

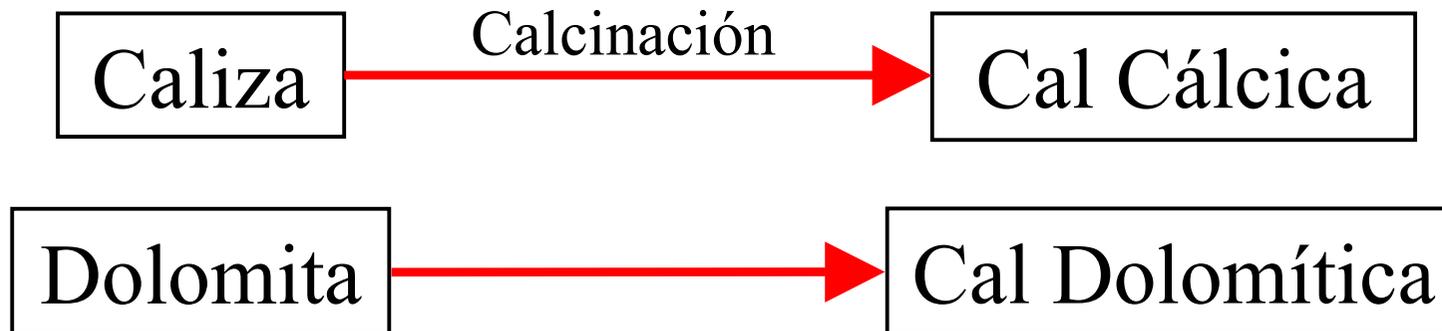
# ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL

Curso de Actualización Profesional  
2019

## CAL



Material resultante de calcinación de rocas calcáreas (constituidas por carbonato de calcio y/o carbonato de magnesio) a temperaturas entre 850°C-900°C



## Cal Cálctica

Calcinación



CaO: Óxido de Calcio



Cal Viva o Virgen

Hidratación de Cal Viva



Ca(OH)<sub>2</sub>: Hidróxido de Calcio



Cal Hidratada  
o Apagada

Hidratación de CaO es exotérmica,  
con gran liberación de calor

## Cal Dolomítica

Mezclas de óxidos o hidróxidos de calcio y de magnesio

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

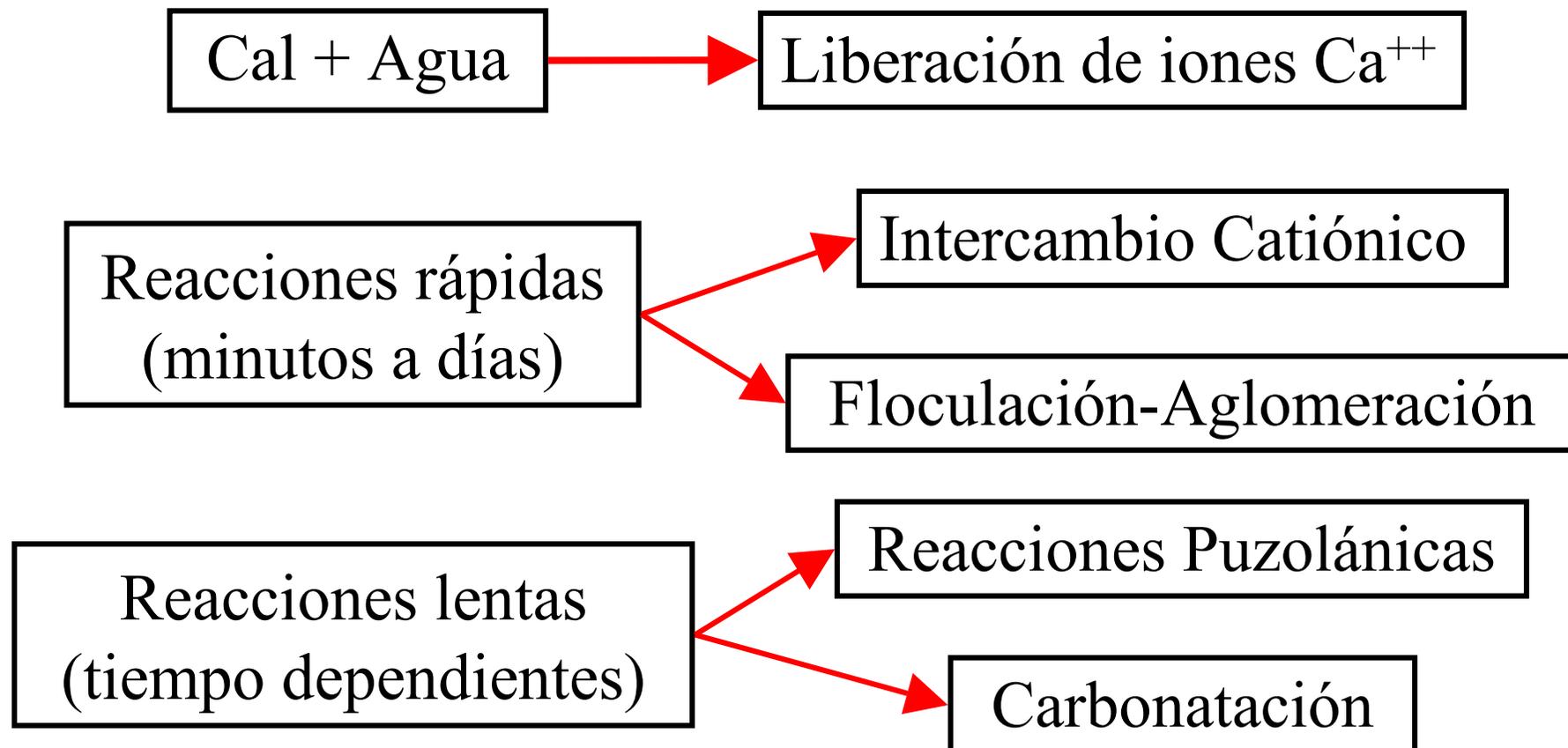
$\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$       Cal Dolomítica Bi-Hidratada

National Lime Association (2004)

- Cal cálcica: hasta 5% de MgO o Mg(OH)<sub>2</sub>
- Cal dolomítica: 35%-46% de MgO o Mg(OH)<sub>2</sub>

## REACCIONES ALCALINAS

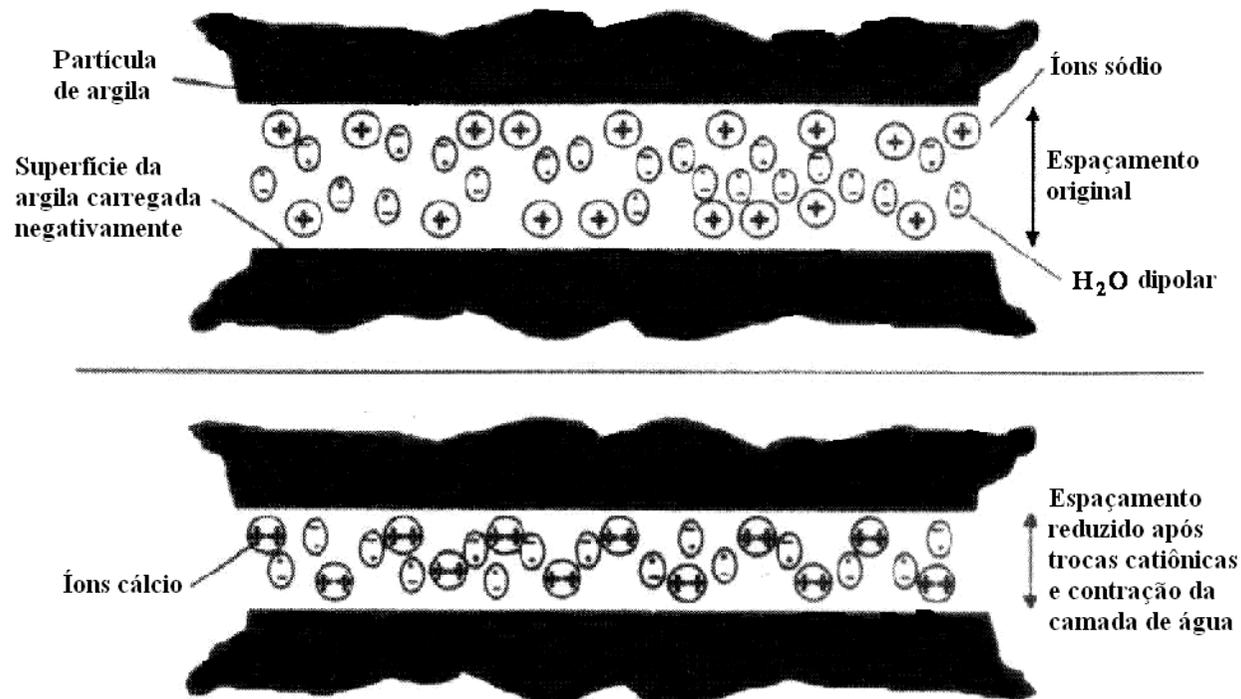
Reacciones químicas desarrolladas en un medio alcalino  
(básico)



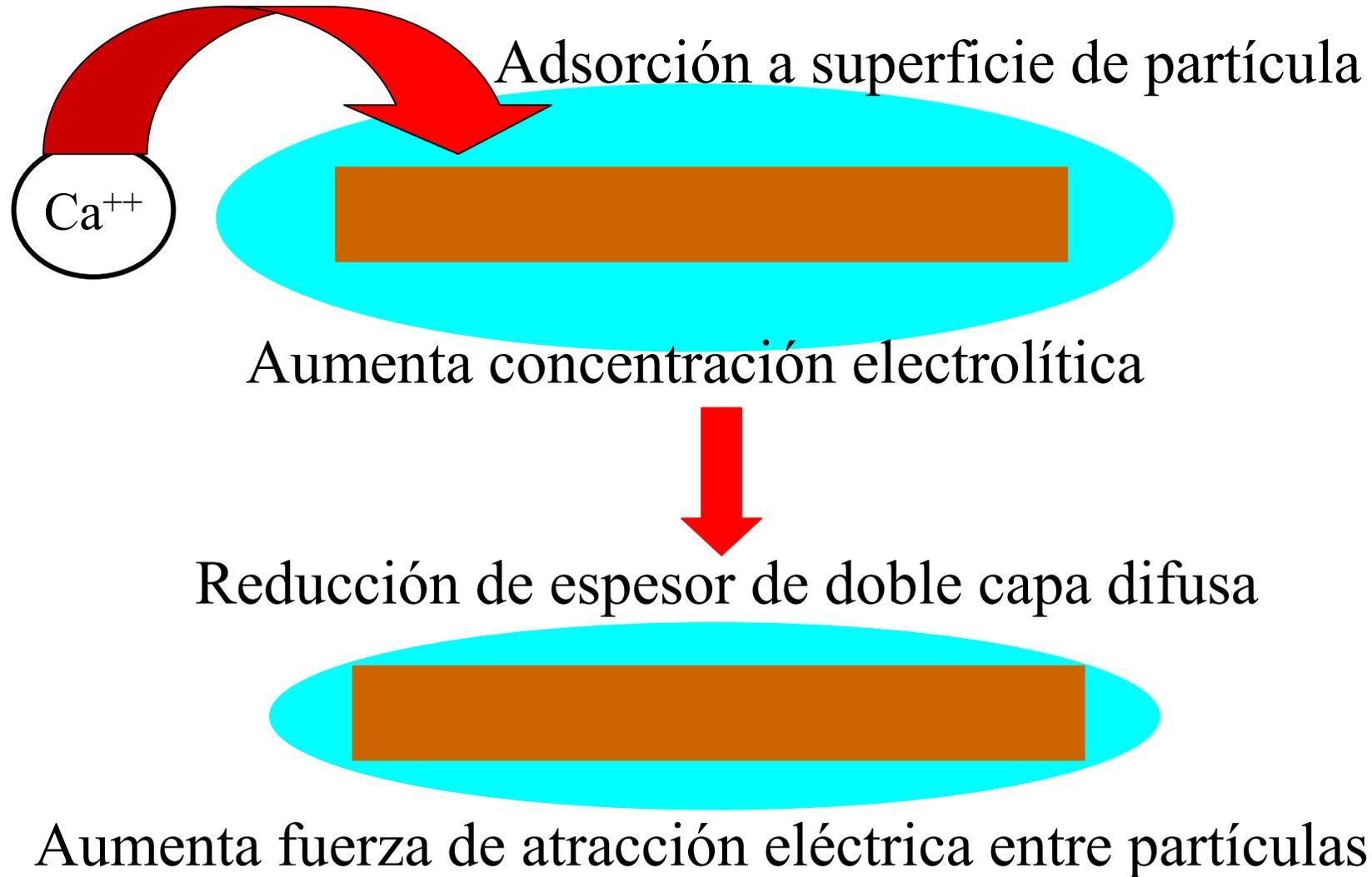
## Intercambio Catiônico

- Processo instantâneo
- Inicia las reacciones

Iones  $\text{Ca}^{++}$  substituyen iones monovalentes



## Floculación-Aglomeración



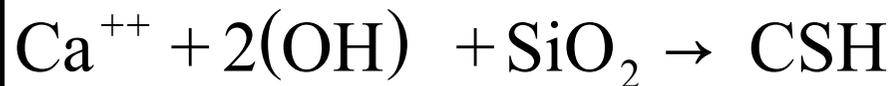
## Efectos de Reacciones Rápidas

- Disminución de Plasticidad
  - Cambio de Textura
  - Mejor Trabajabilidad
- Mayor Estabilidad Volumétrica

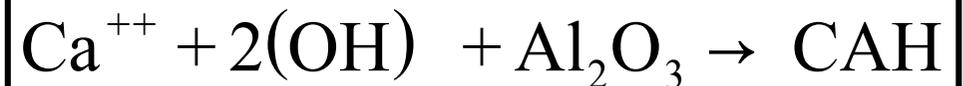
## Reacciones Puzolánicas

Aumento de pH  $\approx 12,4$

- Disolución de sílice y alúmina de minerales arcillosos
- Reacciones entre sílice y/o alúmina con  $\text{Ca}^{++}$  de cal



Silicato de Calcio Hidratado



Aluminato de Calcio Hidratado

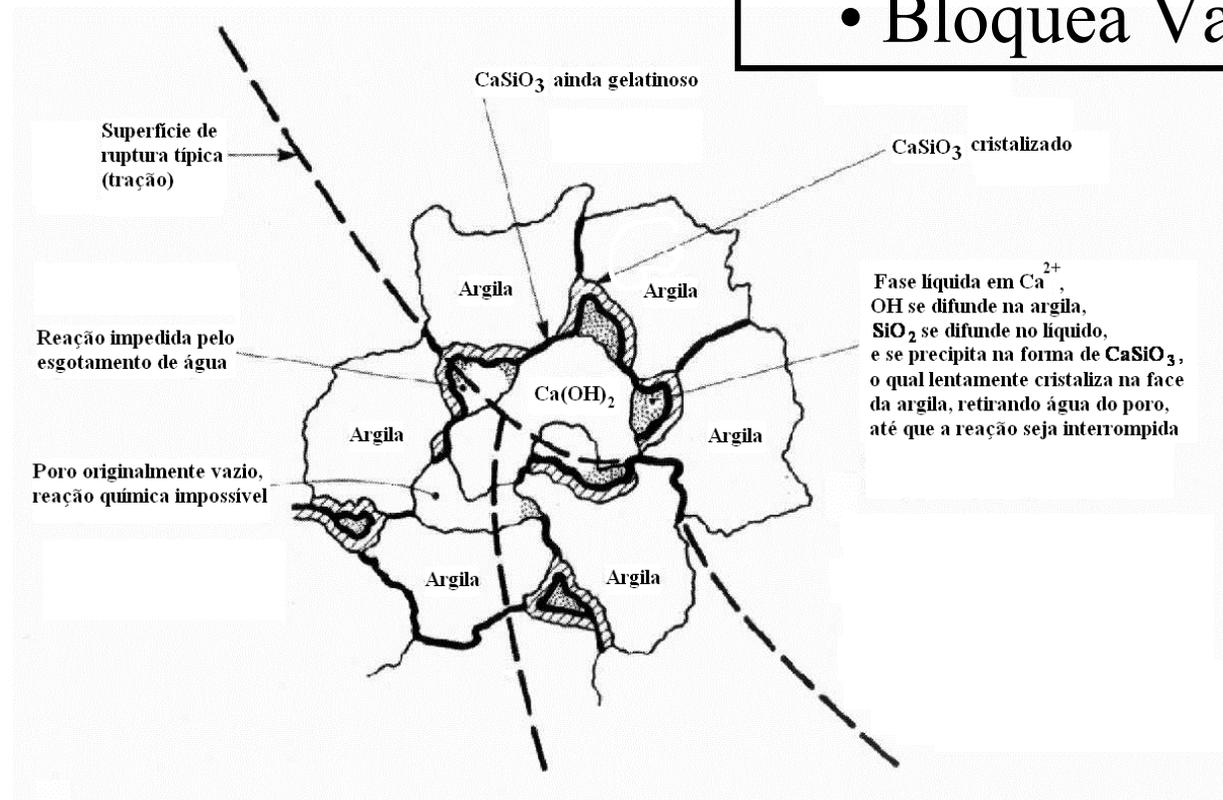
CASH: Sílico-Aluminato de Calcio Hidratado

## Reacciones Puzolánicas

CSH, CAH, CASH

Gel

- Cubre y Liga Arcilla
- Bloquea Vacíos



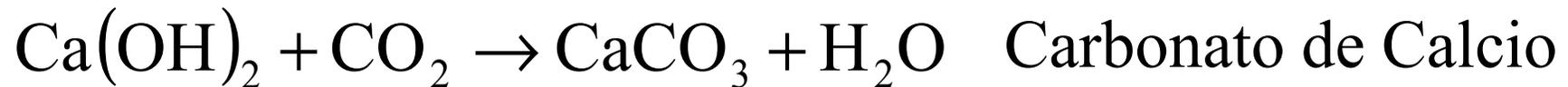
Gel Cristaliza Lentamente

## Reacciones Puzolánicas

- Efectos
  - Aumento de resistencia instantánea
  - Aumento de resistencia con el tiempo, mientras haya cristalización
  - Aumento de durabilidad
- Reacciones continúan mientras haya sílice y cal

## Carbonatación

Reacción entre cal y dióxido de carbono de atmósfera



Mineral sólido perjudicial para estabilización

- Reduce cal disponible para reacciones puzolánicas
- Reduce intercambio catiónico

Compactación inmediata para evitarla al reducir poros

## Factores que Afectan Reacciones Alcalinas

### Materia Orgánica

- Retarda reacciones
- Reduce efecto de estabilización (menor aumento de resistencia)

### Causas

- pH ácido
  - Avidez por agua
  - Avidez por  $\text{Ca}^{++}$  (Petry & Glazer, 2005)
- 
- Suelos con materia orgánico  $> 1\%$  no responde a estabilización (Thompson, 1964)
  - Estabilización de suelos con orgánico  $> 6\%$  económicamente impracticable (Petry & Glazer, 2005)

## Factores que Afectan Reacciones Alcalinas

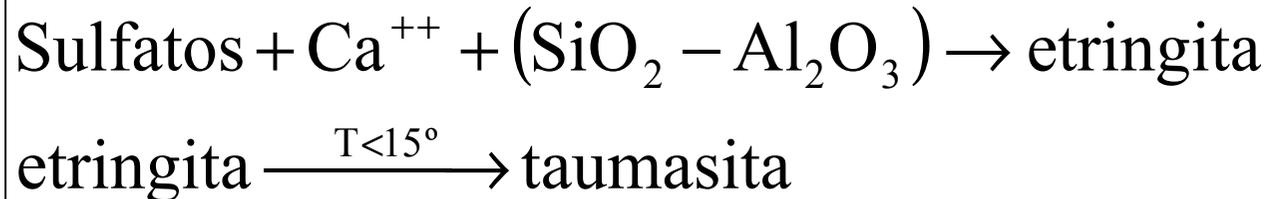
### Temperatura

Velocidad de cristalización de gel depende de temperatura ambiente

- $T < 13^{\circ}\text{C}$  prácticamente inhiben reacciones
- Mayor temperatura de cura acelera reacciones alcalinas y tasa de aumento de resistencia (Bhattacharja et al., 2003)

## Factores que Afectan Reacciones Alcalinas

### Sulfatos



Minerales  
Expansivos

- Expansión inducida en suelos > 10% arcilla  
(Hunter, 1988)
- Etringita causa caída de pH → Inhibe reacciones  
(Petry y Little, 1992)

## Suelos Apropriados para Estabilización con Cal

Suelos con alto contenido de minerales arcillosos

Suelos reactivos a la cal son los que tienen una ganancia de RCI a 28 días a temperatura ambiente de 345 kPa (Thompson, 1966)

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
- 
- Suelos con pasa  $2\mu\text{m} > 7\%$  e  $\text{IP} > 8\%$  (Robbnet & Thompson, 1969)
    - Suelos más finos reaccionan más favorablemente ( $2\mu\text{m} > 10\%$ ) (Thompson, 1975)
      - Arenas arcillosas (arcilla  $> 15\%$ ) (Arabani & Karami, 2005)

## Métodos de Dosificación

### Lime Fixation Point (LFP) (Hilt & Davidson, 1960)

- Contenido 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 suelo es  
aquél que produce  $\text{pH} = 12,4$

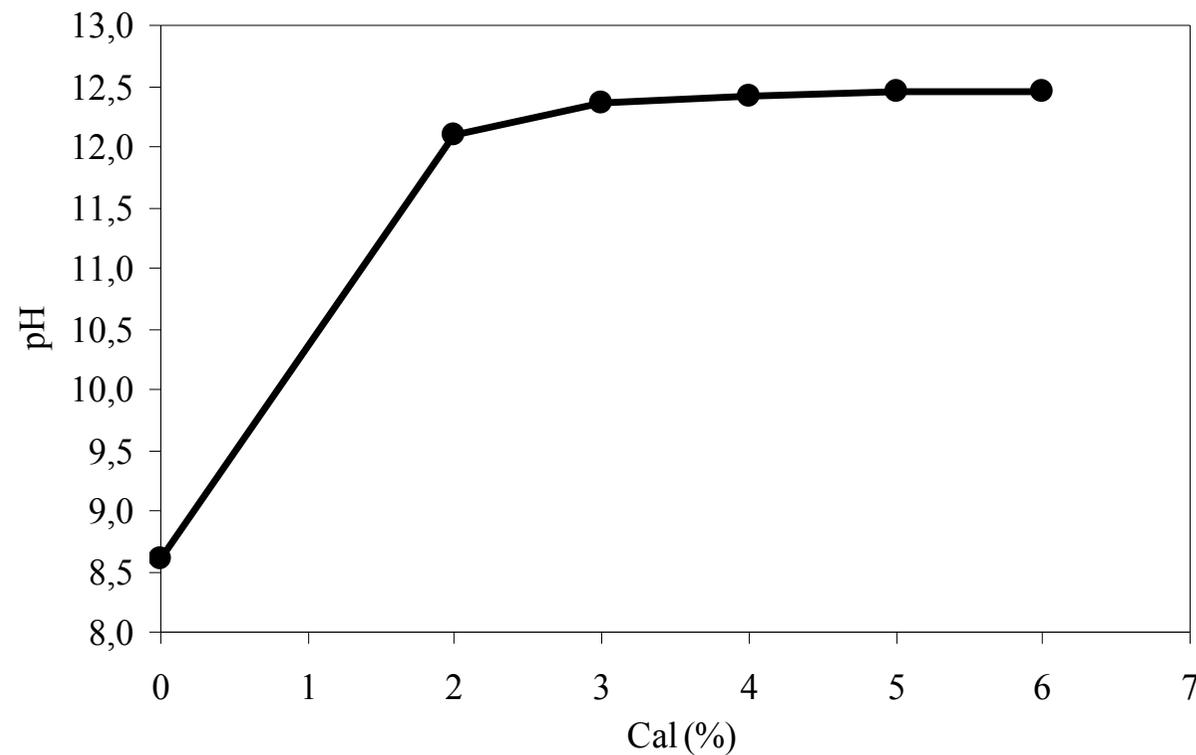
- Colocar en recipiente 20 g de suelo seco pasante en #40
  - Mezclar suelo con diferentes contenidos de cal
    - Adicionar 100 ml de agua destilada
    - Agitar mezclas por 30 seg cada 10 minutos
- Después de 1 h determinar el pH de cada mezcla

## Métodos de Dosificación

### Método del pH

Suelo de Cebollatí (CL) (Behak, 2011)

Cal (%)	pH
0	8,60
2	12,10
3	12,35
<b>4</b>	<b>12,41</b>
5	12,45
6	12,45



## Métodos de Dosificación

### Método de Thompson (1966)

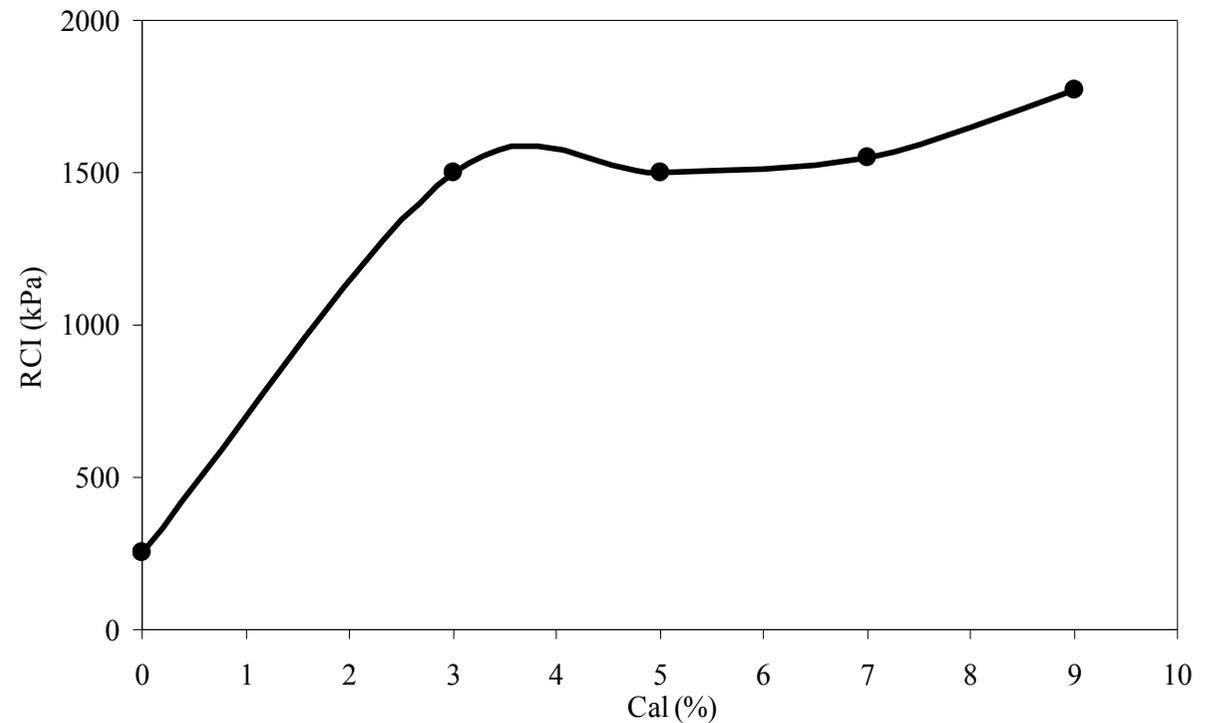
Suelo es reactivo cuando tiene aumento de RCI de por lo menos 345 kPa cuando es tratado con cal

- Moldear probetas de suelo tratado con diferentes contenidos de cal
- Curar probetas durante 48h a temperatura de 48,9°C o durante 28 días en cámara húmeda a temperatura de 22,8°C
- Ensayar probetas a compresión inconfiada

## Métodos de Dosificación

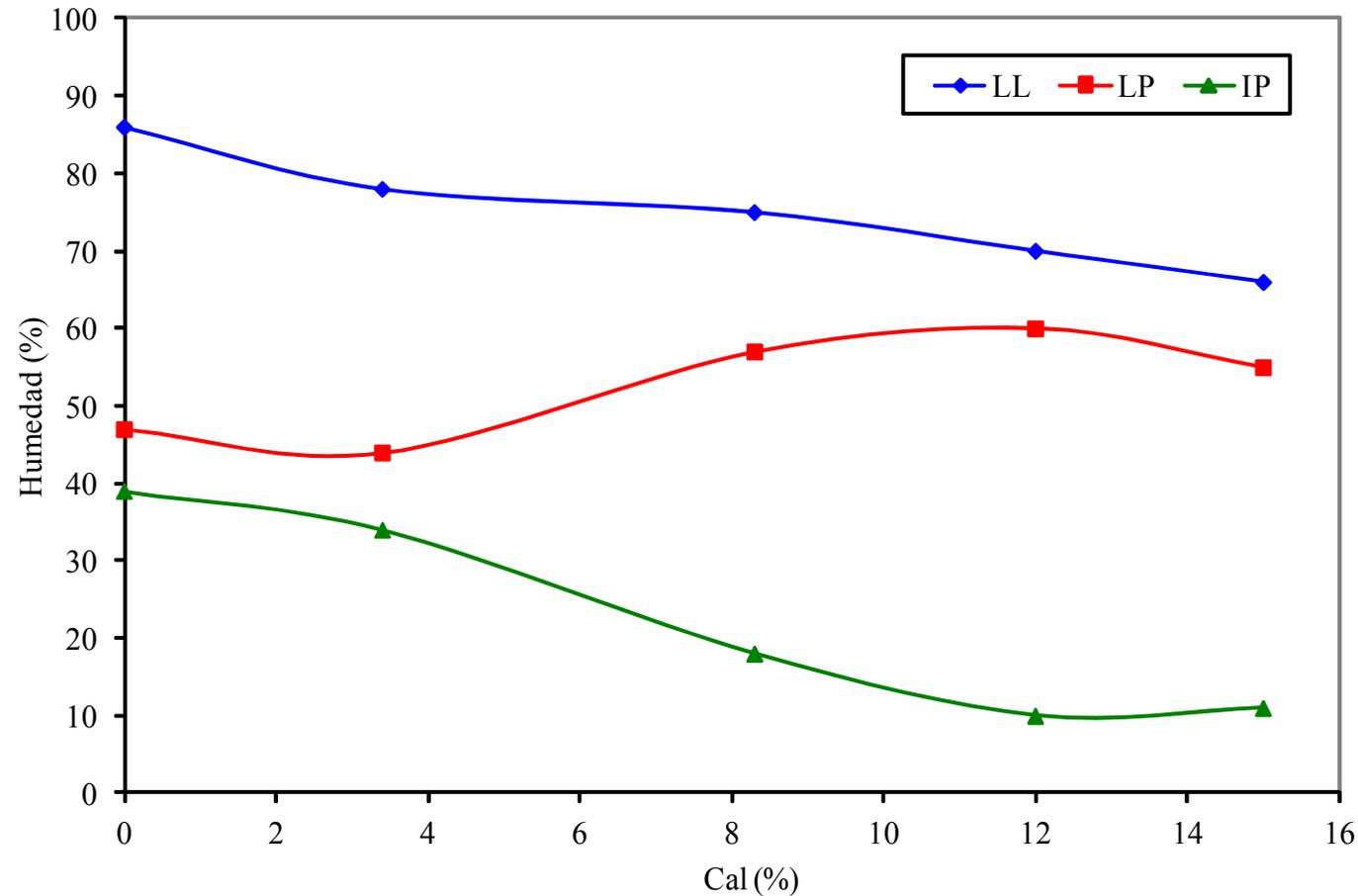
### Método de Thompson (1966) Suelo de Cebollatí (CL) (Behak, 2011)

Cal (%)	RCI (kPa)
0	252,2
<b>3</b>	<b>1497,2</b>
5	1499,5
7	1546,6
9	1771,5



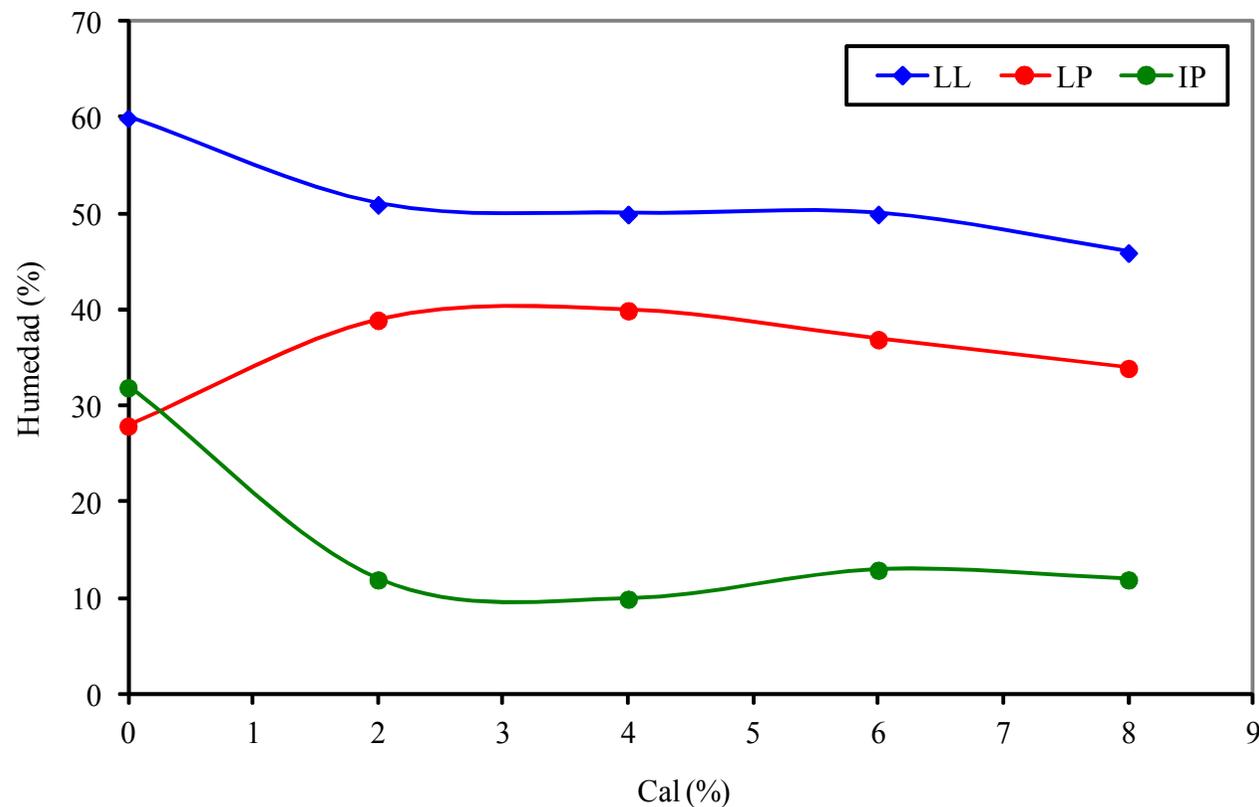
## Efectos de la Estabilización con Cal en la Plasticidad

Núñez (1991)



## Efectos de la Estabilización con Cal en la Plasticidad

Suelo CH  
(Akawwi & Al-Kharabsheh, 2005)



## Efectos de la Estabilización con Cal en la Plasticidad

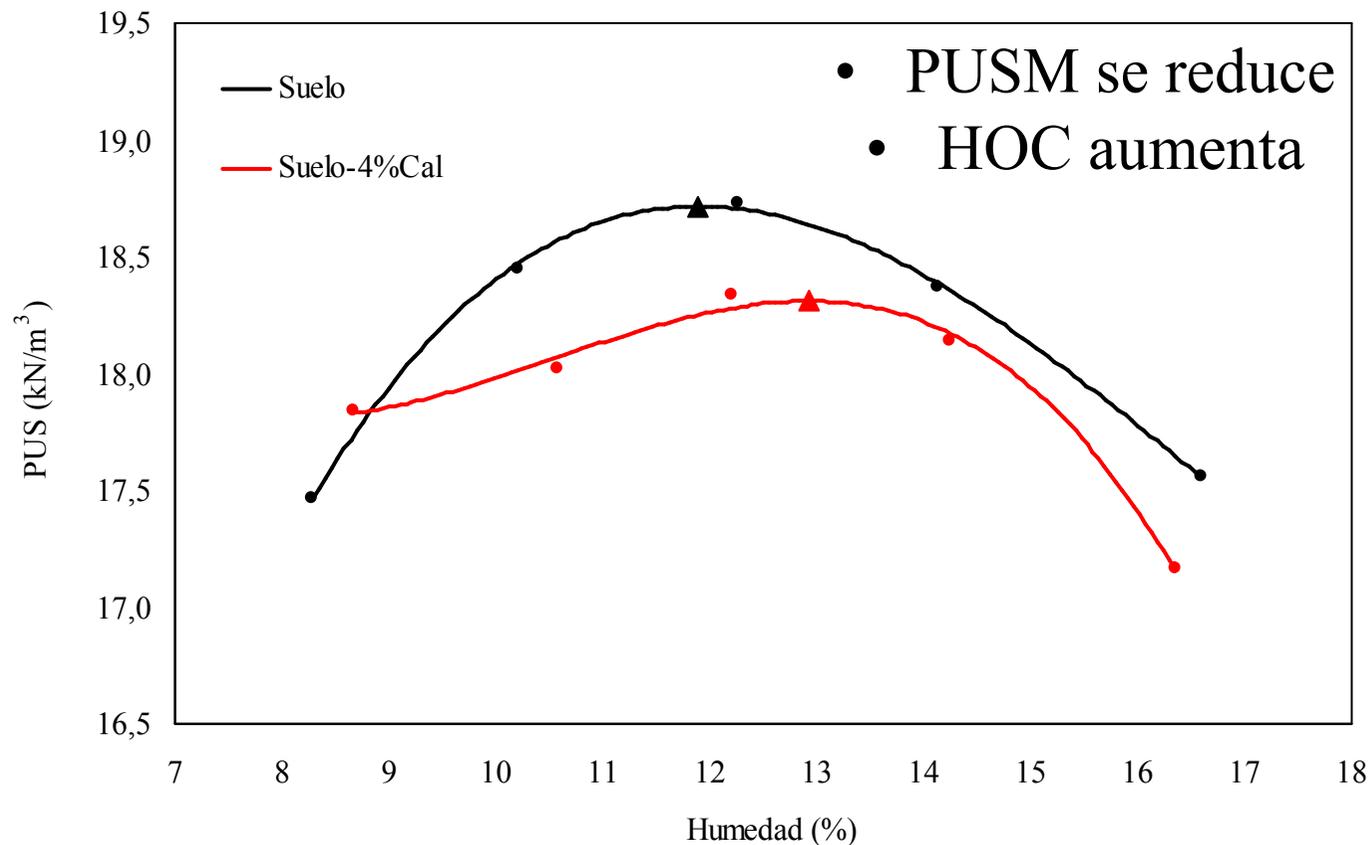
- LL aumenta en algunos casos (Herrin & Mitchell, 1961)
- LL disminuye en arcillas muy plásticas y aumenta en arcillas poco plásticas (Núñez, 1991)

- Aumento acentuados de LP en suelos con montmorillonita, y poco afectado en los que contienen caolinita (Hilt & Davidson, 1969)

- Tiempos de cura de mezclas suelo-cal no tienen efecto en modificaciones de propiedades plásticas (Basma & Tuncer, 1991)

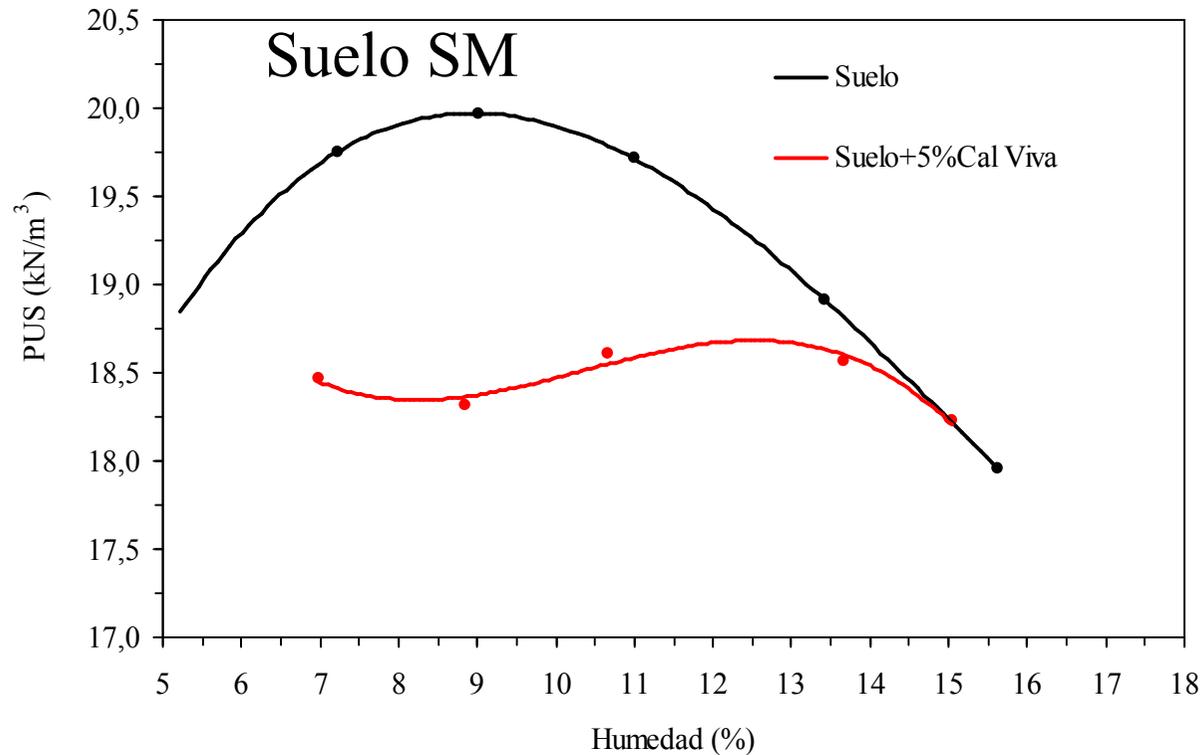
## Efectos de la Estabilización con Cal en la Compactación

### Suelo Cebollatí (CH) (Behak, 2013)



- $G_s \text{ cal} \ll G_s \text{ suelo}$
- Parte de agua se consume en hidratación de cal

## Efectos de la Estabilización con Cal en la Compactación



### Floculación (Sivapullaiah *et al.*, 1998)

- Aumenta vacíos
- Más resistencia a compactación
- Más agua para llenar vacíos

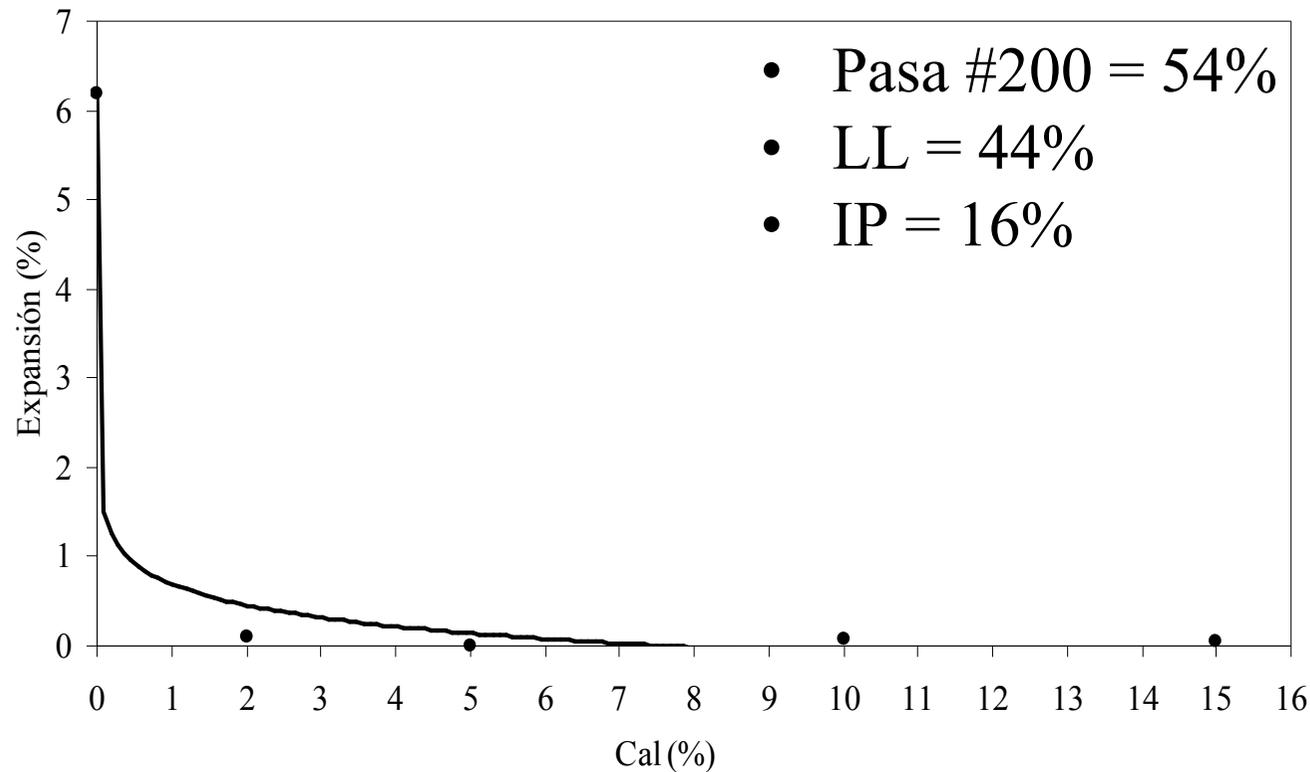
Efectos de la Estabilización con Cal en la Compactación

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

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

## Efectos de la Estabilización con Cal en Estabilidad Volumétrica

Descompuesto Fm Arapey, Yucutujá  
Suelo ML (7 días)

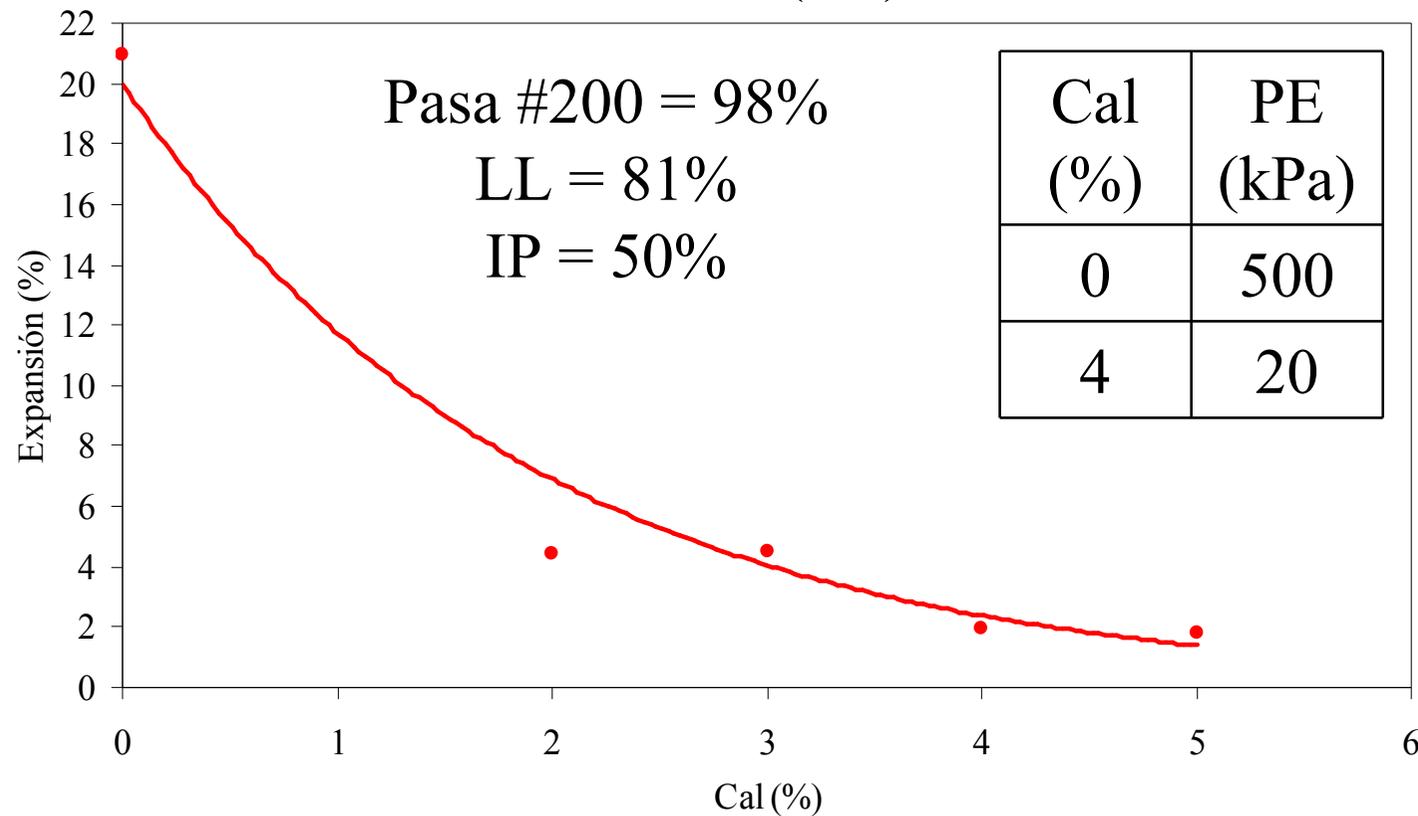


# Efectos de la Estabilización con Cal en Estabilidad

## Volumétrica

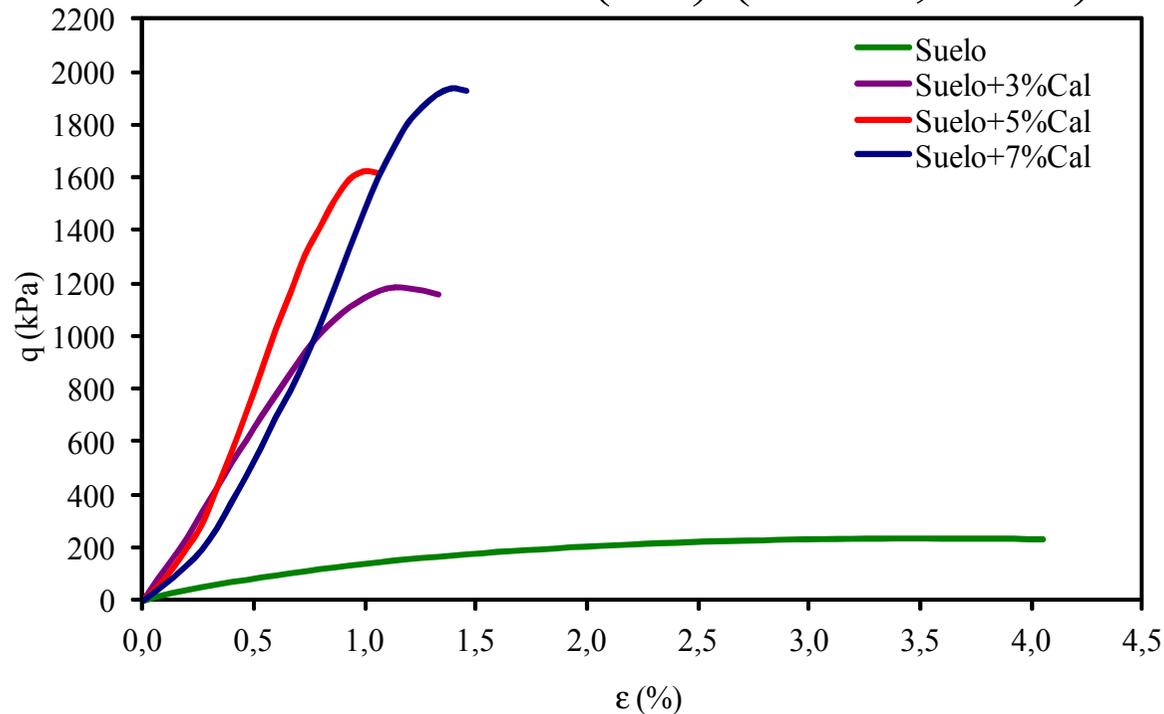
Ruta 1, km 60

Suelo CH (2 h)



Efectos de la Estabilización con Cal en Comportamiento Tensión-Deformación

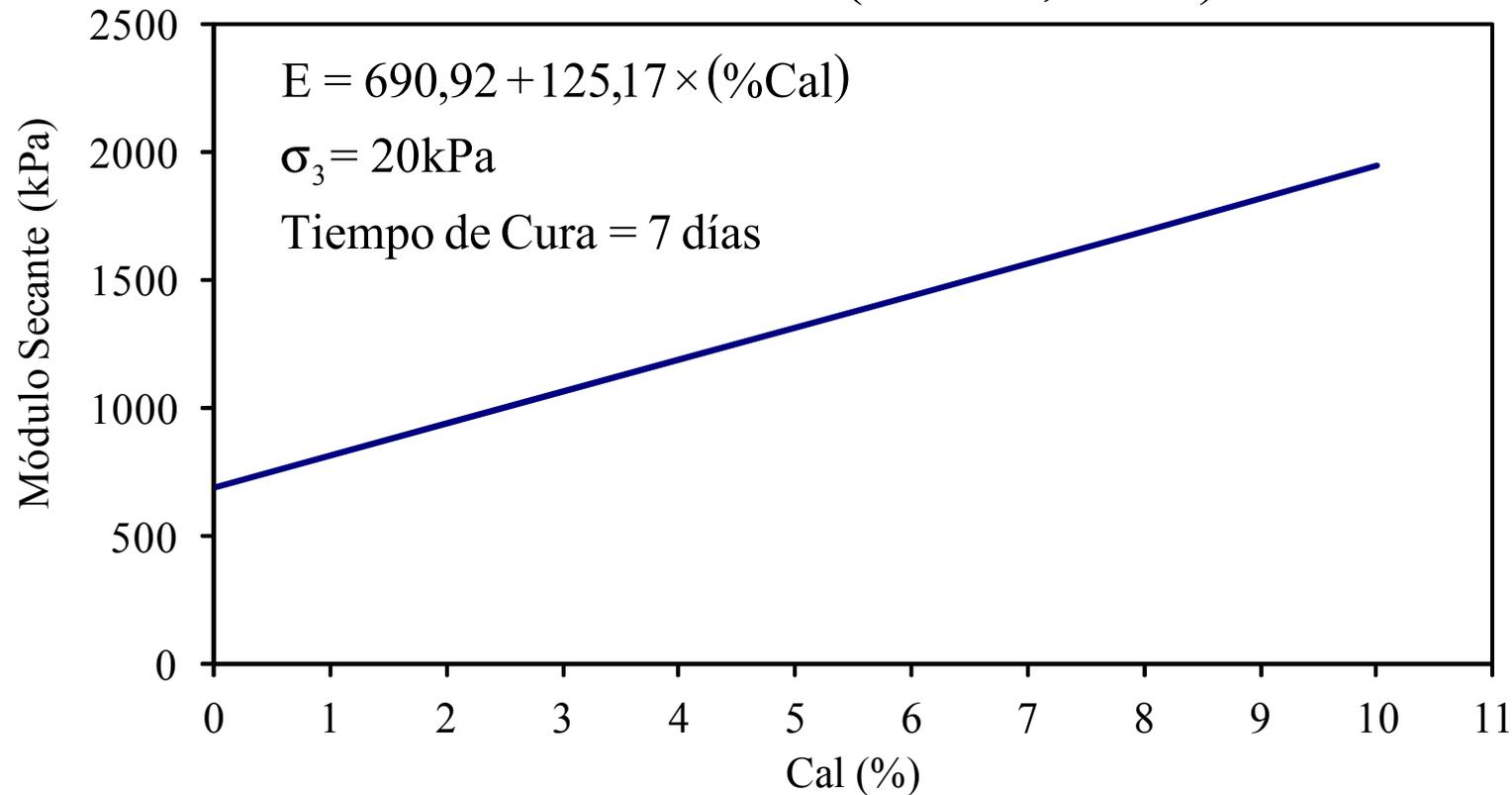
Suelo de Cebollatí (CL) (Behak, 2013)



- Falla dúctil  $\Rightarrow$  Falla frágil
  - Aumenta tensión de falla
  - Disminuye deformación axial
- } Aumenta rigidez

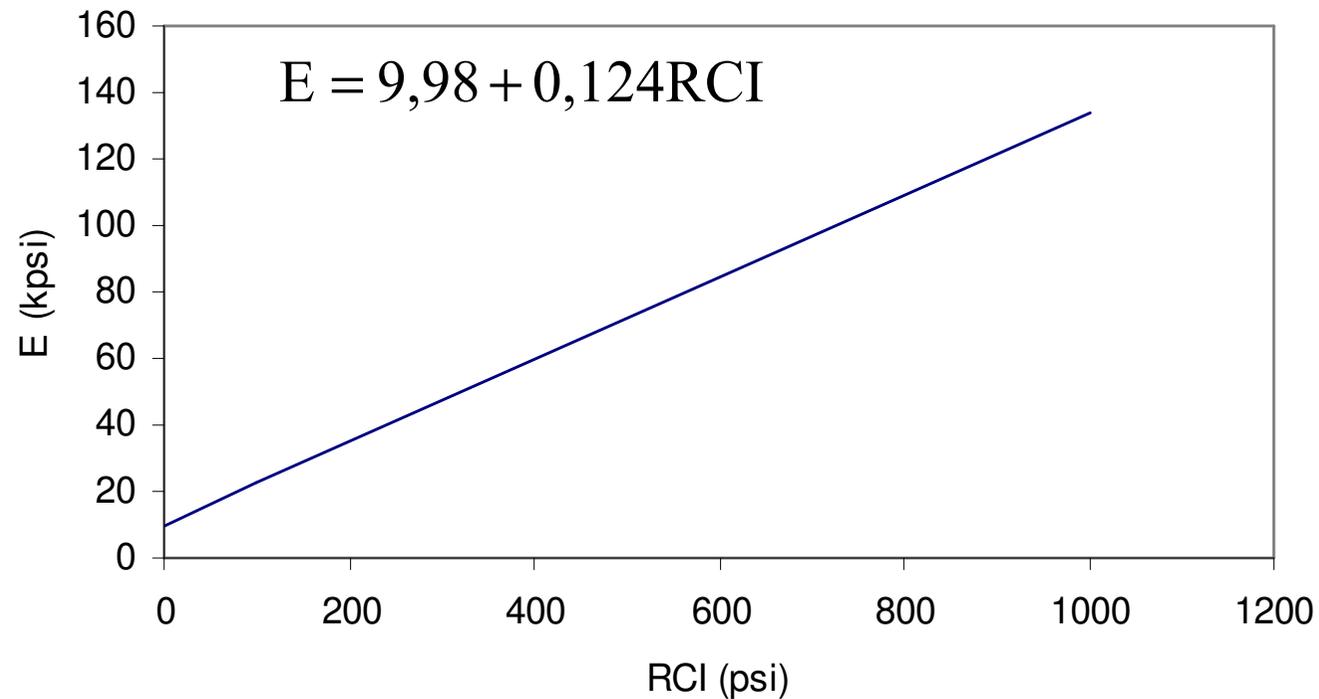
## Efectos de la Estabilización con Cal en Comportamiento Tensión-Deformación

Arcilla de Canoas (Thomé, 1994)

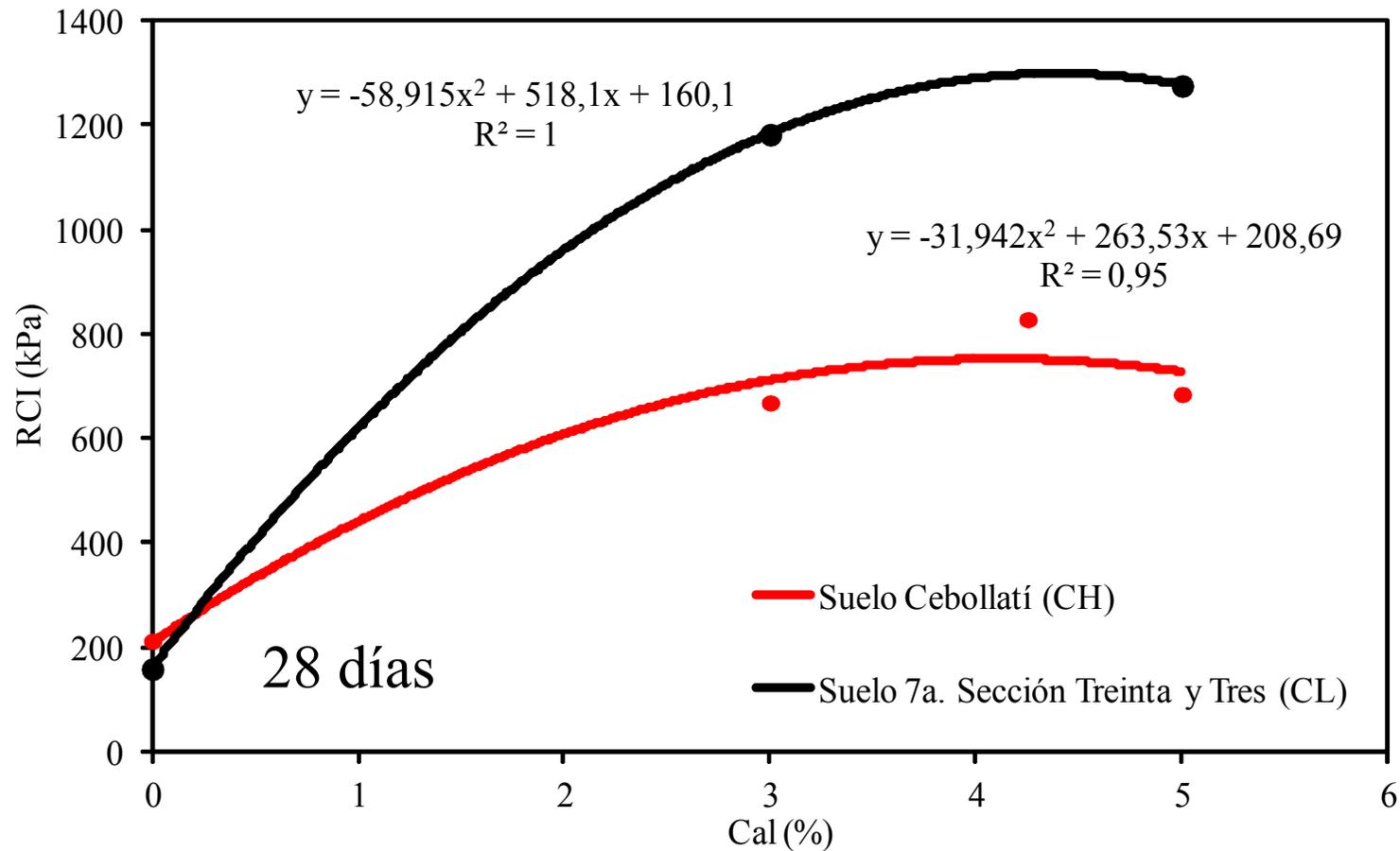


## Efectos de la Estabilización con Cal en Comportamiento Tensión-Deformación

Suelos de Illinois (Thompson, 1966)

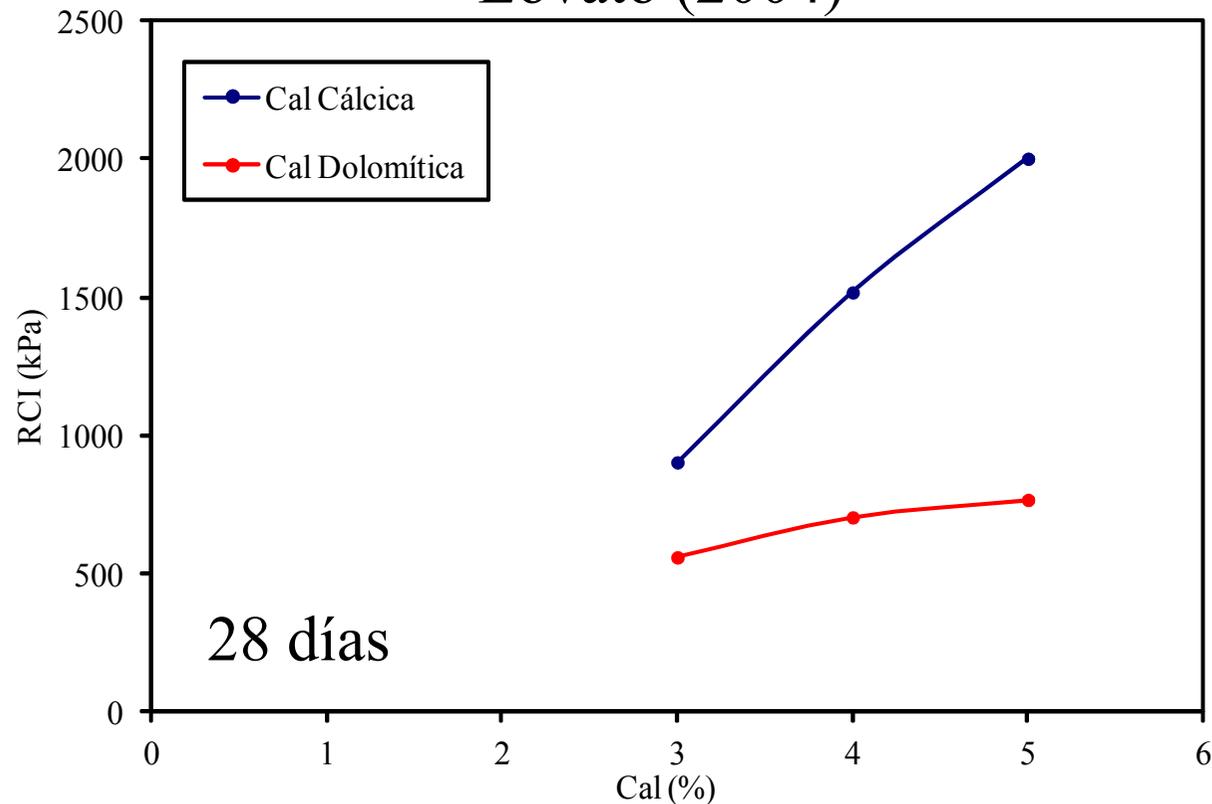


## Efectos del Contenido de Cal en Resistencia a la Compresión Inconfinada (RCI)



## Efectos del Tipo de Cal en RCI

Lovato (2004)

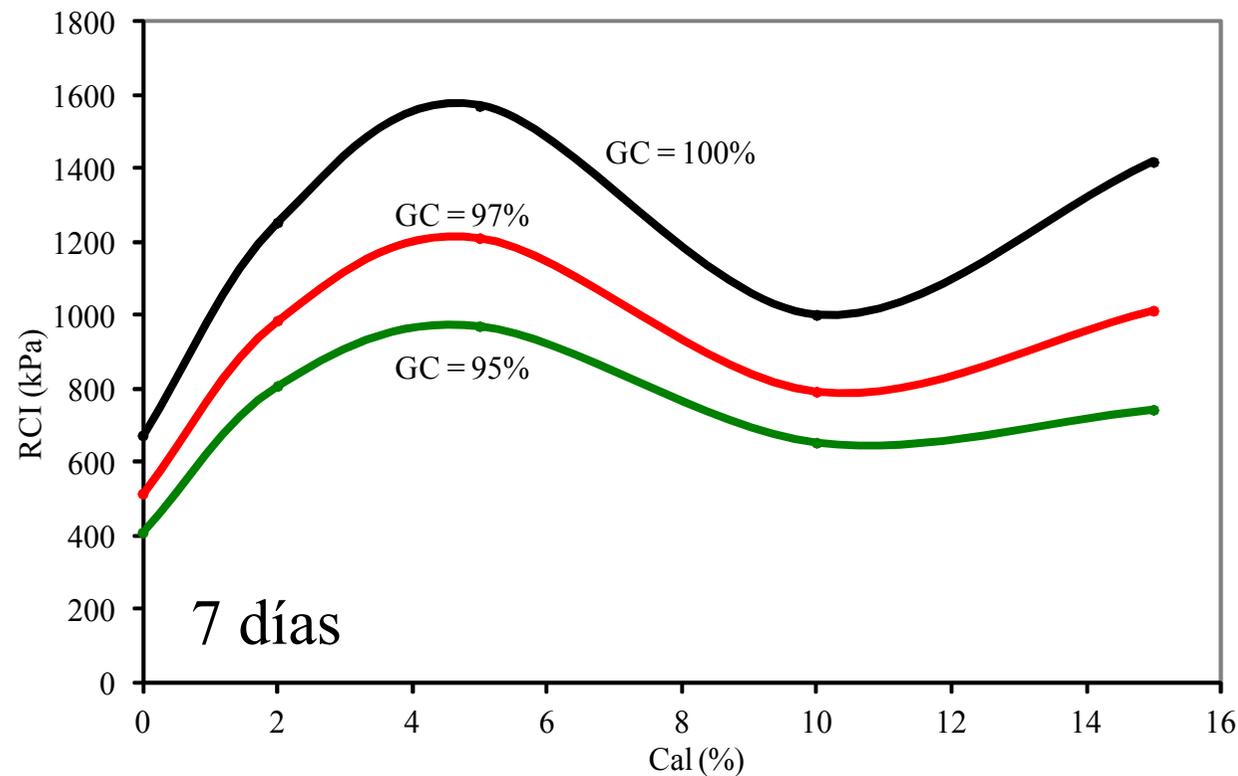


Ormsby y Kinter (1973)

- Caolinita: Cal cálcica da mejores resultados
- Montmorillonita: Cal dolomítica da mejores resultados

## Efectos de Energía de Compactación en RCI

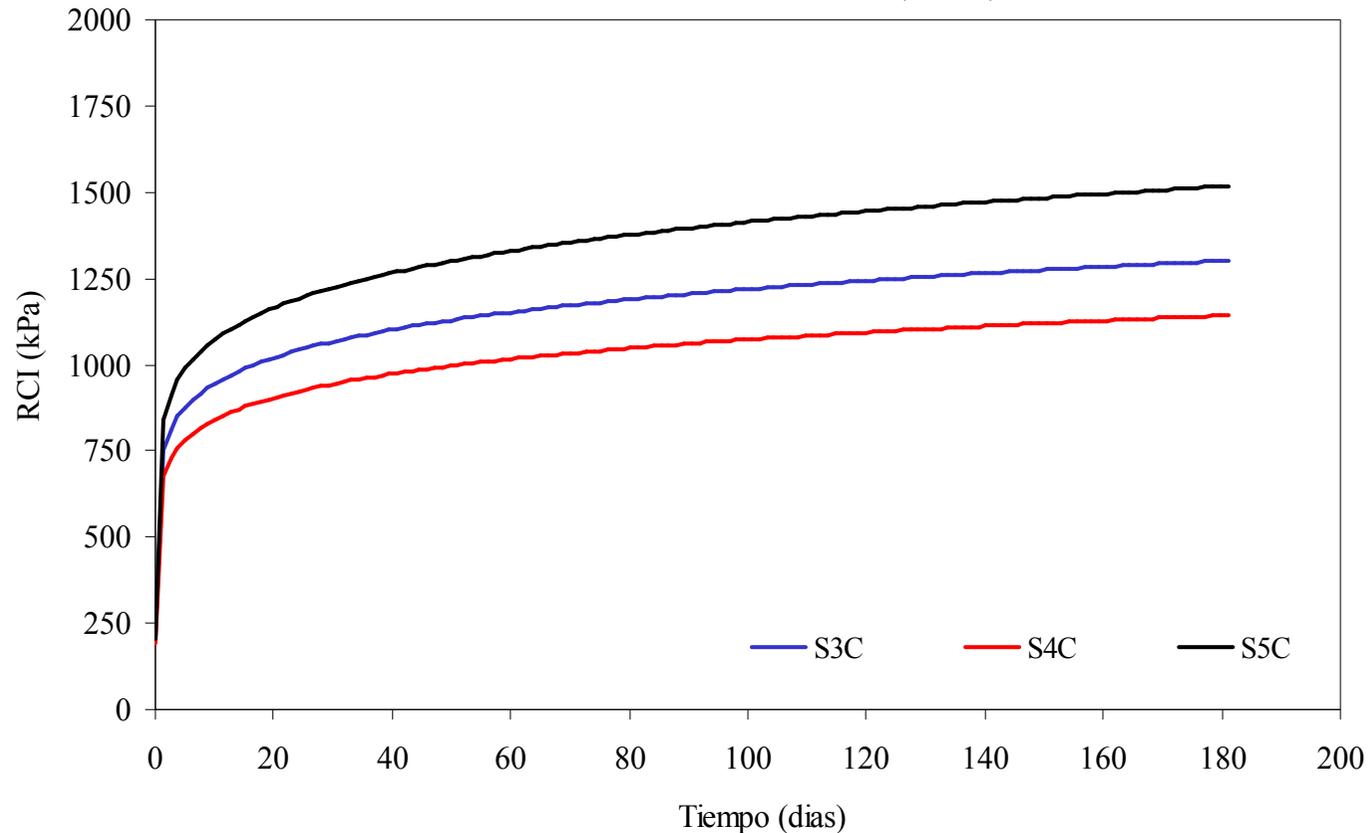
Desagregado Fm Arapey, Cantera Yucutujá



Aumento de RCI es mayor de lado húmedo de curva de compactación que de lado seco (Puppala et al., 1996)

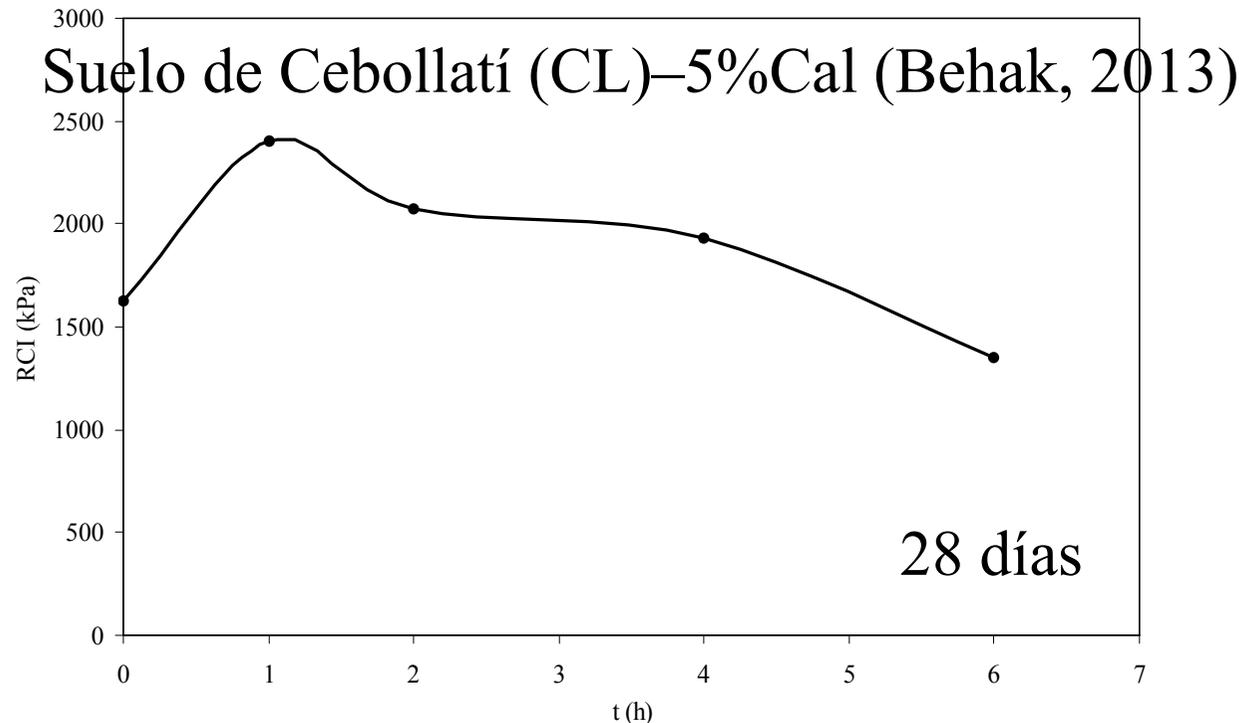
## Efectos del Tiempo en RCI

### Suelo de Cebollatí (CL)



Temperatura acelera o retarda evolución de RCI (Bhattacharja *et al.*, 2003)

## Efectos de Retardo de Compactación en RCI

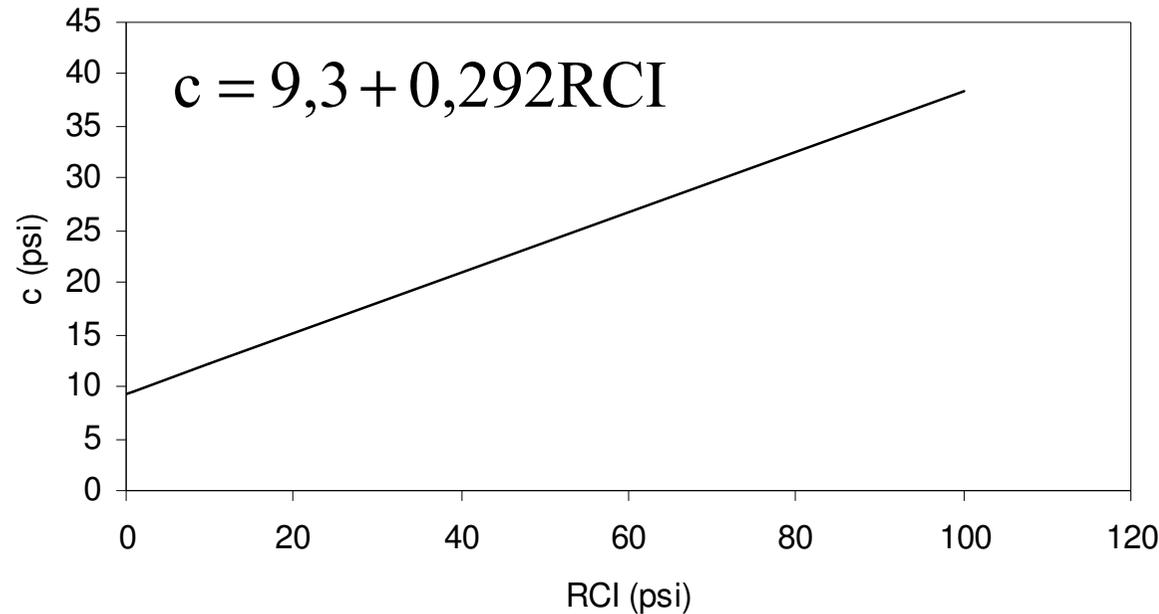


Osinubi (1998)

- PUSM tiende a disminuir con tiempo mezcla-compactación por formación de productos puzolánicos
  - Ruptura de agregaciones para compactación satisfactoria
    - Carbonatación de cal

## Efectos de Estabilización con Cal en Resistencia al Corte

Suelos de Illinois (Thompson, 1966)



Arcilla de Canoas  
(Thomé, 1994)

	c (kPa)	$\phi$ (°)
Suelo Arcilloso	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  $\phi$

## Efectos de Estabilización con Cal en Resistencia a la Tracción (RT)

Resistencia a la Tracción por Compresión Diametral (ASTM D6931)

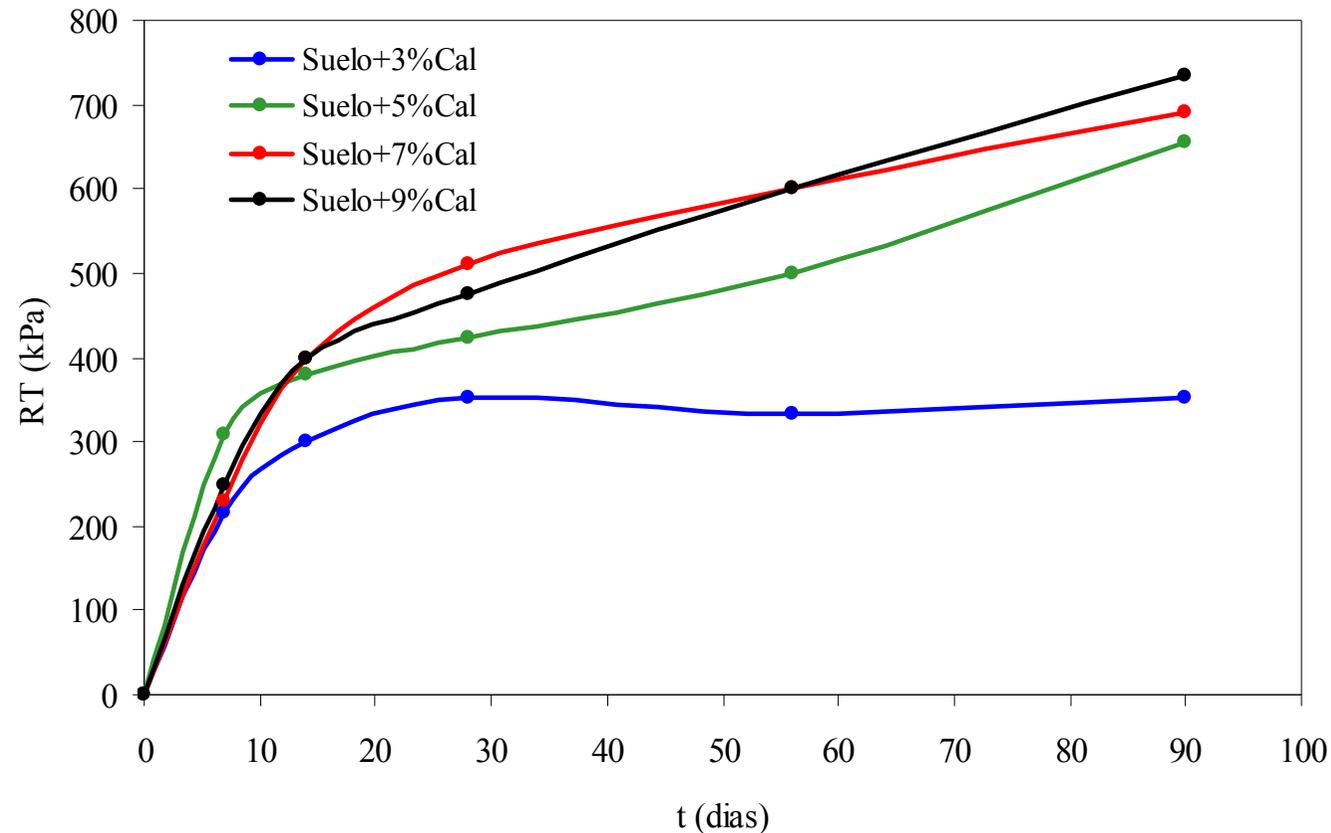


Resistencia a la Tracción por Flexión de Viguetas (3 o 4 Puntos)



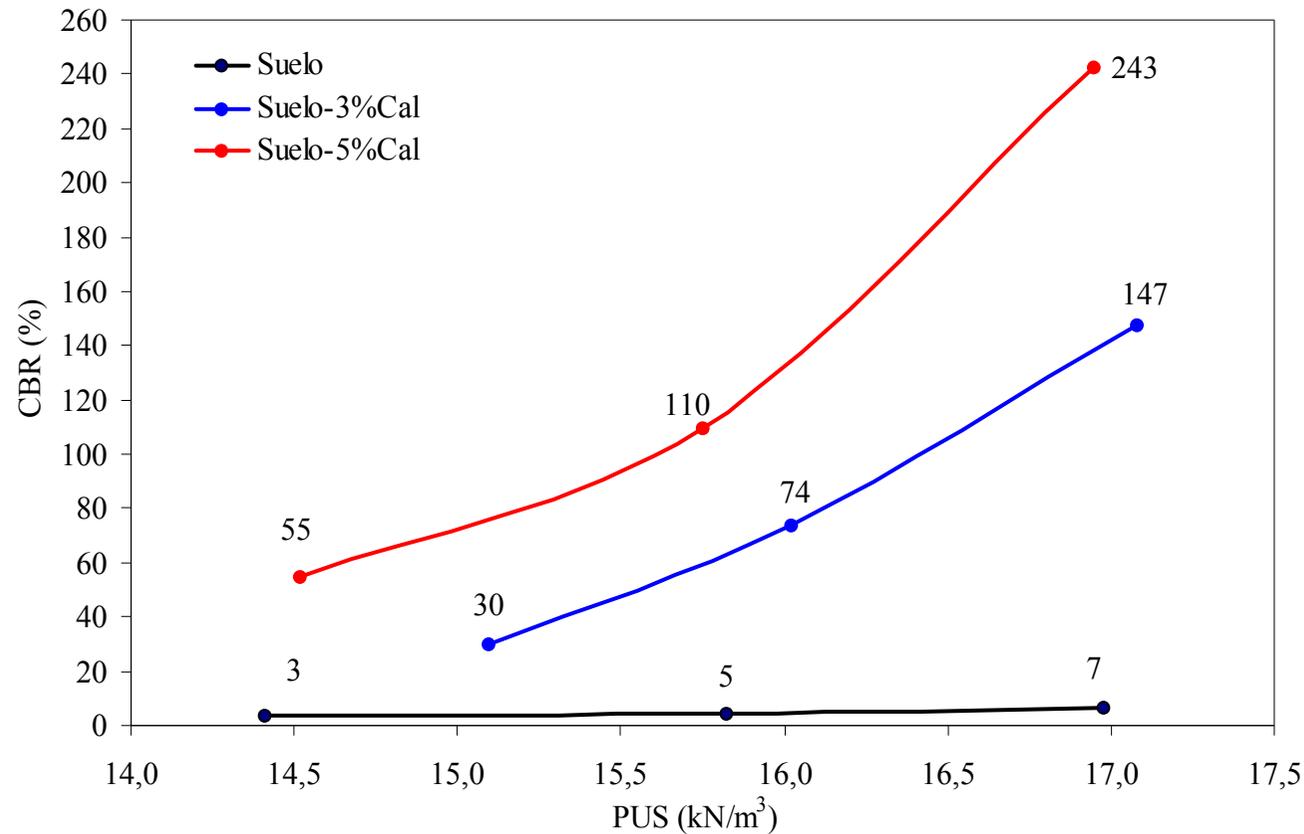
## Efectos del Contenido de Cal y Tiempo en RT

### Suelo CL de Cebollatí



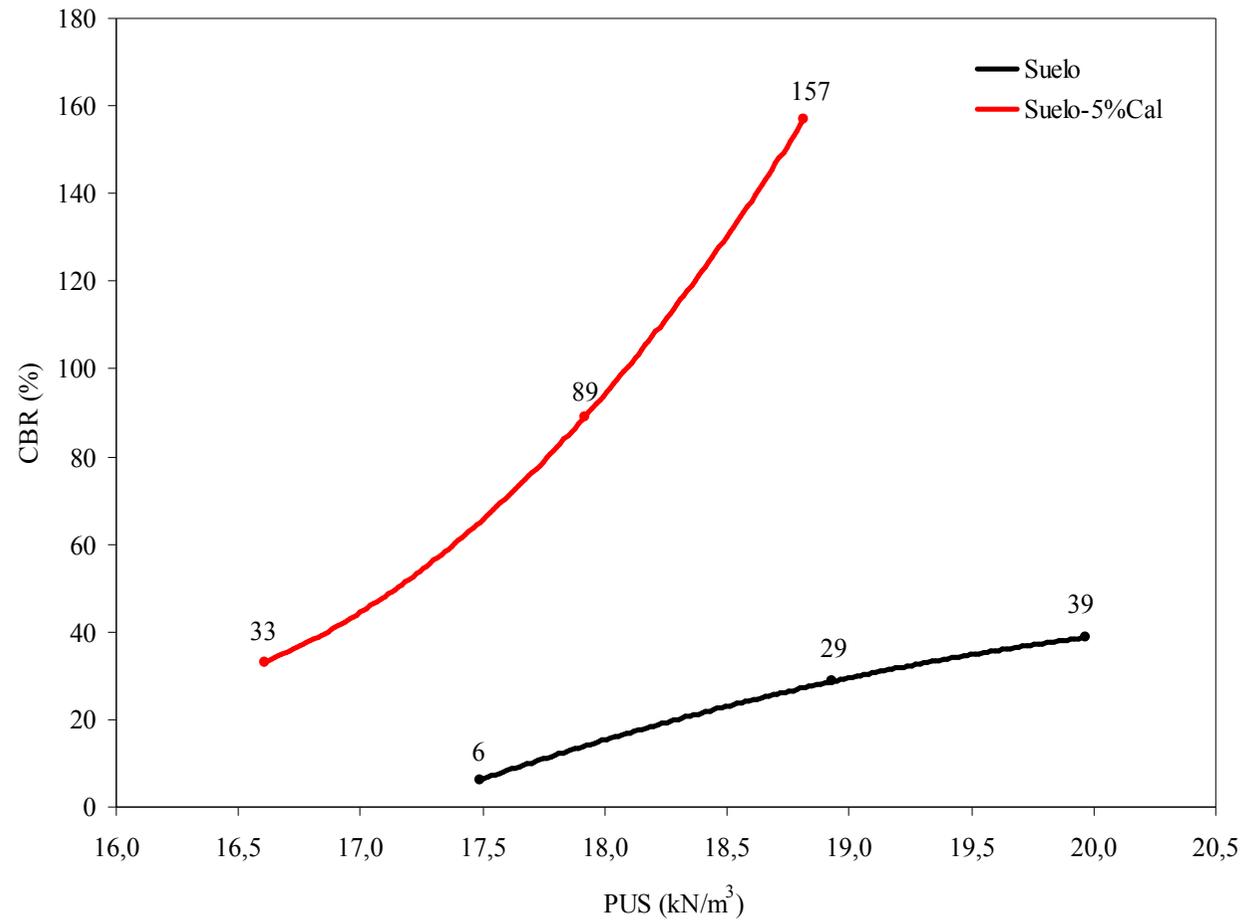
## Efectos de Estabilización con Cal en CBR

Suelo de Cebollatí (CL)  
(Behak, 2011)



## Efectos de Estabilización con Cal en CBR

### Suelo SM



## Efectos de Estabilización con Cal en Durabilidad

### Humedecimiento y Secado

#### Método de Iowa (Hoover et al., 1958)

Cociente de Resistencias  $Q_r = \frac{\sigma_r \text{ con ciclos}}{\sigma_r \text{ sin ciclos}} \quad t = 28 \text{ días}$

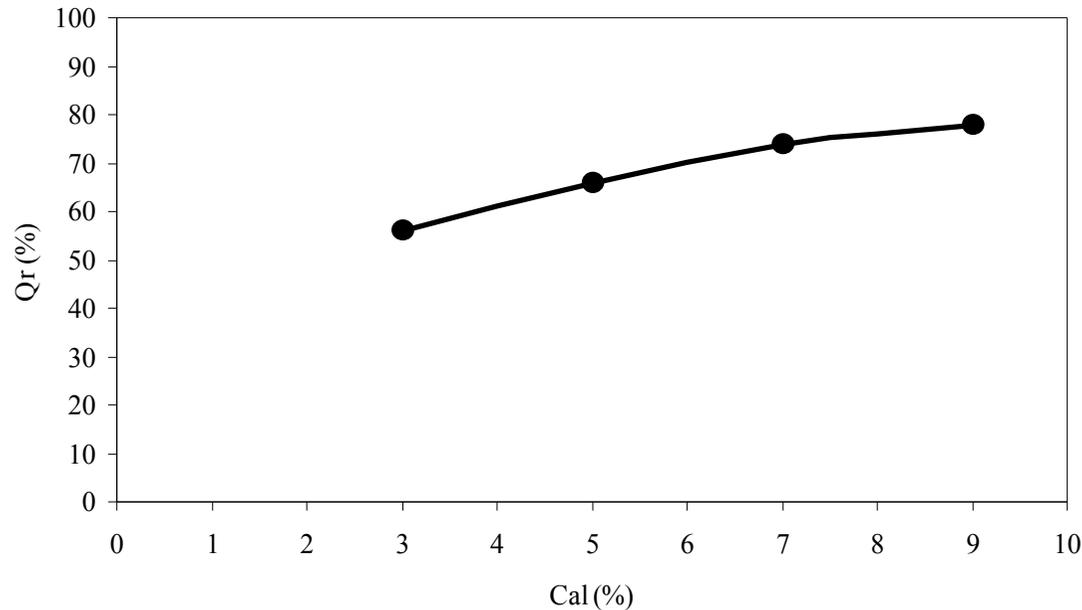
$\sigma_r \text{ con ciclos}$ : RCI de probetas sometidas a ciclos de humedecimiento y secado (12 ciclos de 24hs cada ciclo)

$\sigma_r \text{ sin ciclos}$ : RCI de probetas no sometidas a ciclos

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

## Efectos de Estabilización con Cal en Durabilidad

### Suelo de Cebollatí (CL)



	$\sigma_r$ sin ciclos (kPa)	$\sigma_r$ con ciclos (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