

## Influência de Cinza Volante na Resistência de um Solo Argiloso Estabilizado com Cal

Bruno Karasiak Meneguz

Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, meneguzbruno@gmail.com

Helena Paula Nierwinski

Professora adjunta, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, helena.paula@ufsc.br

Bianca C. Caetani

Mestranda do curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, bibicaetani@gmail.com

**RESUMO:** As cinzas volantes obtidas em centrais termoelétricas apresentam um desafio em relação à sua disposição final e consequente impacto ambiental. No entanto, esses resíduos podem ser reaproveitados como agentes estabilizadores de solo. A técnica de tratamento do solo com cinzas volantes e cal é um método atraente quando o projeto requer melhoria do solo local para fins de construção. Pode ser usado para criar bases estabilizadas sob pavimentos, camadas de suporte para fundações rasas ou para reforçar taludes em problemas de estabilidade. Estudos mostram que existe uma correlação única que controla a resistência das misturas compactadas de solo, cinza volante e cal. Usando esta relação, é possível determinar a quantidade adequada de cal e cinzas volantes, bem como o esforço de compactação necessário para criar uma mistura que atenda aos requisitos de resistência de um projeto com um custo ideal. O presente estudo avalia a resistência à compressão simples (RCS) de um solo argiloso tratado com três teores de cal (3, 5 e 7%) e três porcentagens de cinza volante (0%, 12,5% e 25,0%), sendo testado quanto à resistência à compressão simples (RCS) em três porosidades diferentes e um tempo de cura de 28 dias. Adicionalmente, foi realizada uma caracterização físico-química e mineralógica da cal e das cinzas volantes por meio de granulometria a laser e análise de difração de raios X (DRX). Os resultados mostram que a resistência à compressão simples (RCS) aumentou com a quantidade de cal e cinza volante para os percentuais testados e que estes parâmetros, bem como a porosidade da mistura desempenham um papel fundamental na avaliação da resistência alvo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cinza volante; cal; Ensaio de compressão simples; Melhoramento de solo

**ABSTRACT:** Fly ash obtained from power stations poses challenges for its disposal and subsequent environmental impact. However, these waste materials can be repurposed to improve soil stability. The technique of treating soil with fly ash and lime is an attractive method when the project requires improvement of the local soil for construction purposes. It can be used to create stabilized bases under pavements, support layers for shallow foundations, or to strengthen slopes in slope stability problems. It has been discovered that there is a unique correlation that controls the strength of the compacted soil-fly ash-lime mixtures that have been studied. Using this relationship, it's possible to determine the appropriate amount of lime and fly ash, as well as the compaction effort needed to create a mixture that meets the strength requirements of a project at the optimum cost. The present study evaluates the unconfined compressive strength (UCS) of a clayey soil treated with three levels (3, 5 and 7%) of lime and three percentages of fly ash (0%, 12.5% and 25.0%), being tested for unconfined compressive strength (UCS) at three different porosities and a curing time of 28 days. Additionally, a physical-chemical and mineralogical characterization of the lime and fly ash was carried out using X-ray diffraction (XRD) analysis. The results show that the unconfined compressive strength (UCS) increased with the amount of lime and fly ash for the percentages tested and that these parameters, as well as the porosity of the mixture, play a fundamental role in evaluating the target resistance.

**KEYWORDS:** Fly ash; Lime; Unconfined compression tests; soil improvement

## 1 INTRODUÇÃO

A cinza volante é um subproduto industrial gerado durante a combustão do carvão em usinas termelétricas. Ainda de acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE, 2020), as centrais elétricas a carvão em todo o mundo produzem quase 25% das necessidades de energia primária do mundo, sendo que mais de 65% das cinzas volantes produzidas no mundo são descartadas em aterros sanitários. Ao longo das últimas décadas, a cinza volante tem sido apontada como um resíduo sólido problemático devido aos métodos convencionais de eliminação da mesma, uma vez que contaminaram e degradaram terras aráveis em todo o mundo (Barnes e Sear, 2006). Dessa forma, encontrar aplicações viáveis deste material não só é uma conveniência como uma necessidade (AIE, 2020).

Composta principalmente por sílica, alumina e ferro, a cinza volante exibe características físicas e químicas que a tornam um candidato atrativo para a estabilização de solos e construção de infraestrutura (Kim e Prezzi 2008). Estudos mostram que a adição de cinza volante à solos coesivos resulta no aumento da resistência mecânica dos mesmos (Barnes e Sear, 2006; Turan et al., 2022). No entanto, essa melhora pode não ser suficiente, sendo, assim, necessário o uso concomitante, mas em menor quantidade, de outros aditivos, como a cal ou o cimento (Dalla Rosa, 2009; Consoli et al., 2014a, Consoli et al., 2016; Deepak et al., 2015).

A presente investigação teve como objetivo encontrar uma solução sustentável para a utilização da cinza volante, oferecendo tanto uma solução técnica viável e econômica para aumentar a resistência de um dado solo argiloso, assim como reduzindo os problemas associados à deposição da cinza volante em aterros.

## 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi realizado em duas partes. Primeiramente foi realizada a caracterização do solo e realizados ensaios de difração de raios X do solo, cal e cinza volante. Em seguida, foram confeccionados corpos de prova com diferentes proporções de cal e cinza volante e diferentes porosidade, sendo realizados ensaios de compressão não confinados para verificação da resistência mecânica destas misturas, conforme discutido abaixo.

### 2.1 Caracterização dos Materiais

O solo utilizado no presente estudo, é derivado de granito intemperizado e foi obtido em Florianópolis-SC, no sul do Brasil. Os resultados dos ensaios de caracterização do solo são apresentados na Figura 1. O solo pode ser classificado, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos, como CH, argila de plasticidade média a alta. Pela classificação do *Highway Research Board*, adotada pela AASHTO (2012), como A-7-5, solo argiloso com comportamento geral como subleito fraco a pobre.

Para as misturas de solo e cinza foram realizados apenas ensaios de compactação, assim como para o solo sem aditivos, conforme resultados apresentados na Figura 1. Nela pode-se observar as curvas de compactação para o solo com 0% de cinza volante e para o solo com 25% de cinza volante. Ambos os ensaios de compactação foram realizados sob energia Proctor Normal, sem adição de cal.

O solo sem aditivos apresentou umidade ótima de 18,5% e peso específico aparente seco de  $1,72 \text{ g/m}^3$ , enquanto que o solo com 25% de cinza volante apresentou a mesma umidade ótima que a amostra de solo, porém com menor peso específico aparente seco ( $1,66 \text{ g/m}^3$ ). Os trabalhos de Turan *et al.* (2022) e Dalla Rosa (2009) também observaram uma redução do peso específico aparente seco ao se acrescentar cinza volante ao solo, porém, diferente do que foi observado nesse trabalho, a adição de cinza volante ao solo causou um aumento no teor de umidade ótima. Os autores também utilizaram a energia Proctor Normal para os ensaios de compactação.

A cinza volante utilizada nesta pesquisa é oriunda da Usina Termelétrica Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo, no sul do estado de Santa Catarina. A cal utilizada é uma cal dolomítica comercial.

Ensaio	Resultados
LL (%)	61
LP (%)	35
IP (%)	26
G (g/cm <sup>3</sup> )	2,65
Argila (%)	25,00
Silte (%)	20,00
Areia Fina (%)	12,00
Areia Média (%)	8,00
Areia Grossa (%)	18,00
Pedregulho Fino (%)	17,00

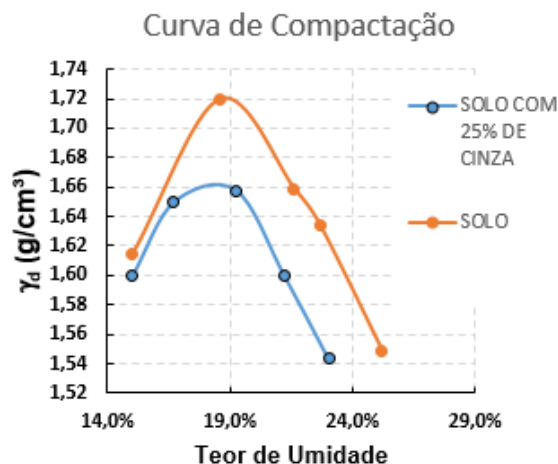


Figura 1 – Propriedades dos solos e curvas de Compactação (energia Proctor normal) para o solo e solo com 25% de cinza.

Fonte: elaborado pelo autor.

### 2.1.1 Ensaio de Difração de Raio-X

Afim de melhor entender a composição química e mineralógica dos materiais estudados foi realizado o ensaio de difração de raio X. Através dos dados obtidos para a fração de argila do solo, determinou-se que a mesma é composta de 66,3% de caulinita, 12,3% de quartzo e 22,5% de materiais não cristalinos (amorfos). A cal dolomítica apresenta teores de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio bem parecidos, 39,5% e 35,5%, respectivamente, além de 15,5% de carbonato de cálcio, mostrando uma calcinação incompleta do calcário, além de 3% de quartzo e 6,6% de óxido de magnésio. A maior parte da cinza volante está na fase amorfa (61,6%), não permitindo estimar sua composição exata através deste ensaio. Além da fase amorfa, observa-se que a cinza volante estudada é composta de 23,1% de mulita (AlSiO), 13,2% de quartzo (SiO<sub>2</sub>), 1,5% de silicato de cálcio e alumínio e 0,5% de óxido de ferro (hematita).

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Para os ensaios de compressão simples foram utilizados corpos de prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Após a pesagem, os componentes secos (solo, cal e cinza volante) foram misturados até a mistura ficar uniforme, sendo os teores de cal 3, 5 e 7% em relação à massa de solo seco. A água foi então adicionada até obter uma pasta homogênea. A quantidade de cal para cada corpo de prova foi calculada com base na massa de solo seco, em substituição à massa de solo seca.

Após a preparação do material, foram retiradas três pequenas porções para determinação do teor de umidade e a mistura foi armazenada em recipiente coberto para evitar perda de umidade antes da compactação. O tempo necessário para preparar (misturar e compactar) cada amostra foi inferior a 1 hora.

As amostras foram então compactadas estaticamente em três camadas (cada camada tinha sua altura controlada - 1/3 da amostra por camada) em um molde bipartido lubrificado de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, de modo que cada camada atingisse o peso unitário seco especificado. Foram utilizados os valores do ensaio de compactação apresentados na Figura 1 para a determinação dos três valores de pesos específicos utilizados na pesquisa (1,5, 1,6 e 1,7 g/cm<sup>3</sup>).

Após a moldagem, os corpos de prova foram imediatamente extraídos do molde bipartido, pesados e medidos com precisão de 0,5 g e 0,5 mm, respectivamente. As tolerâncias adotadas para aceitação dos corpos de prova foram as seguintes: peso unitário seco ( $\gamma_d$ ) dentro de  $\pm 2\%$  do valor alvo; teor de água ( $\omega\%$ ) dentro de  $\pm 1,0\%$ ; diâmetro dentro de  $\pm 0,5$  mm; e altura dentro de  $\pm 1$  mm. Os corpos de prova foram armazenados e

curados, dentro de sacos plásticos para evitar variações significativas no teor de água, em sala úmida a  $25 \pm 2$  °C. Os autores não observaram quaisquer alterações de volume a longo prazo durante o período de cura.

É importante ressaltar que o peso unitário seco dos corpos de prova foi calculado como o peso seco do solo e da cal dividido pelo volume total do corpo de prova. Para manter constante o peso unitário seco dos corpos de prova com o aumento do teor de cal, uma pequena porção do solo foi substituída por cal. Como o peso específico do calcário (2,55) é menor que o peso específico do solo (2,65), para o cálculo do índice de vazios e da porosidade foi utilizado um peso específico composto baseado nas proporções do solo e da cal.

### 2.2.2 Ensaios de compressão simples

Ensaios de compressão simples têm sido utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura para verificar a eficácia da estabilização com cal e também para avaliar a importância absoluta e relativa dos diversos fatores que controlam a resistência dos solos tratados com cal. Uma das razões para isso é a experiência acumulada com este tipo de ensaio em concretos e argamassas. O teste também é simples e rápido, ao mesmo tempo que é confiável e barato.

Os ensaios de compressão não confinada constituíram a parte principal desta pesquisa. O programa foi escolhido de forma a avaliar as influências na resistência à compressão do solo tratado com cal e cinza volante para os seguintes parâmetros: teor de cal, teor de cinza e peso unitário seco.

As variáveis utilizadas foram:

- três teores de cal: 3, 5 e 7%;
- três teores de cinza volante: 0, 12,5 e 25,0%
- três pesos específicos ( $\gamma_d$ ): 1,5, 1,6 e 1,7 g/cm<sup>3</sup> com teor de umidade de 19,0%.

Uma prensa automática, com capacidade máxima de 50 kN e anéis de prova com capacidades de 5 kN e 50 kN e resoluções de 0,005 kN e 0,023 kN, respectivamente, foram utilizados nos ensaios de compressão simples. A taxa de deslocamento adotada foi de 1,14 mm por minuto.

Após cura em sala úmida por 27 dias, os corpos de prova foram submersos em tanque de água por 24 horas para minimizar os efeitos de sucção, com tempo total de cura de 28 dias. Imediatamente antes do teste, os corpos de prova foram retirados do tanque e secos superficialmente com papel absorvente. Em seguida, foi realizado o ensaio de compressão simples e registrada a carga máxima. Considerando a combinação das variáveis, foram ensaiadas 27 misturas diferentes. Para cada mistura foram executados três corpos de prova e a resistência média dos três foi utilizada nos resultados, sendo o desvio padrão aceitável da resistência de cada corpo de prova, inferior a 10% da resistência média.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Efeitos do teor de cinza

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de resistência à compressão simples das misturas com solo, cal dolomítica e cinza volante. Verifica-se que, de modo geral, o acréscimo de cinza nas misturas eleva o valor da RCS.

Na Figura 2, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função do teor volumétrico de cal dolomítica ( $L_v$ ) para os três valores de  $\gamma_d$  ensaiados, cada curva possui um mesmo teor de cinza volante (0%, 12,5% e 25%). A escolha do índice  $L_v$  em detrimento de teor de cal ( $L$ ) deve-se ao fato de que o teor de cal é calculado em função da quantidade de solo. Dessa forma, aumentando-se o teor de cinza, diminui-se o volume de solo e, conseqüentemente, o total de cal utilizado. Tal fato contribuirá para uma melhor avaliação e compreensão dos efeitos da cinza sobre os valores da RCS.

### 3.2 Efeitos da porosidade e relação porosidade/teor volumétrico de cal

Na Figuras 3, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da RCS em função da porosidade ( $\eta$ ) das misturas de solo-cal compactadas, para as cales dolomítica e de casca de ovos, respectivamente. Cada curva possui o mesmo teor de cal (3%, 5% e 7%). Analisando a figura, verifica-se que a redução na porosidade da mistura compactada promove um aumento exponencial da RCS das misturas.

Tabela 1: RCS média das misturas de solo e cal dolomítica.

Dados Gerais das misturas		Teor de cinza volante (%)					
		0		12,5		25	
L (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Lv (%)	RCS (kPa)	Lv (%)	RCS (kPa)	Lv (%)	RCS (kPa)
3	1,5	1,69	90,8	1,50	126,3	1,36	180,9
5	1,5	2,74	205,9	2,46	317,7	2,23	368,8
7	1,5	3,82	390,0	3,39	472,5	3,07	687,0
3	1,6	1,79	196,0	1,59	225,9	1,44	378,7
5	1,6	2,96	372,2	2,62	550,0	2,37	679,0
7	1,6	4,04	723,2	3,60	901,5	3,26	931,8
3	1,7	1,88	392,1	1,68	444,7	1,53	583,0
5	1,7	3,09	662,6	2,77	835,9	2,55	869,2
7	1,7	4,27	1108,1	3,85	1337,8	3,47	1259,0

Fonte: elaborado pelo autor.

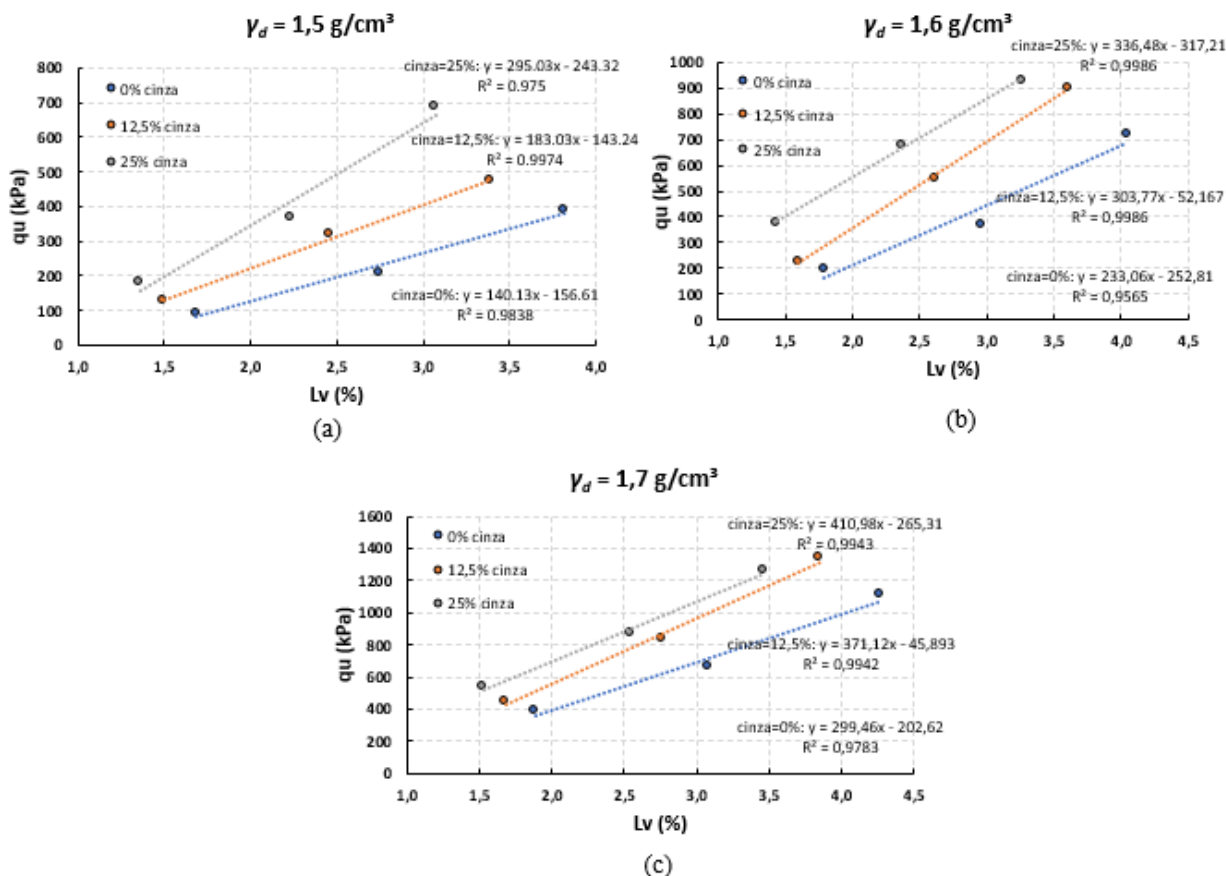


Figura 2 – Efeito do teor volumétrico de cal dolomítica nas misturas com 0%, 12,5% e 25% de cinza volante para os  $\gamma_d$  de (a) 1,5 g/cm<sup>3</sup>, (b) 1,6 g/cm<sup>3</sup> e (c) 1,7 g/cm<sup>3</sup>.



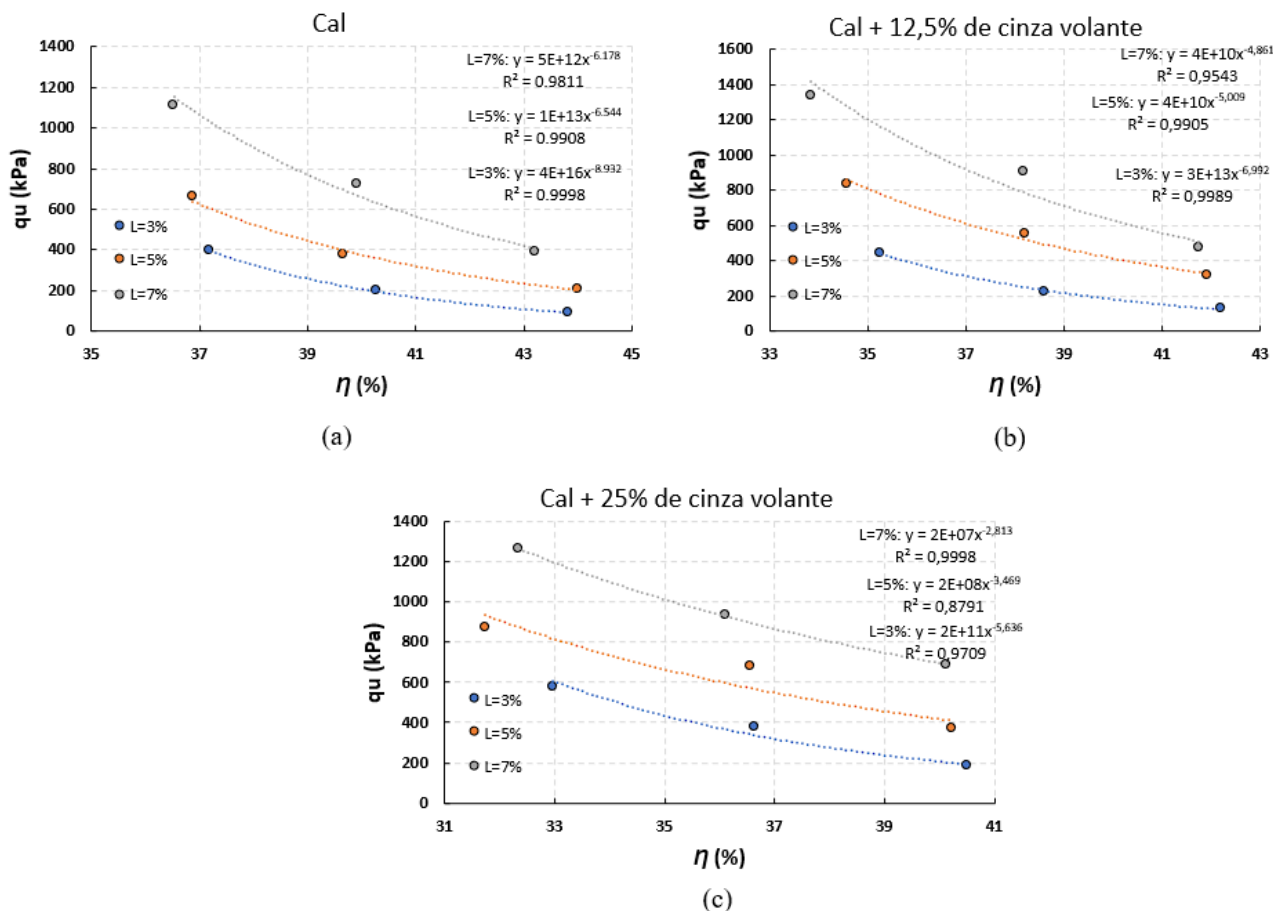


Figura 3 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade ( $\eta$ ) das amostras com (a) 0%, (b) 12,5% e (c) 25% de cinza volante.

Se observa que a adição de cinza volante produz um aumento na RCS se comparado com as misturas de solo-cal sem cinza, sendo o aumento da RCS com a adição de cinza linear em função do teor de cal volumétrico ( $L_v$ ). Além disso, verifica-se que o coeficiente angular das retas de ajuste linear das misturas com cinza são consideravelmente superiores ao coeficiente angular da reta de ajuste linear da mistura de solo cal, exclusivamente. Tal fato evidencia a contribuição positiva da adição da cinza na RCS das misturas. Pode-se verificar, ainda, que o acréscimo de resistência promovido pela adição da cinza é, proporcionalmente maior, quanto menor for o  $\gamma_d$  da mistura. Para os valores de  $\gamma_d$  de 1,5 e 1,6 g/cm<sup>3</sup> a inclinação das retas de resistência são mais pronunciadas em relação à inclinação das retas que definem o comportamento da RCS para as misturas de solo cal exclusivamente.

Na Figura 4 é apresentada a RCS em função da porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_v$ ) das misturas de solo, cal e cinza volante, cada gráfico representa um teor de cinza volante diferente. Pode-se observar na Figura 7 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma tendência exponencial. Verifica-se claramente que pontos com mesma relação vazios/cal obtidos de modos diferentes (um por densificação e outro por aumento do teor de cal) apresentam resistências distintas, sendo que os pontos com menor porosidade e maior quantidade de cal atingem resistências maiores.

Assumindo que uma variação no volume de vazios exigiria uma variação proporcional no volume de cal para contrabalançar a perda ou ganho na resistência, em termos matemáticos, tem-se que:

$$\frac{\eta}{L_v} = K \text{ e } \frac{\eta+\Delta\eta}{L_v+\Delta L_v} = K, \text{ então } \Delta L_v = \frac{L_v}{\eta} \times \Delta\eta$$

Onde:

onde:  $\Delta\eta$  = variação na porosidade;  $\Delta L_v$  = variação no teor volumétrico de cal e,  $K$  = constante.

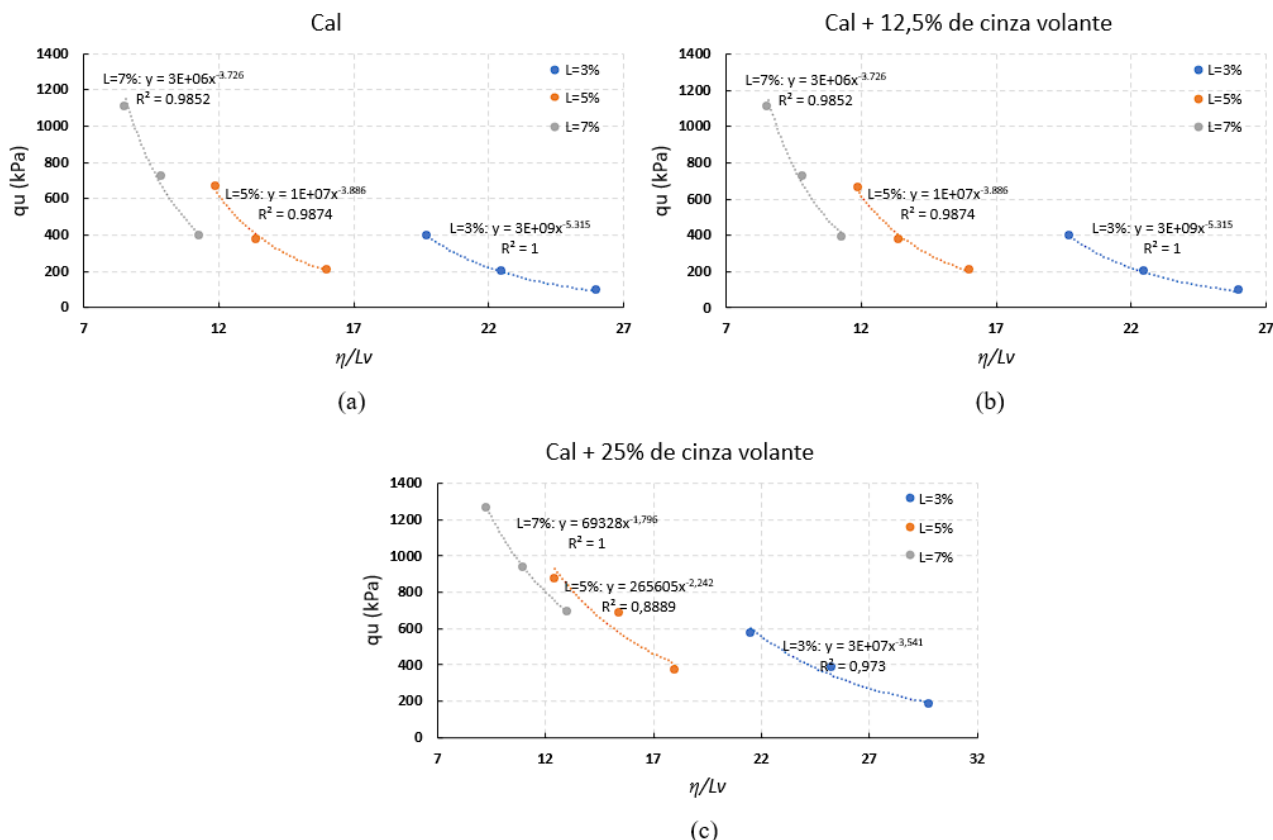


Figura 4 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com das amostras com (a) 0%, (b) 12,5% e (c) 25% de cinza volante.

Essa tendência foi verificada para amostras de solo melhoradas com cimento, com cal e com cinza volante e cal nos estudos de Dalla Rosa (2009), Consoli *et al.* (2016c) e Consoli *et al.* (2015).

Uma maneira de compatibilizarmos as taxas de variação das grandezas citadas é através da aplicação de uma potência sobre uma delas. Dessa forma, foi aplicado uma potência igual a 0,38 sobre o parâmetro  $L_v$ , resultando num melhor ajuste para o fator  $\eta/L_v$ . A Figura 5 apresenta a variação da RCS em relação ao fator  $\eta/(L_v)^{0,38}$  considerando as misturas com solo e cal para os três teores de cinza volante (0%, 12,5% e 25,0%).

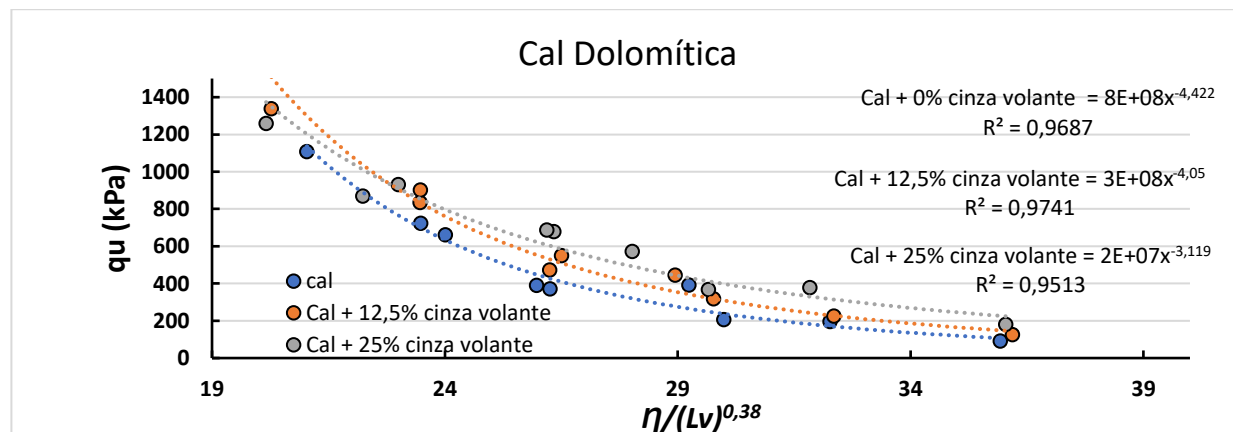


Figura 5 – Relação entre  $\eta/(L_v)^{0,12}$  e a RCS para as amostras de solo e cal com (a) 0%, (b) 12,5% e (c) 25% de cinza volante.

## 4 CONCLUSÃO

Em análise aos resultados apresentado, pode-se afirmar que, para os teores de cinza volante estudados, a mistura que apresenta um melhor desempenho é a com maior teor de cinza (25%), apresentando não só maiores valores de RCS, como menores teores volumétricos de cal, considerando as mesmas condições de  $\gamma_d$  e  $L_v$ , nas misturas sem cinza e com 12,5% de cinza. A diferença da RCS em função dos teores de cinza diminuiu com o aumento de  $\gamma_d$ . Para o maior  $\gamma_d$  (1,7 g/cm<sup>3</sup>), os valores da RCS para as misturas com 12,5% e 25% de cinza volante são praticamente os mesmos para os mesmos teores de cal, embora o teor volumétrico de cal para a mistura com 25% de cinza volante seja menor.

O aumento da RCS das amostras com cinza volante em relação às amostras sem cinza volante evidencia a contribuição da cinza no ganho de RCS do solo tratado com a cal dolomítica. A relação  $\eta/(L_v)^{0,38}$  proposta se mostrou muito satisfatória para prever o comportamento das misturas de solo, cal e cinza volante estudadas.

De modo geral, os resultados encontrados sobre o aumento de resistência causado pelo aumento dos teores de cal condizem com outros estudos sobre o tema para ambas as cales (Dalla Rosa, 2009; Consoli *et al.*, 2014, Consoli *et al.*, 2016; Deepak *et al.*, 2015).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da agência de fomento Fapesc.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2012), American Association of State Highway and Transportation Officials. *Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. M145-91. Washington DC.
- Barnes, Ian; Sear, Lindon (2004). *Ash utilisation from coal-based power plants*. DTI.
- Consoli, Nilo Cesar; Da Rocha, Cecília Gravina; Silvani, Carina (2014). *Devising dosages for soil-fly ash-lime blends based on tensile strength controlling equations*. Construction and Building Materials 55
- Consoli, Nilo Cesar; Festugato, Lucas; Consoli, Bernardo Scapini; Lopes Jr, Luizmar Da Silva (2015). *Assessing Failure Envelopes of Soil-Fly Ash-Lime Blends*. J. Mater. Civ. Eng., 27(5): 04014174.
- Consoli, Nilo Cesar; Dalla Rosa, Amanda; Saldanha, Rodrigo Beck (2011). *Variables Governing Strength of Compacted Soil-Fly Ash-Lime Mixtures*. Journal Of Materials In Civil Engineering, 23(4): 432-440
- Dalla Rosa, A (2009). *Estudo dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).UFRGS, Porto Alegre.
- Deepak, M.S.; Rohini, S.; B, Harini, B.S.; Ananthi, G. Beulah Gnana (2021). *Influence of fly-ash on the engineering characteristics of stabilised clay soil*. Materials Today: Proceedings 37
- IEA (2020). World Energy Outlook 2020. Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>,
- Turan, C.; Javadi, A.A.; Vinai, R.; Beig Zali, R (2022). *Geotechnical Characteristics of Fine-Grained Soils Stabilized with Fly Ash, a Review*. Sustainability, 14, 16710. <https://doi.org/10.3390/su142416710>
- Yoshimoto, Norimasa; Hyodo, Masayuki; Nakata, Yukio (2012). *Evaluation of shear strength and mechanical properties of granulated coal ash based on single particle strength*. Soils and Foundations.
- Kim, Bumjoo; Prezzi, Monica (2008). *Evaluation of the mechanical properties of class-F fly ash*. Waste Management. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.04.006>.