

Misturas de Cinza Volante com Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples Frente à Moagem da Cinza Volante

Thaís Martins de Paula

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, thaismartinsdepaula@gmail.com

RESUMO: O emprego de resíduos da indústria como materiais alternativos na Engenharia vem sendo tópico recorrente em pesquisas de desenvolvimento de novos materiais, devido à uma maior consciência da opinião pública quanto ao impacto ambiental oriundo da produção industrial. Buscando colaborar com esta discussão, esta pesquisa procurou inserir dois resíduos (cinza volante e cal de carbureto), gerados na região metropolitana de Porto Alegre, como alternativa de solução em Engenharia. Analisando-se a microestrutura da cinza volante, observa-se que ela é formada por esferas ocas e plerosferas. Visando fornecer subsídios para que seja possível determinar o comportamento mecânico das misturas, através do uso da relação porosidade (η)/teor volumétrico de cal (L_v), obtendo assim uma formulação de equações para previsão da resistência à compressão simples do material cimentado para cinza volante com diferentes tempos de moagem e cura acelerada. Para isso, foram realizados ensaios de compressão simples em corpos de prova com 5, 10 e 15% de cal, com peso específico aparente seco de 11, 12 e 13 kN/m³, curados por 7 dias, com umidade de 18% para os tempos de moagem 0, 2 e 6h para as temperaturas 23 e 40°C. Os resultados apontam que o aumento do teor de cal gerou ganhos de resistência para a temperatura de cura de 40°C; o aumento da porosidade proporcionou um ganho de resistência para todas as combinações; o aumento da temperatura foi importante no ganho de resistência; a moagem da cinza por 2h promoveu ganhos significativos de resistência em relação à não moída, porém, para 6h de moagem os ganhos não foram significativos para a temperatura de cura de 23°C. A relação η/L_v , ajustada por um expoente [$\eta/(L_v)^{0,07}$], mostrou-se adequada na formulação de equações na previsão da resistência do material cimentado para todas as temperaturas e tempos de moagem estudados. Além disso, a existência de relações únicas e distintas no controle da resistência à compressão simples em função da porosidade, teor volumétrico de cal, temperatura de cura e tempo de moagem, mostraram-se úteis para formulações de dosagem.

PALAVRAS-CHAVE: Cinza Volante, Moagem, Cal de Carbureto, Resistência à Compressão Simples, Relação Porosidade/Teor Volumétrico de Cal, Temperatura de Cura.

1 INTRODUÇÃO

No âmbito industrial e da construção civil, a produção de resíduos é lugar comum. Muitas vezes, sua disposição apresenta-se como um transtorno e um custo de produção, posto que, estes materiais normalmente são poluentes ambientais e requerem uma disposição adequada. Com a crescente conscientização mundial no controle da geração de resíduos poluidores, o reaproveitamento destes materiais vem sendo bastante discutido em diversas áreas

da Engenharia.

Um dos resíduos mais produzidos no mundo é a cinza proveniente da queima de carvão para geração de energia. Esta fonte supre 40% da demanda de energia elétrica global (IEA, 2015). Somente as termelétricas brasileiras produzem 3,35 Mton de cinzas volante por ano e, a grande maioria dessas localizam-se nos Estados de Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Rohde, 2006).

A cinza volante, é considerada pela NBR 10004 como um resíduo sólido não perigoso não inerte (classe II A), as propriedades

pozolânicas deste material tem sido estudadas por diversos pesquisadores. Este vem sendo utilizado pela a indústria para as mais variadas aplicações, levando-o a ter um valor comercial e, por isso, ser considerado um subproduto. Entre as suas aplicações pode-se citar: a produção de cimento, concreto e cerâmica; como material estabilizante em aterros e bases de pavimentos; como corretor de solo para a agricultura. No Rio Grande do Sul, o consumo de cinzas não atinge um terço da produção e, é majoritariamente consumido pela indústria produtora de cimento (Rohde, 2006). A grande disponibilidade deste subproduto, que contém elementos-traço como, zinco, cobre, cromo, chumbo, mercúrio e fósforo na região, faz com que a pesquisa de novas aplicações seja necessária.

Outro resíduo produzido pela indústria é a cal de carbureto, este material é um subproduto da produção do gás acetileno. Como este material possui potencial poluidor, devido a sua alta alcalinidade, ele é destinado a aterros industriais ou comercializado. Com propriedades químicas muito similares a cal calcítica hidratada, a utilização deste material como agente cimentante tem sido estudada por vários pesquisadores com resultados bastante satisfatórios (Consoli *et al.*, 2001; Saldanha, 2014).

O processo de reação pozolânica é aquele onde sílicas e aluminas presentes nas cinzas volantes ligam-se aos íons de cálcio ou magnésio das cales na presença de água, gerando géis de diferentes hidratados de cálcio que, com o tempo se transformam em cristais, conferindo resistência a mistura (Minnick, 1967; Massazza, 1998; Basumajumdar *et al.*, 2005). A compreensão dessa reação foi vital para o desenvolvimento de pesquisas utilizando estes materiais como estabilizantes de solos, ou na produção de tijolos.

A microestrutura da cinza volante é bastante particular, as partículas do material são compostas por esferas ocas e plerosferas, que são, essencialmente, esferas ocas, preenchidas por esferas menores (Fisher *et al.*, 1976). Como as reações pozolânicas acontecem principalmente na superfície deste material, a quebra das pleroesferas proporcionam um aumento da superfície específica da cinza e,

também um aumento na reatividade do material (Greenberg, 1956).

Visando a utilização destes subprodutos na Engenharia Geotécnica, a estabilização da cinza volante moída pode apresentar-se como uma alternativa de projeto mais sustentável, podendo ser aplicada na proteção de taludes, na construção de base para pavimentos e, também, como camada de suporte para fundações superficiais.

Assim, através de relações entre porosidade e teor volumétrico de agente cimentante, desenvolvidas com base na identificação e quantificação das variáveis mais importantes no controle da resistência de misturas de cinza volante moída e cal de carbureto, a presente pesquisa busca fornecer subsídios para que seja possível o desenvolvimento de uma dosagem que permita a previsão da resistência e do comportamento mecânico da mistura de forma objetiva e com confiabilidade.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foram caracterizadas as propriedades físicas da cinza volante moída e não moída, assim como da cal de carbureto. Então, foram realizados ensaios compressão simples a fim de estabelecer a influência do teor de cal, porosidade da mistura, tempo de moagem, temperatura de cura na resistência de misturas compactadas de cinza volante-cal de carbureto.

2.1 Materiais

A cinza volante (CV) utilizada nesta pesquisa é um resíduo proveniente da queima de carvão para a geração de energia elétrica de uma empresa fabricante de resinas termoplásticas localizada em Triunfo/RS e, é classificada como tipo F pela ASTM (1998). A caracterização física, tanto da CV não moída, quanto para a moída 2h e 6h apresenta-se na Tabela 1. Na Figura 1 apresenta-se a distribuição granulométrica das CV com diferentes tempos de moagem. Observa-se na Figura 1 uma diminuição do diâmetro médio das partículas, contudo, todos os materiais são classificados como silte, de acordo com a USCS (ASTM, 2011). Através da utilização do método de

absorção de nitrogênio – BET (ASTM, 2012), observou-se um aumento da superfície específica com o aumento do tempo de moagem do material no moinho de bolas cerâmicas. A análise química da CV mostra que esta é composta por mais de 90% de óxidos ($66,4\%\text{SiO}_2 + 18,2\%\text{Al}_2\text{O}_3 + 6,5\%\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2,2\%\text{CaO} + 1,4\%\text{K}_2\text{O}$), já estes, são considerados elementos imprescindíveis para a ocorrência das reações pozolânicas.

Tabela 1. Propriedades físicas da CV.

Propriedade	CV não moída	CV moída 2h	CV moída 6h
Limite de Liquidez	-	-	-
Limite de Plasticidade	-	-	-
Índice de Plasticidade	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico
Peso Específico Real dos Grãos (kN/m^3)	21,7	22,1	22,7
Areia Média ($0,2 < \phi < 0,6 \text{ mm}$)	1,5%	0,08%	0,08%
Areia Fina ($0,06 < \phi < 0,2 \text{ mm}$)	12,9%	8,47%	8,23%
Silte ($0,002 < \phi < 0,06 \text{ mm}$)	82,5%	87,28%	87,54%
Argila ($\phi < 0,002 \text{ mm}$)	3,15%	4,17%	4,15%
Diâmetro médio (D50) (mm)	0,020	0,015	0,009
Área Superficial Específica (m^2/g)	3,28	4,96	5,95

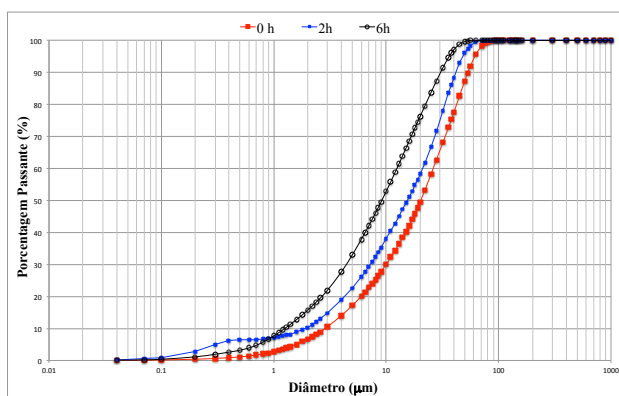


Figura 1. Análise granulométrica para os diferentes tempos de moagem da CV.

A cal de carbureto, utilizada como agente cimentante nesta pesquisa, é um resíduo da produção de gás acetileno proveniente de uma empresa produtora de gases industriais localizada em Esteio/RS. A análise química do material mostrou que este é composto por

70,02% CaO, 0,3% MgO e 1,5% de resíduos insolúveis, com uma perda ao fogo de 27% e, possui 64,6% de óxido de cálcio disponível. O peso real dos grãos da cal de carbureto é $21,2 \text{ kN/m}^3$.

2.2 Métodos

Na presente pesquisa, foi utilizada cinza volante em seu estado natural, moída por 2h e moída por 6h em um moinho de bolas cerâmicas com capacidade de 30 L, com o objetivo de aumentar a superfície específica do material. Os teores de cal de carbureto (L) utilizados nas misturas variou de 5% até 15%, o peso específico aparente seco (γ_d) foi variado de 11 kN/m^3 até 13 kN/m^3 e o teor de umidade (ω) foi mantido constante em 18%. O tempo de cura foi definido como 7 dias.

2.3 Moldagem e Cura

Para os ensaios de compressão simples, foram utilizados corpos de prova com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Foram pesados a cinza volante (para todos os tempos de moagem), cal de carbureto e água, então, a cinza volante e cal de carbureto foram misturadas até obter-se um material de consistência uniforme (ASTM, 2008). A água é adicionada, continuando o processo de mistura até que seja obtida uma pasta homogênea. A quantidade de cal de carbureto utilizada em cada mistura é calculada baseada no peso seco da cinza volante. O tempo necessário para a preparação, mistura e compactação das amostras foi sempre menor do que 20 minutos. Cada corpo de prova foi compactado em três camadas em um molde cilíndrico com 50 mm de diâmetro para atingir os valores de estipulados de L, γ_d e ω . Após a moldagem, o corpo de prova foi pesado e foram medidas seu diâmetro e altura com tolerância de 0,01 g e 0,1 mm. Para cada ponto foram moldados 3 corpos de prova. As amostras foram curadas em câmara úmida para as temperaturas de 23°C (sem vapor) e 40°C (à vapor). A câmara úmida tinha dispersores de água e controladores de temperatura para controlar a umidade (aproximadamente 100%) e temperatura.

2.4 Ensaios de Resistência à Compressão Simples

O procedimento dos ensaios de compressão simples seguiram a ASTM (2010). A velocidade de deformação destes ensaios eram de 1,14 mm por minuto. Depois de curados em uma câmara úmida, os corpos de prova foram submersos em água por 24h para a saturação e minimização da sucção. Imediatamente antes do ensaio, os corpos de prova eram retirados do tanque e secos superficialmente. Então, o ensaio de compressão simples era realizado, e a carga máxima obtida por cada corpo de prova era computada.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Cinza Volante-Cal de Carbureto: Misturas de Referência

A fim de avaliar a influência da resistência à compressão simples (q_u) das misturas de cinza volante-cal de carbureto, foi definido como misturas de referência as amostras de cinza volante não moída com peso específico aparente seco (γ_d) de 11, 12 e 13 kN/m³ e teores de cal de carbureto (L) de 5, 10 e 15%. Todos os corpos de prova foram curados por 7 dias. Nas Figuras 2 e 3 observam-se resultados típicos para os corpos de prova curados a 23°C e 40°C, respectivamente.

Na Figura 2, observa-se que a resistência à compressão simples das misturas não cresce com o aumento da quantidade de cal adicionada à mistura, ficando estagnada. Isto se dá, provavelmente, porque todos os corpos de prova foram curados por 7 dias e, as reações pozolânicas entre os aluminatos e silicatos da cinza volante e a cal de carbureto, que são conhecidas como reações lentas, não tiveram tempo suficiente para proporcionar ganhos significativos de resistência com o aumento da quantidade de cal na mistura para esta temperatura. Tal efeito também foi observado por Rojas e Cabrera (2002)

Na figura 3, observa-se que, diferentemente do ocorrido com as misturas curadas a 23°C, o aumento do teor de cal implicou em um ganho de resistência médio de 21% entre 5% e 10% de

cal e, de 8% entre 10 e 15%, de cal, implicando que o aumento da temperatura proporcionou uma aceleração no desenvolvimento das reações pozolânicas.

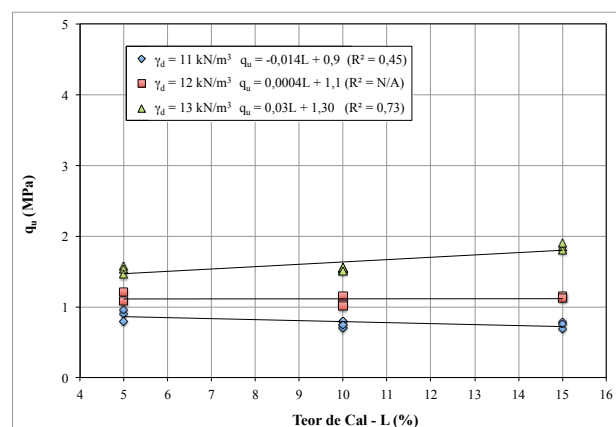


Figura 2. Variação de q_u em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante não moída curadas a 23°C.

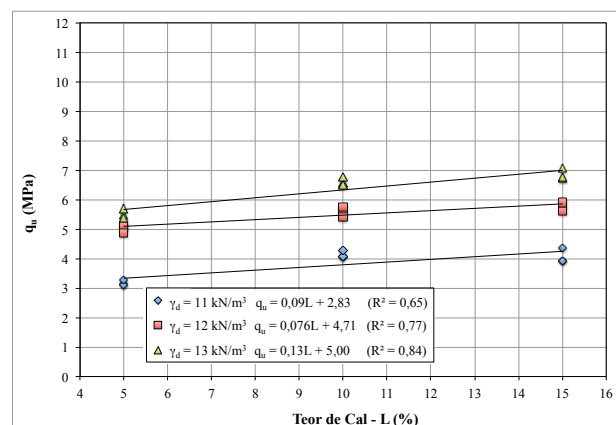


Figura 3. Variação de q_u em relação ao teor de cal das amostras de cinza volante não moída curadas a 40°C.

Contudo, em ambos os casos, a resistência da mistura aumentou com o aumento do peso específico aparente seco do material.

A relação porosidade/teor volumétrico de agente cimentante tem sido empregada como um fator de estimativa da variação da resistência para diversos materiais artificialmente cimentados por diversos pesquisadores (Foppa, 2005; Lopes Junior, 2007; Dalla Rosa, 2009; Saldanha, 2014). Sendo assim, foi avaliada a validade da utilização desta relação para a misturas estudadas nesta pesquisa.

Foppa (2005) verificou que a taxa de variação da porosidade não possui a mesma ordem de grandeza da taxa de variação do teor

volumétrico de agente cimentante. Com isto, o autor sugeriu a adoção de um expoente no teor volumétrico de material cimentante, a fim de equalizar tais taxas de variação. A utilização deste expoente deu origem a uma curva ajustada única, que pode então, ser empregada na estimativa da resistência à compressão simples do material artificialmente cimentado.

Para as misturas estudadas, o expoente que proporcionou o melhor ajuste da taxa de variação do teor volumétrico da cal em relação a taxa de variação da porosidade, foi de 0,07. Nas figuras 4 e 5 apresentam-se os resultados da q_u frente a variação da relação $\eta/(L_v)^{0,07}$ para todos os corpos de prova curados a 23°C e 40°C, respectivamente. As Equações 1 e 2 representam as curvas de tendência para as misturas de referência para os corpos de prova curados a 23°C e 40°C, respectivamente. Estas equações apresentam um R^2 de 0,90 para 23°C e 0,88 para 40°C.

$$q_u = 0,31 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (1)$$

$$q_u = 1,35 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (2)$$

Através da análise das Eq. 1 e 2, observa-se um aumento médio de 4 vezes na resistência devido ao aumento da temperatura de cura para as misturas de referência.

Como não há uma norma específica de dosagem de misturas de cinza volante com cal, considerou-se o valor mínimo de resistência à compressão simples de 2,1 MPa para 7 dias de cura, estipulado para misturas solo-cimento pela NBR 12253 (1992), como valor de referência para os resultados obtidos. Sendo assim, as misturas de cinza não moída curada a 23°C, não atingem o valor mínimo estabelecido. Já para os corpos de prova curados a 40°C este valor é facilmente superado chegando a valores médios de 5,2 MPa.

3.2 Influência da Moagem da Cinza no Ganho de Resistência de Misturas Cinza Volante-Cal de Carbureto

Na Figura 4 também são apresentados os resultados de q_u frente a variação da relação $\eta/(L_v)^{0,07}$ para as misturas com cinza moída 2h e moída 6h curados a 23°C. As Equações 3 e 4 representam as curvas de tendência para estas misturas. Estas equações apresentam um R^2 de 0,80, tanto para a cinza moída 2h, quanto para a moída 6h.

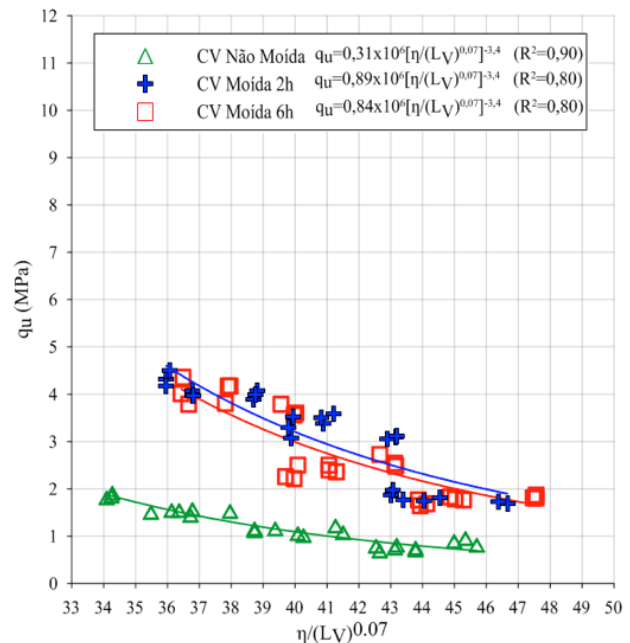


Figura 4. Efeito da variação da moagem da cinza volante para amostras curadas a 23°C

$$q_u = 0,89 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (3)$$

$$q_u = 0,84 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (4)$$

Através da análise das Eq. 1 e 3, observa-se um aumento médio de 2,8 vezes na resistência devido à moagem da cinza por 2h. Contudo, observando-se Eq. 3 e 4, há uma queda de 6% de resistência entre a cinza volante moída por 2h e a moída 6h, que pode ser atribuída ao aumento da quantidade de água requerida pela mistura (fenômeno também observado por Bouzoubaâ *et al.* (1997)). Com isto, é possível observar uma estagnação no ganho de resistência, ou seja, o aumento da moagem de 2h para 6h para corpos de prova curados a 23°C foi ineficiente.

Considerando-se novamente a resistência mínima para a aplicação da mistura em obras de Engenharia de 2,1 MPa, tanto para a cinza moída por 2h, quanto para a cinza moída por 6h, foram superados os valores de q_u para as misturas com γ_d de 12 e 13 kN/m³.

Já na Figura 5, também são apresentados os resultados de q_u frente a variação da relação $\eta/(L_v)^{0,07}$ para as misturas com cinza moída 2h e moída 6h para temperatura de cura de 40°C. As Equações 5 e 6 representam as curvas de tendência para estas misturas. Estas equações apresentam um R^2 de 0,97 para CV moída 2h e 0,93 para CV moída 6h.

$$q_u = 1,87 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (5)$$

$$q_u = 2,27 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_v)^{0,07}} \right]^{-3,40} \quad (6)$$

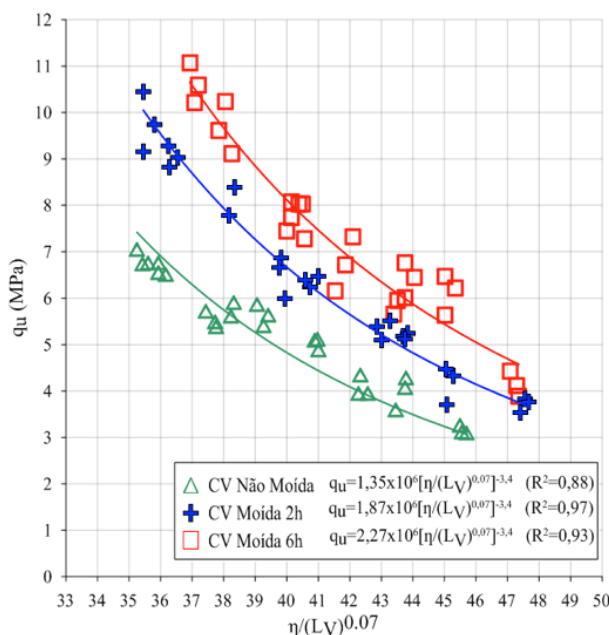


Figura 5. Efeito da variação da moagem da cinza volante para amostras curadas a 40°C.

Comparando-se as Eq. 2 e 5, observa-se um ganho médio de q_u de 1,4 vezes entre a CV não moída e moída 2h. Quando comparadas as resistências entre a CV não moída e moída 6h (Eq. 2 e 6) há um incremento de resistência de 1,7 vezes. Através das Eq. 5 e 6, observa-se um ganho aproximado de resistência de 20%, o

que indica mesmo com um aumento na quantidade de água requerida pela mistura devido à quebra de partículas na moagem, o aumento da temperatura de cura proporcionou um ambiente favorável para o desenvolvimento das reações pozolânicas.

Considerando-se a resistência mínima para a aplicação da mistura em obras de Engenharia de 2,1 MPa, tanto para a cinza moída por 2h, quanto para a cinza moída por 6h, foram superados os valores mínimos de q_u , sendo, em média, 6,5 MPa, para a CV moída 2h e, 8,2 MPa para CV moída 6h.

Sendo assim, a moagem da CV por 2h, principalmente quando curada a temperatura ambiente, se mostrou o tempo de moagem mais eficiente para a promoção de ganho de resistência mecânica das misturas. O acréscimo de 4h no tempo de moagem (de 2h para 6h) não promoveu ganhos de resistência expressivos ao ponto de justificar-se o aumento do gasto de energia e assim, do custo de produção.

3.3 Influência da Temperatura de Cura no Ganho de Resistência de Misturas Cinza Volante–Cal de Carbureto

Através da análise das Figuras 4 e 5, observa-se que a temperatura de cura é um fator chave no ganho de resistência das misturas, como já foi discutido para a CV não moída no item 3.1. Analisando a influência desta variável para a CV moída 2h (Eq. 3 e 5), é possível observar um aumento médio de resistência de 2 vezes entre as misturas curadas a 23°C e 40°C. Já para a CV moída 6h (Eq. 4 e 6), o aumento médio de resistência foi de 2,7 vezes, este aumento foi mais expressivo do que o apresentado CV moída 2h, uma vez que houve uma estagnação de resistência para os corpos de prova com CV moída curados a 23°C.

Contudo, observa-se que a influência do aumento da temperatura de cura foi muito mais expressiva para as misturas com CV não moída (4 vezes). Mesmo assim, o aumento da temperatura de cura promove ganhos expressivos de resistência em todas as misturas estudadas, justificando o seu emprego.

4 CONCLUSÕES

Através dos dados apresentados no artigo, as seguintes conclusões podem ser realizadas:

- O aumento do teor de cal de carbureto para as misturas curadas por 7 dias só promovem ganhos de resistência quando aliado à cura acelerada (40°C). Tal fato ressalta a importância do estudo da influência do tempo de cura em misturas com cal como agente cimentante, embora este tópico não tenha sido avaliado nesta pesquisa;
- O aumento do γ_d promove ganhos de q_u , independentemente da mistura realizada;
- O aumento da superfície específica da CV promove ganhos de resistência da mistura, contudo, o excesso de moagem pode gerar um aumento na quantidade de água requerida pela mistura, promovendo, em casos, a queda de q_u ;
- O tempo de moagem da CV mais eficiente na promoção do ganho de resistência à compressão simples, dentre aos estudados (0, 2h e 6h), foi o de 2h;
- O aumento da temperatura de cura de 23°C para 40°C promove ganhos significativos de resistência;
- As misturas de cinza volante com cal de carbureto que atingiram o valor mínimo de resistência de 2,1 MPa, apontado na NBR 12253 (1992), foram: as misturas com de CV moída 2h e 6h, curadas a 23°C com γ_d de 12 e 13 kN/m³ e todas as combinações curadas a 40°C;
- Através da adoção de um expoente no teor volumétrico de cal (L_v) igual a 0,07, foi possível o ajuste dos dados experimentais para a relação entre porosidade/teor volumétrico de cal, tornando possível a concepção de uma correlação única entre $\eta/(L_v)^{0,07}$ e resistência à compressão simples. Através do ajuste de curvas do tipo potência para os dados obtidos, foram geradas equações na previsão do comportamento mecânico das amostras estudadas. Esta relação se mostrou aplicável para todas as combinações estudadas.

AGRADECIMENTOS

A autora gostaria de manifestar seu agradecimento à CAPES o ao CNPq pelo financiamento da pesquisa, bem como à CIENTEC e ao LEGG pelo apoio do desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ASTM (1998). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. *C618*, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2008). Standard practice for laboratory preparation of soil-lime mixtures using mechanical mixer. *D3551*, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2010). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. *C 39*, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2011). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). *D2487*, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2012). Standard test methods for precipitated silica—surface area by single point B.E.T. nitrogen adsorption. *D5604*, West Conshohocken, PA.
- Consoli, N. C.; Prietto, P. D. M.; Carraro, J. H. A.; Heineck, K. S. (2001). Behavior of Compacted Soil-Fly Ash-Carbide Lime Mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Civil Engineering*, ASCE, Vol. 127, n. 9, p. 774-782.
- Basumajumdar, A.; Das, A. K.; Bandyopadhyay, N.; Maitra, S. (2005). Some studies on the reaction between fly ash and lime. *Bulletin of Materials Science*, Springer, Vol. 28, n. 2, p. 131-136.
- Bouzoubaâ, N.; Zhang, M. H.; Bilodeau, A.; Malhotra, V. M. (1997). The effect of grinding on the physical properties of fly ashes and a Portland cement clinker. *Cement and concrete research*, Elsevier, Vol. 27, n. 12, p. 1861-1874.
- Dalla Rosa, A. (2009) *Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 198 p.
- Fisher, G. L.; Chang, D. P. Y.; Brummer, M. (1976). Fly ash collected from electrostatic precipitators: microcrystalline structures and the mystery of the spheres. *Science*, AAAS, Vol. 192, n. 4239, p. 553-555.
- Foppa, D. (2005) *Análise de Variáveis-chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento

- de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 143 p.
- Greenberg, S. A. (1956). The chemisorption of calcium hydroxide by silica. *The Journal of Physical Chemistry*, ASC, Vol. 60, n. 3, p. 325-330.
- IEA (2015) *Energy Atlas*. Paris, França. Disponível em: <<http://energyatlas.iea.org/?subject=2020991907>> Acesso em 20 mar. 2015.
- Lopes Junior, L. S. (2007) *Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 147 p.
- Massazza, F. (1998) Pozzolana and Pozzolanic Cements. *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4th ed., Elsevier, Burlington, MA, USA, 1057 p.
- Minnick, L. J. (1967) Reactions of hydrated lime with pulverized coal fly ash, *Fly Ash Utilization Conf.*, American Public Power Association, Bureau of Mines, Pittsburgh, PA, USA p. 287-315.
- NBR 12253 (1992). *Solo – Cimento – Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento*. ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 7 p.
- NBR 10004 (2004). *Resíduos Sólidos - classificação*. 2a ed, ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 71 p.
- Rohde, G.M.; Zwonok, O.; Chies, F.; Silva, N. I. W. (2006) *Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil: aspectos técnicos e ambientais*. Vol. 1., 1 ed., CIENTEC, Porto Alegre, RS, Brasil, 202 p.
- Rojas, M. F. e Cabrera, J. (2002). The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin–lime–water systems. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Vol. 32, n. 1, p. 133-138.
- Saldanha, R. B. (2014) *Misturas Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples para Cura Acelerada*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 170 p.