



Uso Sustentável de Resíduo da Indústria da Celulose e Papel na Estabilização de um Solo Expansivo

Jair de Jesús Arrieta Baldovino, MSc

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, yaderbal@hotmail.com

Alexandre Erbs, MSc

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, aleerbs@gmail.com

Danilo Lima, BSc

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, daslima83@gmail.com

Ölaf Graupmann, MSc

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, eugraupmann@yahoo.com.br

Ronaldo Luis dos Santos Izzo, DSc

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, izzo@utfpr.edu.br

Juliana Lundgren Rose, DSc

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, julrose@gmail.com

RESUMO: A resistência à compressão simples e a resistência à tração por compressão diametral foram sistematicamente pesquisados para analisar o desempenho de um solo siltoso da região metropolitana de Curitiba (Brasil) estabilizado com cinza da indústria da produção de papel e com cal dolomítica hidratada, empregando tempos de cura de 14, 28 e 90 dias. Uma série de ensaios de compactação na energia Proctor normal foram realizados para calcular os parâmetros ótimos de compactação das misturas solo-cinza-cal: peso específico seco máximo (γ_{d-max}) e teor umidade ótimo (ω_o). Foram adicionados e utilizados 4 teores de cinza de celulose (5%, 10%, 15% e 20% em relação à massa seca do solo) e um teor fixo de cal (L) de 5% baseado no Consumo Inicial de Cal modificado e estabelecido a partir da interpretação das medidas de pH realizadas em várias misturas solo-cinza-cal. Os resultados demonstram que existe um aumento no teor de umidade ótimo e uma diminuição no peso específico seco máximo das curvas de compactação com o aumento do teor de cinza de celulose. Por outra parte, os ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral revelam que existe um acréscimo nos valores de resistência mecânica das misturas até um teor de cinza de 15%. Finalmente, equações de dosagem que permitem estimar os valores da resistência das misturas foram desenvolvidas baseados em um modelo semiempírico tendo em consideração a massa específica e o volume dos materiais além da energia de compactação.

PALAVRAS-CHAVE: Solo-cinza-cal, compressão simples, tração por compressão diametral, índice porosidade/cal.

1 INTRODUÇÃO

Recentes estudos demonstram a melhoria dos solos da Formação Guabirota usando diferentes estabilizantes. Baldovino et al.

(2018a) estudaram a melhoria de um solo siltoso da FG estabilizado com cal hidratada usando 180 de cura apresentando uma melhora tanto na compressão como na tração. Em seguida, Baldovino et al. (2018b) analisaram os efeitos de



adição de cal de outro solo siltoso da FG usando a energia Proctor normal e 90 dias de cura, os resultados demonstraram um acréscimo na compressão simples e na tração indireta de até 75%. Recentemente Moreira et al. (2019) melhoraram um solo silto-arenoso da FG com cimento e resíduo de telha moída, obtendo aumento na compressão simples, influenciada diretamente pelos vazios e volume de cimento adicionado. Contudo, estudos de estabilização dos solos da FG usando cinza de celulose e cal nem em outros solos ainda não foram realizados.

Por isso, este estudo propõe estudar as propriedades mecânicas de um solo característico da terceira camada da Formação (camada amarela) usando cal hidratada e cinza de celulose, com isto se introduz um novo geomaterial na literatura e se emprega um procedimento alternativo na estabilização dos solos da FG usando um resíduo que pode ser aproveitável na construção civil.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em duas etapas: a primeira foi a realização dos ensaios de caracterização do solo, da cinza de celulose e da cal dolomítica hidratada: granulometria do solo de acordo à norma americana ASTM D2487 (ASTM 2011), limites de Atterberg do solo de acordo às normas brasileiras NBR 7180 (ABNT 2016) e NBR 6459 (ABNT 2016), a massa específica real dos grãos do solo de acordo à norma ASTM D854 (ASTM 2014), massa específica real dos grãos da cinza de celulose e cal hidratada em pó de acordo à norma brasileira NBR 16605 (ABNT 2017) e as propriedades de compactação do solo com os diferentes teores de cinza e cal na energia Proctor normal de acordo à norma brasileira NBR 7182 (ABNT 2016); e a segunda etapa, consistiu-se na moldagem, cura e rompimento dos corpos de prova solo-cinza-cal submetidos a ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral em diferentes tempos de cura.

2.1 Materiais

Um solo siltoso de cor amarela da Formação Guabirotuba (FG), cinza de celulose da indústria da produção de papel, cal dolomítica hidratada e água destilada foram os materiais utilizados na pesquisa. A amostra de solo foi coletada num talude rodoviário a 3 m do nível do terreno (terceira camada da FG) natural no município de São José dos Pinhais, próximo da cidade de Curitiba (Brasil), de maneira manual em estado deformado, evitando uma possível contaminação e em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios. Um solo com características semelhantes da FG de cor vermelha já foi utilizado em estudos prévios por Baldovino et al. (2018b, a) para estabilização com cal hidratada. A cal hidratada foi fornecida por um produtor local, a qual apresenta uma densidade dos grãos de $2,39 \text{ g/cm}^3$ e uma porcentagem passante pela peneira #0,075 mm de 95%.

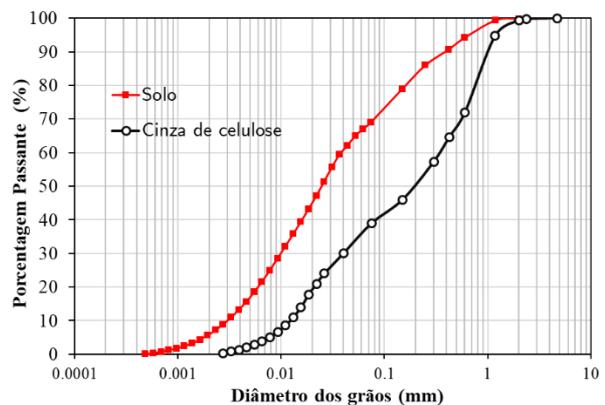


Figura 1. Curva de distribuição granulométrica do solo siltoso e da cinza de celulose

A cinza de celulose foi coletada em uma empresa (Ubicada na cidade de Canoinhas - Santa Catarina/Brasil) que produz papel branco para produção de papel higiênico, nesta fabricação é utilizado papel reciclado no qual recuperam as fibras de celulose das aparas para utilizá-las em seus produtos, descartando assim, parte deste material como resíduos líquidos com alto teor de sólidos, sendo necessário a retirada de grandes quantidades de líquidos do material formando o que é chamado de lodo primário, este lodo é formado por caulim, celulose, traços não significativos de substâncias químicas e água.



Desta forma, classificado como resíduo da indústria de papel e celulose classe II A não inertes conforme norma técnica NBR 10004 (ABNT 2004). Após realizada a retirada da umidade do lodo, é feito o processo de calcinação para que a unidade seja completamente evaporada chegando a uma temperatura em torno de 900° C resultando

assim o produto final que é a cinza utilizada no presente artigo. Finalmente, para a realização de todos os ensaios de caracterização dos solos, das misturas solo-cinza-cal e para a moldagem de corpos de prova foi usada água destilada a 24±3°C para evitar reações não desejadas e limitar o número de variáveis no estudo.

Tabela 1. Propriedades físicas do solo e da cinza de celulose

PROPRIEDADE	VALOR	
	SOLO	CINZA DE CELULOSE
Limite de liquides, %	50,82	-
Limite de plasticidade, %	35,96	-
Índice de plasticidade, %	14,86	Não plástico
Massa específica real dos grãos	2,62	2,31
Areia grossa (0,6 mm < diâmetro < 2 mm), %	5	30
Areia média (0,2 mm < diâmetro < 0,6 mm), %	12	20
Areia fina (0,06 mm < diâmetro < 0,2 mm), %	18	15
Silte (0,002 mm < diâmetro < 0,06 mm), %	60	35
Argila (diâmetro < 0,002 mm), %	5	-
Diâmetro efetivo (D ₁₀), mm	0,003	0,013
Diâmetro médio (D ₅₀), mm	0,038	0,20
Coefficiente de uniformidade (C _u)	8,33	26,92
Coefficiente de curvatura (C _c)	1,33	0,35
Classificação segundo o SUCS	MH	-
UCS- Solo virgem, kPa	104,58	NC (Não calculado)
STS-Solo virgem, kPa	16,62	NC
Relação STS/UCS -Solo virgem	0,16	-
φ- Solo virgem, (°)	26	NC
Coesão- Solo virgem, kPa	23	NC
Color	Amarelo	Cinza marrom

Tabela 2. Propriedades químicas do solo e da cinza de celulose

COMPOSTO	CONCENTRAÇÃO (%)		
	SOLO	CINZA DE CELULOSE	CAL DOLOMÍTICA HIDRATADA
SiO ₂	48,78	8,8	0,70
Al ₂ O ₃	44,51	8,3	0,40
Fe ₂ O ₃	0,61	0,7	0,20
CaO	-	55,6	63,2
MgO	-	0,9	10,4
K ₂ O	0,84	0,2	0,30
Na ₂ O	-	0,1	0,1
TiO ₂	0,92	0,4	0,2
MnO	-	0,1	-
P ₂ O ₅	-	0,2	-
SO ₃	4,12	1	-
SrO	-	0,2	-
Cl	-	0,1	-
ZnO	-	0,1	-
CuO	-	0,1	-
Perda ao fogo	0,22	23,9	24,5



Tabela 3. Propriedades de compactação do solo

SOLO	PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO (kN/m ³)			TEOR DE UMIDADE ÓTIMO (%)		
	Energia Normal	Energia intermediária	Energia Modificada	Energia Normal	Energia intermediária	Energia Modificada
Silte amarelo	13,72	15,43	16,75	26,5	20,5	14,5

A Figura 1 mostra a curva de distribuição granulométrica do solo e da cinza de celulose. Os diâmetros das partículas de solo correspondentes ao 10%, 30%, 50%, 60% e 90% de material passante foram calculados como $d_{10}=0,003$ mm, $d_{30}=0,01$ mm, $d_{50}=0,025$ mm, $d_{60}=0,038$ mm e $d_{90}=0,3$ mm (ver Figura 1). Adicionalmente, o coeficiente de uniformidade (i.e. $C_u=d_{60}/d_{10}$) e o coeficiente de curvatura [i.e. $C_c=(d_{30})^2/(d_{10} \times d_{60})$] foram calculados como $C_u=8,33$ mm e $C_c=1,33$. Para a cinza de celulose, os diâmetros das partículas sólidas correspondentes ao 10%, 30%, 50%, 60% e 90% de material passante foram calculados como $d_{10}=0,013$ mm, $d_{30}=0,03$ mm, $d_{50}=0,2$ mm, $d_{60}=0,35$ mm e $d_{90}=1$ mm, conseqüentemente C_u e C_c foram determinados como 26,92 e 0,35, respectivamente.

A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas do solo e da cinza de celulose. Segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o solo é classificado como um silte elástico arenoso (MH). O solo, de cor amarela apresenta uma porcentagem de areia grossa de 5%; areia média de 12%; areia fina de 18%; silte 60% e de argila de 5%, sendo a porcentagem de silte ($0,002$ mm < ϕ < $0,075$ mm) compõe a maior parcela do solo. Durante os ensaios de limites de Atterberg, foi percebido que a cinza de celulose não apresenta plasticidade enquanto o solo possui uma plasticidade de 14,86% e uma massa específica real dos grãos de $2,62$ g/cm³.

A Tabela 2 exibe a composição química do solo e da cinza determinadas com Fluorescência de Raios-X. As propriedades químicas da cal também mostradas na Tabela 2 foram fornecidas pelo produtor e as físicas foram calculadas no laboratório. Nota-se que o solo é composto principalmente por sílica e alumina com pequena quantidade de óxido sulfúrico.

A Tabela 3 apresenta as propriedades de compactação do solo nas três energias de acordo com a norma brasileira NBR 7182 (ABNT 2016). Como típico de solos finos, encontrou-se um aumento no peso específico seco máximo (γ_{d-max}) e uma diminuição no teor de umidade ótimo (ω_o) devido ao aumento de energia. O ponto máximo alcançado na energia modificada, segundo a Tabela 3, encontra-se em $\gamma_{d-max}=16,75$ kN/m³ e $\omega_o=14,5\%$.

2.2 Fixação dos teores de cinza, teor de cal, tempo de cura e pontos de moldagem

Para a determinação de um teor mínimo de cal (L) foi utilizado o método Eades e Grim (1960), também chamado “*Optimum Lime Content*” ou OLC. Este método consiste em adicionar cal à mistura e realizar medidas do pH da mesma. Pelo método do OLC, o teor mínimo de cal é aquele que leva a um valor máximo e constante de pH aproximado de 12,4 que representa o teor de cal para satisfazer as reações iniciais e troca catiônica. O método consiste em: 20 g de solo-cinza estabilizado peneirado passante pela peneira 425 μ m é misturado com 100 ml de água destilada e agitado por 30 segundos, e depois por mais 30 segundos a cada 10 min por um total de uma hora. O pH da mistura resultante é então testado com um medidor de pH calibrado para uma solução padrão de pH=12. O OLC corresponde ao teor mínimo de cal necessário para produzir um pH de água no solo de 12,4, nomeadamente uma solução saturada de cal. Embora os testes sejam conduzidos na fração fina do material estabilizado, ou seja, aquela fração mais reativa à estabilização de cal, presume-se que os resultados se apliquem a toda a classificação do material (Ciancio et al. 2014).



Tabela 4. Definição dos pontos de moldagem

MISTURA	γ_{d-max} (kN/m ³)	ω_o (%)	GRAU DE SATURAÇÃO/%
Solo (Controle)	13,72	26,5	0,75
Solo+5%L+5% Cinza	13,45	28	0,78
Solo+5%L+15% Cinza	13,25	30	0,82
Solo+5%L+20% Cinza	12,75	32	0,81
Solo+5%L+25% Cinza	12,00	34	0,77

Foram adicionados teores de cal entre 3 e 7% em relação a várias misturas de solo-cinza (usando teores de cinza entre 5 e 20% e solo passantes na peneira 425 μ m). As misturas solo-cinza alcançaram um valor próximo a 12,4 de pH quando adicionado 5% de cal em pó até uma porcentagem de 20% de cinza. Assim, o teor de cal escolhido foi de 5% em referência à massa seca do solo e os teores de cinza foram escolhidos como 5%, 10%, 15% e 20% também em referência à massa seca do solo. Desta forma foram realizados 4 misturas solo-cal-cinza: Solo+5%cal+5%cinza, Solo+5%cal+10%cinza, Solo+5%cal+15%cinza e Solo+5%cal+20%cinza; e uma mistura de controle do solo em estado virgem (i.e. sem adição de cal nem de cinza). Devido a que as reações pozolânicas solo-cal-cinza se dão lentamente, foram escolhidos tempos de cura até 90-d (dias) sendo assim propostos 3 tempos para avaliar a resistência mecânica das misturas estudadas: 14-d, 28-d e 90-d.

Após a fixação dos teores de cinza e cal e os tempos de cura, procedeu-se com a realização dos ensaios de compactação na energia do Proctor normal [norma brasileira NBR 7182 (ABNT 2016)] de cada mistura para estabelecer os pontos de moldagem [i.e. peso específico seco máximo e teor de umidade ótimo de cada mistura]. A Figura 2 apresenta a curva de compactação do solo, a curva de cada mistura solo-cinza-cal e as linhas de saturação (i.e. 100%) do solo e da mistura com maior adição de cinza e cal (5%L+20% cinza). Em referência a esses resultados, a Tabela 4 estabelece os critérios de moldagem para cada mistura tendo em consideração o ponto ótimo de cada curva [γ_{d-max} , ω_o e grau de saturação/%]. Estes pontos de moldagem são definidos estrategicamente considerando possíveis condições de campo, entre 13,80 kN/m³ e 11,80 kN/m³, com uma

variação do peso específico seco. Pontos de moldagem estratégicos para estudar solos melhorados já foram utilizados anteriormente por Rios et al. (2012), Festugato et al. (2017) e Consoli et al. (2014).

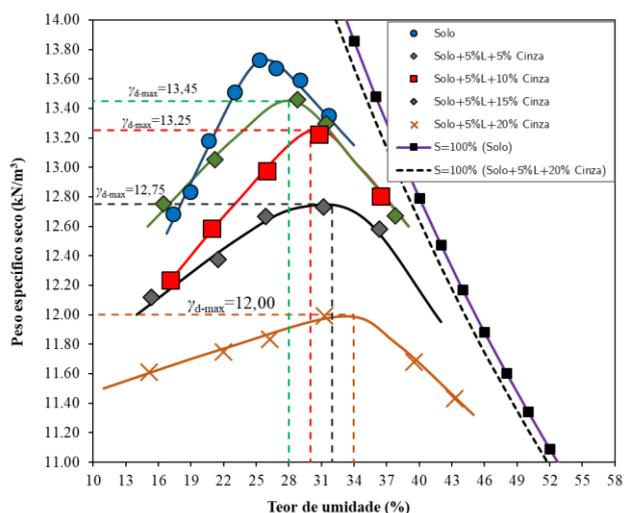


Figura 2. Curva de compactação do solo e das misturas solo-cinza de celulose-cal

2.3 Moldagem dos corpos de prova

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. Depois da coleta em campo, o solo foi seco, totalmente, em estufa à temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$, e colocado em porções uniformemente distribuídas para ser misturado com a cinza e posteriormente com a cal (em 5%). Adicionou-se a quantidade de cinza seca em referência ao peso seco da amostra do solo em quatro teores diferentes de adição (5%, 10%, 15% e 20%) de acordo aos ensaios de pH e OLC. Logo depois, adicionou-se a quantidade de cal em pó em referência à massa seca do solo com um teor fixo de 5%.

Realizou-se a mistura do com a cinza e a cal



de modo que as misturas ficassem as mais homogêneas possíveis. Em seguida, foi adicionada uma porcentagem de água em peso, sendo esta porcentagem referente ao teor de umidade ótimo dos pontos de moldagem estabelecidos na Tabela 4 (ω_o). A mistura do solo-cinza-cal com a água destilada foi realizada em um período não superior a 5 minutos, com isto tentando minimizar as reações da cal com a água antes do processo de moldagem dos corpos de prova. As amostras para a moldagem dos corpos de prova foram compactadas estaticamente em três camadas com um molde de aço inox com diâmetro interno de 50 mm, altura de 100 mm e espessura de 5 mm, nas condições de compactação mostradas na Tabela 4. Para assegurar o peso específico seco aparente de moldagem (γ_{d-max}) foi realizado o cálculo do volume do molde e do peso de mistura úmida necessários para cada corpo de prova. Após esses cálculos, foi pesada a quantidade necessária de material para cada corpo de prova. A moldagem foi feita com a ajuda de uma prensa hidráulica manual. Depois de cada processo de moldagem, três amostras da mistura eram tomadas para medir o teor de umidade em estufa durante 24 horas para assegurar o valor de ω_o .

Os corpos de prova foram pesados em uma balança de precisão de 0,01 g e as dimensões do mesmo eram medidas com o uso de um paquímetro de 0,1 mm de erro. Os corpos de provas extraídos do molde foram envolvidos com plástico filme transparente para manter o teor de umidade. Por último, os corpos de prova foram armazenados em câmara úmida para processo de cura durante 14, 28 e 90 dias (a temperatura média de 24°C) para prevenir mudanças significativas de umidade até o dia do ensaio. As amostras tinham que respeitar os seguintes erros máximos para serem usadas nos ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral: dimensões das amostras com diâmetro de $\pm 0,5$ mm e altura de ± 1 mm, peso específico aparente seco (γ_d) de $\pm 1\%$ e teor de umidade (ω) de $\pm 0,5\%$. Os valores de q_u e q_t são expressos em função da porosidade inicial de moldagem (η) para qualquer teor de cal (L), teor

de cinza de celulose (C_i) e peso específico seco aparente de moldagem, e é calculada com a Equação (Consoli et al. 2014; Baldovino et al. 2018a):

$$\eta = 100 - 100 \left[\left(\frac{\gamma_d}{1 + L + C_i} \right) \left(\frac{1}{\gamma_{SS}} + \frac{L}{\gamma_{SL}} + \frac{C_i}{\gamma_{SCi}} \right) \right] \quad (1)$$

Onde γ_{SS} , γ_{SL} e γ_{SCi} são a massa específica real dos grãos do solo, da cal e da cinza, respectivamente. γ_d é o peso específico seco de moldagem. Para cada ponto de moldagem ou mistura foram moldados 6 corpos de prova (3 para compressão e 3 para tração). No total, foram compactadas 72 amostras para estes dois ensaios.

2.4 Ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral

Os procedimentos dos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral seguiram as normas brasileiras NBR 5739 (ABNT 2018) e NBR 7222 (ABNT 2011), respectivamente. A resistência a compressão simples é o valor da carga máxima de ruptura do material ou o valor da pressão correspondente à carga na qual ocorre deformação específica do corpo de prova de solo de 20%, naqueles casos em que a curva tensão-deformação axial não apresenta um pico máximo.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 4 apresenta os resultados da influência dos teores de cinza de celulose no peso específico seco máximo (PESM ou γ_{d-max}) e no teor de umidade ótimo (TUO ou ω_o) das curvas de compactação das misturas mostradas na Figura 2 e detalhado na Tabela 4 (obtidas da compactação na energia Proctor normal). Nota-se uma diminuição no peso específico seco máximo conforme é adicionado a quantidade seca de cinza de celulose. Em adição, um aumento no teor de umidade ótimo também é



encontrado. Uma representativa mudança no peso máximo seco e umidade ótima foi observada para as amostras de solo estabilizadas com material de celulose e cal até 20% e 5%, respectivamente. O aumento da cinza de celulose desde 5% para 20% causou grandes variações nas características de compactação das amostras de solo-5% cal, diminuindo o peso específico seco máximo em 14% e aumentando a TOU em 30% em referência à curva de compactação do solo em estado virgem. Este comportamento deve-se à adição de materiais finos (cinza e cal) e com densidade menor ($2,39 \text{ g/cm}^3$ para a cal e $2,31 \text{ g/cm}^3$ para a cinza) em referência ao solo ($2,62 \text{ g/cm}^3$) que preencheram os vazios entre as maiores partículas do solo silto-arenoso e levaram a diminuir o peso dos sólidos na unidade de volume.

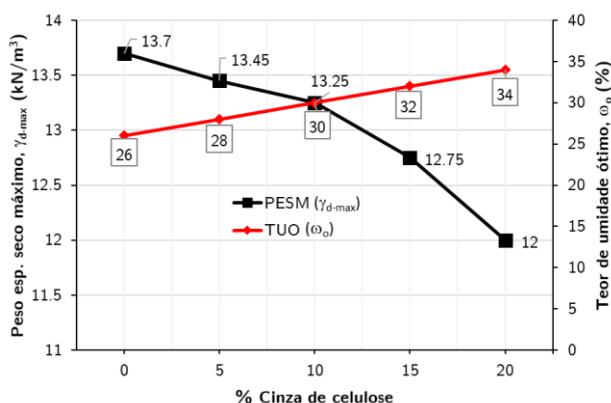


Figura 4. Influência do teor de cinza nas propriedades de compactação (Peso específico seco máximo-PESM e Teor de umidade ótimo-TUO) das misturas solo-cinza-cal

A Figura 5 mostra os resultados da influência da adição de cinza de celulose na resistência à compressão simples (q_u) para 14-d, 28-d e 90-d de cura. Para 14-d, 28-d e 90-d de cura, a resistência à compressão simples aumentou de maneira proporcional desde 5 até 15% de adição de cinza. Depois de 15% cinza (até 20% de cinza), os valores de q_u diminuíram em média em 35%. Em 14-d cura, q_u aumentou em 25%, desde 5% até 20% de cinza, para 28-d e 90-d cura o acréscimo de q_u foi de 30% e 33%, respectivamente. De forma geral, se obtiveram as máximas resistências q_u quando adicionado

15% cinza na mistura solo+5%L para todos os tempos de cura.

A Figura 6 apresenta a influência dos teores 5%, 10%, 15% e 20% de cinza de celulose na resistência à tração por compressão diametral (q_t) para os tempos de cura de 14-d, 28-d e 90-d. De igual forma que para a compressão simples, a tração indireta aumentou proporcionalmente até 15% cinza e caiu desde este teor até 20% de cinza. Descrevendo a diminuição de q_t desde 15%-20% de cinza para cada tempo de cura, se tem que para 14-d os valores de q_t diminuíram em 30%, para 28-d q_t diminuiu em 40% e finalmente para 90-d a resistência à tração caiu 35%. A diminuição da resistência mecânica (tanto compressão como tração) depois de 15% de adição de cinza de celulose deve-se principalmente a dois fatores: primeiro, a influência da porosidade [Equação (1)] e dos vazios da mistura solo-cinza-cal não exerceu maior atuação na resistência q_u e à tração indireta q_t do que o teor volumétrico de cal usado (i.e. quantidade de cal inserida no volume de solo para cada corpo de prova), de tal forma que um aumento na porosidade necessita de um incremento proporcionalmente maior no teor de cal, a fim de compensar o aumento dos vazios devido à falta de compactação e manter a resistência constante, e segundo, de acordo à composição química da cinza de celulose mostrada na Tabela 2 uma parcela do material é inerte e inviabiliza reações pozolânicas na matriz das misturas além de ser um material ligeiramente menos pesado que o solo e que a cal, com uma densidade calculada de $2,31 \text{ g/cm}^3$. O anterior somado ao fato de estar compactando em um peso específico seco menor em referência às outras misturas (i.e. solo-5%L-5%Cinza, solo-5%L-10%Cinza e solo-5%L-15%Cinza) compreende que o teor de 20% de cinza seja inviável já que diminuiu a resistência da mistura. Assim, uma análise da possível aplicação das misturas solo-cinza-cal em obras de engenharia geotécnica deve formular-se com a utilização de até 15% de cinza, sendo esta porcentagem a qual potencializa as maiores resistências.

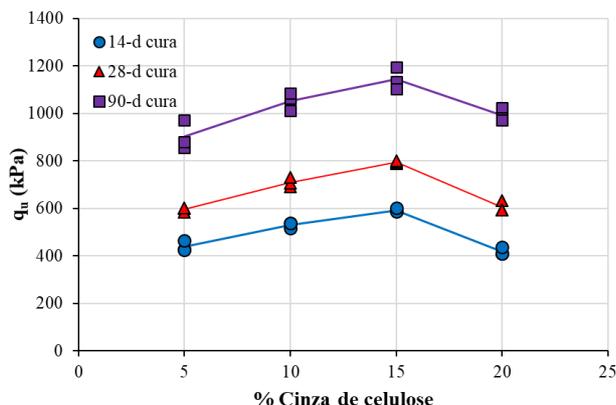


Figura 5. Influência do teor de cinza de celulose na resistência à compressão simples na mistura solo-5% cal após 14, 28 e 90 dias de cura.

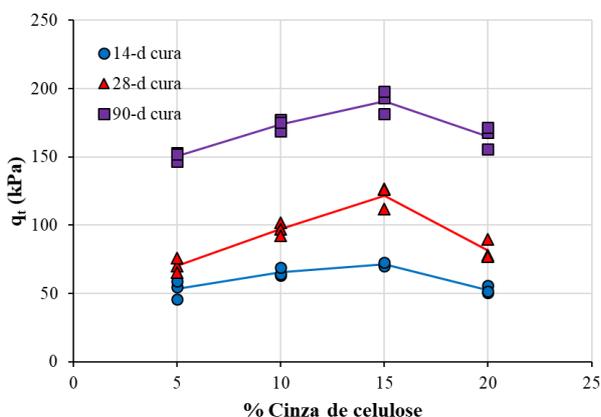


Figura 6. Influência do teor de cinza de celulose na resistência à tração por compressão diametral na mistura solo-5% cal após 14, 28 e 90 dias de cura.

A relação de aumento de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral é uma variável muito importante na mecânica de solos cimentados artificialmente, já que com a obtenção de uma fórmula geral de dosagem em função do tempo de cura e do teor de cinza/cal para o solo estudado, pode-se calcular a quantidade de cinza, cal, grau de compactação e o tempo de cura que se precisa empregar sobre o solo para obter uma resistência à compressão e tração desejada experimentalmente. Neste caso, aplica-se um modelo semiempírico baseado nas relações de fase peso-volume das misturas até uma porcentagem de 15% de cinza, onde se obtém as maiores resistências mecânicas. O modelo está

baseado no índice porosidade/teor volumétrico de cal. A porosidade das misturas pode ser calculada usando a Equação (1) e o teor volumétrico de cal 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.

$$L_{iv} = \frac{100 \left(\left(\frac{\gamma_d V_s}{1 + L + C_i} (L) \right) / \gamma_{SL} \right)}{V_s} \quad (2)$$

Onde V_s é o volume do corpo de prova solo-cinza-cal (aproximadamente 196 cm^3). Nas Figuras 7a-7b apresenta-se a influência da relação porosidade/teor volumétrico de cal na resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral para as amostras com 14-d, 28-d e 90-d de cura. Segundo Consoli et al. (2014) é possível encontrar uma tendência única dos pontos das Figuras 7a-7b elevando o teor volumétrico de cal (L_{iv}) a um expoente. No caso da presente pesquisa o expoente com o qual os pontos se organizam (e se obtém o melhor coeficiente de determinação) é de 1,00.

Se as equações (das Figuras 7a-7b) que controlam q_u e q_t são divididas pela expressão $10^2(\eta/L_{iv})^{-0,50}$ se obtém uma constante que aumenta com o tempo de cura. A Figura 8 apresenta a evolução da resistência à tração e à compressão simples desde 14 até 90 dias de cura. O aumento do tempo de cura produz um aumento nos valores de q_t e q_u mostrando um aumento potencial com valores de coeficientes de determinação de $R^2=0,99$ tanto para q_t como para q_u . Assim, uma equação de dosagem para q_t e q_u pode ser proposta com a relação η/L_{iv} e com o tempo de cura (t). As expressões de dosagem para q_t e q_u são mostradas nas Eq. (3) e Eq. (4), respectivamente. Estas equações de dosagem podem ser empregadas dentre os limites de cinza de celulose, cal e grau de compactação usados nesta pesquisa. Se as Equações que controlam q_t e q_u mostradas na Figura 7a-7b para cada tempo de cura são divididas (i.e. q_t/q_u) obtém-se constantes de 0,12-0,14 e 0,16 para 14, 28 e 90-



dias de cura, respectivamente. Isto é, o valor da tração das misturas sempre é 12-16% do valor da compressão simples.

$$q_t = 41,88 \times t^{0,36} \left[\frac{\eta}{L_{iv}} \right]^{-0,50} \quad (R^2=0,99) \quad (3)$$

$$q_u = 531,21 \times t^{0,53} \left[\frac{\eta}{L_{iv}} \right]^{-0,50} \quad (R^2=0,99) \quad (4)$$

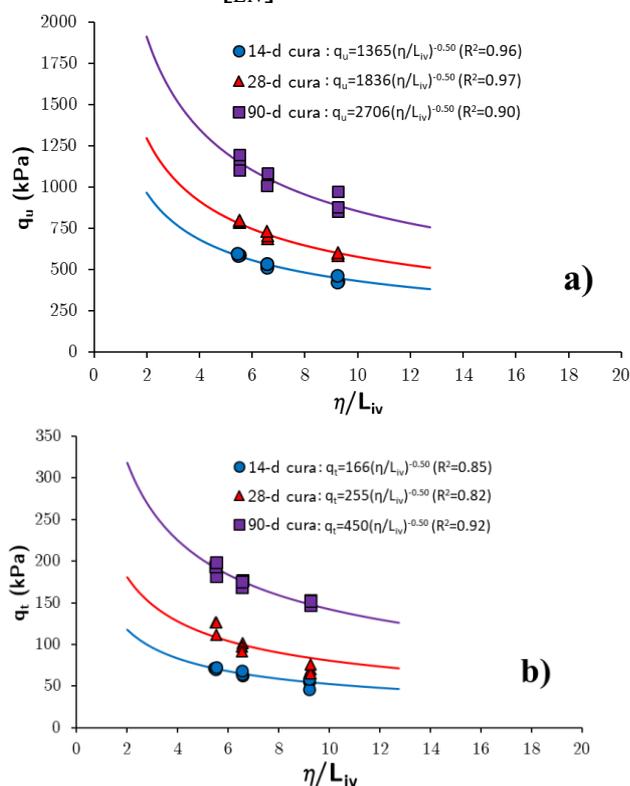


Figura 7. Influência da relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}) na resistência mecânica das misturas até 15% de cinza de celulose para os tempos de cura de 14-d, 28-d e 90-d. (a) η/L_{iv} vs. q_u . (b) η/L_{iv} vs. q_t .

4 CONCLUSÕES

De acordo ao programa experimental e as análises dos resultados, as seguintes conclusões podem ser estabelecidas:

-A adição de cinza de celulose e cal no silte amarelo da FG significou um aumento na resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral até uma porcentagem de 15% de cinza. A melhor maneira de representar esse aumento foi através de uma tendência linear.

- O aumento no peso específico seco aparente de moldagem, o aumento do tempo de cura, a diminuição dos vazios (porosidade) e o aumento do teor volumétrico de cal em volume fez aumentar a resistência das misturas.

-A relação porosidade/teor volumétrico de cal η/L_{iv} se mostrou ser um parâmetro e índice eficiente para estudar a evolução de q_u e q_t das misturas solo-cinza-cal. Para melhorar a tendência dos pontos experimentais, η/L_{iv} teve que ajustar-se a um expoente de 1,00 e -0,50. Assim, foi possível calcular uma equação de dosagem para q_u e q_t do silte estabilizado obtendo ajustes de 99%.

-Em termos de acréscimos de resistência, o silte amarelo obteve maiores resistências à tração e à compressão simples para porcentagens de 15% de cinza e 90-d de cura. Assim, com a relação η/L_{iv} foi possível estabelecer uma relação entre q_u e q_t (q_t/q_u) para as misturas dependendo do tempo de cura, sendo essa relação de $q_t/q_u = 0,12, 0,14$ e $0,16$ para 14-d, 28-d e 90-d dias, respectivamente.

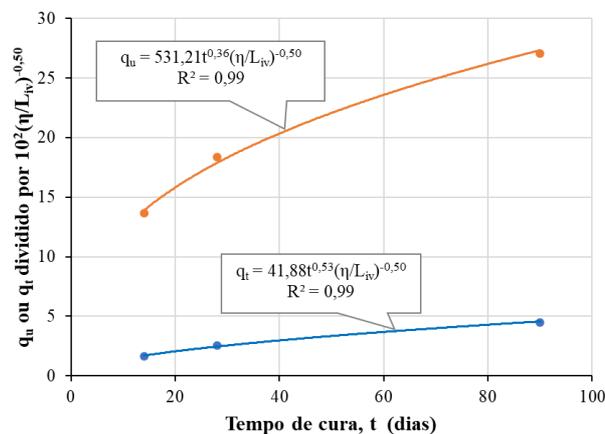


Figura 8. Equações de dosagem para a resistência à compressão simples e tração por compressão diametral usando os tempos de cura 14-d, 28-d e 90-d e a relação $10^2(\eta/L_{iv})^{-0,50}$ dividido pelos valores das constantes A_i correspondentes a cada tempo de cura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação Araucária do Paraná, da CAPES e do CNPq-Brasil.



REFERÊNCIAS

- ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Solo — Determinação do limite de plasticidade. NBR 7180: 2016, Rio de Janeiro, Brasil.
- ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Solo-Determinação do limite de liquidez. NBR 6459: 2016. Rio de Janeiro, Brasil.
- ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Solo - Ensaio de compactação. NBR 7182: 2016, Rio de Janeiro, Brasil.
- ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2007). Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. NBR 5739: 2018, Rio de Janeiro, Brasil.
- ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. NBR 7222: 2011, Rio de Janeiro, Brasil.
- ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. NBR 16605: 2017, Rio de Janeiro, Brasil.
- ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Resíduos sólidos - Classificação. NBR 10004: 2004, Rio de Janeiro, Brasil.
- ASTM (2011) ASTM D 2487 - 11 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM Int West Conshohocken, Pa D5521-5:1–5. doi: 10.1520/D2487-11.
- ASTM (2014) ASTM D 854 - 14 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer 1. ASTM Int West Conshohocken, Pa
- Baldovino JA, Moreira EB, Izzo RL dos S, Rose JL (2018a) Empirical Relationships with Unconfined Compressive Strength and Split Tensile Strength for the Long Term of a Lime-Treated Silty Soil. *J Mater Civ Eng* 30:6018008. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002378
- Baldovino JA, Moreira EB, Teixeira W, et al (2018b) Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil. *J Rock Mech Geotech Eng* 10:188–194. doi: 10.1016/j.jrmge.2017.10.001
- Ciancio D, Beckett CTS, Carraro JAH (2014) Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth. *Constr Build Mater* 53:59–65. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.077
- Consoli NC, Prietto PDM, da Silva Lopes L, Winter D (2014) Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil. *Transp Geotech* 1:129–136. doi: 10.1016/j.trgeo.2014.07.005
- Eades JL, Grim RE (1960) A Quick Test to Determine Lime Requirements For Lime Stabilization. In: the 45th Annual Meeting of the committee on Lime and Lime-Fly Ash Stabilization. pp 61–72
- Festugato L, Menger E, Benezra F, et al (2017) Fibre-reinforced cemented soils compressive and tensile strength assessment as a function of filament length. *Geotext Geomembranes* 45:77–82. doi: 10.1016/j.geotextmem.2016.09.001
- Moreira EB, Baldovino JA, Rose JL, Luis dos Santos Izzo R (2019) Effects of porosity, dry unit weight, cement content and void/cement ratio on unconfined compressive strength of roof tile waste-silty soil mixtures. *J Rock Mech Geotech Eng* 11:369–378. doi: 10.1016/j.jrmge.2018.04.015
- Rios S, Viana da Fonseca A, Baudet BA (2012) Effect of the Porosity/Cement Ratio on the Compression of Cemented Soil. *J Geotech Geoenvironmental Eng* 138:1422–1426. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000698