

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Suelo-Cemento



FACULTAD DE
INGENIERÍA

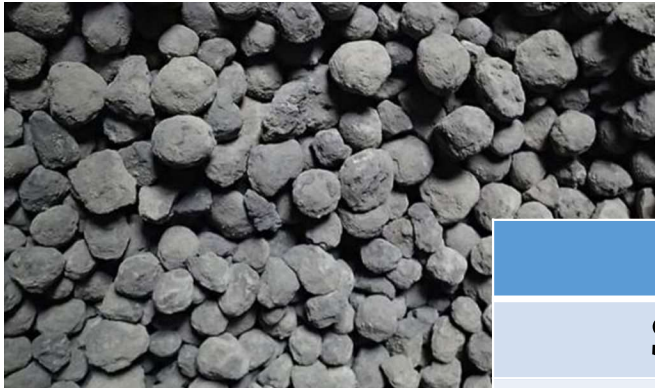


UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Dr. Ing. Leonardo Behak
Instituto de Estructuras y Transporte

EL CEMENTO PORTLAND

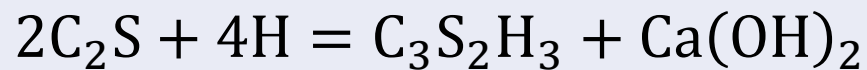
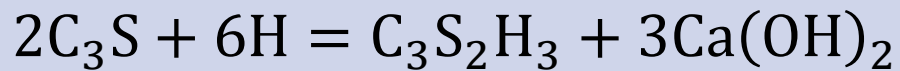
Material producido por mezcla de calizas calcinadas (calcio) y arcillas (sílice y alúmina) en hornos a 1300-1400°C



Clinker	
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S)
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S)
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)
Aluminoferrita Tetracálcica	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)

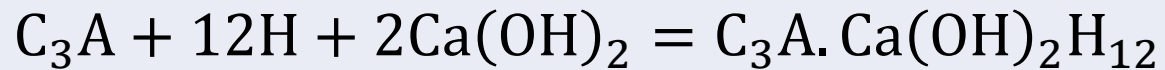
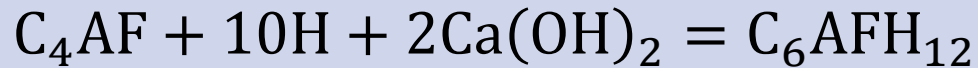
REACCIONES PRIMARIAS

Hidratación



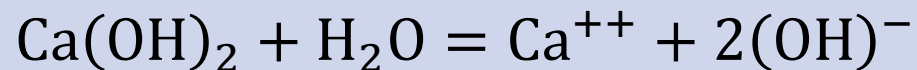
$C_3S_2H_3$: Tobermorita
 $Ca(OH)_2$: Cal Hidratada

Reacciones de la Cal con Fase Aluminato



Aluminatos de Calcio
Hidratados (CAH)

Hidratación de la Cal



REACCIONES PRIMARIAS

Efectos	
Suelos Gruesos Sin Fracción Arcilla	Cementación de granos en puntos de contacto
Suelos Gruesos de Granulometría Densa	La cementación es más efectiva
Suelos Gruesos Uniformes	Mayor consumo de cemento para alcanzar el mismo efecto

REACCIONES SECUNDARIAS

Se desarrollan entre los iones calcio (Ca^{++}) producto de la hidratación de la cal y los minerales arcillosos (SiO_2 , Al_2O_3) de la fracción fina del suelo

Reacciones Alcalinas

Reacciones Rápidas

Intercambio Catiónico

Floculación-Aglomeración

Reacciones Lentas

Puzolánicas (CSH , CAH , CASH)

Carbonatación (CaCO_3)

FACTORES QUE AFECTAN LAS REACCIONES

Materia Orgánica

Retarda las reacciones

Reduce los efectos de la estabilización (menor resistencia)

Temperatura

Mayores temperaturas aceleran las reacciones

$T < 13^{\circ}\text{C}$ inhiben las reacciones

Sulfatos

Generación de minerales expansivos

SUELOS APROPIADOS PARA ESTABILIZAR CON CEMENTO

Epps et al. (1971)	Suelos con Pasa #200 < 35% e IP < 20% Suelos A-1, A-2, A-3
Croft (1967)	Suelos muy expansivos difíciles de estabilizar
National Institute for Transport and Road Research de Sudáfrica (1986)	Las Arenas finas o de dunas exigen altos tenores de cemento (10 a 14%)

MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

Método de la Portland Cement Association (PCA)

RCI de probetas cilíndricas compactadas con diferentes contenidos de cemento a PUSM y HOC del Proctor y curadas 7 días a temperatura ambiente

Resistencia mínima admisible = 2,1 MPa

Susceptibilidad al fisuramiento: Considerar comportamiento flexible de capa de suelo-cemento (prefisuración)

MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

Austrroads Guide to Pavement Technology (2002)

Categorías de Materiales Según Comportamiento Como Capa de Pavimento

Modificado	Aquéllos con cantidad pequeña de cemento agregado para mejorar resistencia o corregir otras propiedades, sin causar aumento significativo de resistencia a la tracción. Para diseño de pavimentos son considerados como granulares no ligados (comportamiento “flexible”)
Cementado (Estabilizado)	Aquéllos con cantidad de cemento suficiente para producir significativa resistencia a la tracción y rigidez. Susceptibles de fisurar (comportamiento rígido)

Material Cementado

Ligeramente Cementado

Fuertemente Cementado

MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

Austrroads Guide to Pavement Technology (2002)

RCI de probetas compactadas a PUSM y HOC del Proctor con 28 días en condiciones húmedas sin inmersión en agua

Categoría	Criterio
Modificado	$RCI < 1 \text{ MPa}$
Ligeramente Cementado	$1 \text{ MPa} < RCI < 2 \text{ MPa}$
Fuertemente Cementado	$RCI^* > 2 \text{ MPa}$

* Algunas agencias sumergen en agua

Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI)

$< 80 \text{ kPa}$	$> 80 \text{ kPa}$
Modificado	Estabilizado

MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

Durabilidad

Durabilidad por pérdida de peso por cepillado de probetas curadas 7 días y sometidas a 12 ciclos de humedecimiento y secado o congelamiento y deshielo

Ensayo

Humedecimiento y Secado

ASTM D559

Congelamiento y Deshielo

ASTM D560

EFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

Compactación

Kezdi (1979)

PUSM y HOC no varían mucho con adición de cemento

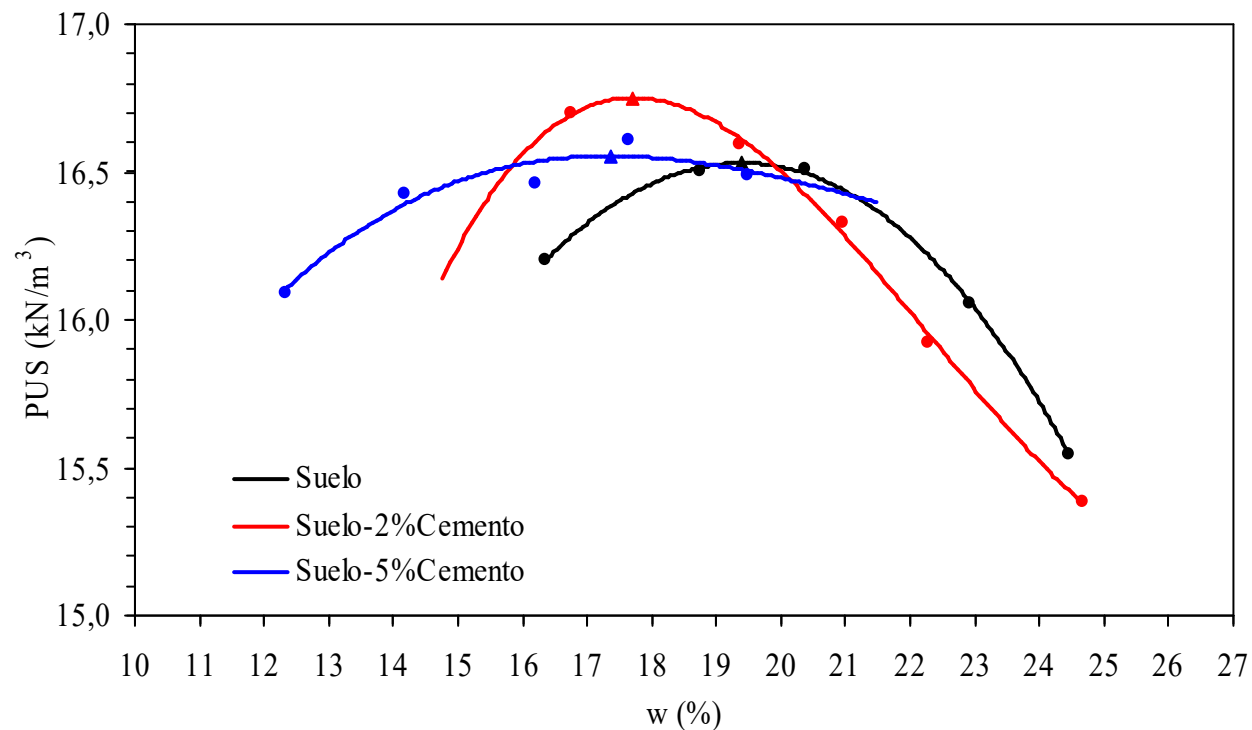
PUSM aumenta en arenas, no se modifica en arcillas medias y livianas, aumenta ligeramente en arcillas gordas y disminuye levemente en limos

Aumenta sensibilidad frente a humedad de compactación.
Pequeñas variaciones producen variación acentuada de PUS

EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

Compactación

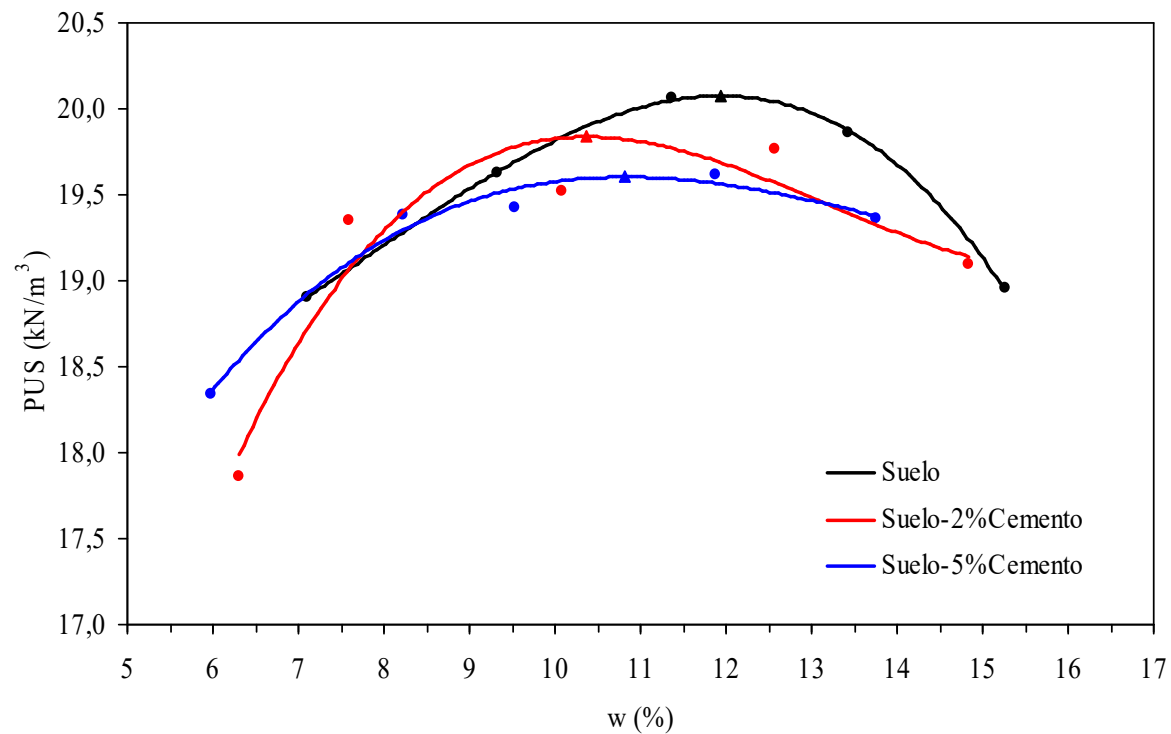
Suelo Descompuesto de Fm Arapey (ML), Ruta 30, Arroyo Yucutujá



EFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

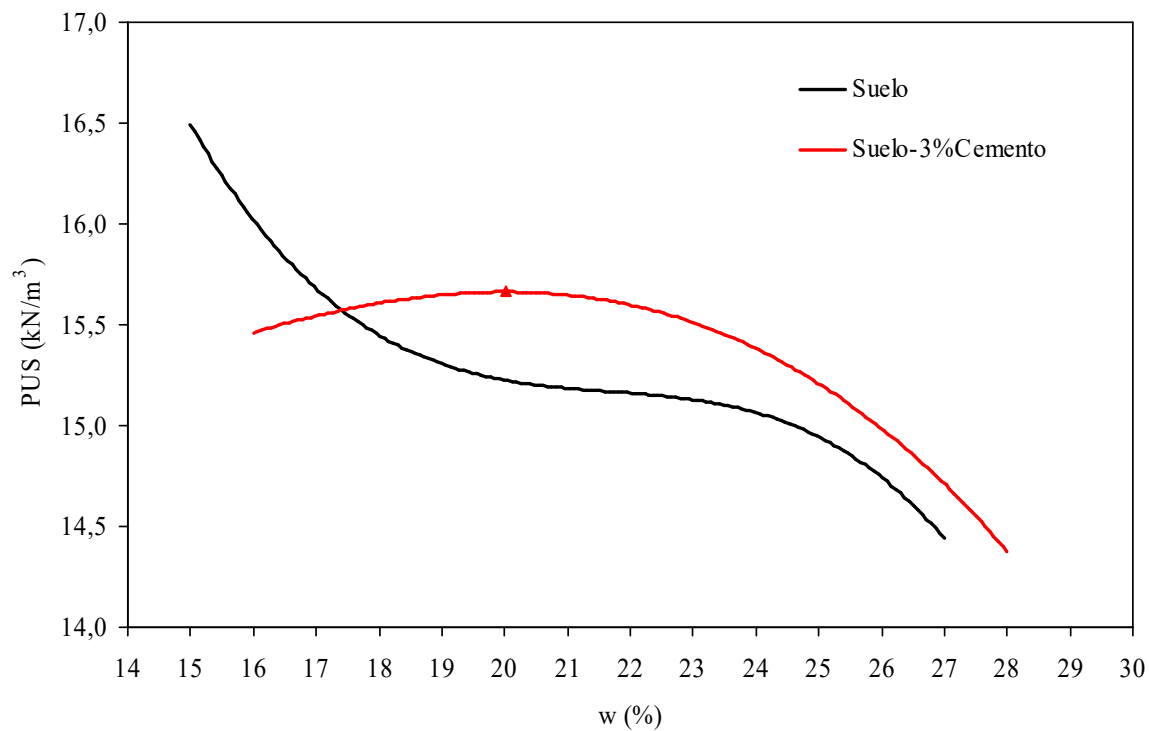
Compactación

Suelo Desagregado de Fm Arapey (GP-GM), Cantera Yucutujá



EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

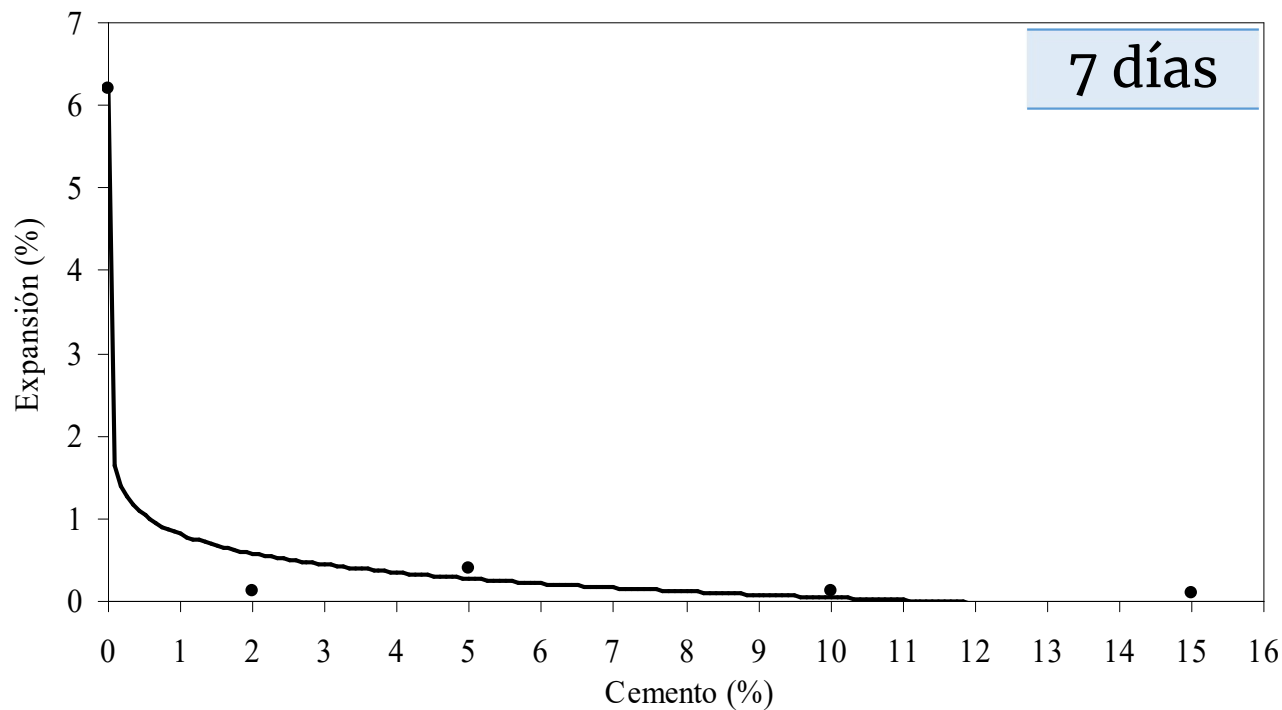
Compactación Arcilla (CH), Ruta 1, 60K000



EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

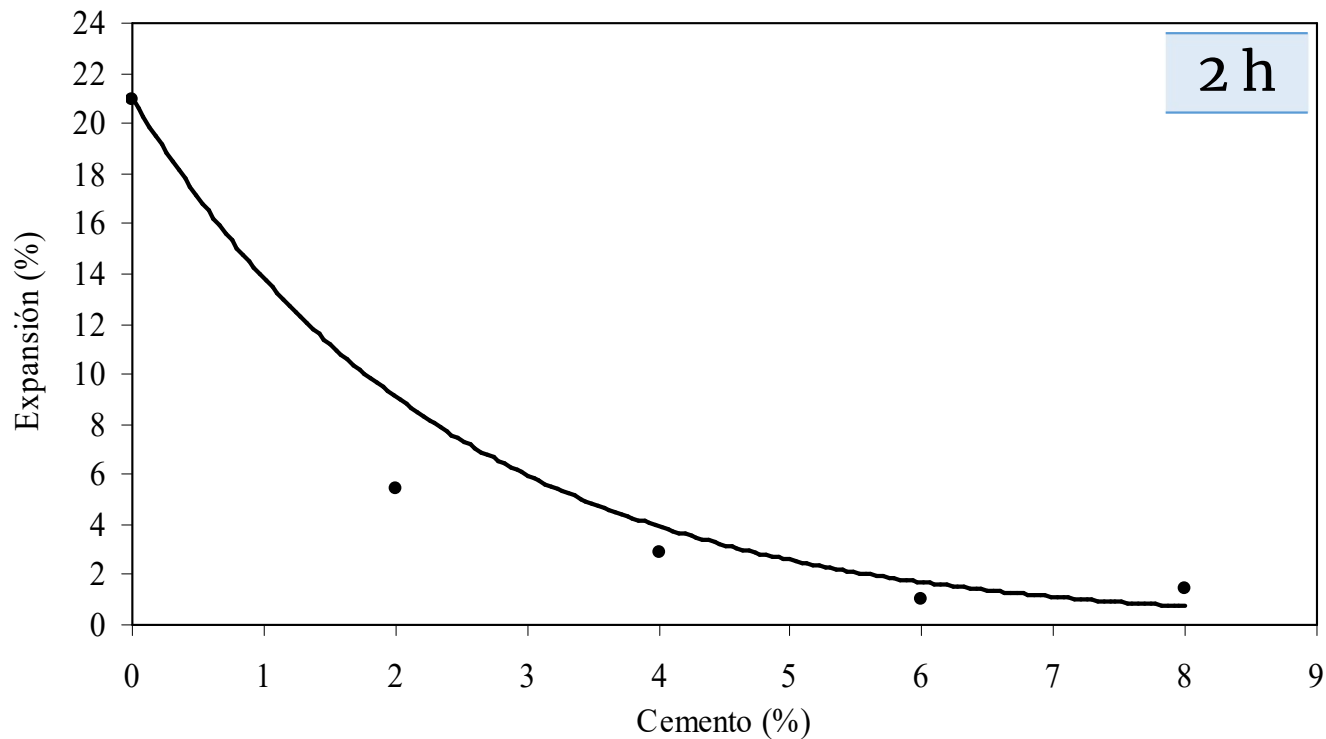
Estabilidad Volumétrica

Suelo Descompuesto de Fm Arapey (ML), Ruta 30, Arroyo Yucutujá



EFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

Estabilidad Volumétrica
Arcilla (CH), Ruta 1, 60K000

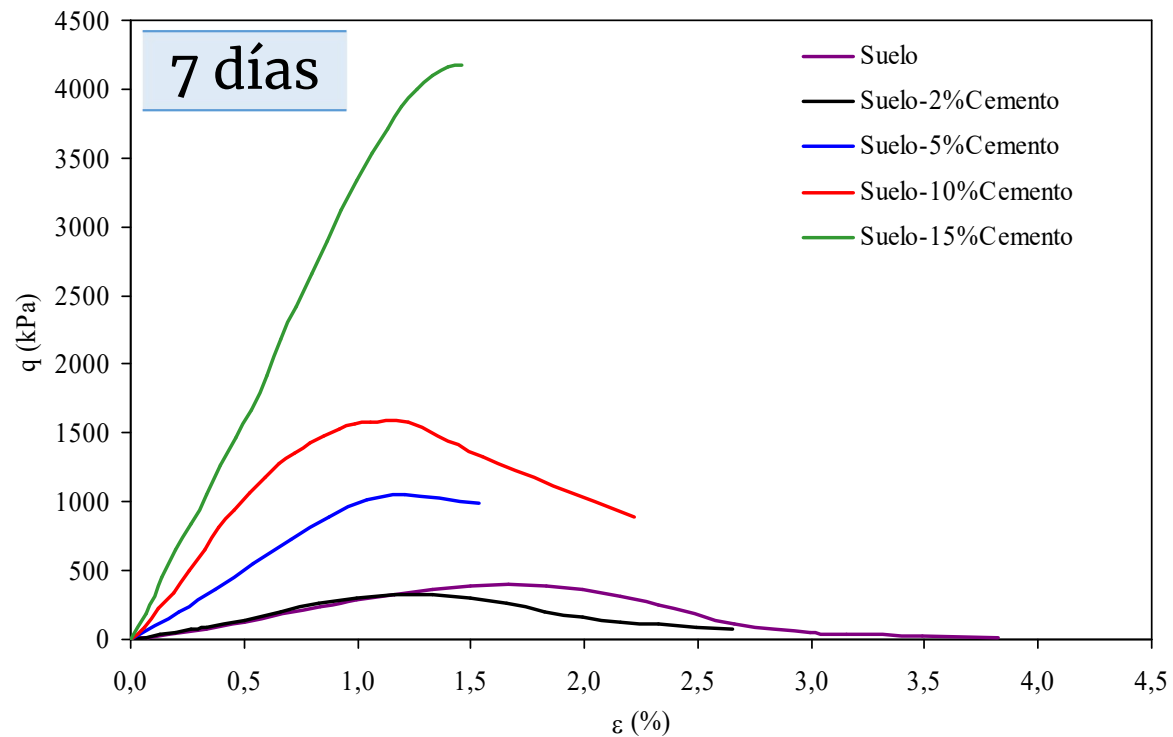


Cemento (%)	PE (kPa)
0	500
6	15

EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

Comportamiento Tensión-Deformación

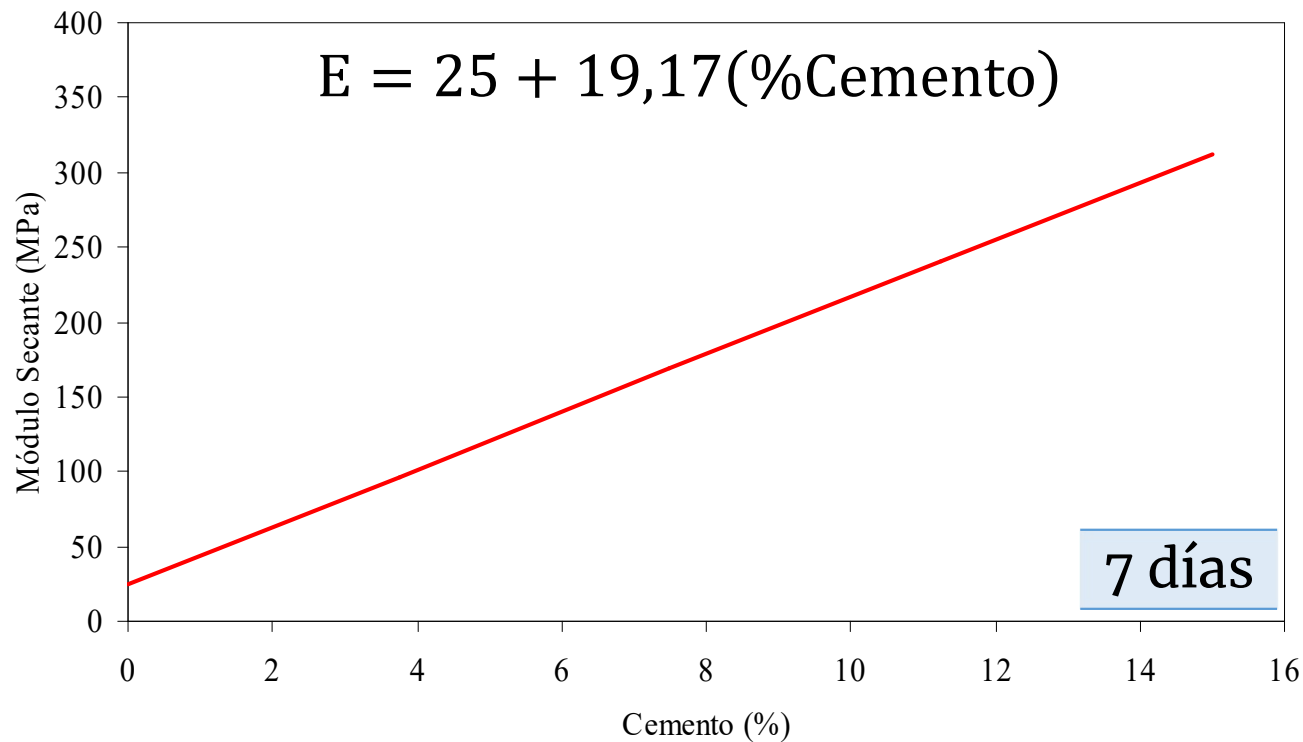
Suelo Desagregado de Fm Arapey (GP-GM), Cantera Yucutujá



EFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

Comportamiento Tensión-Deformación

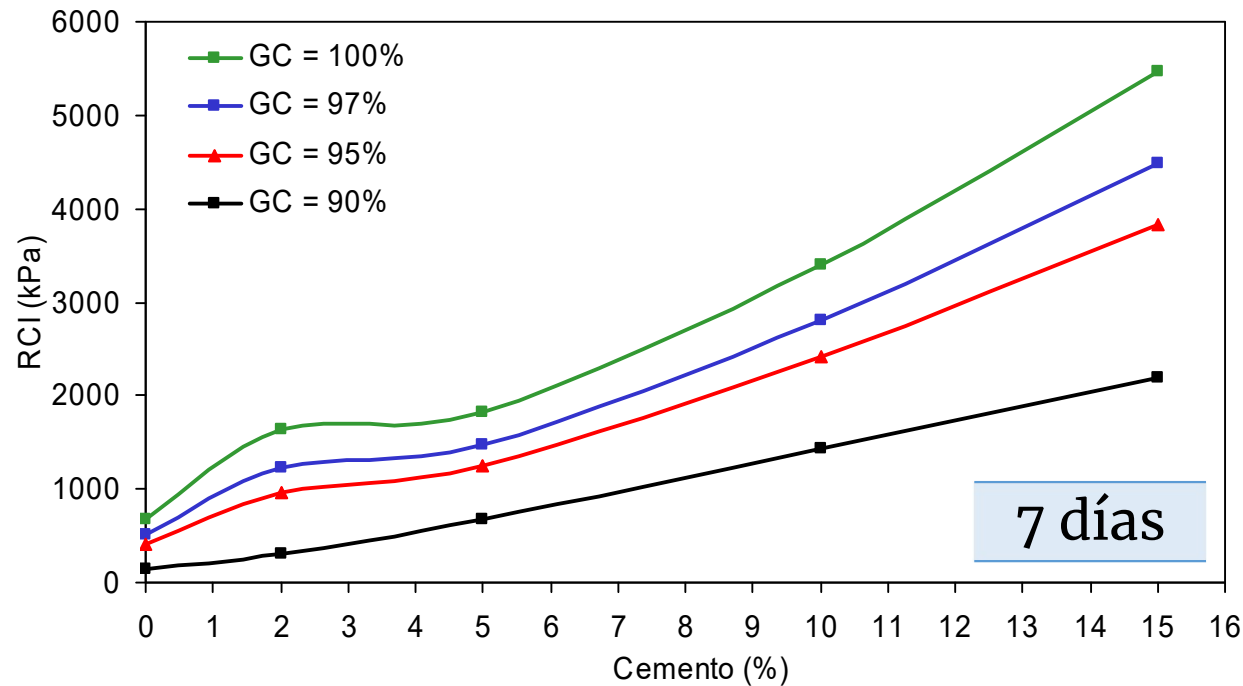
Suelo Desagregado de Fm Arapey (GP-GM), Cantera Yucutujá



EFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

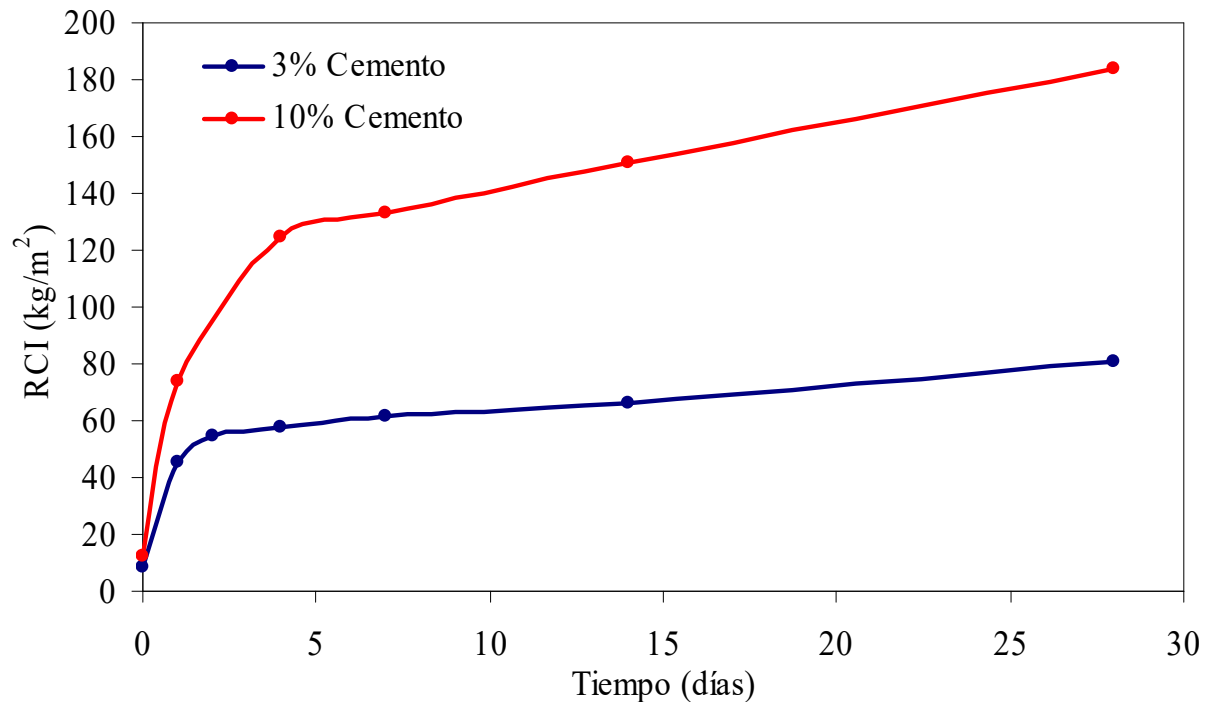
Resistencia a la Compresión Inconfinada

Efecto del Contenido de Cemento y la Energía de Compactación
Suelo Desagregado de Fm Arapey (GP-GM), Cantera Yucutujá



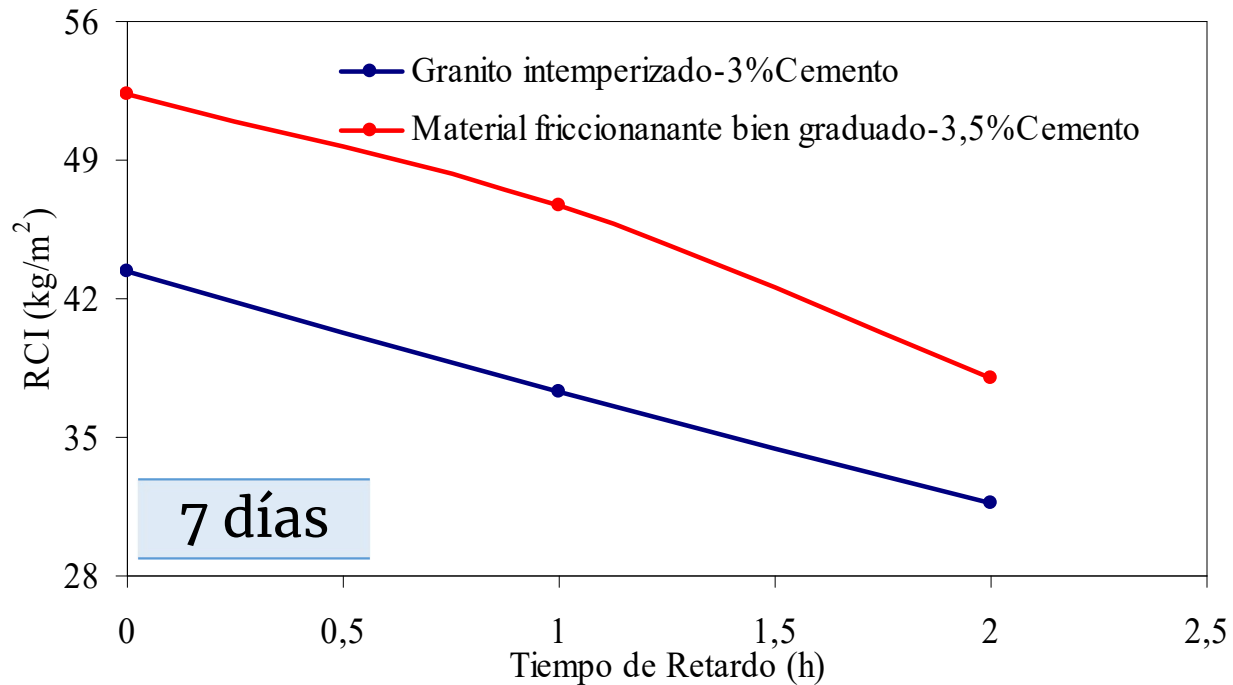
EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

Resistencia a la Compresión Inconfinada Efecto del Contenido de Cemento y el Tiempo Grava-Arena (Hveem y Zuba, 1963)



EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

Resistencia a la Compresión Inconfinada Efecto del Retardo de la Compactación Hveem y Zuba (1963)



EFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

Resistencia a la Compresión Inconfinada

Relación Módulo Secante (E)-Resistencia a la Compresión Inconfinada (RCI)

Suelo Desagregado de Fm Arapey (GP-GM), Cantera Yucutujá

