

# FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E À TRAÇÃO INDIRETA DE UM SOLO SILTOSO CIMENTADO ARTIFICIALMENTE COM CAL HIDRATADA

## FACTORS THAT INFLUENCE ON UNCONFINED COMPRESSIVE AND SPLIT TENSILE STRENGTH OF A SILTY SOIL CEMENT ARTIFICIALLY WITH HYDRATED LIME

Arrieta Baldovino, Jair de Jesús; *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, Estudante, yaderbal@hotmail.com*

Batista Moreira, Eclesielter; *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, Estudante, eclesielter\_ebm@hotmail.com*

Dos Santos Izzo, Ronaldo Luis; *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, Professor, izzo@utfpr.edu.br*

Vieira de Goes Rocha, Eduardo; *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, Estudante, rochae@alunos.utfpr.edu.br*

Chun Yan Pan, Roberto; *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, Estudante, vcrp7@yahoo.com.br*

### RESUMO

O presente estudo avalia os fatores que influenciam a resistência à compressão simples e à tração indireta de um solo siltoso da Formação geológica Guabirotuba de Curitiba/Brasil cimentado artificialmente com cal hidratada. O estudo apresenta a relação do crescimento da resistência da compressão não confinada ( $q_u$ ) e tração por compressão diametral ( $q_t$ ) de um solo siltoso curado em 30 dias com a influência de fatores como a relação água/cal ( $a/L$ ), porosidade ( $\eta$ ) e a relação porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_v$ ). Os parâmetros de controle avaliados foram: o teor de cal ( $L$ ), a umidade de moldagem ( $\omega$ ), o peso específico seco aparente de moldagem ( $\gamma_d$ ) e a porosidade. Os resultados mostram um crescimento de  $q_u$  e  $q_t$  com o aumento de teor de cal e com a diminuição da porosidade dos corpos de prova. Também foi calculada uma relação geral entre a resistência à compressão e à tração  $q_t/q_u$  com o uso da relação  $\eta/L_v$ .

### ABSTRACT

The present study evaluates the factors that influence the unconfined compressive strength and the split tensile strength of a silty soil of the Guabirotuba geological Formation of Curitiba/Brazil artificially cemented with hydrated lime. The study shows the relationship between the increase of the unconfined compression strength ( $q_u$ ) and the split tensile strength ( $q_t$ ) of a silty soil cured in 30 days with the influence of factors such as water/lime ratio ( $a/L$ ), porosity ( $\eta$ ) and the porosity/volumetric content of lime ratio ( $\eta/L_v$ ). The control parameters evaluated were: lime content ( $L$ ), molding moisture content ( $\omega$ ), dry unit weight of molding ( $\gamma_d$ ) and porosity. The results show an increase of  $q_u$  and  $q_t$  with the increase in lime content and the reduction of the porosity of the samples. A general relationship between the compressive strength and the split tensile  $q_t/q_u$  was also calculated using the  $\eta/L_v$  ratio.

### 1 - INTRODUÇÃO

O uso de materiais cimentantes como a cal vem sendo empregados com sucesso na engenharia geotécnica para a estabilização e melhoramento mecânico em solos, principalmente de tipo argilosos e siltsos. Em período recente, com o salto econômico vivenciado pelo país há alguns anos atrás, nota-se a necessidade de infraestruturas e têm-se por exigência construções que sejam técnica e economicamente viáveis, com o menor impacto ambiental possível. Frente a isso, verifica-se a necessidade de estudos em materiais e técnicas pouco utilizadas regionalmente, como é o caso da estabilização dos solos com cal. A estabilização permite o uso de solos locais, melhorando as propriedades geotécnicas, de modo a enquadrá-los dentro das especificações construtivas vigentes; o uso é antigo e está sempre em processo de atualização, principalmente a partir de 1945 (Guimarães, 2002; Lima et al., 1993). Esta pesquisa visou quantificar os benefícios alcançados com a estabilização de solos com cal. As pesquisas atuais têm encontrado a influência das quantidades de materiais cimentantes no comportamento mecânico desses tipos de solo, como as realizadas por Consoli et al. (2001, 2012, 2014) onde aplicam-se teores de 3%, 5%, 7% e 9% de cal para estabilização. Os tipos de cal comumente usados para estabilizar solos finos são a cal hidratada com conteúdo alto de cálcio, cal calcítica, cal dolomítica monohidratada e cal viva dolomítica. O teor de cal para usar na estabilização na maioria dos solos varia entre o intervalo de 5 até 10%.

Quando se coloca cal nos solos argilosos, acontecem duas reações químicas pozolânicas: a troca de cátions e floculação-aglomeração das partículas (Das, 2000). Os solos da Formação geológica de Guabirota, localizados na cidade de Curitiba-PR e região metropolitana, têm por sua granulometria a maioria de finos. Os solos de Guabirota não podem em grande parte serem empregados para camadas de sub-base e base de pavimentação, para o suporte de fundações superficiais como as sapatas e para proteção de encostas. A técnica de melhoramento desse solo também pode ser utilizada nas fundações de edificações de pequeno porte, em solos com baixa capacidade de suporte ou que apresentam baixa estabilidade volumétrica. Tais condições são problemáticas na medida em que podem causar severas patologias na edificação (Inglês e Metcalf, 1972). A resistência à compressão simples qu de um solo de grão fino compactado em um teor de umidade ótima pode variar de 170 kPa a 2100 kPa, dependendo da natureza do solo. Com uma adição de entre 3 a 5% de cal e um período de cura de 28 dias, a resistência à compressão simples pode aumentar em 700 kPa ou mais (Das, 2000).

É de interesse fundamental o estudo do melhoramento de solos locais de Curitiba em quanto se podem aproveitar solos que não estão sendo empregados por más propriedades físico-mecânicas. Além disso, fazer uma pesquisa para a construção de um banco de dados de locais de tais solos é essencial, para encontrar soluções técnicas que sejam de fácil execução e economicamente viáveis. Assim, esta pesquisa busca determinar a influência de diferentes teores de cal na resistência à compressão não confinada  $q_u$  e na resistência à tração por compressão diametral  $q_t$  de um solo da Formação geológica de Guabirota.

## 2 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 - Materiais

#### 2.1.1 - Solo

O solo usado para o presente estudo foi coletado na terceira camada da Formação Guabirota no município de Fazenda Rio Grande (PR)-Brazil, em um local de construção de habitações populares, com localização geográfica 25°41'03.9"S e 49°18'32.5"W. O solo é composto por 9 % de argila (< 0,002 mm), 57,6 % de silte (0,002 a 0,075 mm), 25,9 % de areia fina (0,075 a 0,42 mm) e 7,5 % de areia média (0,42 a 2,0 mm). A Figura 1 mostra a curva granulométrica do solo. A umidade natural encontrada do solo in-situ é próxima a 40%.

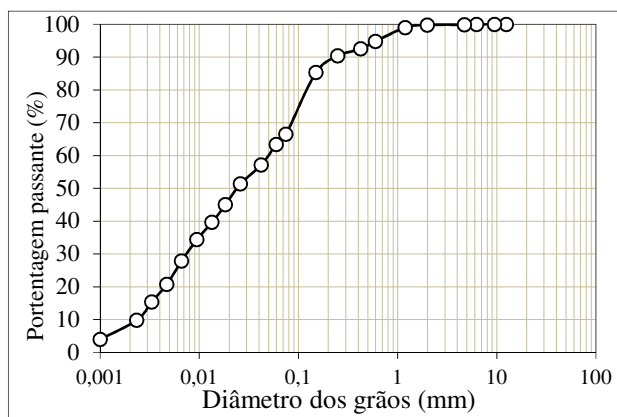


Figura 1- Curva granulométrica do solo

Quadro 1- Propriedades físicas do solo

Propriedades Físicas	Valores Médios
Massa específica real dos grãos, $G_s$	2,71 g/cm <sup>3</sup>
Areia média	7,5 %
Areia fina	25,9%
Silte	57,6%
Argila	9 %
Limite de liquidez, $LL$	53,1%
Índice de plasticidade, $IP$	21,3%

Mostra-se também no Quadro 1 as propriedades físicas do solo; segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS – o solo é classificado como um silte elástico arenoso. A partir da curva granulométrica e da composição presente no Quadro 1, nota-se que o solo apresenta um limite de liquidez alto (53,1%) e o índice de plasticidade indica que a argila é altamente plástica com 21,3% (IP>15).

### 2.1.2 - Cal

A cal usada para o estudo foi uma cal hidratada dolomítica CH-III composta principalmente por hidróxidos de cálcio  $\text{-Ca(OH)}_2$  e magnésio  $\text{-Mg(OH)}_2$ , produzida no município de Almirante Tamandaré, região metropolitana de Curitiba. O percentual retido acumulado no diâmetro 0,075 mm foi de 9% [ $\leq 15\%$ , como especifica a norma brasileira NBR 7175 (ABNT, 2003)]. A massa específica da cal é igual a  $2,39 \text{ g/cm}^3$ .

### 2.1.3 - Água

A água empregada tanto para a moldagem de corpos de prova como para os ensaios de caracterização do solo foi destilada conforme as especificações das normas, enquanto está livre de impurezas e evita as reações não desejadas.

## 2.2 - Métodos

### 2.2.1 - Ensaios de pH

Para a realização das misturas de solo com a cal, definiu-se qual é o menor teor que se pode utilizar para a mistura. Portanto, empregou-se a metodologia proposta por Rogers et al. (1997), também chamada de método do ICL (Initial Consumption of Lime), se refere a uma variação do pH onde o teor mínimo de cal a usar é aquele onde o pH atinge um valor constante máximo. A Figura 2 mostra a variação do pH das misturas com o teor de cal usado. Nota-se que alcança um valor máximo constante de 12,5 depois de chegar ao 3% de cal (teor mínimo a usar nas misturas).

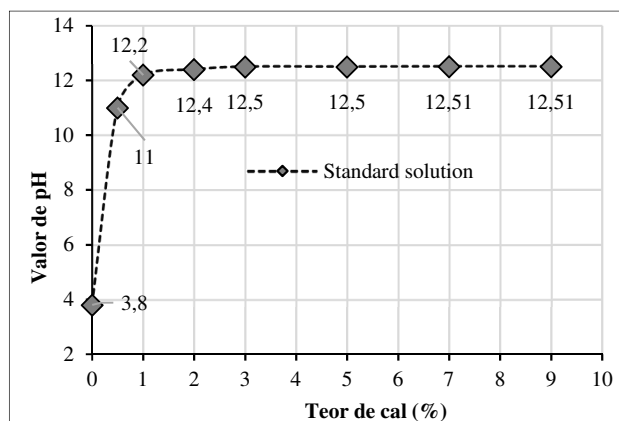


Figura 2 - Variação do pH com o teor de cal

### 2.2.2 - Dosagem das misturas

De acordo com os ensaios de pH das misturas solo-cal e tendo em consideração diferentes pesquisas sobre o tema, definiu-se para o presente estudo 5 teores de cal a usar (0%, 3%, 5%, 7% e 9%); incluindo o teor de 0% para verificar a variação da resistência em suas propriedades físicas. O teor mínimo de cal usado foi definido em função da porcentagem de cal que atingiu o máximo valor constante do pH, que de acordo à Figura 2 é de 3%. O ensaio de resistência não confinada e de tração das misturas constituiu como as principais variáveis de estudo e de avaliação. Dessa forma, são definidas as propriedades dos corpos de prova a partir dos ensaios de compactação.

### 2.2.3 - Ensaios de compactação e pontos de moldagem

Foram realizados ensaios de compactação do solo nas três energias (normal, intermediária e modificada) de compactação segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 2016). A Figura 3 mostra as curvas de compactação do solo estudado. Além disso, ensaios de compactação com a cal foram realizados na energia normal para ver a variação do peso específico seco máximo e a umidade ótima. Assim, o Quadro 2 apresenta a variação do peso específico seco máximo e a umidade ótima para os teores 3%, 5%, 7% e 9% de cal. Nota-se que a variação é bem pequena devido aos baixos teores utilizados. As pesquisas apresentadas por Consoli et al. (2007), onde trata o solo com cimento, e Consoli et al. (2001) que usa a cal de carbureto como material cimentante para o solo, pode-se notar que os pontos de moldagem nestas pesquisas são estratégicos.

De acordo aos resultados dos ensaios de compactação se tomaram como pontos de moldagem os pontos ótimos das curvas de compactação nas três energias do solo: (Energia Normal: EN, Energia Intermediária: EI e Energia Modificada: EM). Também denomina-se os pontos de moldagem como A1 (EN), A2 (EI) e A3 (EM). Onde A1 é  $\gamma_d=13,80 \text{ kN/m}^3$  e  $\omega=28.5 \%$ , A2 é  $\gamma_d=15,10 \text{ kN/m}^3$  e  $\omega=22.8 \%$  e finalmente A3 é  $\gamma_d=16,15 \text{ kN/m}^3$  e  $\omega=20 \%$ . Assim, com estes pontos de moldagem, variam-se a porosidade, o peso específico aparente seco e a umidade dos corpos de prova.

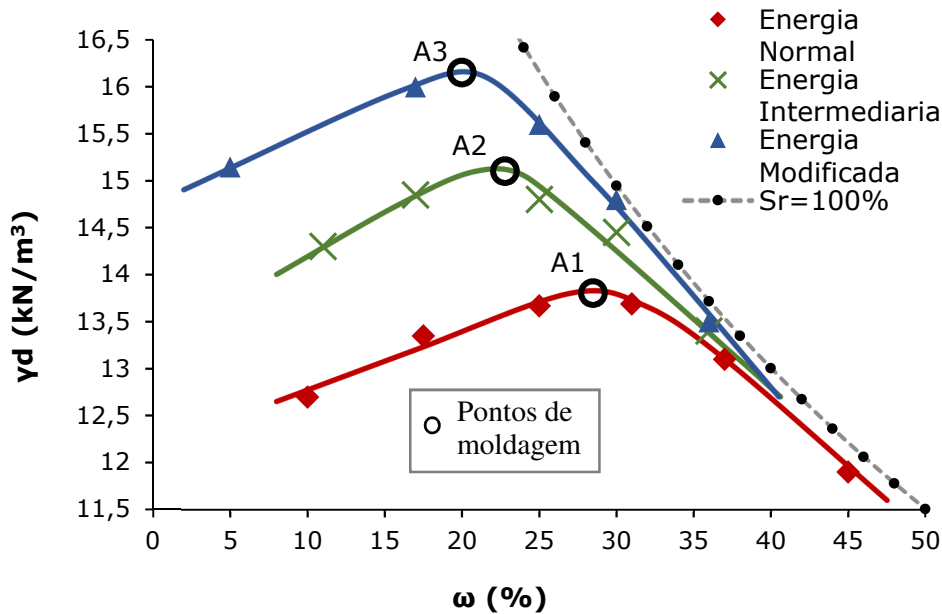


Figura 3- Curvas de compactação do solo e pontos de moldagem

Quadro 2 - Propriedades de compactação (energia normal) do solo com diferentes teores de cal

Teor de cal (%)	Peso específico seco máximo, $\gamma_{d_{max}}$ (kN/m³)	Umidade ótima, $\omega$ (%)
3	13,58	32,5
5	13,50	32,0
7	13,50	31,5
9	13,50	30,0

#### 2.2.4 - Ensaio de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral

Para os ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral foram moldados corpos de prova de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. O silte foi secado totalmente em estufa a  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  e logo colocado em porções uniformemente distribuídas para serem misturadas com os diferentes teores de cal. Coloca-se a quantidade de cal seca com referência ao peso seco da amostra do solo. Por seguinte, realiza-se a mistura de maneira que a mescla final se torna a mais homogênea possível. Uma porcentagem de peso de água foi adicionada na amostra de solo com cal e misturada novamente para atingir a umidade ótima. Durante a moldagem dos corpos de prova, eram compactadas estaticamente duas camadas em um molde de aço inox com diâmetro interno de 50 mm e altura de 100 mm, para atingir o peso específico seco aparente de moldagem. Depois de ser compactado o corpo de prova é retirada do molde com a ajuda de um extrator hidráulico, pesando-a em sequência em uma balança de precisão de 0,01 g; tomando-se suas dimensões com o uso de um paquímetro. Logo após, eram envoltas com plástico transparente para assegurar a conservação da umidade. Por último, levam-se os corpos de prova até a câmara úmida para processo de cura durante 30 dias, com temperatura média de  $25^\circ\text{C}$ . Além disso, os corpos de prova tinham que respeitar as seguintes condições para serem consideradas no ensaio de compressão simples e tração:

- Dimensões dos corpos de prova: variações de diâmetro em  $\pm 0,5 \text{ mm}$  e altura em  $\pm 1 \text{ mm}$ ;
- Massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ): dentro de  $\pm 1\%$  do valor alvo;

- Teor de umidade ( $w$ ): dentro de  $\pm 0,5\%$  do valor alvo.

Os procedimentos dos ensaios de compressão simples seguiram a norma americana ASTM D 5102 (ASTM, 1996) e os de tração a norma ASTM C 496/C 496M (ASTM, 2004). Adota-se a resistência à compressão não confinada ou simples ( $q_u$ ) como o quociente entre a carga de ruptura ( $P_R$ ) e a área transversal ( $A_T$ ) do corpo de prova ( $q_u = P_R/A_T$ ) e adota-se a resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) como o quociente entre a duas vezes carga de ruptura ( $P_R$ ) e o produto entre PI ( $\pi$ ), o diâmetro ( $D$ ) e a altura do corpo de prova ( $L$ ): ( $q_t = 2P_R/\pi DL$ ).

### 2.2.5 - Ensaios de sucção matricial

A sucção é um dos parâmetros que interferem na resistência do solo, já que é definida como a capacidade do solo para reter a água. Assim, no presente trabalho se estudou a influência da sucção matricial na resistência das misturas solo-cal com o uso da técnica do papel filtro usada por Marinho (1995). Foram usadas os corpos de prova de solo-ca (de 50 mm de diâmetro e 25 mm de espessura) que foram submetidas a compressão e tração.

## 3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 3.1 - Influência do teor de cal na resistência à compressão simples e à tração indireta

A Figura 4 (a) mostra os resultados de  $q_u$  das amostras depois de 30 dias de cura com a variação dos teores de cal de 0 até 9%. Observa-se que com o aumento do peso específico seco das amostras aumenta sua resistência à compressão simples, e, em seguida o aumento do teor de cal usado também proporciona um aumento nos resultados de  $q_u$ .

Comparando as resistências  $q_u$  dos pontos A3 e A1 (menor e maior peso específico seco de moldagem, respectivamente) para 30 dias de cura, pode-se mencionar que houve um acréscimo em porcentagem de 115, 185, 243, 297 e 234% na resistência  $q_u$  com a utilização de 0, 3, 5, 7 e 9% de cal. A melhor forma de representar o acréscimo de  $q_u$  com o aumento do teor de cal foi com uma tendência linear com a forma:  $q_u = a_1 * L + K_1$ , onde  $L$  é o teor de cal,  $a_1$  e  $K_1$  são coeficientes obtidos por regressão de mínimos quadrados.

A Figura 4 (b) mostra os resultados de  $q_t$  das amostras depois de 30 dias de cura com a variação dos teores de cal de 0 até 9%. Observa-se que com o aumento do peso específico seco das amostras aumenta sua resistência à tração, e, em seguida o aumento do teor de cal usado também proporciona um aumento nos resultados de  $q_t$ . Fazendo uma comparação das resistências  $q_t$  dos pontos A3 e A1 (menor e maior peso específico seco de moldagem, respectivamente) para 30 dias de cura pode-se mencionar que houve um acréscimo em porcentagem de 88, 90, 250, 239 e 165% na resistência  $q_t$  com o emprego de 0, 3, 5, 7 e 9% de cal.

De igual maneira que para os resultados de compressão simples, os resultados de  $q_t$  seguem um comportamento linear com o aumento do tempo de cura da forma  $q_t = a_2 * L + K_2$ . O comportamento linear é proporcional também ao peso específico seco aparente de moldagem dos corpos de prova devido a que os valores das constantes  $a$  e  $k$  crescem com o aumento de  $\gamma_d$  tanto para  $q_u$  como para  $q_t$ . A través da regressão linear se obtiveram os maiores valores de coeficiente de determinação (desde 0,90 até 0,98).

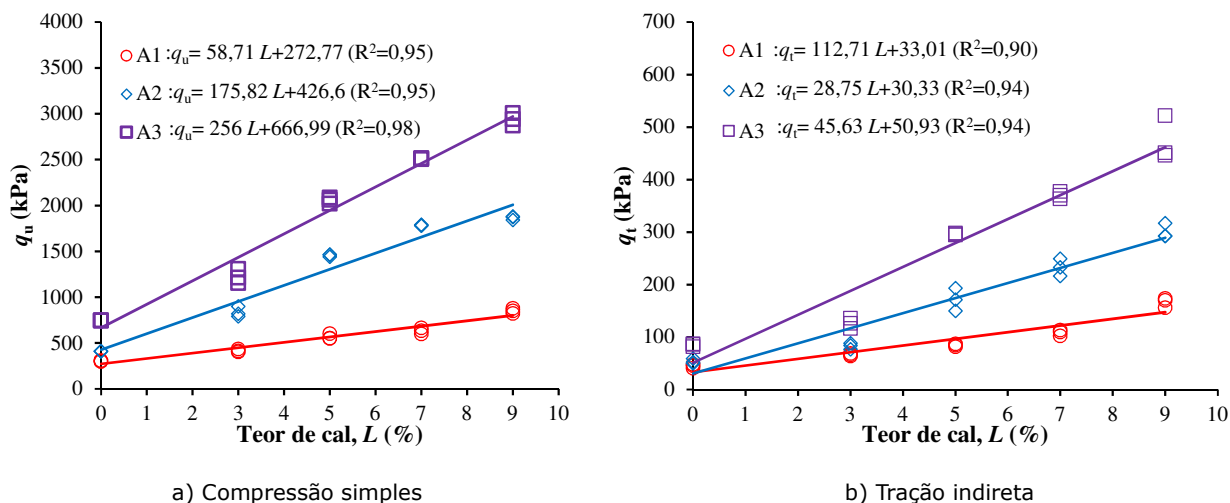


Figura 4 - Influência do teor de cal na resistência  $q_u$  e  $q_t$

### 3.2 - Influência da relação água/cal na resistência à compressão simples e à tração indireta

A influência do parâmetro água/material cimentante em relação peso/peso se considera um fator importante para estabelecer equações de dosagem para obter resistências desejadas à compressão simples ou compressão uniaxial, como exemplo no concreto armado a relação água/cimento (A/C) é muito empregada para a estimativa da resistência axial  $f_c'$ . No caso de solos melhorados com cal hidratada, pode-se estudar a influência da relação água/cal (A/L) na resistência final das misturas.

Segundo as Figuras 5 (a) e 5 (b), a relação A/L varia de 2,4 a 6,8 para a energia modificada, de 2,7-7,8 na energia intermediária e de 3,4-9,8 na energia normal, isto acontece devido a que o teor de umidade diminui ao aumentar a energia o grau de compactação com que foram moldadas as misturas solo-cal. Tanto  $q_u$  como  $q_t$  aumentam com a diminuição de A/L e também com o aumento da energia de compactação.

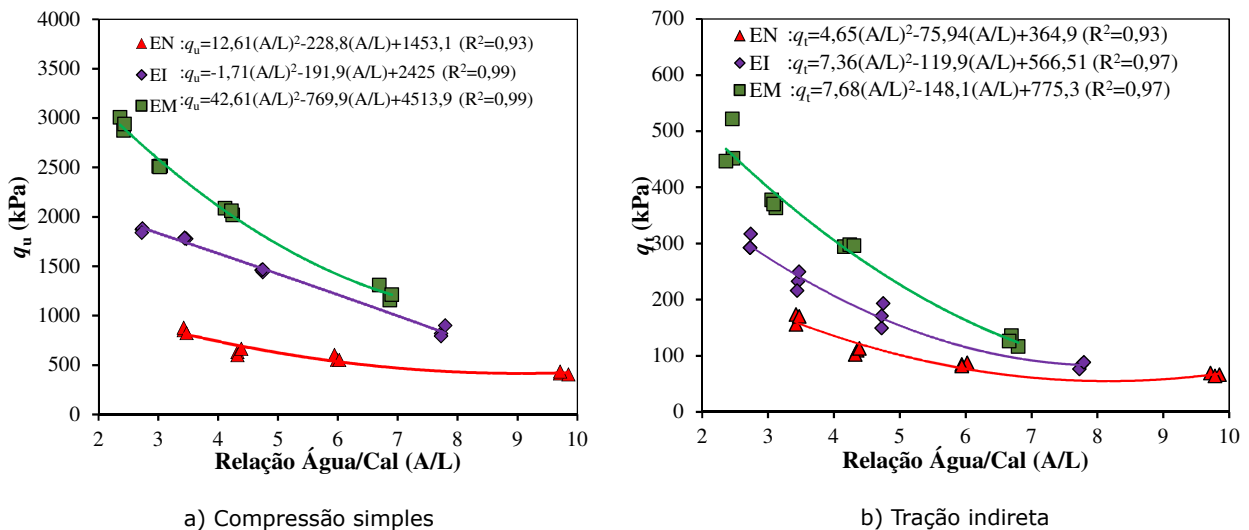


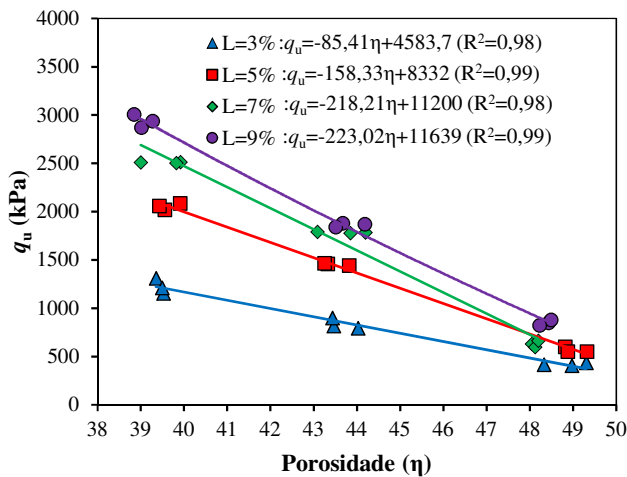
Figura 5 - Influência da relação água/cal na resistência  $q_u$  e  $q_t$

### 3.3 - Influência da porosidade na resistência à compressão simples e à tração indireta

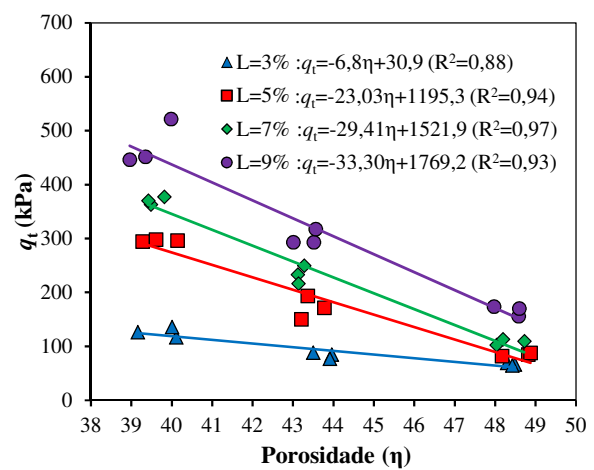
Para Consoli et al. (2012) a porosidade tem uma influência na resistência dos solos estabilizados com cal, haja vista que quando se reduz os vazios do solo, a mistura se torna mais rígida. A variação da tração e compressão com a diminuição da porosidade foi avaliada na presente pesquisa. A porosidade de um corpo de prova solo-cal pode ser calculada como:

$$\eta = 100 - 100 \frac{\left( \frac{\gamma_d V_s}{1 + \frac{L}{100}} \right) + \left( \frac{\gamma_d V_s}{1 + \frac{L}{100}} \right) \left( \frac{L}{100} \right)}{\gamma_{ss} + \gamma_{sL} V_s} \quad [1]$$

Onde  $V_s$  é o volume total do corpo de prova em  $\text{cm}^3$ ,  $\gamma_d$  é o peso específico seco aparente de moldagem em  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $L$  é teor de cal em porcentagem, e  $\gamma_{ss}$  e  $\gamma_{sL}$  são o peso unitário dos grãos do solo e da cal, respectivamente dados em  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Assim, as Figuras 6 (a) e 6 (b) mostram a influência da porosidade na resistência à compressão simples e à tração indireta das misturas solo-cal para 30 dias de cura, respectivamente. Observa-se a variação da porosidade de 39% a 49% para 3%, 5%, 7% e 9% de cal. Se apresenta, também uma relação inversamente proporcional da porosidade com  $q_u$  e  $q_t$ , pois a medida que a porosidade diminui o  $q_u$  e  $q_t$  aumentam, essa relação aplica para os teores de cal dentro da faixa estudada. De acordo à Figura 6 (a) e 6 (b) e aplicando a Equação 1, são encontrados 3 valores médios de porosidade de 39,5, 43,5 e 48,5 correspondentes ao ponto de moldagem da energia modificada (A3), intermediário (A2) e normal (A1), respectivamente. A melhor maneira de caracterizar a variação da porosidade (na faixa estudada) e os resultados da resistência à compressão simples e tração foi através de uma curva linear já que através dela se obtiveram os maiores valores de coeficiente de determinação (desde 0,88 até 0,99).



a) Compressão simples



b) Tração indireta

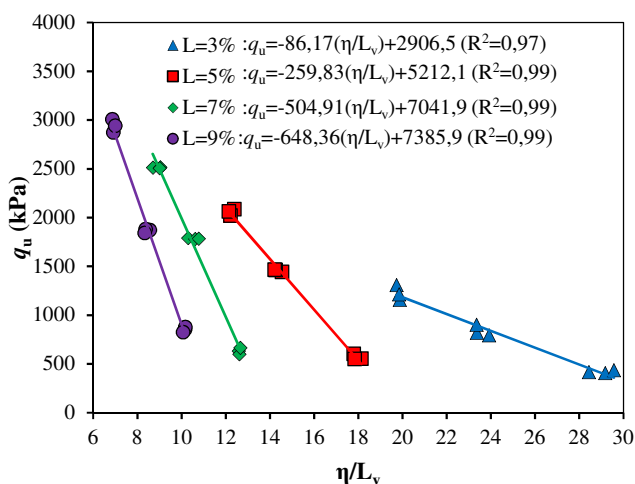
Figura 6 - Influência da porosidade na resistência  $q_u$  e  $q_t$

### 3.4 - Influência da relação porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_v$ ) na resistência à compressão simples e à tração indireta

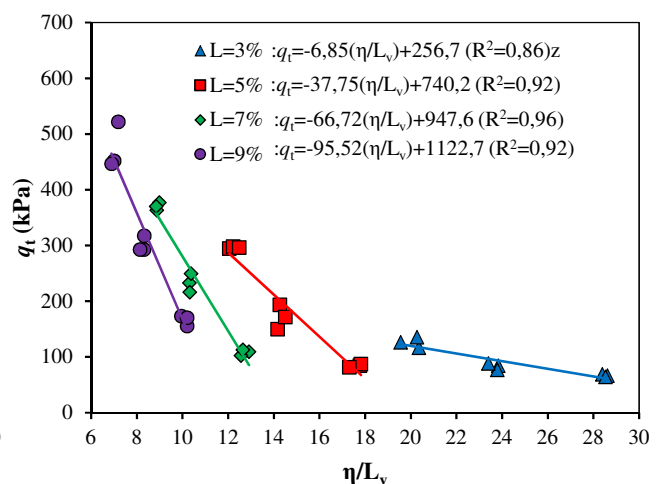
As Figuras 7 (a) e 7 (b) mostram a influência da relação porosidade/teor volumétrico de cal na resistência à compressão simples e à tração indireta para 30 dias de cura, respectivamente. O teor volumétrico de cal ( $L_v$ ) é definido como a razão entre volume cal pelo volume de um corpo de prova (Equação 2). O teor volumétrico aumenta com o aumento do teor de cal enquanto a relação porosidade/teor volumétrico diminui.

$$L_v = \frac{\left( \left( \frac{V_s \gamma_d}{1 + L/100} \left( \frac{L}{100} \right) \right) / \gamma_{sL} \right)}{V_s} \quad [2]$$

Para  $q_t$  e  $q_u$   $\eta/L_v$  varia de 20 a 29,2 para  $L=3\%$ , de 12 a 17,7 para  $L=5\%$ , de 9 a 13 para  $L=7\%$  e finalmente de 6,9 a 10 para  $L=9\%$ , os resultados de  $q_u$  vs  $\eta/L_v$  e  $q_t$  vs  $\eta/L_v$  mostram que com o aumento do teor de cal a variação de  $\eta/L_v$  vai diminuindo, isto ocorre porque os menores teores de cal nos pontos de moldagem representam maior dispersão de  $\eta/L_v$  e poucos ganhos de resistência à compressão simples e à tração como é possível observar nas Figuras 7 (a) e 7 (b). A variação de  $\eta/L_v$  se manteve constante para  $q_u$  e  $q_t$ , assim  $q_u$  e  $q_t$  vai aumentando proporcionalmente ao teor de cal dos corpos de prova. Embora exista uma tendência linear dos pontos para cada teor de cal, os pontos experimentais de todos os teores apresentam uma leve tendência potencial não bem definida.



a) Compressão simples



b) Tração indireta

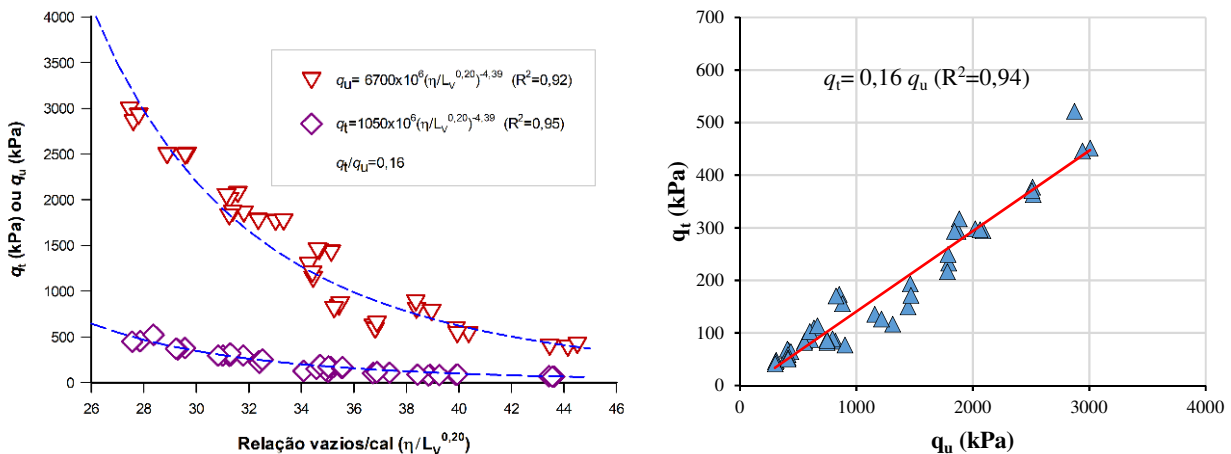
Figura 7 - Influência da relação porosidade/teor volumétrico de cal na resistência  $q_u$  e  $q_t$

### 3.5 - Relação entre a resistência à tração indireta e a resistência à compressão simples

A relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a compressão simples é uma variável muito importante na mecânica de solos cimentados artificialmente, já que com a obtenção de uma das duas resistências se pode fazer uma estimativa da outra. Segundo Consoli et al. (2014) é possível encontrar uma tendência única dos pontos da resistência à compressão e à tração se o teor volumétrico de cal ( $L_v$ ) é ajustado a um expoente. No caso da presente pesquisa o expoente com o qual os pontos se organizam e se obtém os melhores coeficientes de determinação é de 0,20.

Na Figura 8 (a) se pode perceber um aumento potencial da resistência à tração e à compressão das misturas de solo com cal. Assim, é possível estabelecer uma relação entre  $q_t$  e  $q_u$  tendo em consideração a relação  $\eta/L_v^{0,20}$ . O valor de  $q_t/q_u$  encontrado foi de 0,16, ou seja, o valor da tração é 16% do valor da compressão.

Outra forma para encontrar a relação entre a tração indireta e a compressão simples de maneira direta é colocar em um mesmo plano cartesiano os valores correspondentes de  $q_t$  e  $q_u$  das amostras, ou seja, para um teor de cal usado nos ensaios de resistência eram moldados 6 corpos de prova para uma energia de compactação, assim 3 delas eram tomadas para realizar ensaios de compressão e 3 para ensaio de tração. Assim, a Figura 8 (b) mostra uma relação global entre a tração e a compressão para todos os teores de cal e todas as energias de compactação. Observa-se que a relação global de  $q_t$  e  $q_u$  sem depender da relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustado  $\eta/L_v^{0,20}$  é de 0,16 com coeficiente de determinação de 0,94. A relação constante de 0,16 também foi encontrada por Consoli et al. (2012).



a) Relação  $q_t/q_u$  com o uso da relação  $\eta/L_v$

b) Relação  $q_t/q_u$  sem o uso da relação  $\eta/L_v$

Figura 8 - Relação entre a tração e a compressão simples

### 3.6 - Influência da sucção matricial na resistência mecânica das amostras

Depois de realizados os ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral, foi medida a sucção matricial mediante a técnica do papel filtro. Os corpos de prova apresentaram uma variação de  $\pm 0,5\%$  do teor de umidade inicial, estando a saturação compreendida entre 80% e 82,5%. A sucção calculada com o papel filtro apresentou resultados de 1% até 5,5% dos valores da resistência à compressão e tração. Pode-se concluir que para estes valores a sucção não se torna em uma variável relevante para as análises do presente estudo.

## 4 - CONCLUSÕES

Observa-se que a mistura solo-cal é uma solução bastante eficaz para estabilizar solos, principalmente quando o solo encontrado nos locais de obra não atende aos requisitos exigidos para realização de obras de barragens e pavimentação. O uso de cal em solos com baixas capacidades mecânicas é de importância significativa, pois a adição de cal ao solo acrescentou em mais de 4 vezes a resistência à compressão simples e de 6 vezes a resistência à tração do solo usado para a pesquisa.

Existe uma relação direta e proporcional entre o teor de cal usado, o tempo de cura empregado e a resistência à compressão simples e à tração indireta, elevando a resistência gradualmente em curto período de análise; com resultados satisfatórios à compressão simples e à tração. Assim, a resistência à compressão



simples  $q_u$  e tração  $q_t$  teve um aumento linear com o aumento do teor da cal e com o aumento do tempo de cura.

Existe uma relação constante entre tração e compressão simples para o solo estudado com cal em 30 dias de cura igual a 0,16. Em contrapartida, o teor de cal mínimo a ser usado está limitado pelas reações imediatas da cal com o solo e pelo pH.

## AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer o apoio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Curitiba, Brazil). Também querem agradecer às instituições de fomento de pesquisa brasileiras CNPq, CAPES e Fundação Araucária do Paraná pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- American Society For Testing Materials. ASTM D 5102. (1996) - *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures*.
- American Society For Testing Materials. C. 496/C 496M-04. (2004) - Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *American Society for Testing and Materials (ASTM) Committee C*, v. 9.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7175. (2003) - Cal hidratada para argamassas.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182. (2016) - Ensaio de compactação.
- Consoli, N. C., Prietto, P. D. M., Carraro, J. A. H. e Heineck, K. S. (2001) - Behavior of compacted soil-fly ash-carbide lime mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 127, n. 9, 774-782.
- Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L., e Heineck, K. S. (2007) - Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. v. 133, n. 2, 197-205.
- Consoli, N. C., Dalla Rosa Johann, A., Gauer, E. A., Dos Santos, V. R., Moretto, R. L., e Corte, M. B. (2012) - Key parameters for tensile and compressive strength of silt-lime mixtures. *Géotechnique Letters*, 2(3), 81-85.
- Consoli, N. C., Prietto, P. D. M., da Silva Lopes, L., e Winter, D. (2014) - Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil. *Transportation Geotechnics*, 1(3), 129-136.
- Das, B.M. (2000) - *Fundamentals of Geotechnical Engineering*, Brooks/Cole, Pacific.
- Guimarães, J. E. P. (2002) - *A cal – Fundamentos e aplicações na engenharia civil*. 2. ed., São Paulo: Pini. 341p.
- Ingles, O. G. e Metcalf, J. B. (1972) - *Soil Stabilization*. In: Principles and Practice. Sidney: Butterworths. 374p.
- Lima, D. C., Röhm, S. A. e Barbosa, P. S. A. (1993) - *Estabilização dos solos III – mistura solo-cal para fins rodoviários*. 1. ed., Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 46p.
- Marinho, F. A. M. (1995) - *Suction measurement through filter paper technique*. Proc., Unsaturated Soils Seminar. Porto Alegre, Brazil: UFRGS.
- Rogers, C. D. F., Glendinning, S., e Roff, T. E. J. (1997) - Lime modification of clay soils for construction expediency. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering* (Vol. 125, No. 4).