

Estabilización de Suelos Dispersivos y Suelos Sulfatados

Nilo Cesar Consoli, Ph.D.

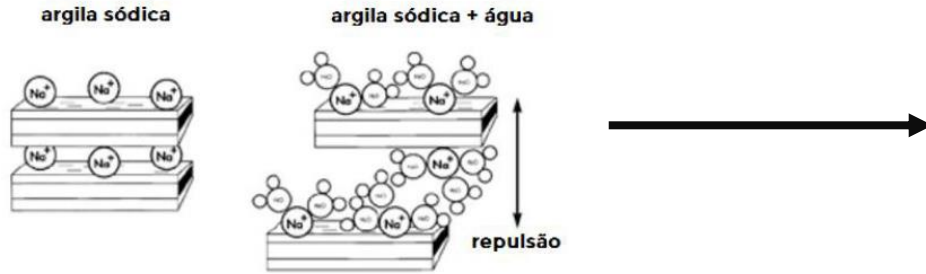
Profesor-Investigador de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul

Porto Alegre – BRASIL



Desempeño y Comportamiento Mecánico de Suelos Dispersivos Tratados con Puzolana y Cal

❖ Solo Dispersivo Paraguayo:



Na⁺ = cátion monovalente

↑ quantidade para cobrir o déficit iônico dos argilominerais

fracamente aderidos às partículas minerais

↑ espessura da dupla camada difusa (DCD)

Sistema no qual a tendência é que predominem forças de natureza repulsiva, havendo propensão para suspensão das partículas

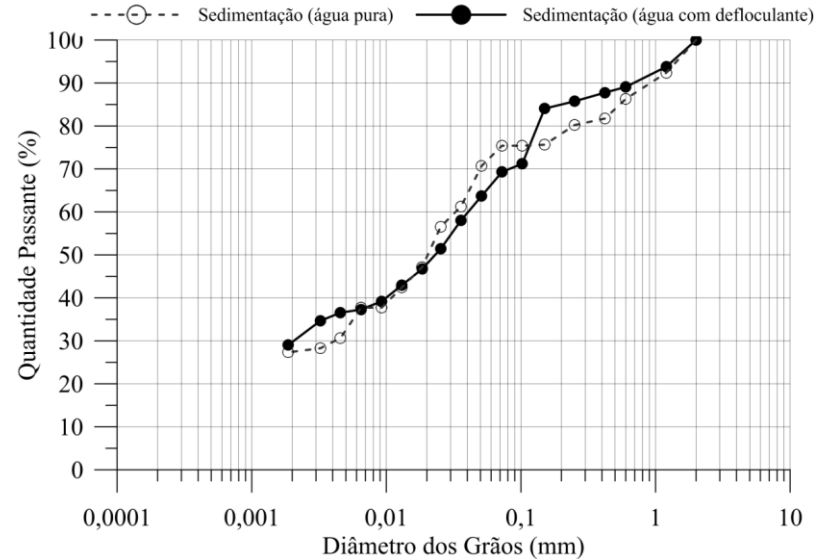


❖ Solo Dispersivo Paraguayo:

Características Físicas

Característica	Resultado	Norma
Limite de liquidez (LL)	43%	NBR 6459
Limite de plasticidade (LP)	19%	NBR 7180
Índice de plasticidade (IP)	24%	-
Peso específico real dos grãos (Gs)	2,74 g/cm ³	NBR 7181
% Passante peneira #200	91%	NBR 7181
% de Areia fina (0,06 < d < 0,2 mm)	20%	
% Silte (0,002 < d < 0,06 mm)	38%	
% Argila (d < 0,002 mm)	30%	
% Matéria orgânica	1,33%	NBR 13600
Classe USCS	CL (lean clay)	ASTM D-2487
Crumb test	Grau 4	NBR 13601
Pinhole test	ND4	NBR 14114
Porcentagem de Dispersão	88,90 %	NBR 13602

Distribuição Granulométrica

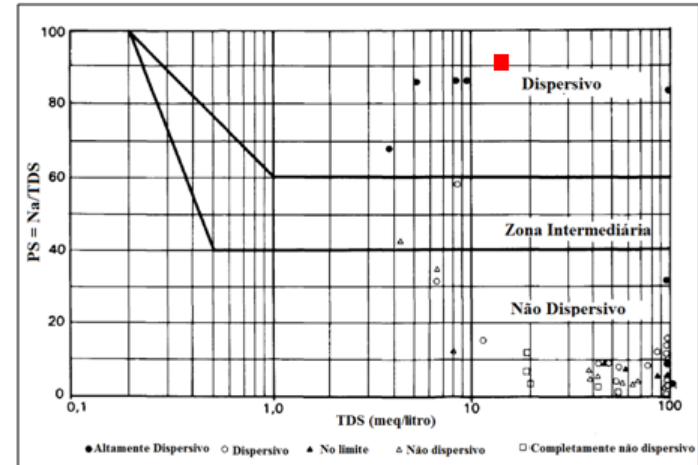


❖ Suelo Dispersivo Paraguayo:

Características químicas

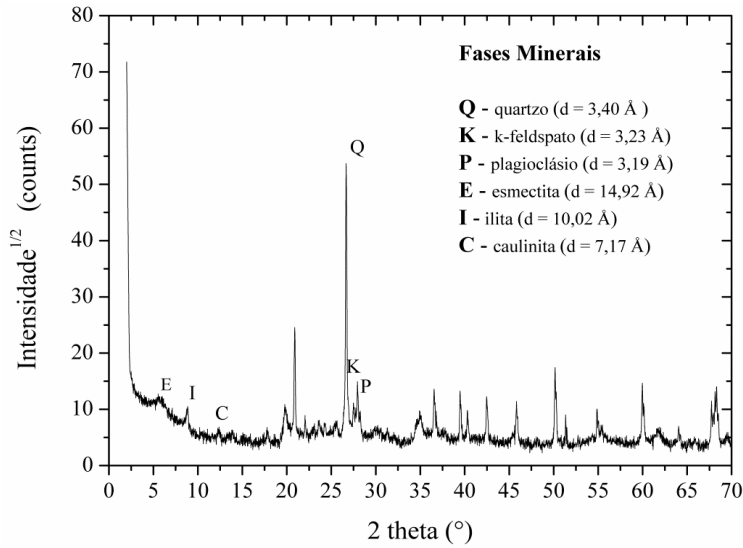
Cátion	Resultado
Sódio – Na ⁺ (cmol/kg)	13,90
Potássio – K ⁺ (cmol/kg)	0,50
Cálcio – Ca ⁺² (cmol/kg)	0,60
Magnésio – Mg ⁺² (cmol/kg)	0,20
Característica	Resultado
Total de sais dissolvidos - TSD (cmol/kg)	15,20
Porcentagem de sódio – PS (%)	91,40
Razão de absorção de sódio (RAS)	21,98
pH	8,24

Dispersibilidade

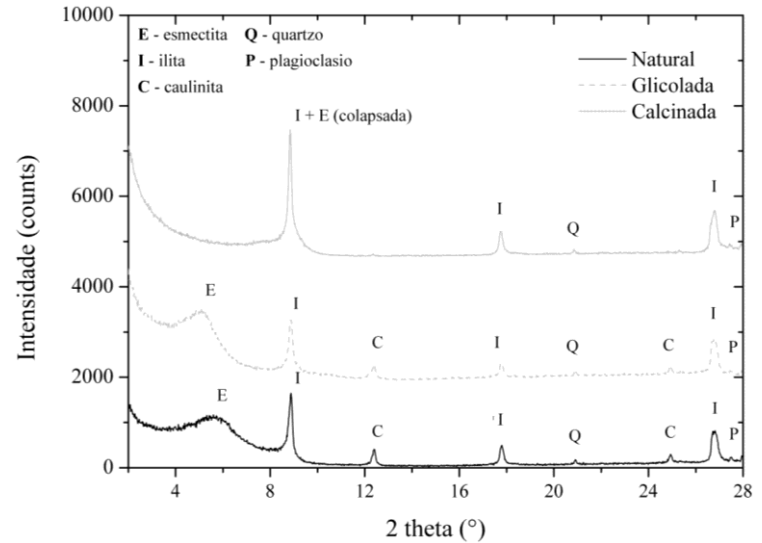


❖ Suelo Dispersivo Paraguayo:

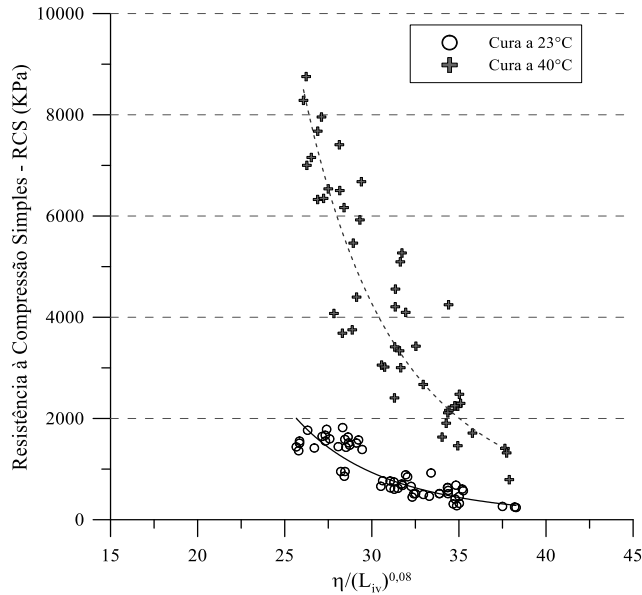
Método do pó (fração < 75 µm)



Amostra orientada (fração < 4 µm)



❖ Resistencia a la Compresión y Módulo de Cizallamiento Inicial:



$$RCS(kPa)_{23^{\circ}C} = 1,60 \times 10^{10} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-4,90}$$

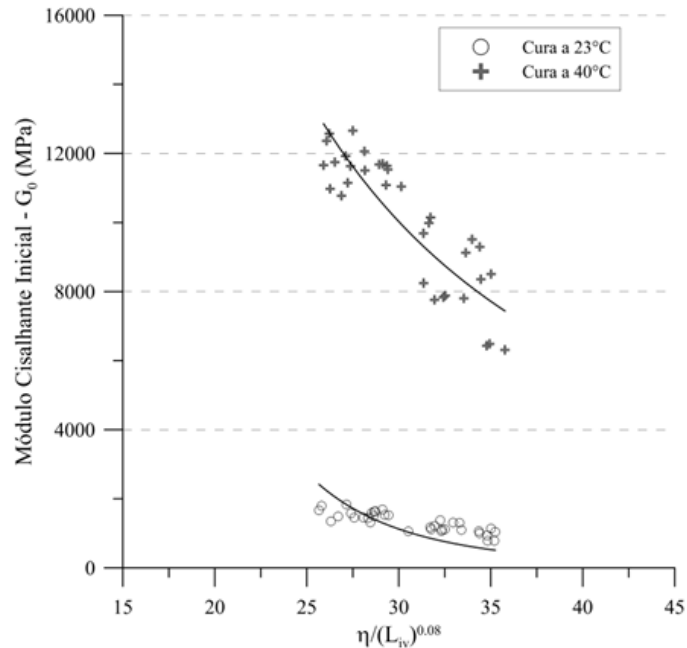
$R^2 = 81\%$

$$RCS(kPa)_{40^{\circ}C} = 7,36 \times 10^{10} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-4,90}$$

$R^2 = 81\%$

Tempo de cura de 7 dias em ambiente com condições controladas!

❖ Resistencia a la Compresión y Módulo de Cizallamiento Inicial:



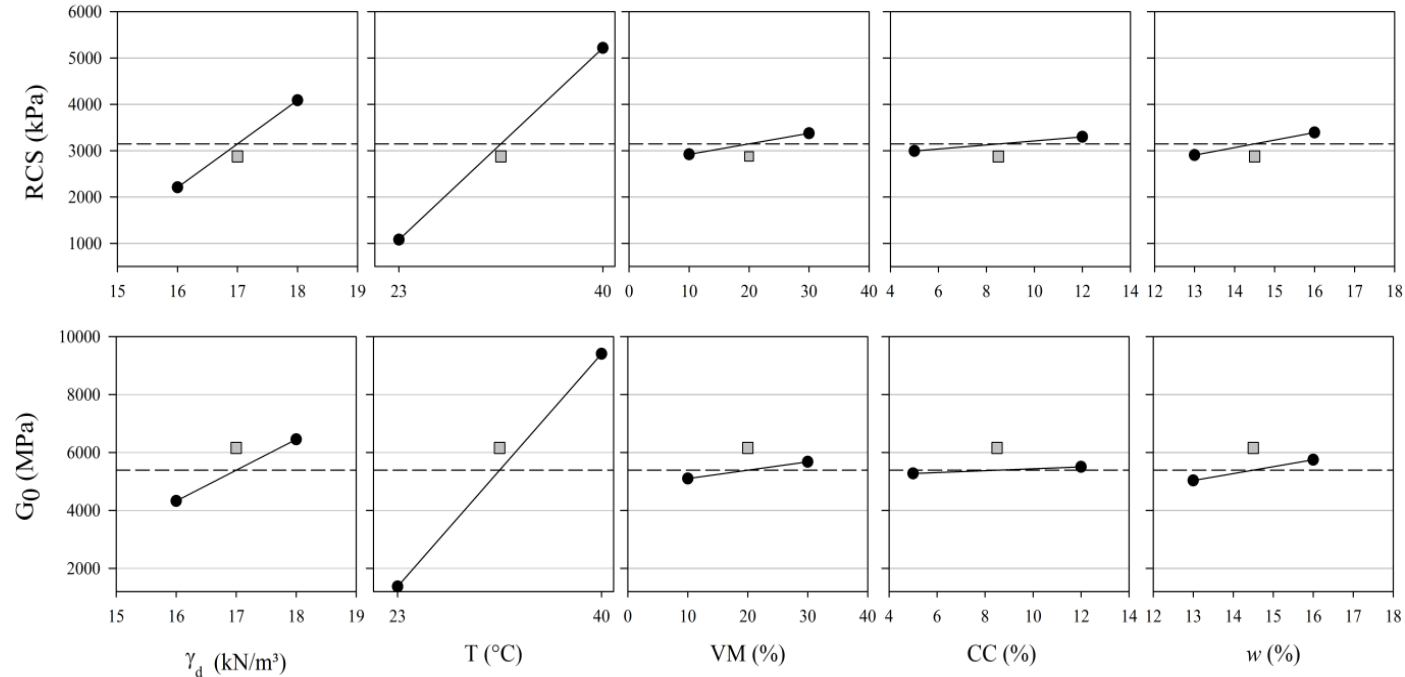
$$G_0(MPa)_{23^\circ C} = 7,72 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-1,87} \quad R^2 = 71 \%$$

$$G_0(MPa)_{40^\circ C} = 5,78 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-1,87} \quad R^2 = 71 \%$$

Tempo de cura de 7 dias em ambiente com condições controladas!

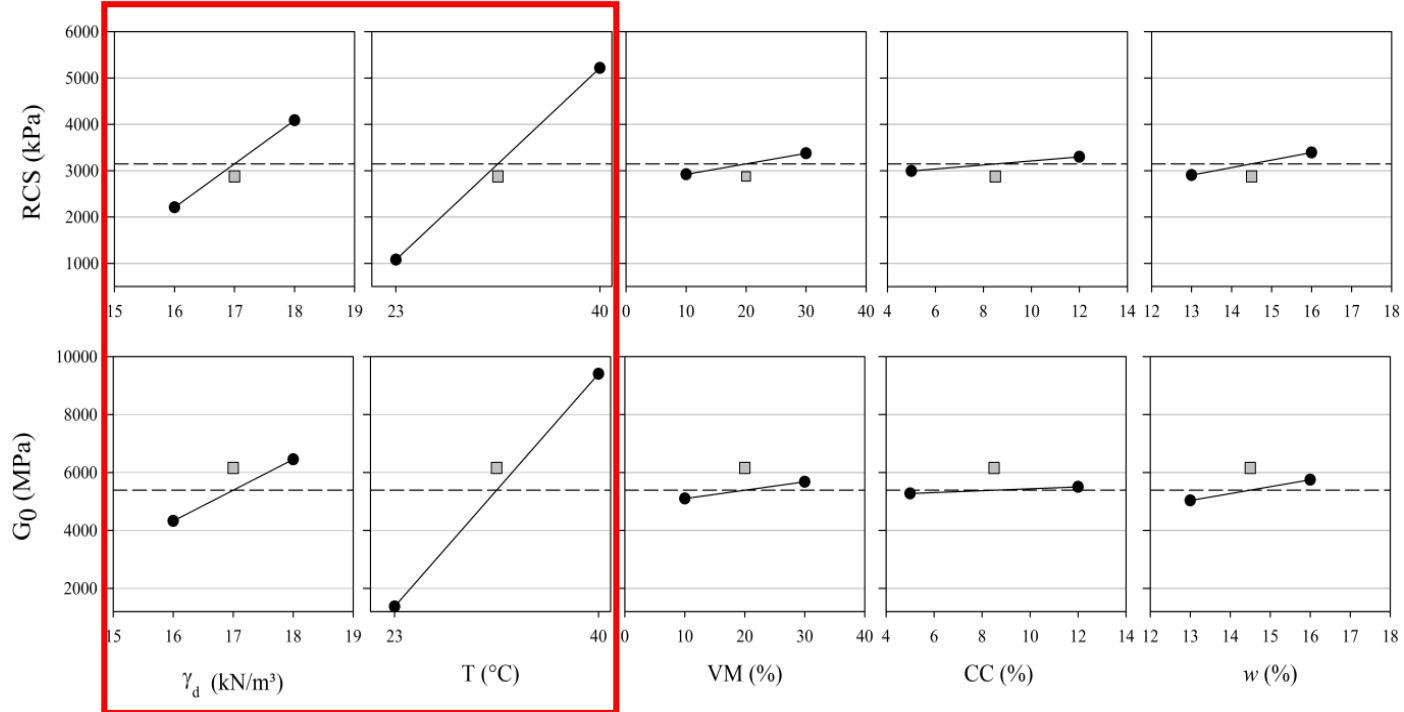
❖ Resistencia a la Compresión y Módulo de Cizallamiento Inicial:

Gráfico de Efeitos Principais



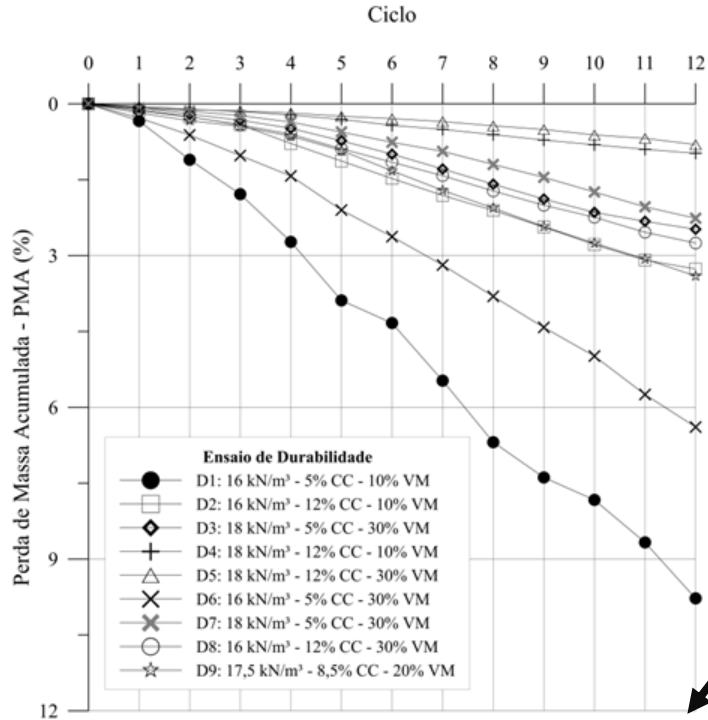
❖ Resistencia a la Compresión y Módulo de Cizallamiento Inicial:

Grande efeito da temperatura de cura e da compacidade!

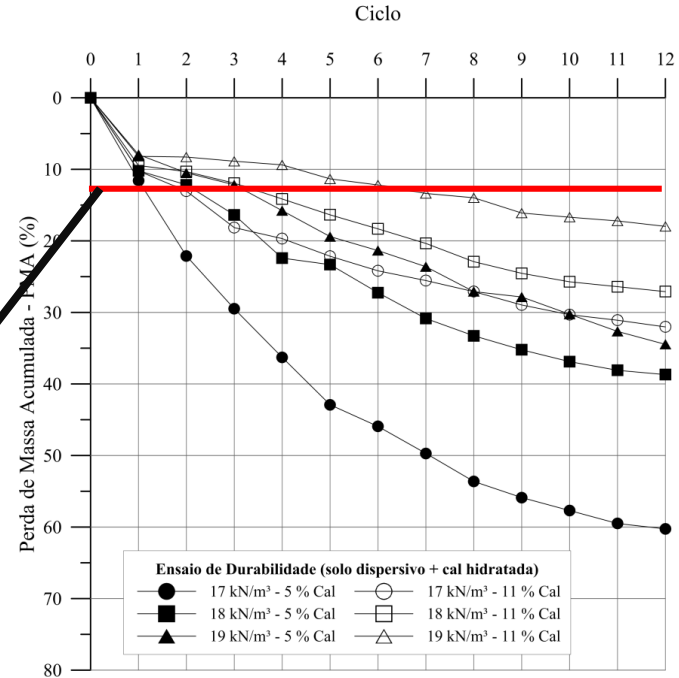


❖ Durabilidade por medio de un proceso de secado y mojado:

Durabilidade com adiç3o de pozolana + cal hidratada

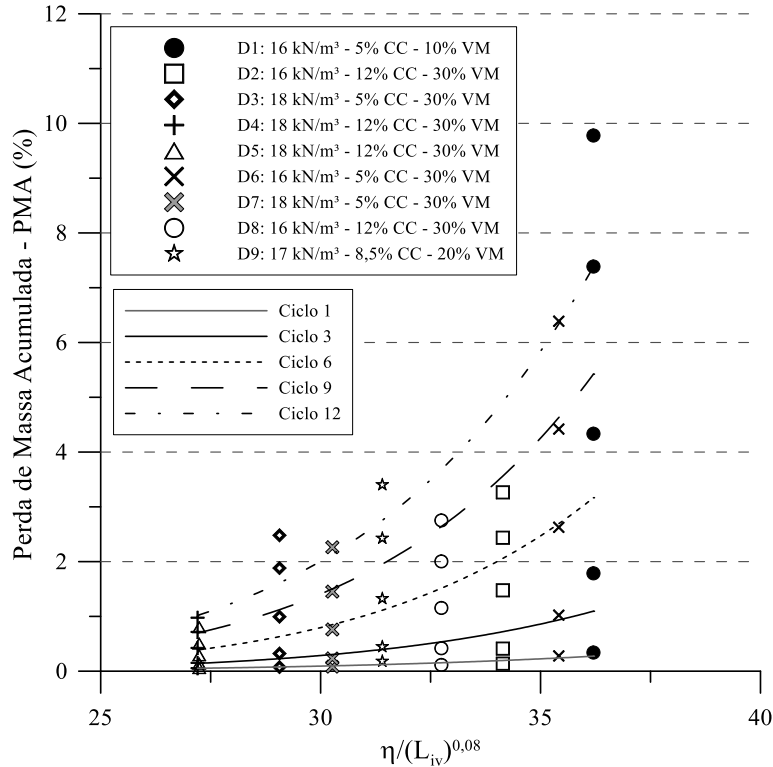


Durabilidade somente com cal hidratada



Tempo de cura de 7 dias em ambiente com condiç3es controladas!

❖ Durabilidad por medio de un proceso de secado y mojado:



$$PMA_1(\%) = 2,95 \times 10^{-10} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{5,75}$$

$$R^2 = 86\%$$

$$PMA_3(\%) = 8,11 \times 10^{-12} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{7,14}$$

$$R^2 = 85\%$$

$$PMA_6(\%) = 1,11 \times 10^{-11} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{7,35}$$

$$R^2 = 88\%$$

$$PMA_9(\%) = 3,60 \times 10^{-11} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{7,17}$$

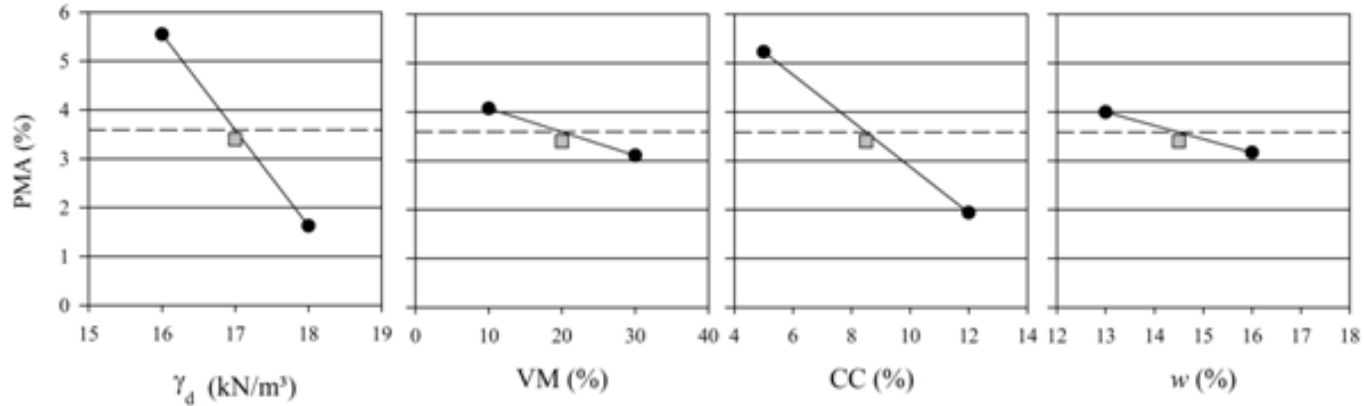
$$R^2 = 86\%$$

$$PMA_{12}(\%) = 1,15 \times 10^{-10} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{6,93}$$

$$R^2 = 87\%$$

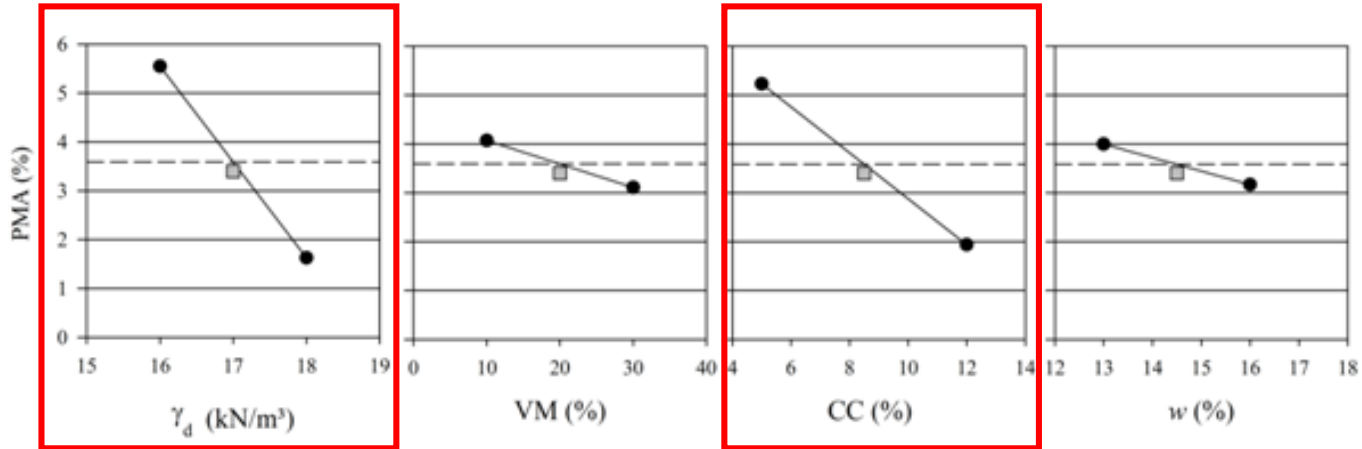
❖ Durabilidad por medio de un proceso de secado y mojado:

Gráfico de Efeitos Principais



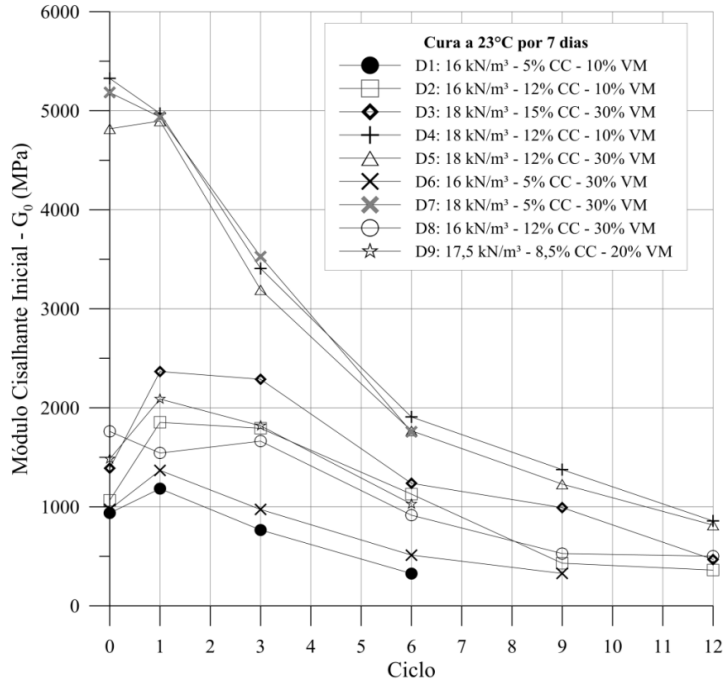
❖ Durabilidade por medio de un proceso de secado y mojado:

Grande efeito do teor de cal e da compacidade

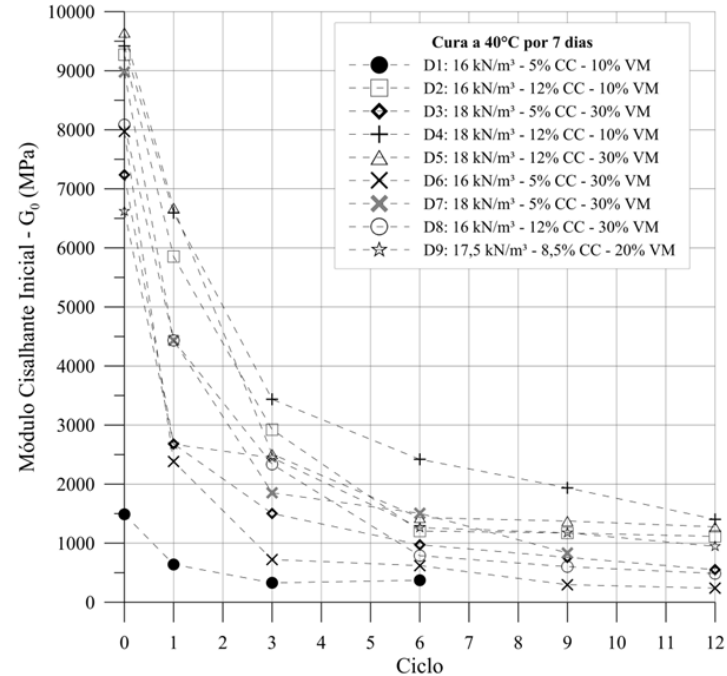


❖ Durabilidade por medio de un proceso de secado y mojado:

Cura a 23°C

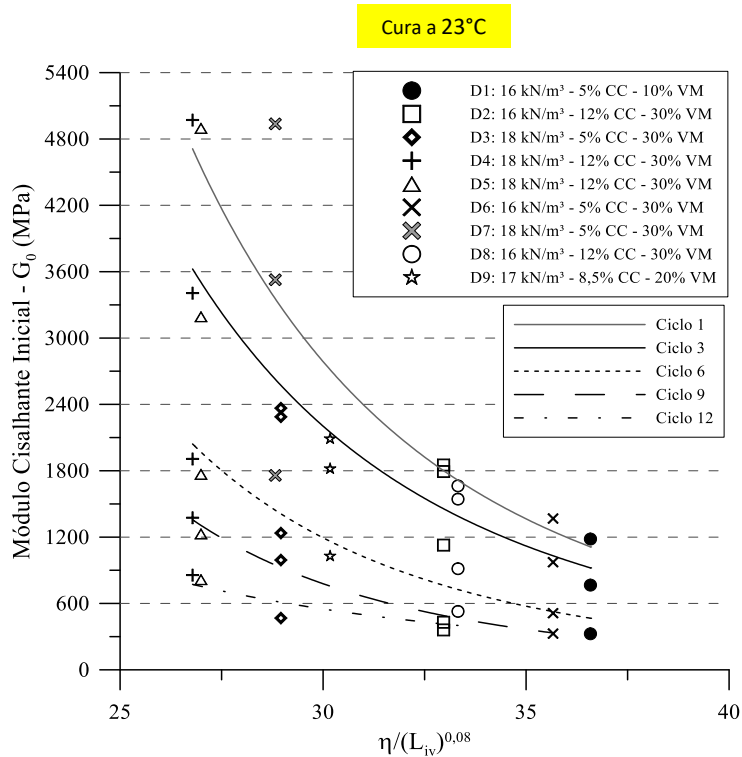


Cura a 40°C



Tempo de cura de 7 dias em ambiente com condições controladas!

❖ Durabilidad por medio de un proceso de secado y mojado:



$$G_0(MPa)_1 = 1,93 \times 10^{10} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-4,63}$$

$$R^2 = 86\%$$

$$G_0(MPa)_3 = 6,73 \times 10^{10} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-4,39}$$

$$R^2 = 89\%$$

$$G_0(MPa)_6 = 1,11 \times 10^{10} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-4,73}$$

$$R^2 = 86\%$$

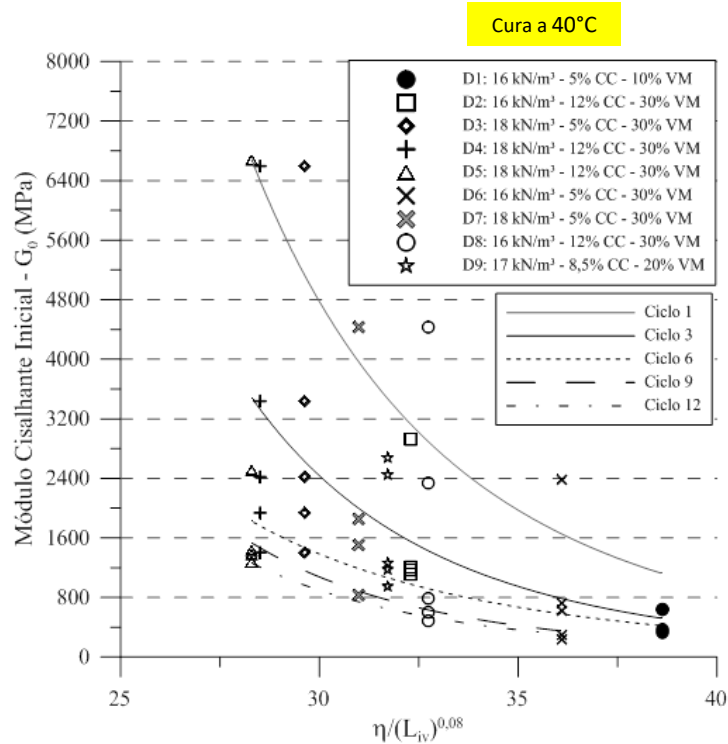
$$G_0(MPa)_9 = 1,33 \times 10^{10} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-4,89}$$

$$R^2 = 97\%$$

$$G_0(MPa)_{12} = 1,50 \times 10^{10} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-3,00}$$

$$R^2 = 72\%$$

❖ Durabilidad por medio de un proceso de secado y mojado:



$$G_0(MPa)_1 = 1,41 \times 10^{14} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-5,73}$$

$$R^2 = 72\%$$

$$G_0(MPa)_3 = 2,64 \times 10^{12} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-6,11}$$

$$R^2 = 70\%$$

$$G_0(MPa)_6 = 1,27 \times 10^{10} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-4,71}$$

$$R^2 = 82\%$$

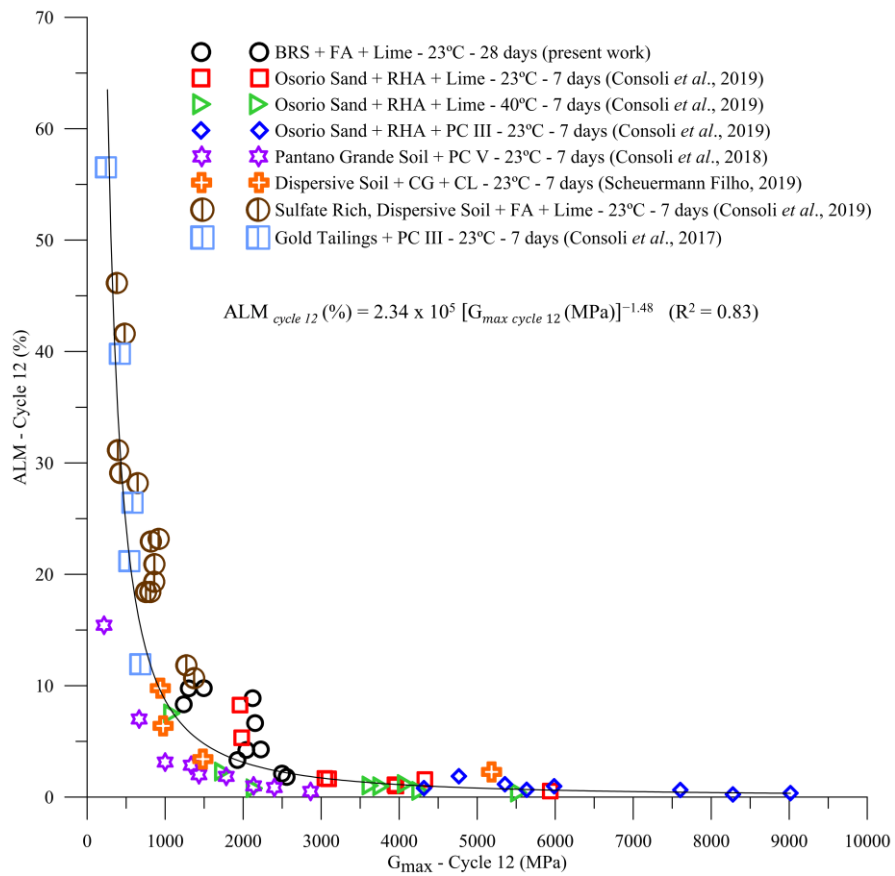
$$G_0(MPa)_9 = 9,50 \times 10^{11} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-6,10}$$

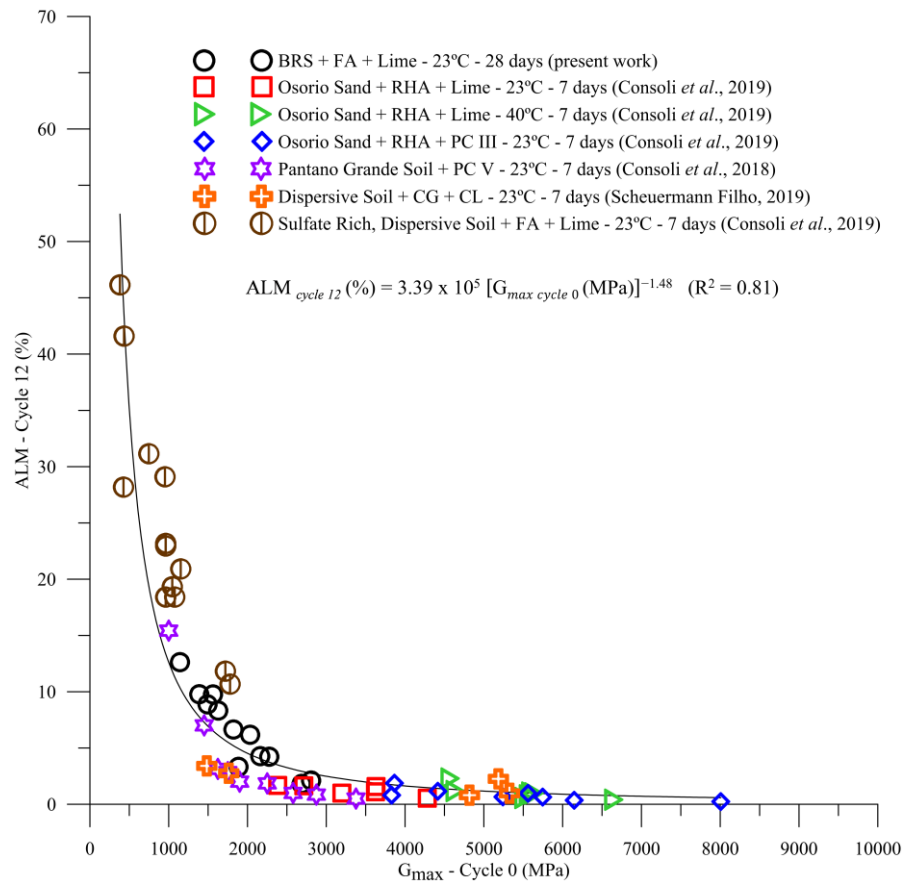
$$R^2 = 74\%$$

$$G_0(MPa)_{12} = 1,50 \times 10^7 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,08}} \right]^{-5,83}$$

$$R^2 = 75\%$$

Un Enfoque de la Durabilidad de las Mezclas Suelo-Puzolana-Cal a través de la Prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónica

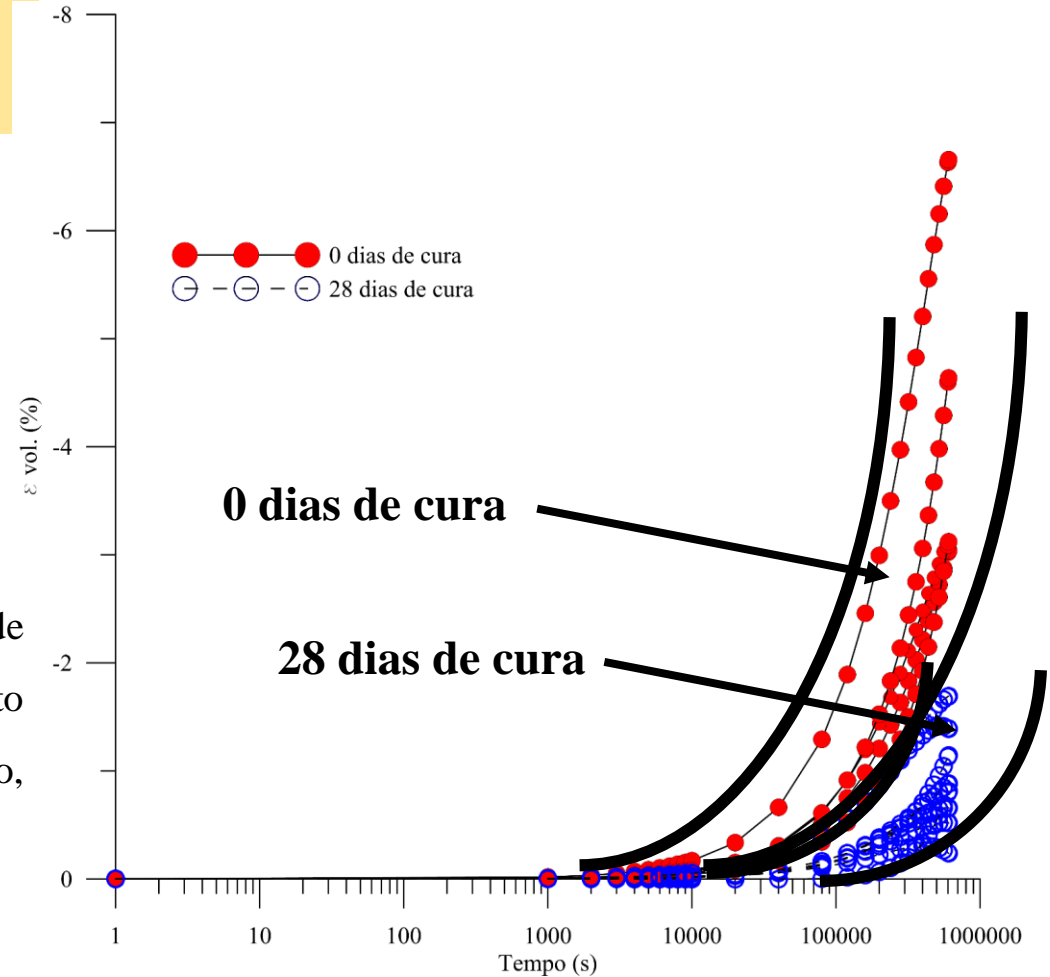


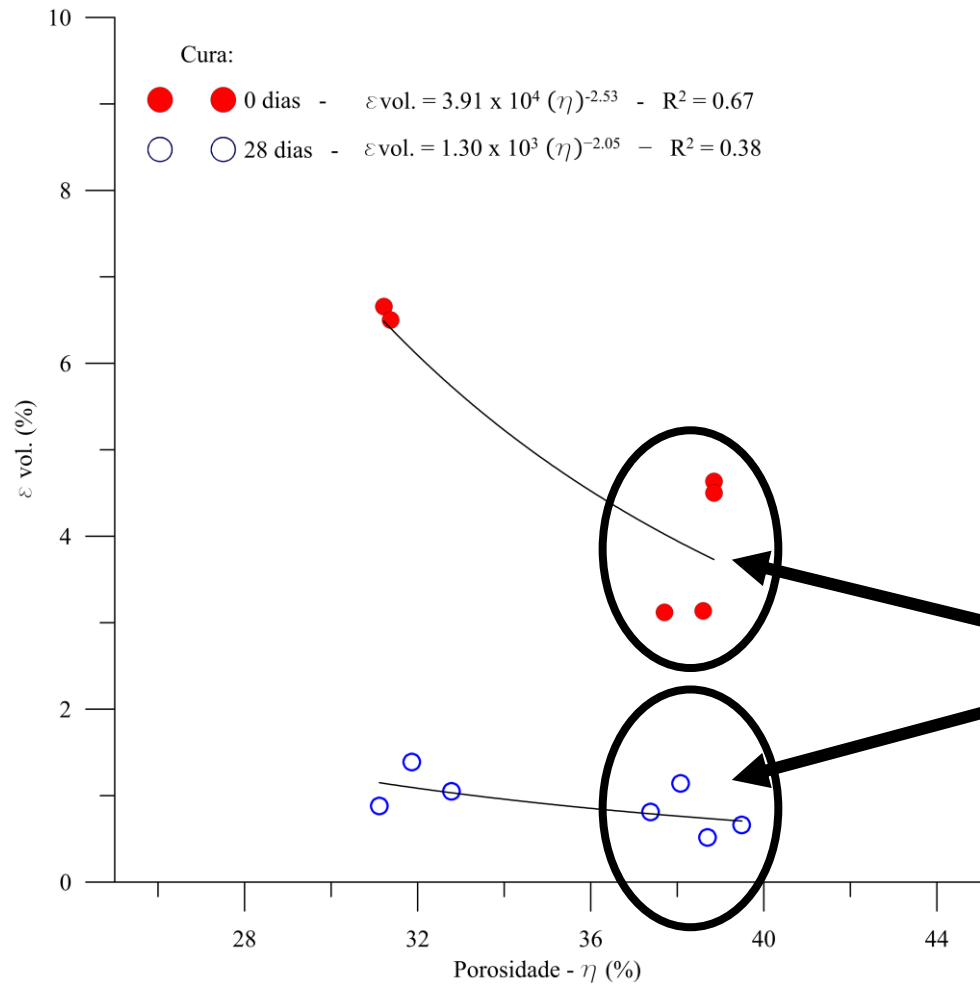


Expansión Tridimensional de Suelos Sulfatados Tratados con Pozolana, Cal y Reforzados con Fibras

❖ Impacto del tiempo de curado:

- Ao comparar as curvas de expansão ao longo do tempo, fica evidente o impacto das reações pozolânicas no que diz respeito a variação volumétrica dos corpos de prova.
- Corpos de prova com um maior período de cura, maior possibilidade do desenvolvimento de compostos ligantes hidratados e com isto, uma menor variação volumétrica é percebida.

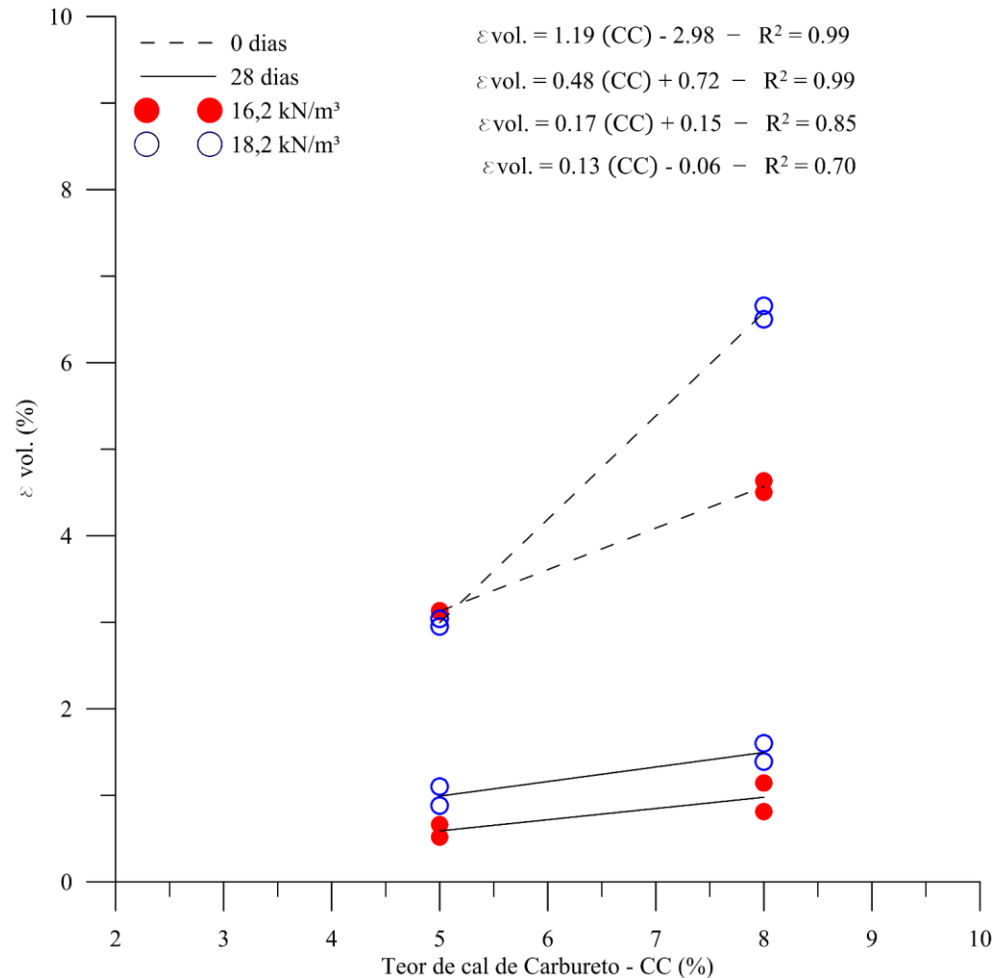


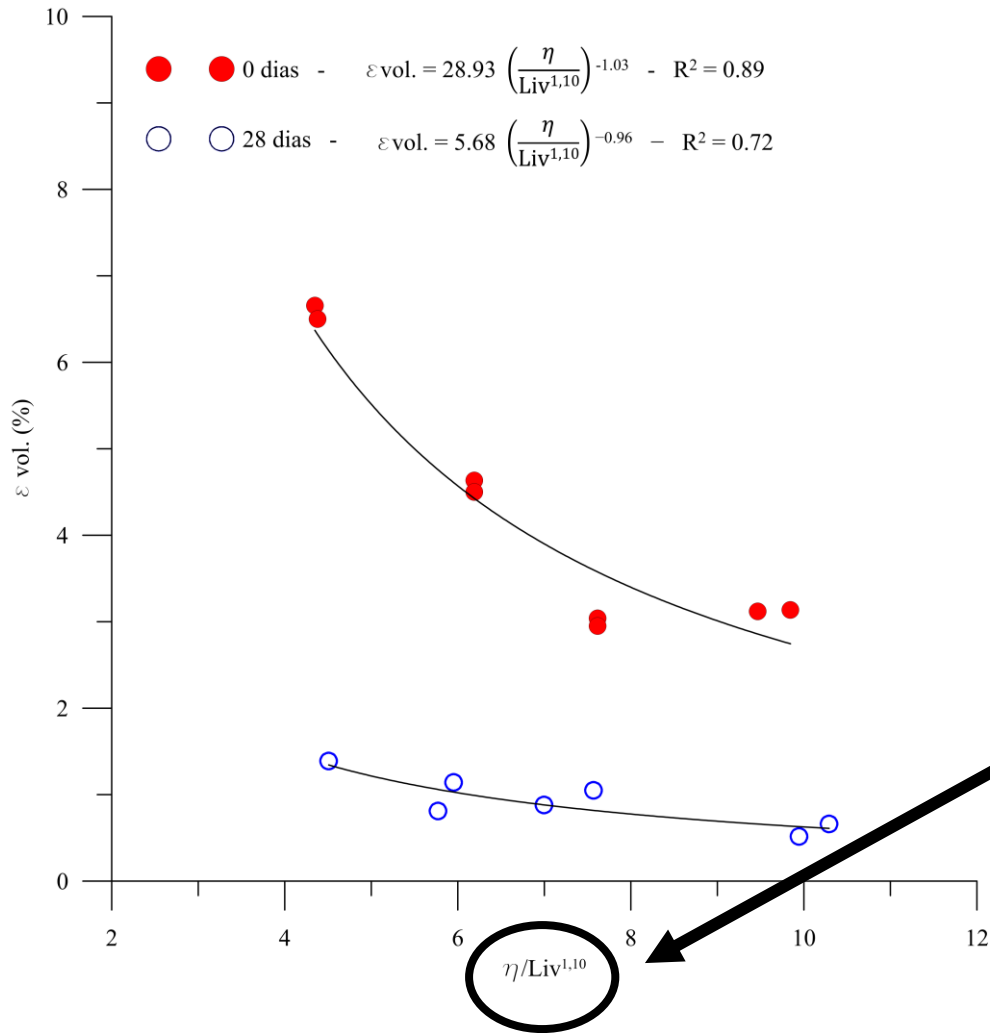


- Novamente, o período de cura se mostrando importante. Mostrando que a mistura proposta foi capaz de conter a expansão.
- Contudo, além disto, repare na influência também da porosidade. Corpos de prova mais porosos relutaram em uma menor expansão isto, em virtude de possuírem maior espaço para acomodar a etringita.

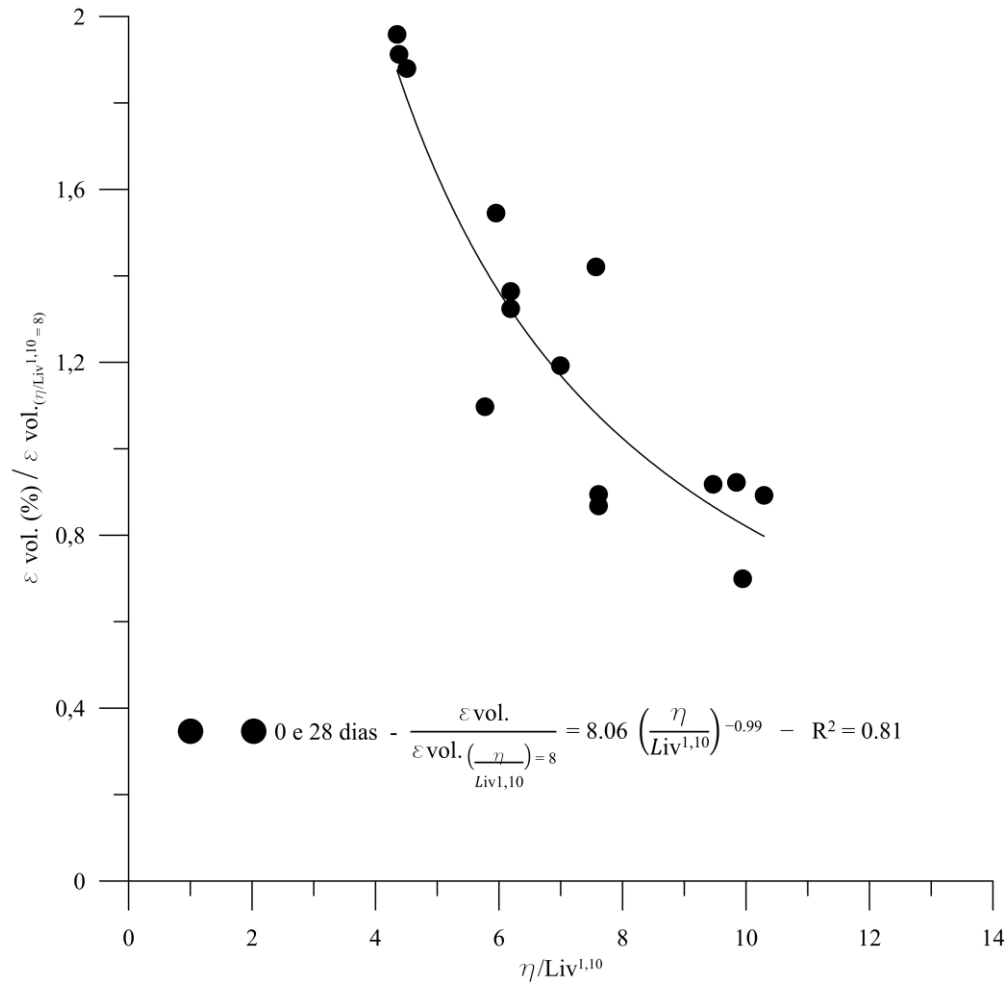
❖ Impacto del contenido de caliza:

- Duas constatações ficam claras por meio desta figura primeiro, quanto maior o teor de cal de carbureto maior a expansão gerada. O que era de se esperar já que uma maior quantidade de etringita irá se formar.
- Segundo, pesos específicos mais elevados levaram a uma maior expansão devido ao menor espaço disponível para que os cristais se acomodassem.



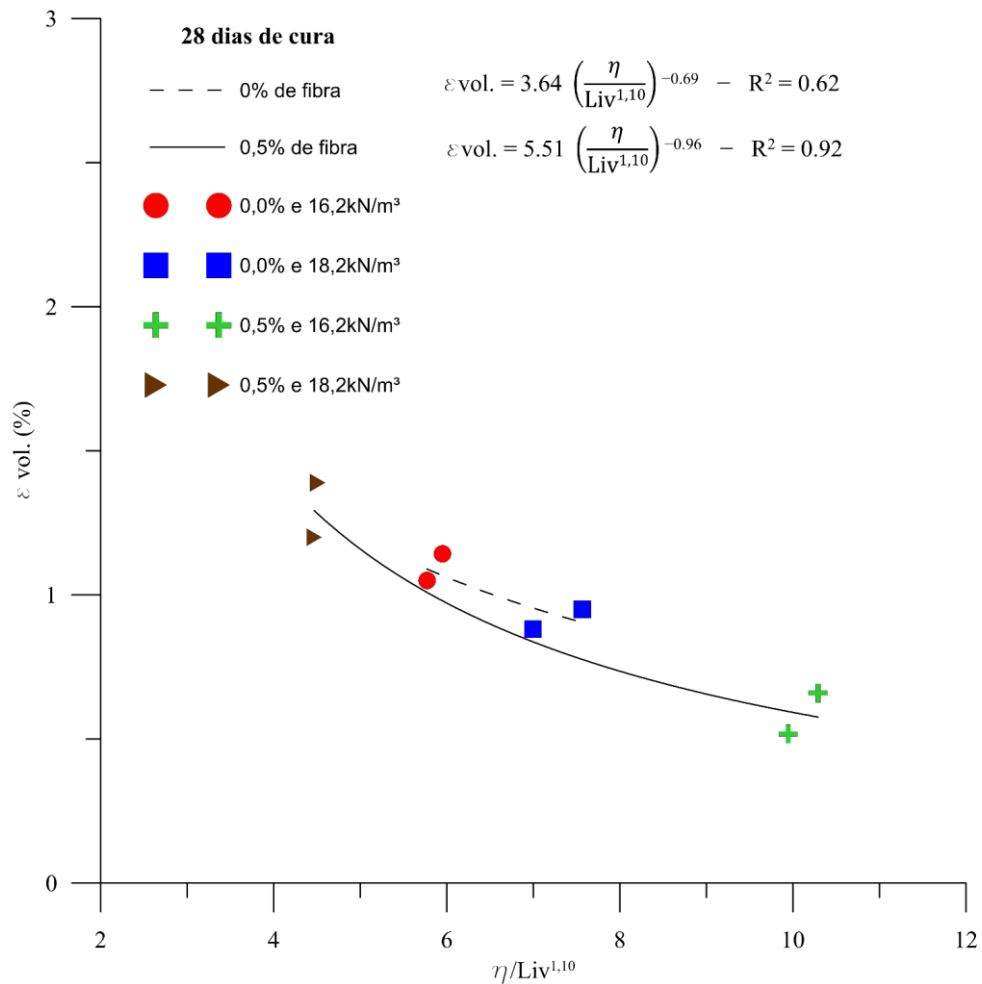


- Em uma mesma abordagem da anterior, a única modificação proposta aqui foi o emprego do expoente 1,10 no termo Liv. Indicando um maior impacto do teor volumétrico de cal nas misturas propostas.



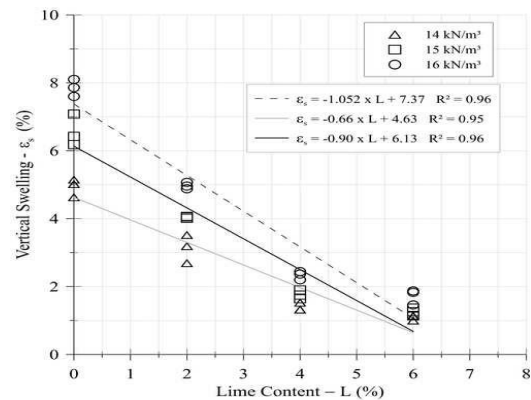
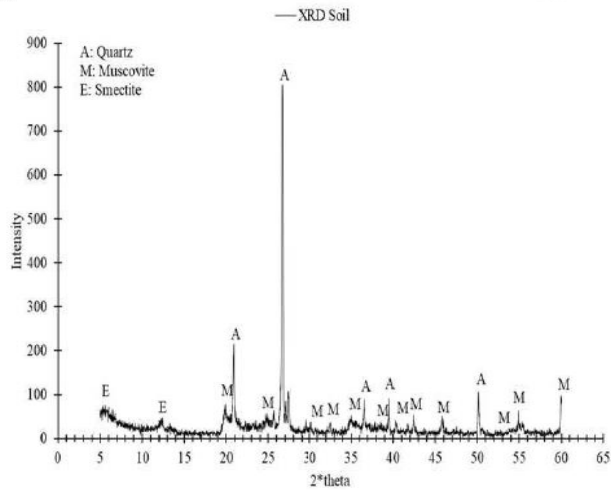
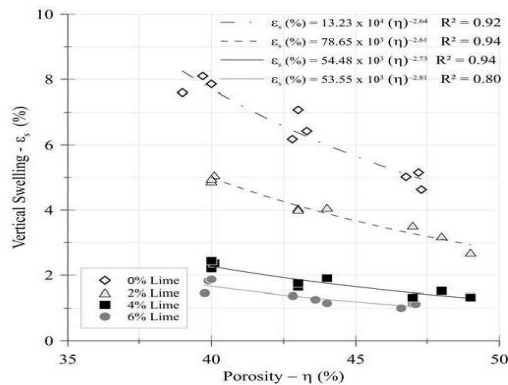
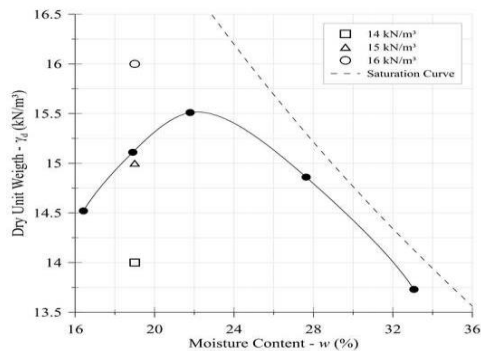
- Propondo-se uma normalização dos resultados através do valor da variação volumétrica ($\varepsilon_{\text{vol.}}$) para $\eta/L_{iv}^{1,10} = 8$. Obtém-se, então, uma única curva para diferentes tempos de cura e materiais utilizados, mas uma vez corroborando a utilização do parâmetro na mensuração da expansão de solos sulfatados.

- A constatação obtida da figura anterior, já não fica claro para os resultados de 28 dias. No caso de resultados de 28 dias, o impacto das reações pozolânicas é tamanho que acaba mascarando tal efeito de interação entre fibra e porosidade/peso específico.

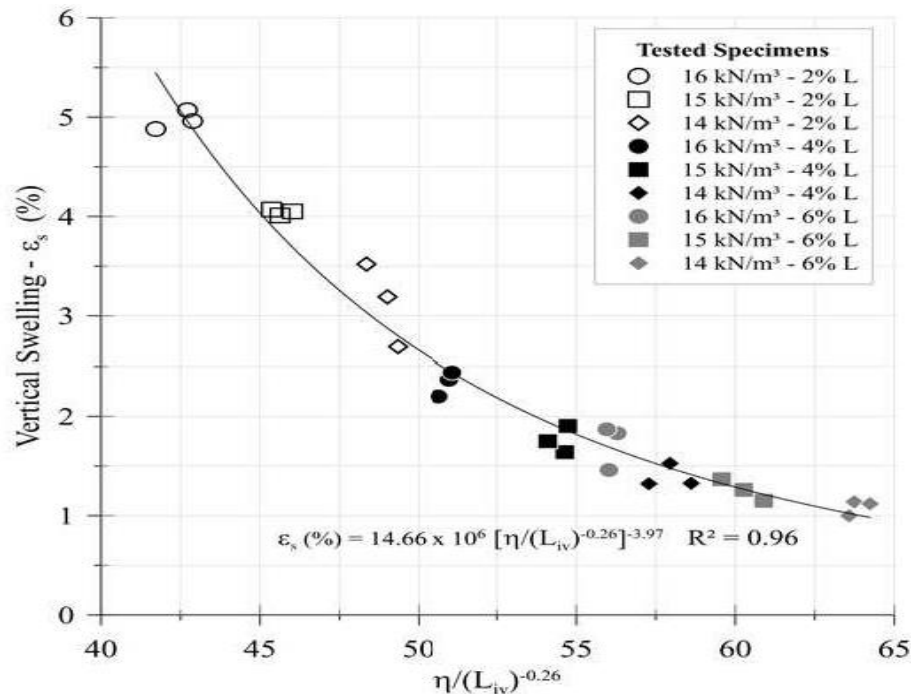
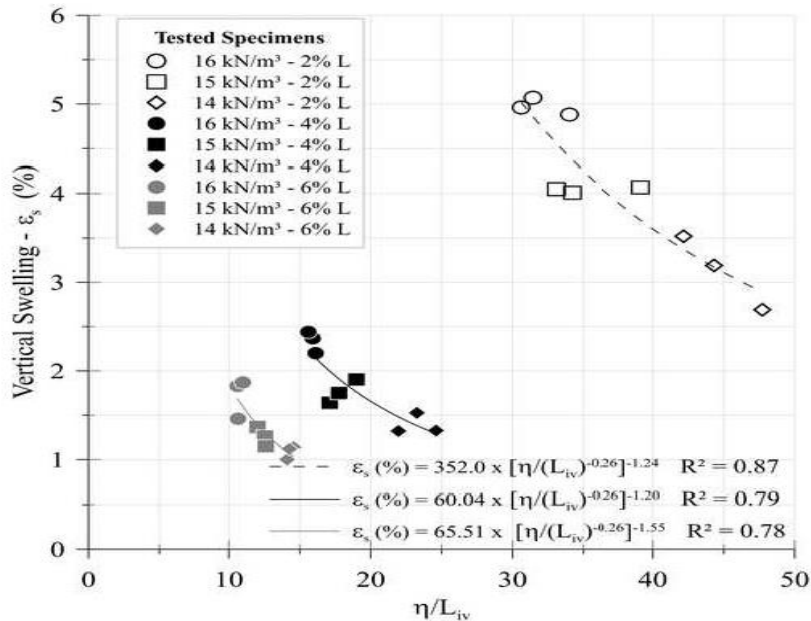


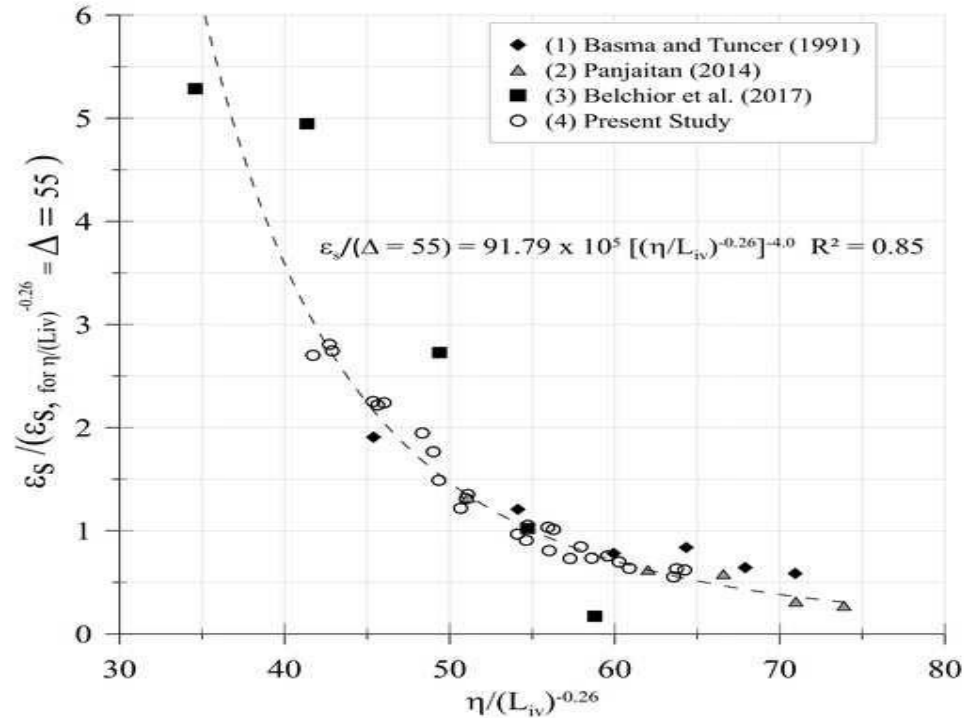
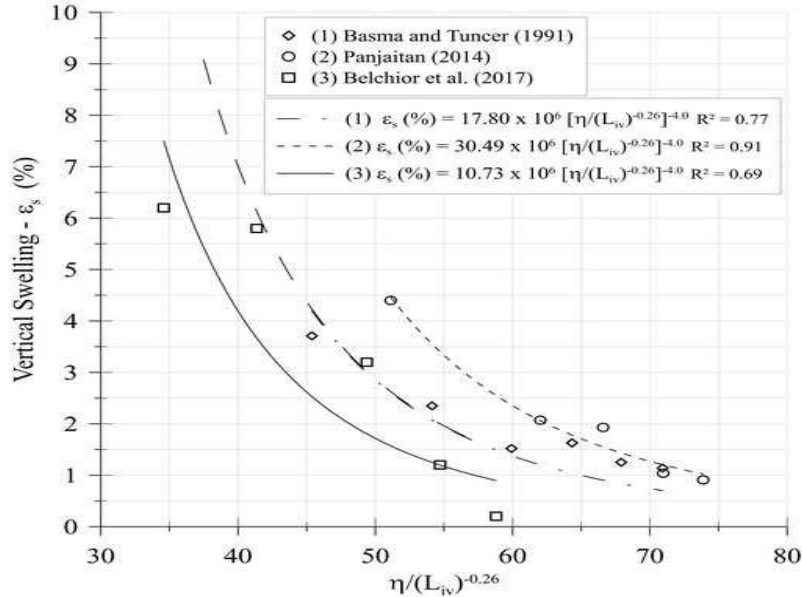
Hinchazón de Suelos Expansivos Tratados con Cal

Hinchazón del suelo expansivo



Hinchazón del suelo expansivo

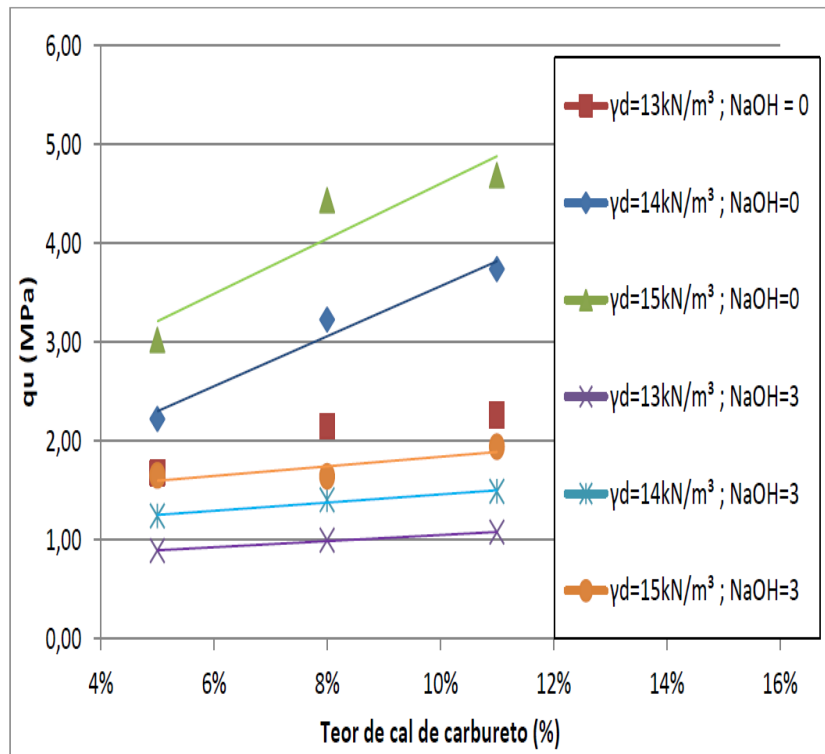




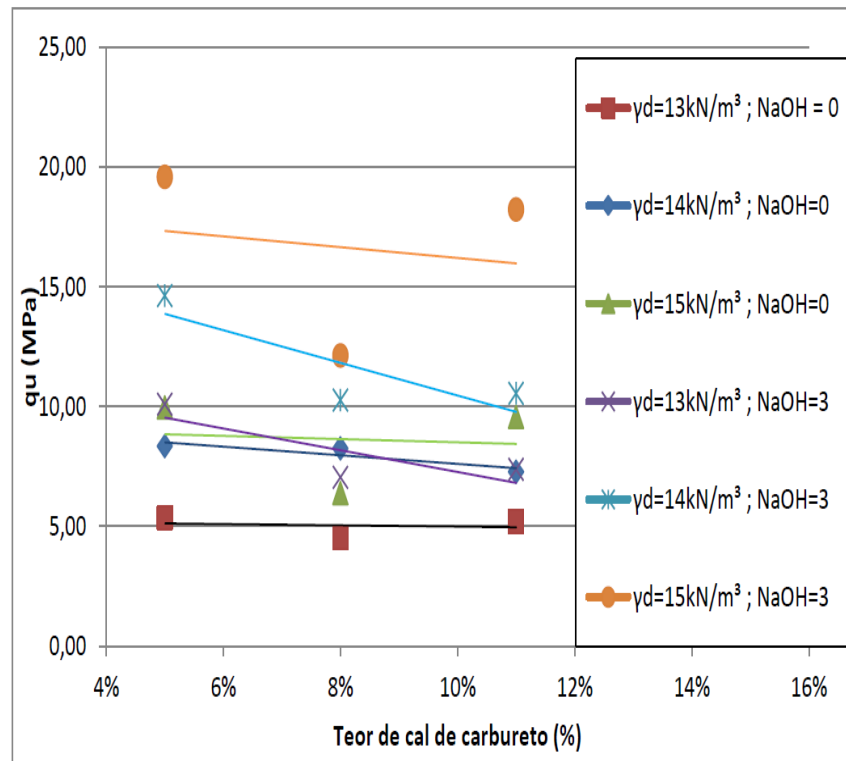
Efecto del NaOH en la resistencia de las mezclas de puzolana-cal y en la expansión de suelos sulfatados tratados con puzolana-cal

Resistencia con y sin NaOH

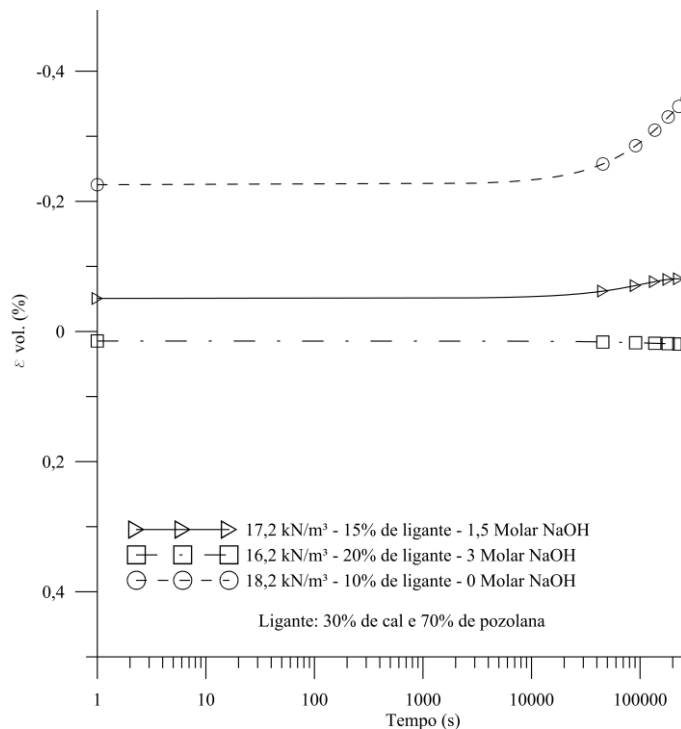
Para 7 dias



Para 28 dias



Expansión de Suelos Sulfatados - Puzolana - Cal con y sin NaOH



MUCHAS GRACIAS!!!