenido de cal

G_s de la cal \ll G_s del suelo

Floculación: Aumento de Vacíos

Cementación: Material más Resistencia

HOC aumenta con contenido de cal

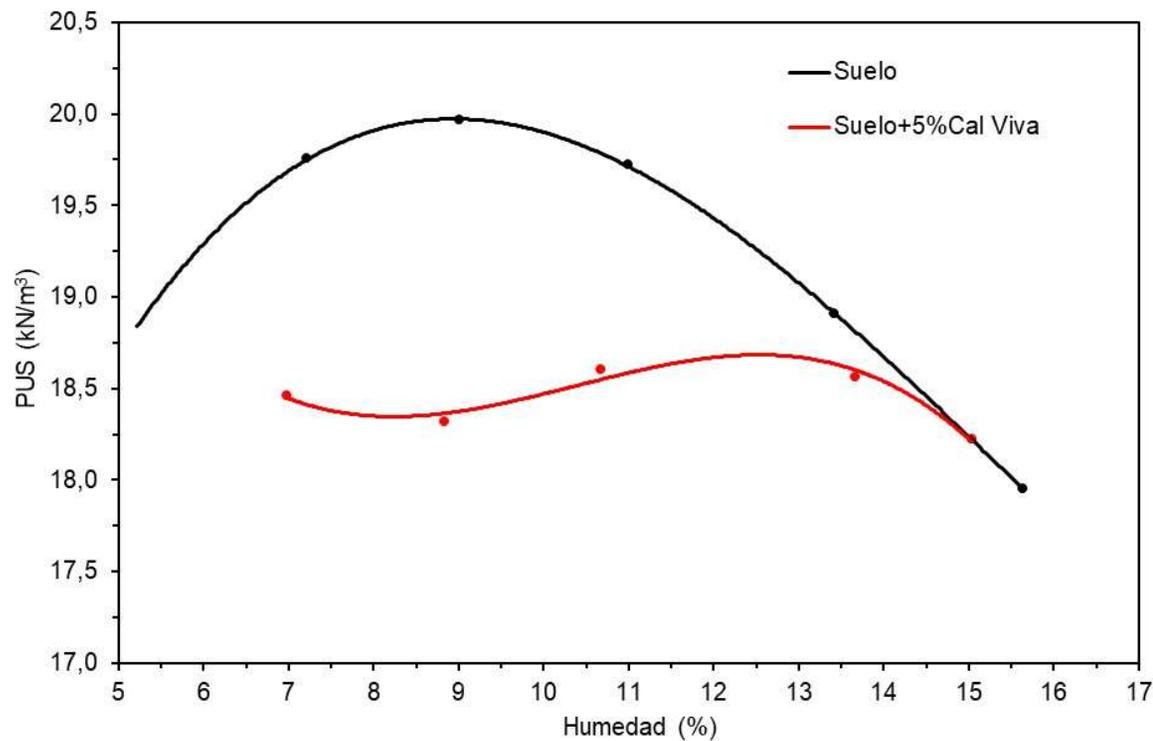
Parte del agua se consume en la hidratación de la cal

Floculación: Más agua para llenar vacíos

EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Compactación

Suelo SM



Cambio de Forma de la Curva de Compactación

EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Compactación

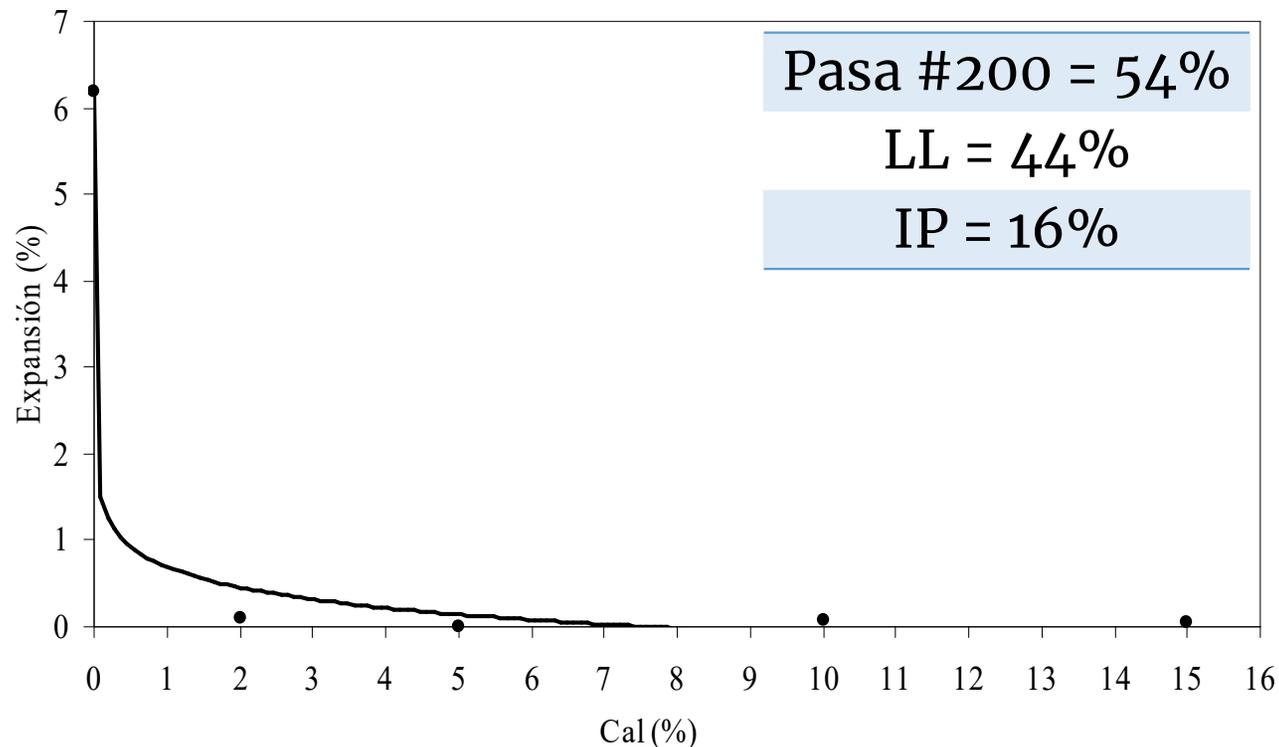
Suelo Residual de Fm Serra Geral (CL) (Lovato, 2004)

Material	Cal (%)	PUSM (kN/m ³)	HOC (%)
Suelo	0	17,62	17,4
Cal Cálcica	3	16,64	18,5
	4	16,60	18,2
	5	16,62	18,7
Cal Dolomítica	3	16,87	17,2
	4	16,85	18,2
	5	16,74	18,3

EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Estabilidad Volumétrica

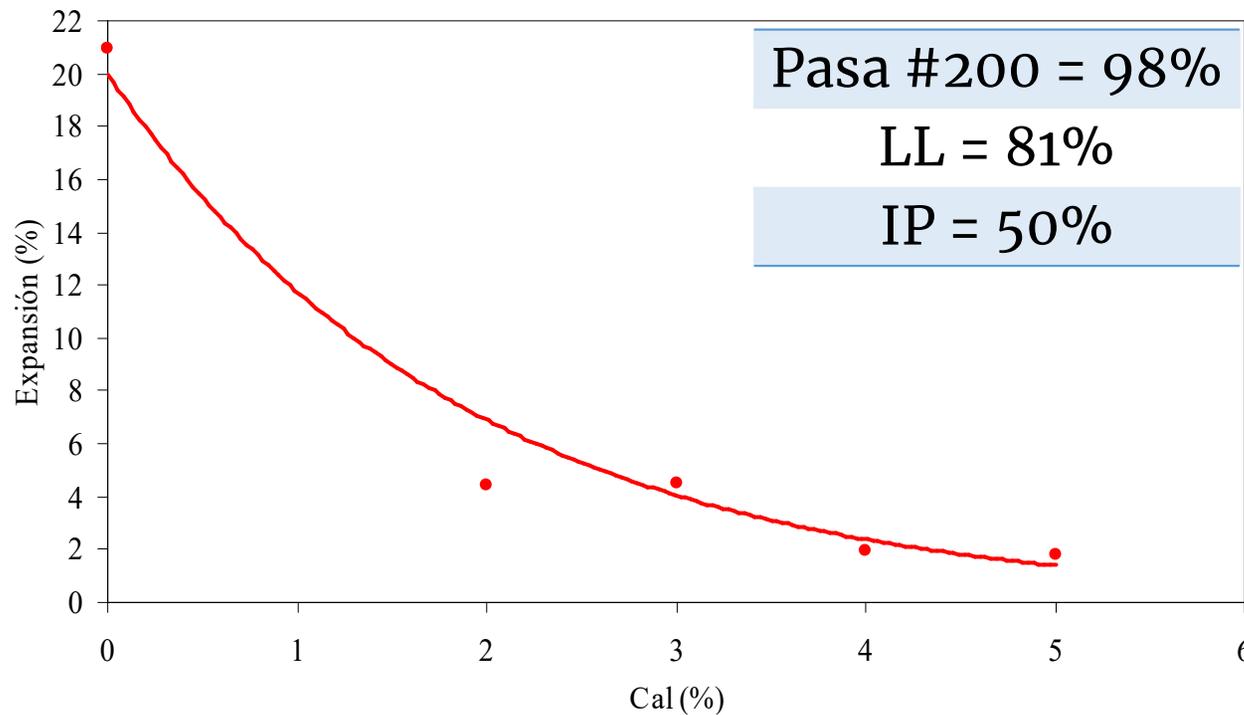
Descompuesto Fm Arapey (ML), Cantera Yucutujá
Expansión Libre a 7 días



EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Estabilidad Volumétrica

Suelo de Fm Libertad (CH), Ruta 1, km 60
Expansión Libre y Presión de Expansión a 2 h

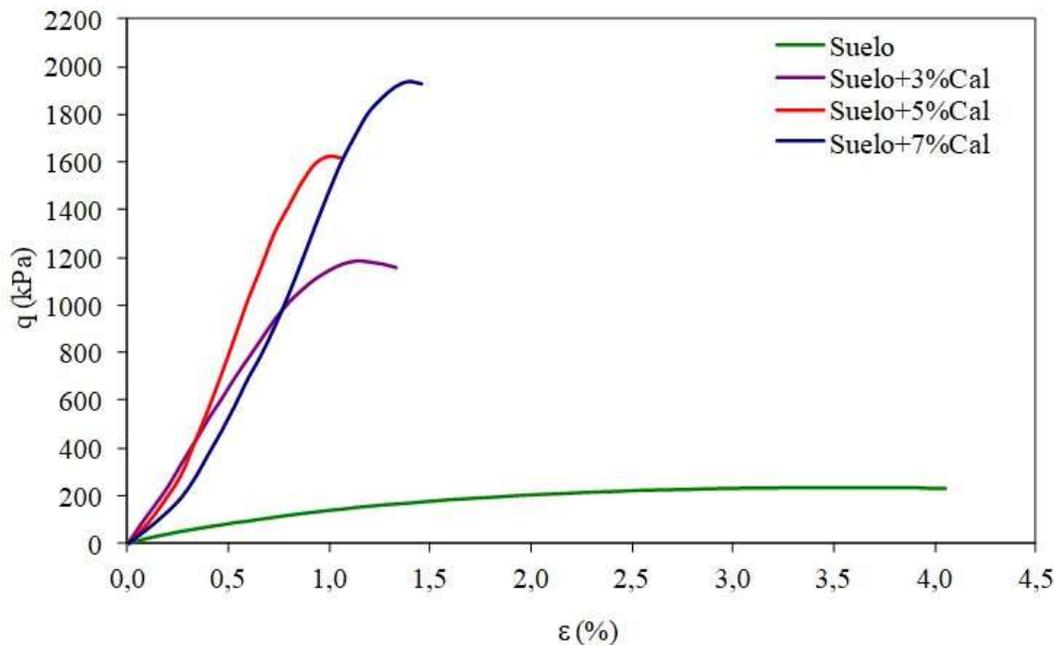


Cal (%)	PE (kPa)
0	500
4	20

EFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Comportamiento Tensión-Deformación

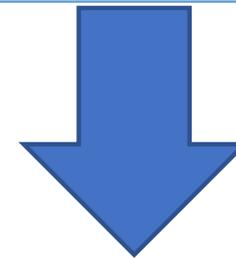
Suelo de Cebollatí (CL) (Behak, 2013)



Falla Dúctil → Falla Frágil

Aumento de Tensión de Falla

Disminución de Deformación Axial

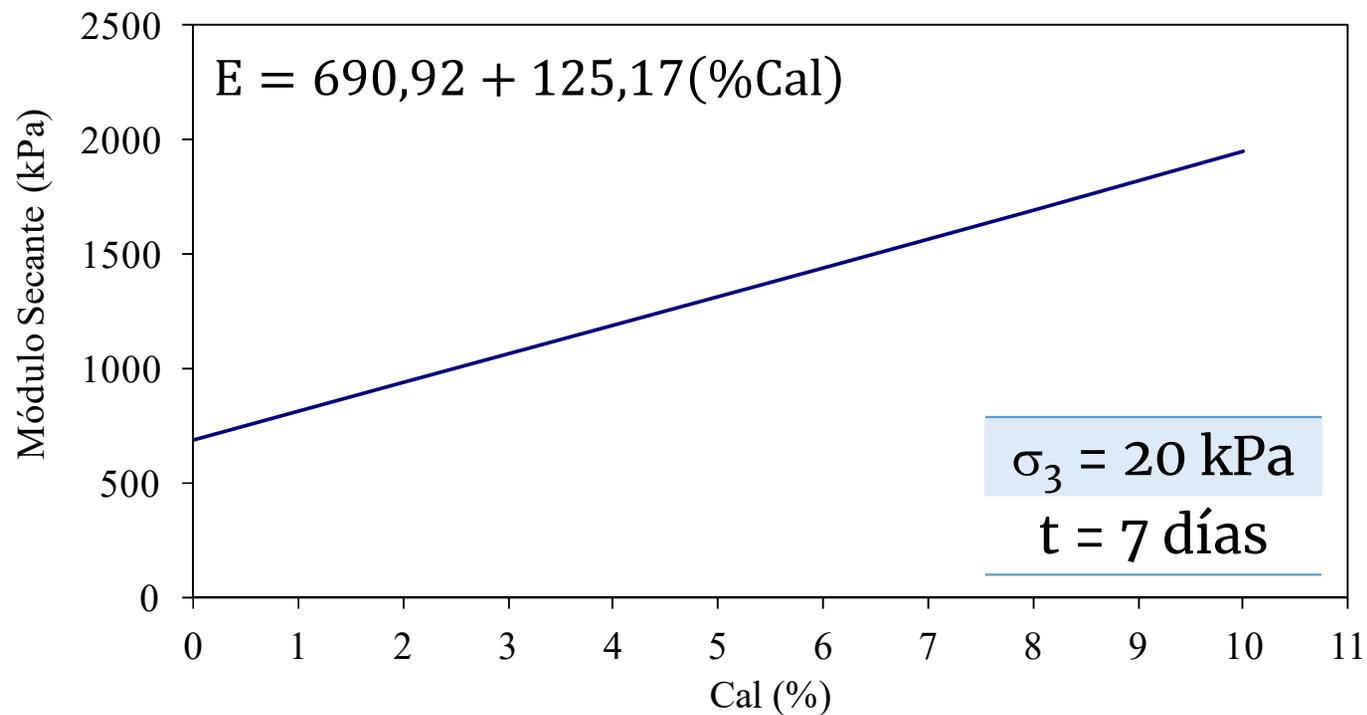


Aumento de Rigidez

EFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Comportamiento Tensión-Deformación

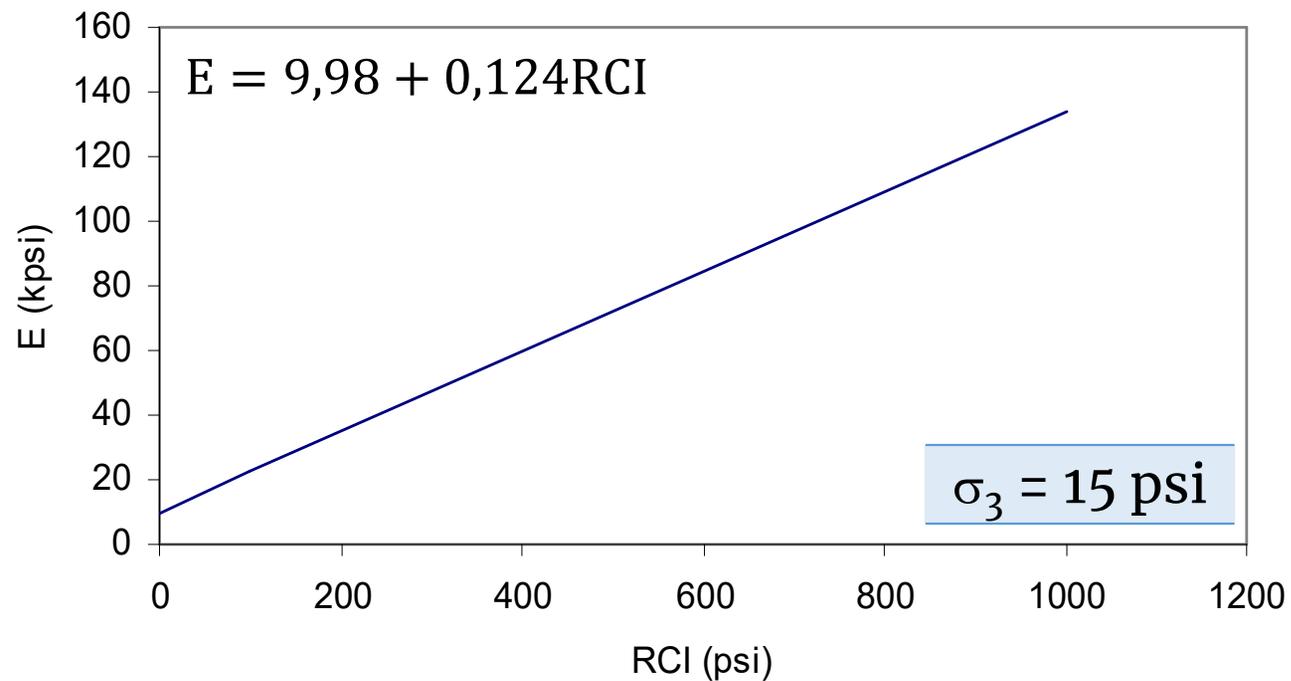
Arcilla de Canoas (Thomé, 1994)



EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

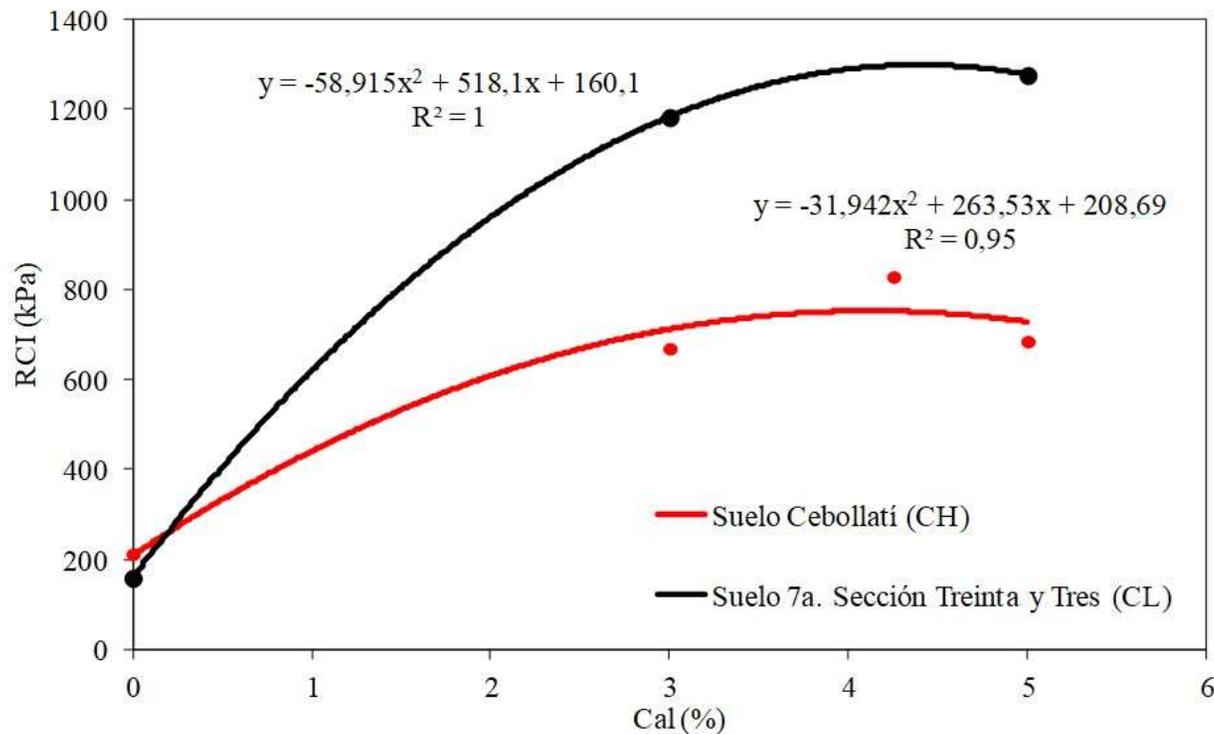
Comportamiento Tensión-Deformación

Suelos de Illinois (Thompson, 1966)



EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

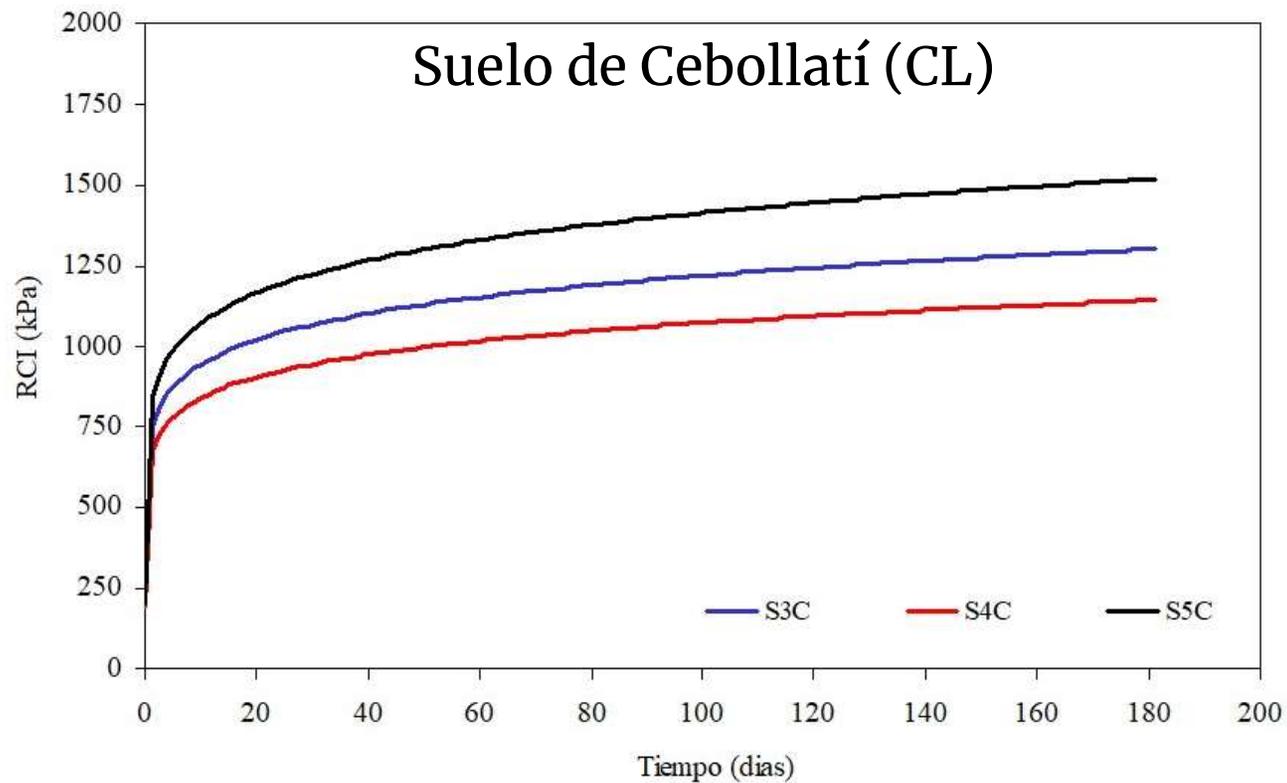
Resistencia a la Compresión Inconfiada Efecto del Contenido de Cal



28 días

EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

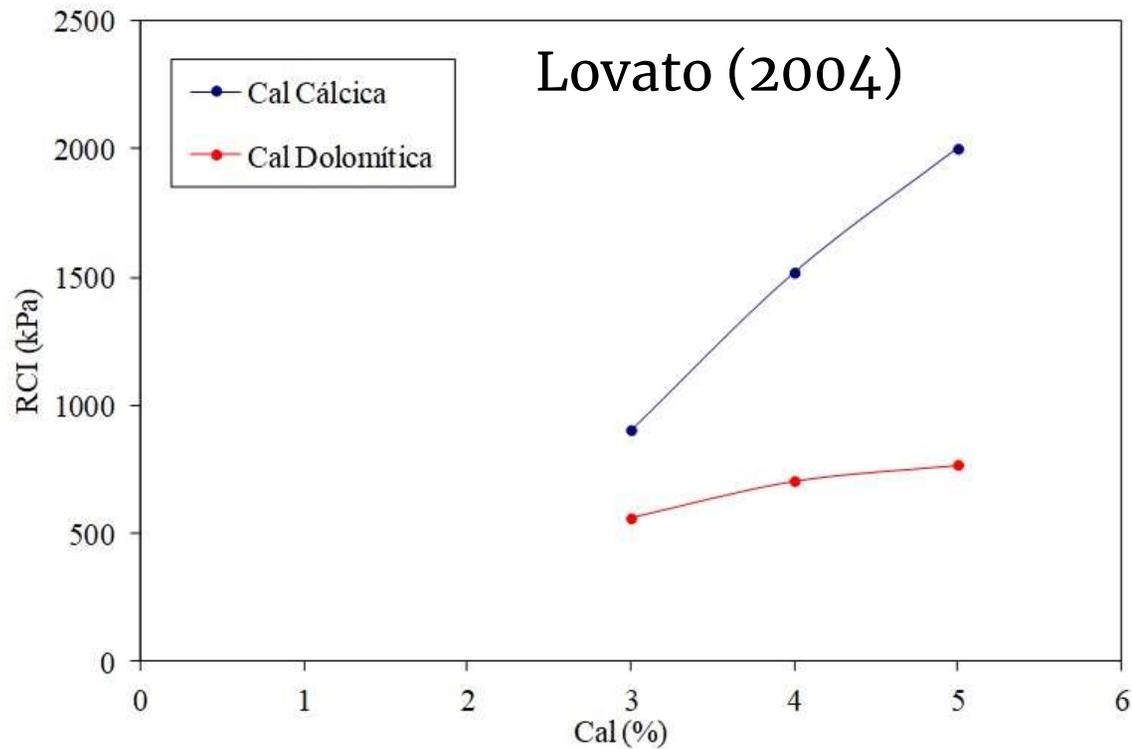
Resistencia a la Compresión Inconfinada Efecto del Tiempo



EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Resistencia a la Compresión Inconfinada

Efecto del Tipo de Cal

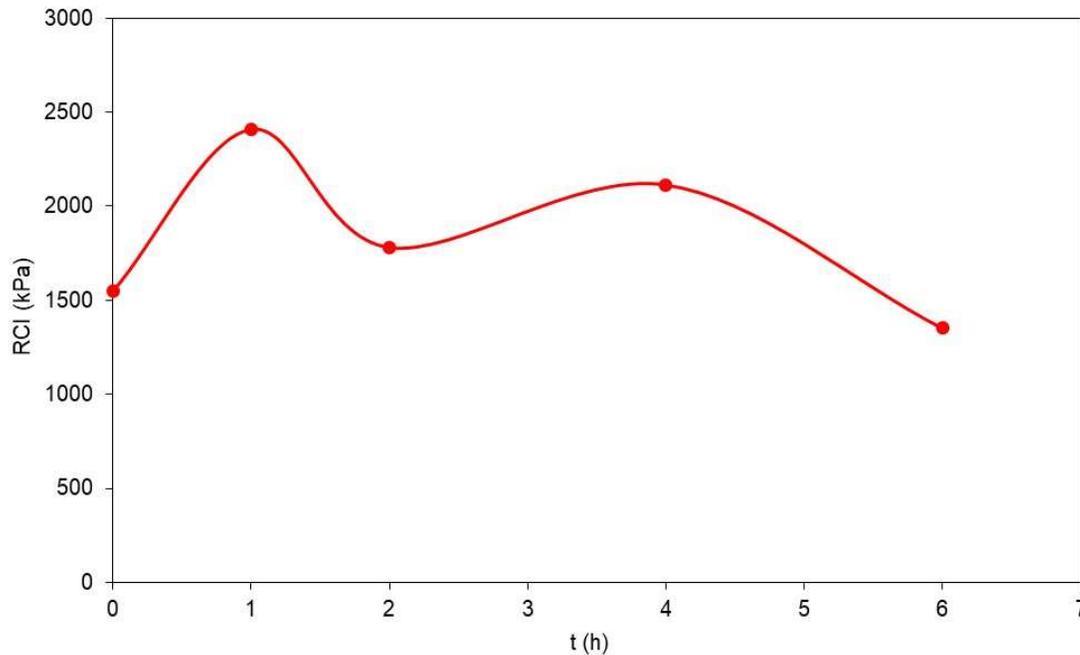


28 días

EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Resistencia a la Compresión Inconfinada Efecto del Retardo de la Compactación

Suelo de Cebollatí (CL)–5%Cal (Behak, 2013)



Osinubi (1988)

PUSM tiende a disminuir con aumento de tiempo de retardo por formación de productos cementantes

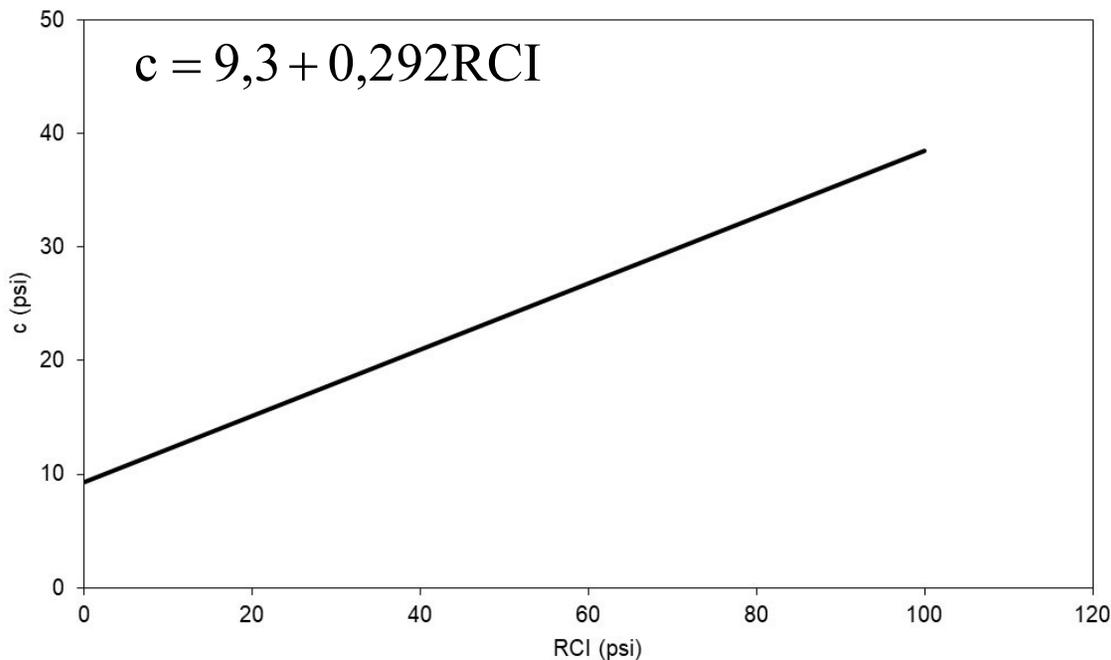
Ruptura de agregaciones para tener una compactación satisfactoria

Carbonatación de la cal

EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Resistencia al Corte

Suelos de Illinois (Thompson, 1966)



Arcilla de Canoas
(Thomé, 1994)

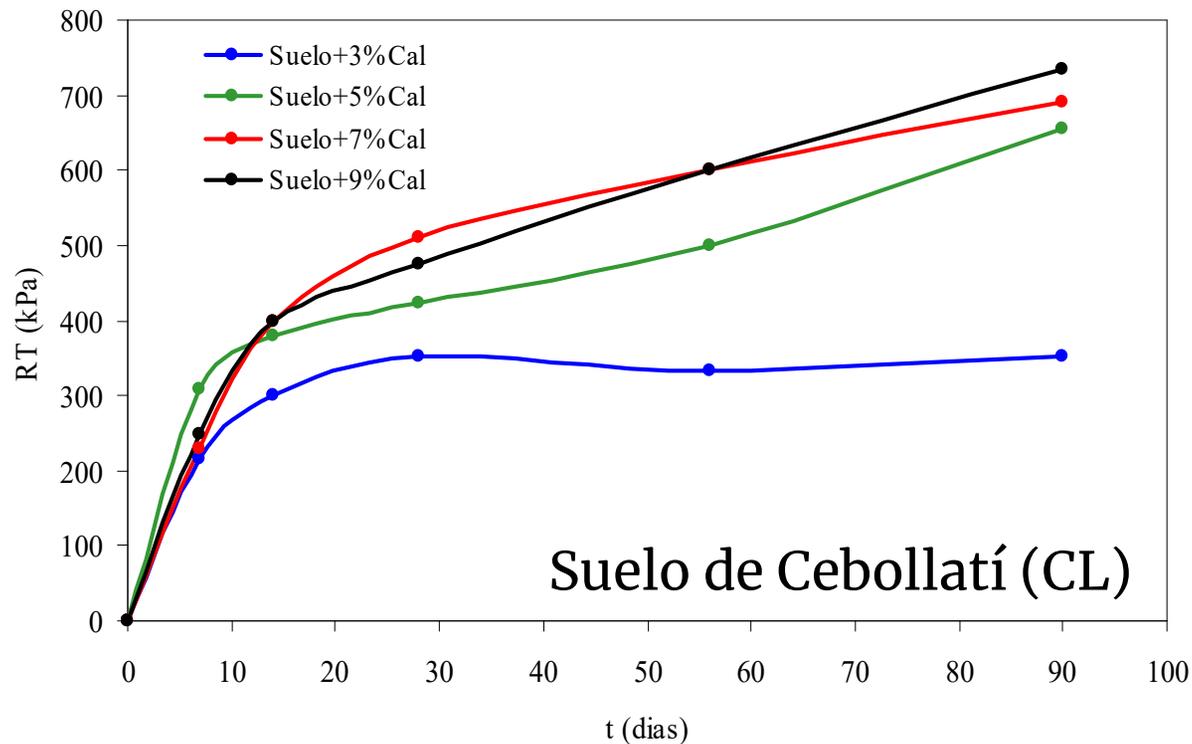
	c (kPa)	ϕ (°)
Suelo	6,1	18,3
Suelo-5%Cal	13,7	19,7
Suelo-9%Cal	21,6	23,1

Aumento significativo de c

Aumento poco significativo de ϕ

EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

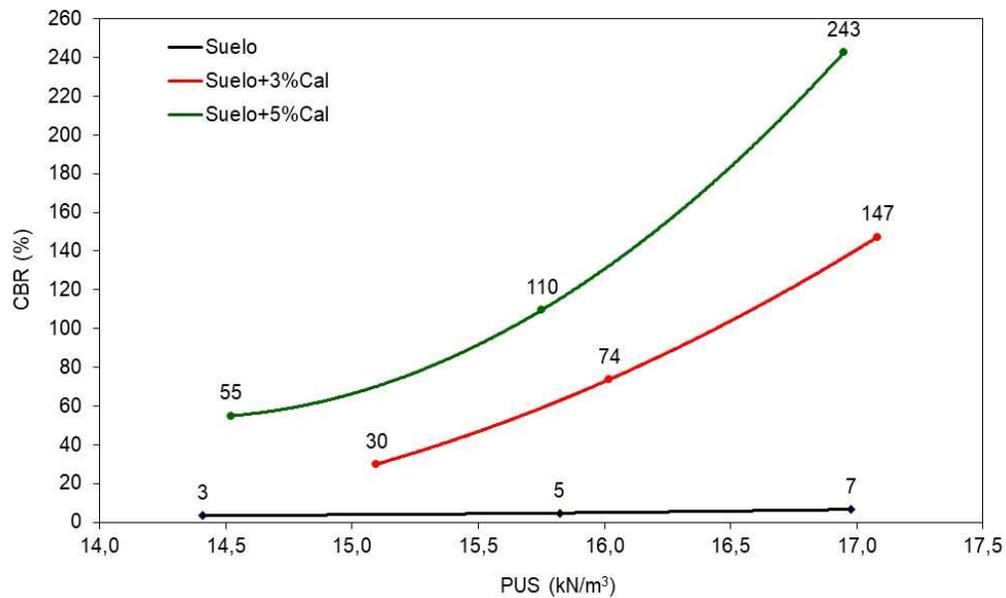
Resistencia a la Tracción Efecto del Contenido de Cal y el Tiempo



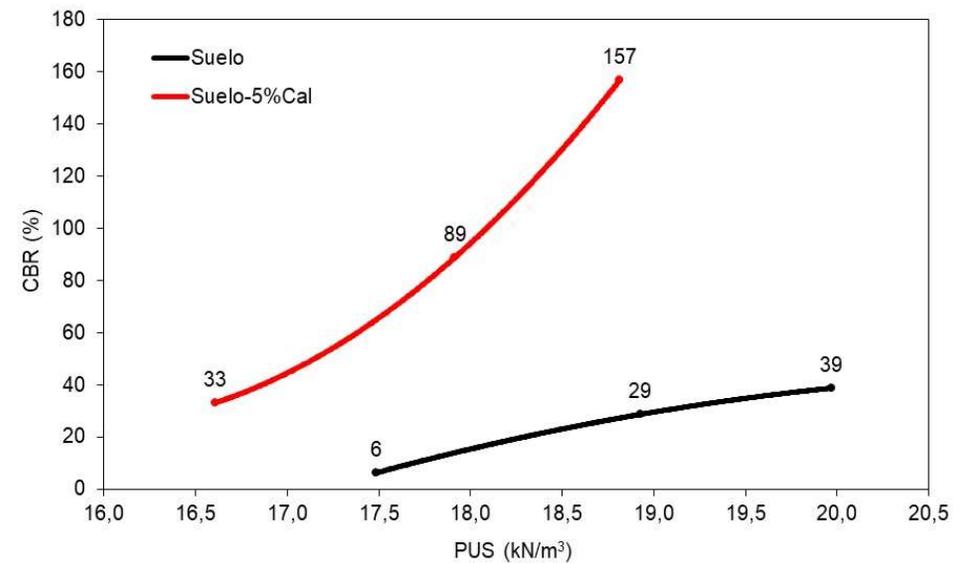
EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

CBR

Suelo de Cebollatí (CL) (Behak, 2011)



Suelo SM, Villa del Carmen



EFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Durabilidad

Humedecimiento y Secado

Método de Iowa (Hoover et al., 1958)

Cociente de Resistencias

$$Q_r = \frac{\sigma_{r\ c/c}}{\sigma_{r\ s/c}} \quad t = 28 \text{ días}$$

$\sigma_{r\ c/c}$: RCI de probetas sometidas a 12 ciclos de 24 h de humedecimiento y 24 h de secado

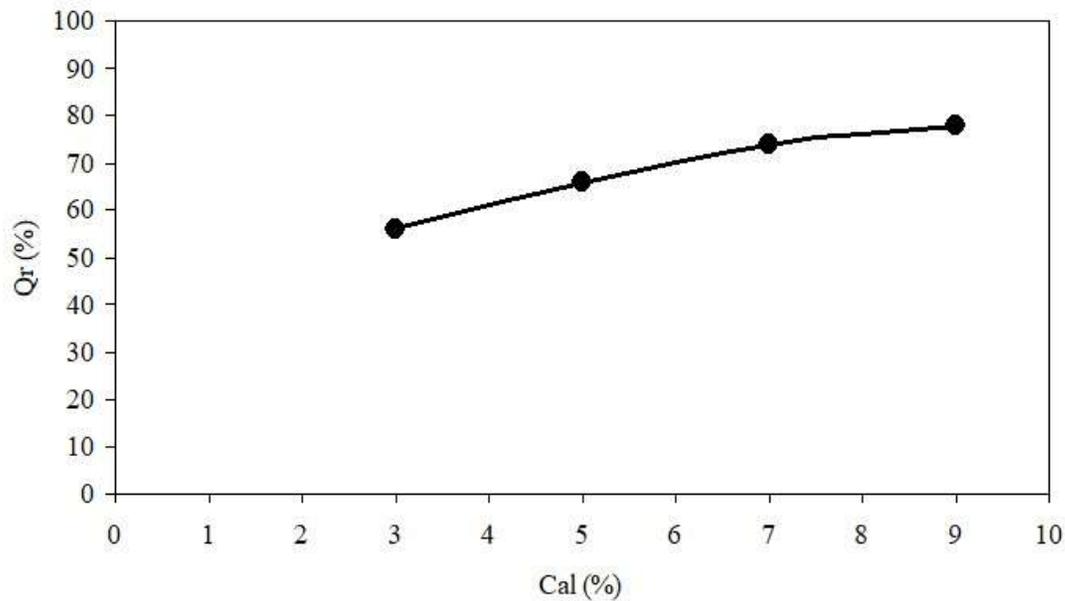
$\sigma_{r\ s/c}$: RCI de probetas no sometidas a ciclos

Marcon (1977): $Q_r > 80\%$ Material Aceptable

EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Durabilidad

Suelo de Cebollatí (CL)



	$\sigma_{rs/c}$ (kPa)	$\sigma_{rc/c}$ (kPa)	Q_r (%)
Suelo-3%Cal	1018	1821	56
Suelo-5%Cal	1399	2132	66
Suelo-7%Cal	1976	2667	74
Suelo-9%Cal	2260	2891	78