XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul
GEOSUL 2019 – 17 a 19 de Outubro, Joinville, Santa Catarina, Brasil
©ABMS, 2019

Uso de Resíduo de Vidro em Pó em Estabilização de Solos

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

Ronaldo Luis dos Santos Izzo, DSc
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, izzo@utfpr.edu.br

Yeimy Ordoñez Muñoz, BSc
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, yeimymunoz@alunos.utfpr.edu.br

Jéssica Leindorf de Almeida, BSc
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, jessica.leindorf@hotmail.com

Marcos Filipe Neves Da Silva, BSc
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, filipemarcos3@gmail.com

RESUMO: O artigo apresenta a estabilização de um solo com resíduo de vidro e cimento Portland. Para isso, um solo sedimentar originário da Formação Guabirotuba (Curitiba, Brasil) foi usado adicionando três teores de cimento em relação à massa seca do solo: 3, 6 e 9%. Adicionalmente, 15% de resíduo de vidro em pó foi o teor escolhido para adicionar à mistura solo-cimento. As amostras foram curadas em tempos de 7, 28 e 90 dias e submetidos a ensaios de compressão simples (q_u). Os resultados demonstraram que o acréscimo dos seguintes fatores aumentou o q_u das misturas solo-cimento-vidro: teor de cimento, peso específico seco de moldagem e tempo de cura. Por outra parte, todas as resistências são controladas pela relação porosidade/cimento (η/C_{iv}) para cada tempo de cura. Finalmente, equações de dosagem e estimativa de q_u foram propostas empregando o índice η/C_{iv} ajustado a um expoente de 0,20.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduo de vidro em pó; Estabilização de solos; Compressão simples.

1 INTRODUÇÃO

A reciclagem de resíduos de vidro em pó representa um grande problema para as áreas urbanas, tanto em países desenvolvidos como em processo de desenvolvimento (Turgut 2013). Usar resíduos de vidro reciclado em pó na produção de geopolímeros é uma nova tecnologia considerada em projetos de construção sobretudo em concretos. No entanto, tem sido pouco investigado para a estabilização de solos. Arulrajah et al. (2017) analisaram o vidro reciclado (RG) como material de preenchimento suplementar em geopolímeros de grãos de café usados (CG) usando cinzas volantes e escória. Cinzas volantes e escória em 30% em peso foram usadas como precursores para induzir a geopolimerização em misturas RG-CG. O RG foi adicionado a misturas geopoliméricas em proporções de 25%, 50% e 75% em peso. Os autores concluíram que uma proporção líquida alcalina de Na_2SiO_3 a 70% e NaOH a 30% usava para induzir a geopolimerização nas misturas obtidas UCS (resistência à compressão não confinada) com valor de 10 MPa em 28-d de cura, e o RG-CG, FA e *Slag* são um material de construção alternativo e, de fato, promovem um futuro

sustentável para a indústria da construção. Pourabbas Bilondi et al. (2018a) investigou a viabilidade de usar um geopolímero baseado em pó de vidro reciclado (RGP) para melhorar o comportamento mecânico de solos argilosos. Eles usaram um solo argiloso de baixa plasticidade misturado com várias porcentagens (0-25% em peso) de RGP e hidróxido de sódio como ativador alcalino. O ativador alcalino foi preparado com uma concentração diferente de NaOH (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 M, M = Molar) e depois adicionado à mistura solo-RGP. Os autores estudaram as influências da temperatura de cura de 25 e 70°C e vários períodos de cura (7, 28 e 91 dias) em UCS. Eles concluíram que os valores de UCS de todos os espécimes estabilizados com um geopolímero e concentrações de NaOH foram aumentados em comparação com a amostra de solo não estabilizada. Os valores de UCS foram maiores quando os espécimes foram curados por um período de 91 dias e os resultados confirmaram que uma fonte rica de sílica (em uma fase amorfa), como o pó de vidro, era necessária para melhor estabilização do solo e formação de gel-geopolímero. Recentemente Pourabbas Bilondi et al. (2018b) empregaram resíduos de carboneto de cálcio (CCR) como um ativador alcalino para misturas de argila-RPG. O efeito de diferentes fatores como o conteúdo de CCR, o teor de pó de vidro (0-25%), a temperatura inicial de síntese e o tempo de cura foram investigados. O UCS de amostras CCR-RGP melhorou significativamente aumentando o conteúdo de CCR e RGP até os valores ótimos de 7% e 15%, respectivamente. Os autores também concluíram que os valores de UCS dos espécimes geopoliméricos foram aumentados com o aumento da temperatura de síntese inicial de 25°C para 70°C para ambos tempos de cura (7 e 28 dias). No entanto, o efeito da alta temperatura inicial de síntese no UCS dos espécimes foi menos eficaz para 28 dias de cura.

De acordo ao anterior, o uso de cimento em conjunto com pó de vidro reciclado não foi investigado na estabilização de solos da Formação Guabirotuba. Assim, este estudo avalia o potencial de combinar dois ligantes: pó de vidro reciclado (em forma de pó) e cimento Portland de resistência inicial, como um possível geopolímero substituindo parcialmente o cimento Portland para melhorar o comportamento de um solo sedimentar da Formação de Guabirotuba.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em duas etapas: a primeira foi a realização dos ensaios de caracterização do solo, do resíduo de vidro em pó e do cimento Portland: granulometria do solo e do pó de vidro 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 especifica real dos grãos do solo de acordo à norma ASTM D854 (ASTM, 2014)e massa especifica real dos grãos do cimento e do vidro em pó de acordo à norma brasileira NBR 16605 (ABNT, 2017); e a segunda etapa, consistiu-se na moldagem, cura e rompimento dos corpos de prova solo-vidro-cimento submetidos a ensaios de compressão simples em diferentes tempos de cura.

2.1 Materiais

Na presente pesquisa foram utilizados quatro materiais: solo, cimento de alta resistência inicial, resíduo de vidro em pó e água.

O solo usado é um solo característico da região metropolitana de Curitiba pertencente à Formação Guabirotuba. O solo é em sua maioria composto por silte de tipo sedimentar, de cor amarelo e foi coletado em um talude rodoviário a 2,5 metros de profundidade do nível do terreno natural na municipalidade de São José dos Pinhais (sudeste de Curitiba). A Tabela 1 apresenta as propriedades do solo. Nota-se [de acordo à norma Brasileira NBR 6502 (ABNT, 1995)] que 60% das partículas são silte (0,002 mm <diâmetro<0,06 mm), o 25% são areia e uma pequena parcela de 5% de argila também foi encontrada durante o ensaio de sedimentação.

©ABMS, 2019

Segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o solo é classificado como um silte elástico arenoso (MH) com um índice de plasticidade médio de 14,86%.

O cimento utilizado foi de alta resistência inicial, com alta porcentagem de óxido de cálcio (CaO). A densidade do cimento foi calculada como sendo 3,11. A Tabela 2 apresenta as propriedades do cimento utilizado neste estudo.

O resíduo de vidro em pó foi coletado em uma vidraçaria de Curitiba e secado em estufa a 70°C por 42 horas. O resíduo foi submetido a moagem usando um moino de bolas por 4 horas. Finalmente o produto moído foi peneirado usando o diâmetro de 0,075 mm obtendo assim o produto em pó. O resíduo em pó foi caraterizado e os resultados são apresentados na Tabela 1. Além disso, ensaios mineralógicos foram realizados encontrando uma formação amorfa com conteúdo de 98% de sílica. Finalmente o pó de vidro foi classificado como silte (ML) com densidade de 2,40 g/cm^3.

Água destilada foi usada para a caracterização dos materiais, ensaios de compactação, confecção dos corpos de prova compressão-tração-durabilidade e saturação das amostras, evitando assim reações não desejadas.

Tabela 1. Propriedades físicas do solo e do resíduo de vidro em pó

Propriedades	**Valor**	
	Solo	**Vidro moído**
Limite de liquides, %	50,82	-
Limite de plasticidade, %	35,96	-
Índice de plasticidade, %	14,86	-
Densidade real dos grãos	2,62	2,40
Areia grossa (0,6 mm<diâmetro<2 mm), %	5	-
Areia média (0,2 mm< diâmetro <0,6 mm), %	12	-
Areia fina (0,06 mm< diâmetro <0,2 mm), %	18	-
Silte (0,002 mm < diâmetro <0,06 mm), %	60	95
Argila (diâmetro < 0,002 mm), %	5	5
Diâmetro efetivo (D_{10}), mm	0,003	0,0035
Diâmetro médio (D_{50}), mm	0,038	0,015
Coeficiente de uniformidade (C_u)	12,67	5,43
Coeficiente de curvatura (C_c)	0,88	1,09
Classificação (SUCS)	MH	ML
Color	Amarelo	Branco

Tabela 2. Propriedades físico-químicas do cimento

Propriedade	**Valor**
% MgO	4,11
% SO_3	2,99
% CaO	60,73
%Al_2O_3	4,38
%Fe_2O_3	2,83
%S_iO_2	19,9
% Resíduo insolúvel	0,77
Resistência aos 7 dias (MPa)	42
Resistência aos 28 dias (MPa)	53
% Finura	0,04
Gs_C	3,11

2.1 Porcentagens de cimento, resíduo de vidro e tempos de cura.

Três teores de cimentos foram usados em relação à massa do solo seco: 3, 6 e 9% de acordo à experiencia local na estabilização dos solos da Formação Guabirotuba com cimento (Moreira et al. 2019). Adicionalmente, 15% de vidro foi a porcentagem escolhida em relação à massa seca do solo. Finalmente, a resistência à compressão simples das misturas compactadas foi avaliada depois de 7, 28 e 90 dias de cura.

2.1 Pontos de moldagem

Para esta pesquisa foram escolhidos 3 pesos específicos secos de moldagem: 13,50

©ABMS, 2019

kN/m^3 (A1), 14,50 kN/m^3 (A2) e 15,50 kN/m^3 (A3). Realizou-se uma bateria de ensaios previamente compactando corpos de prova no ponto A2, adicionando 6% de cimento, 15% de vidro, curados em 28 dias e variando o teor de umidade desde 20% até 38%. Encontrou-se que 26% de humidade é o valor onde as misturas obtêm maior valor à compressão simples como pode ser visto na Figura 1. Assim, todas as amostras foram compactadas com 26% de teor de umidade, variando os pesos específicos de moldagem e as porcentagens de cimento.

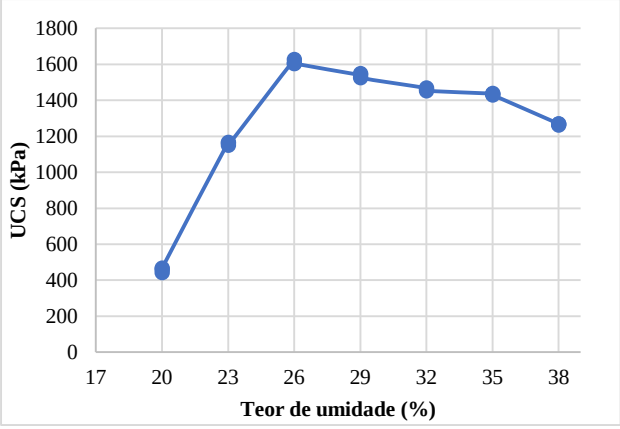

Figura 1. Influência do teor de umidade na resistência à compressão simples das misturas solo-vidro-cimento.

2.2 Ensaios de resistência à compressão simples

Foram moldados corpos de prova de 50 mm e 100 mm de diâmetro e altura, respetivamente. Primeiramente, o solo foi seco totalmente em estufa e seguidamente a quantidade de cimento e resíduo de vidro em pó foram adicionadas. A mistura em seco do solo+cimento+vidro foi realizada até ficar homogênea. Foi pesada e adicionada a quantidade de água necessária para atingir 26% de humidade da mistura. Uma segunda homogeneização foi realizada a mão até ficar uniforme. Foi calculada a quantidade se mistura necessária para atingir as densidades de moldagem. Passo seguido, os corpos de prova foram compactada empregando 3 camadas usando moldes de aço inox e uma prensa hidráulica manual com capacidade de 10 ton. Finalmente, os corpos de prova foram extraídos dos moldes e foram pesados e medidos. As amostras tinham que respeitar os seguintes erros máximos para serem usadas nos ensaios de compressão simples: dimensões das amostras com diâmetro de ±0,5 mm e altura de ±1 mm, peso específico aparente seco (γ_d) de ±1% e teor de umidade (ω) de ±0,5%. Para cada ponto de moldagem e teor de cimento foram moldados 3 corpos de prova.

Para a realização dos ensaios de compressão simples foi usada uma prensa automática com capacidade de 10 kN. Os ensaios foram feitos com um sistema automatizado, medindo, principalmente, a força aplicada e a deformação com uma sensibilidade de 0,01 mm, sendo a velocidade do ensaio de 1,10 mm/min. Os procedimentos dos ensaios de compressão simples seguiram a norma brasileira NBR 5739 (ABNT, 2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 2-4 apresentam os resultados da influência do teor de cimento na resistência à compressão simples das misturas compactadas de solo-resíduo de vidro para 7, 28 e 90 dias de cura, respectivamente. Nota-se um aumento na resistência mecânica das misturas quando é aumentada a quantidade de cimento em pó. É verificado também que o crescimento de UCS relacionado com o teor de cimento se dá de forma linear. Por outra parte, a resistência UCS também aumenta quando o peso específico seco de moldagem é aumentado (de A1 para A3). Assim. os pontos de moldagem A1, A2, e A3 demostram como a resistência mecânica aumenta linearmente independente do tempo de cura.

Comparando as Figuras 2-4 a resistência aumenta com o tempo de cura. Em 7 dias a resistência máxima obtida é de 2,5 MPa enquanto em 90 dias de cura a resistência é de 10,5 MPa, sendo um acréscimo de 320%. Adicionalmente, comparando os pontos de moldagem de 7 dias para 90 dias, os acréscimos são em média de 300%.

©ABMS, 2019

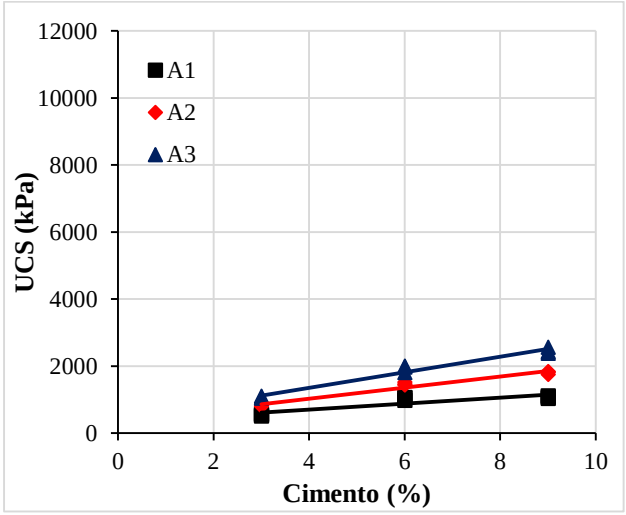

Figura 2. Influência do teor de cimento na resistência UCS das misturas solo-vidro para 7 dias de cura.

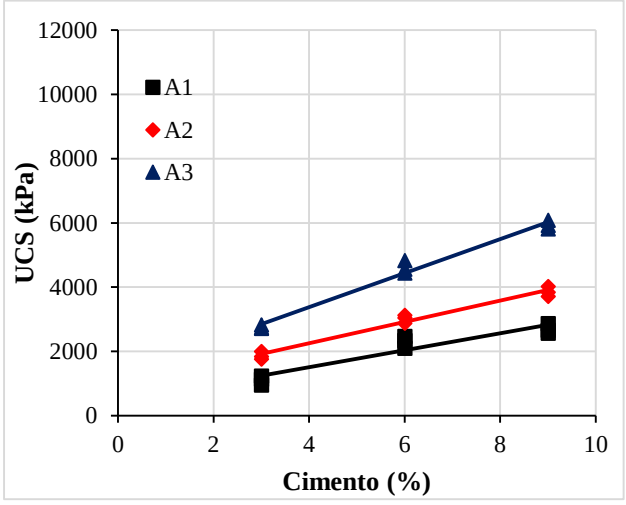

Figura 3. Influência do teor de cimento na resistência UCS das misturas solo-vidro para 28 dias de cura.

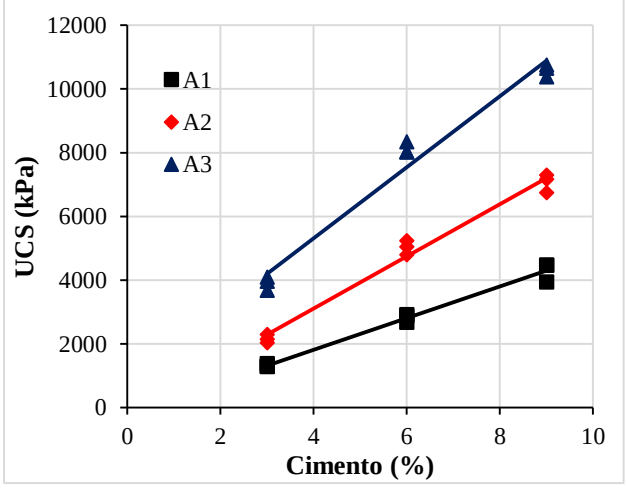

Figura 4. Influência do teor de cimento na resistência UCS das misturas solo-vidro para 90 dias de cura.

Os resultados das Figuras 2-4 podem ser expressos em termos da compactação e quantidade de cimento usando o índice porosidade/cimento (η/C_{iv}). Onde η representa os vazios e C_{iv} representa o volume de cimento unitário. Assim, a Figura 5 mostra os resultados de UCS- η/C_{iv} para as misturas compactadas e equações que controlam UCS de forma potencial para 7 (Eq. 1), 28 (Eq. 2) e 90 dias de cura (Eq. 3), dada pelas seguintes expressões:

$$q_u = 1565{,}4\times10^6 \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,20}}\right]^{-3,87} \quad (R^2 = 0{,}98) \qquad (1)$$

$$q_u = 3644{,}8\times10^6 \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,20}}\right]^{-3,87} \quad (R^2 = 0{,}99) \qquad (2)$$

$$q_u = 6102\times10^6 \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,20}}\right]^{-3,87} \quad (R^2 = 0{,}94) \qquad (3)$$

Para fazer compatíveis UCS- η/C_{iv}, os valores de C_{iv} tiveram que se ajustar a um expoente de 0,20. Este expoente acrescentou os valores de coeficiente de determinação das equações e depende do tipo de solo.

A Figura 5 mostra como aumenta a resistência UCS de maneira potencial e com o aumento do tempo de cura. A diminuição de η/C_{iv} acrescenta os valores de q_u e vice-versa devido à diminuição dos vazios e aumento do volume do cimento e vidro em pó. O acréscimo de q_u com a adição de vidro pode ser comparada com a resistência do solo-cimento. Por exemplo, para 28 dias de cura as misturas solo-cimento com 3% de cimento, compactadas na densidade de 14,5 kN/m^3 obtém um valor de UCS=500 kPa. Adicionando 15% de vidro, a resistência aumenta para 2000 kPa. O mesmo acontece com as demais misturas. Ao adicionar o pó de vidro as reações pozolânicas aumentam provocando a formação de maior porcentagens de C-S-H. Assim, a melhoria da ligação entre as partículas do solo pelo gel geopolimérico do cimento com o pó de vidro tem sido o principal fator para o aumento da resistência dos corpos de prova. Este

©ABMS, 2019

fator foi o responsável pelo aumento de resistência de materiais geopoliméricos em estúdios prévios feitos por Pourabbas Bilondi et al. (2018a, 2018b).

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o comportamento mecânico de misturas solo-cimento-vidro. Foi usado o índice porosidade/cimento para descrever o crescimento de q_u. De acordo aos resultados as seguintes conclusões podem ser anexadas:

a). A resistência à compressão simples dos corpos de prova de misturas solo-cimento aumentou com o acréscimo do teor de pó vidro de 15% e com o aumento da massa específica seca de moldagem. Além disso, uma tendência linear foi a melhor forma de representar o crescimento de q_u com a variação do teor de cimento de 3 a 9%. Por outra parte, a diminuição da porosidade das amostras também fez aumentar q_u.

b). A relação porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) demonstrou ser um parâmetro eficiente para estudar o comportamento mecânico das misturas solo-cimento-pó de vidro. Um exponente de 0,20 sobre o teor volumétrico de cimento ($\eta/C_{iv}^{0.20}$) forneceu melhor ajuste das amostras ensaiadas à compressão simples.

AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer o apoio financeiro da Fundação Araucária do Paraná, CAPES e CNPq.

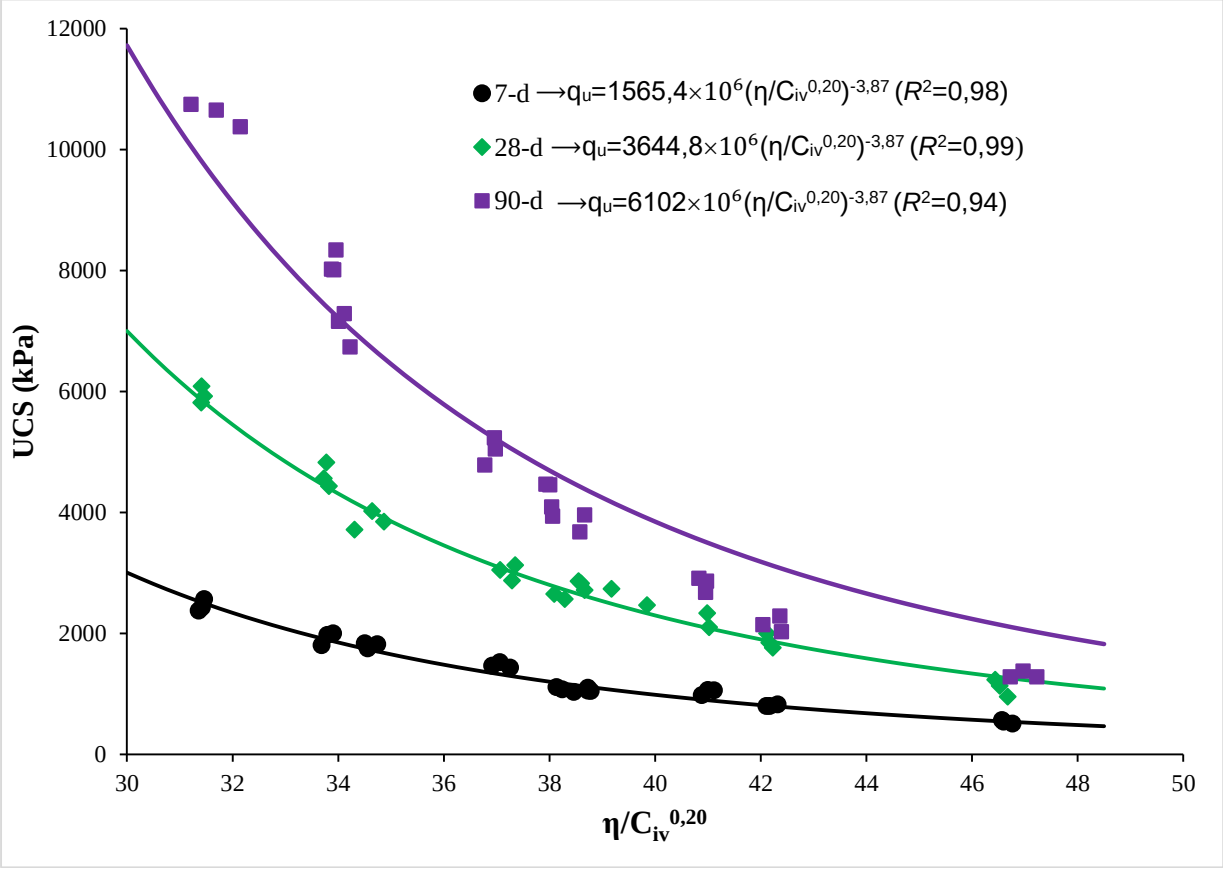

Figura 5. Influência do índice porosidade/cimento (ajustado com 0,20) na resistência à compressão simples das misturas solo-vidro considerando tempos de cura de 7, 28 e 90 dias.

REFERÊNCIAS

Arulrajah, A., Kua, T. A., Horpibulsuk, S., Mirzababaei, M., & Chinkulkijniwat, A. (2017). Recycled glass as a supplementary filler material in spent coffee grounds geopolymers. *Construction and Building Materials*, *151*, 18-27.

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). Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. NBR 16605: 2017, Rio de Janeiro, Brasil.

ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Rochas e solos. NBR 6502: 1995. Rio de Janeiro, Brasil.

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.

ASTM. ASTM D 2487 - 11 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). 2011, *ASTM International, West Conshohocken, Pa*, D5521-5, 1–5.

ASTM. ASTM D 854 - 14 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer 1. 2014, *ASTM International, West Conshohocken, Pa*.

Bilondi, M. P., Toufigh, M. M., & Toufigh, V. (2018a). Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils. *Construction and Building Materials*, 170, 302-313.

Bilondi, M. P., Toufigh, M. M., & Toufigh, V. (2018b). Using calcium carbide residue as an alkaline activator for glass powder–clay geopolymer. *Construction and Building Materials*, 183, 417-428.

Moreira, E. B., Baldovino, J. A., Rose, J. L., & dos Santos Izzo, R. L. (2019). Effects of porosity, dry unit weight, cement content and void/cement ratio on unconfined compressive strength of roof tile waste-silty soil mixtures. *Journal Of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *11*(2), 369-378.

Turgut, P. (2013). Fly ash block containing limestone and glass powder wastes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(6), 1425-1431.