AVALIAÇÃO DA POZOLONICIDADE DOS SOLOS E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA A ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

POZZOLANIC CEMENT: EVALUATION OF THE POZZOLONICITY OF SOILS AND ITS CONTRIBUTION TO THE MECHANICAL STABILIZATION OF MORTARS

Adyson Müller Vieira Guimarães
Universidade Federal do Pará | Belém, Pará | adysonmuller2016@gmail.com

Evandro Julio da Silva Junior
Universidade Federal do Pará | Belém, Pará | evandro.junior@itec.ufpa.br

Taiza Naiana da Silva Ferreira
Universidade Federal do Pará | Belém, Pará | taizaferreira@ufpa.br

Luciana Carvalho Queiroz
Universidade Federal do Pará | Belém, Pará | lucianaqueiroz@gmail.com

Resumo

O tema sustentabilidade tem sido abordado constantemente em todo o mundo, ganhando importância notável pelos altos índices de gases poluentes que são diariamente emitidos na atmosfera. A fabricação de cimento Portland é responsável por um elevado impacto quando nos referimos a gases de efeito estufa (GEE). Com o crescente impacto gerado, surge a necessidade de estudar materiais suplementares ou novas técnicas para que possa substituir, em parte, os materiais utilizados como matérias primas dos cimentos. Nesse sentido, esta pesquisa investiga o índice de pozolanicidade de diferentes tipos de solos, sendo eles: arenoso, arenoso com baixo teor de argila, argilo siltoso e argiloso, e suas contribuições na estabilização química e resistência mecânica. Resultados mostram que aos 7 dias algumas misturas apresentam valores de índice de pozolanicidade atrávez da NBR 5752 (ABNT, 2014) e que eles impactam no comportamento mecânico dos solos sendo eles: solo arenoso (AR), arenoso com baixo teor de argila (SBA), um solo argilo siltoso (SAS), um solo argiloso (SA)

Palavras-chave: Sustentabilidade; Cimento Portland; Gases de Efeito Estufa (GEE); Pozolanicidade; Estabilização Química

ABSTRACT

The topic of sustainability has been constantly addressed worldwide, gaining notable importance due to the high levels of polluting gases that are emitted into the atmosphere every day. The manufacture of Portland cement is responsible for a high impact when it comes to greenhouse gases (GHG). With the increasing impact generated, there is a need to study supplementary materials or new techniques that can partially replace the materials used as raw materials for cement. In this sense, this research investigates the pozzolanicity index of different types of soils, namely: sandy, sandy with low clay content, silty clay and clayey, and their contributions to chemical stabilization and mechanical resistance. Results show that after 7 days some mixtures present pozzolanicity index values according to NBR 5752 (ABNT, 2014) and that they impact the mechanical behavior of the soils, namely: sandy soil (AR), sandy soil with low clay content (SBA), a silty clay soil (SAS), a clayey soil (SA).

Keywords: Sustainability; Portland Cement; Greenhouse Gases (GHG); Pozzolanicity; Chemical Stabilization

1 INTRODUÇÃO

O tema sustentabilidade tem sido abordado constantemente em todo o mundo, ganhando importância notável pelos altos índices de gases poluentes que são diariamente emitidos na atmosfera. Esse cenário tem gerado preocupações globais sobre os impactos das atividades humanas no meio ambiente e no equilíbrio climático do planeta (WRI, 2020). A fabricação de cimento Portland é responsável por um elevado impacto quando nos referimos a gases de efeito estufa (GEE). De acordo com a associação mundial de negócios e

desenvolvimento sustentável, *World Business Council for Sustainable Development*, cerca de 5% do total das emissões antrópicas de carbono em escala mundial são provenientes da indústria cimenteira. Estudos recentes destacam que a produção de cimento é responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de CO_2, devido à calcinação do calcário e ao consumo energético intenso (LE et al., 2020; HABERT et al., 2020).

Nesse contexto, devido ao seu potencial de melhorar o desempenho e a sustentabilidade de concretos e argamassas, a utilização de materiais pozolânicos na construção civil tem despertado crescente interesse. As pozolanas, ricas em sílica e alumina, reagem na presença de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), formado a partir da interação dos produtos de hidratação do cimento, produzindo compostos cimentantes e aumentando a resistência das misturas. Ao utilizar esses materiais, tem-se a diminuição do consumo de clínquer, contribuindo para a redução do impacto ambiental na produção de cimento e trazendo a possibilidade de utilizar resíduos e materiais alternativos. Dessa forma, este trabalho de iniciação científica tem por objetivo principal estudar o comportamento de diferentes solos argilosos, sem calcinação, avaliando seu grau de pozolanicidade e a contribuição desta propriedade no comportamento mecânico, buscando uma alternativa para o elevado consumo de cimento utilizado na técnica de estabilização química de solos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os solos utilizados neste estudo foram um solo arenoso (AR), arenoso com baixo teor de argila (SBA), um solo argilo siltoso (SAS), um solo argiloso (SA) e o cimento Portland CPV-ARI. O solo foi inicialmente submetido a um processo de secagem em estufa a 100ºC por 24 horas. Após a secagem, o solo foi destorroado manualmente, preservando o tamanho natural das partículas, utilizando um almofariz e mão de gral revestida com borracha, seguido de peneiramento em malha de 4,75 mm, garantindo assim a utilização sem que suas características naturais sejam alteradas. O solo destorroado foi homogeneizado, misturando-se porções de diferentes pontos da amostra para garantir a uniformidade e representatividade do material nos ensaios experimentais.

Foram realizados os ensaios de caracterização no solo, sendo estes a granulometria e massa específica. Já para o cimento foram realizado o ensaio de massa específica (NBR 16605. ABNT 2017) e finura por peneiramento (NBR 12826. ABNT 2014), e tempos de pega (NBR 16607. ABNT 2018). Para avaliar a pozolanicidade dos solos naturais foram realizados os ensaios de índice de pozolanicidade de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014). E para analisar a contribuição da atividade pozolânica de cada solo na estabilização química, foram produzidas misturas de solo cimento, fixando a taxa de cimento em 33,33%, teor de umidade ótima de 15,41%, peso específico aparente seco de 14,46kN/m³ e idade de cura de 7 e 28 dias. As misturas foram identificadas da seguinte forma: REF (cimento+solo arenoso); CSBA (cimento+SBA); CSAS (cimento+SAS); CSA (cimento+SA).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os resultados de caracterização dos solos, onde é possível que o solo arenoso com baixo teor de argila (SBA) é mal graduado e, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos, classificado como areia fina (S). Já o solo argilo siltoso (SAS) e solo argiloso (SA) possuem comportamento uniforme, com percentual de partículas passantes na peneira 200 *mesh*. Os valores de massa específica são 2,66g/cm³ (SBA), 2,61g/cm³ (SAS) e de 2,59g/cm³ (SA), considerados próximos o que irá contribuir para compatibilização do volume esperado na redução do consumo de cimento durante estabilização química.
Os resultados de caracterização do CP V – ARI indicam uma massa específica de 3,08g/cm³, índice de finura de 80% atendendo aos requisitos normativos. O tempo de pega inicial foi de 2:51h e final de 4:11h, de acordo com os padrões normativos, o tempo de pega final está dentro do limite máximo de 10 horas. Esse resultado indica que o cimento atende às exigências para aplicações convencionais, garantindo um comportamento adequado durante a execução das obras.

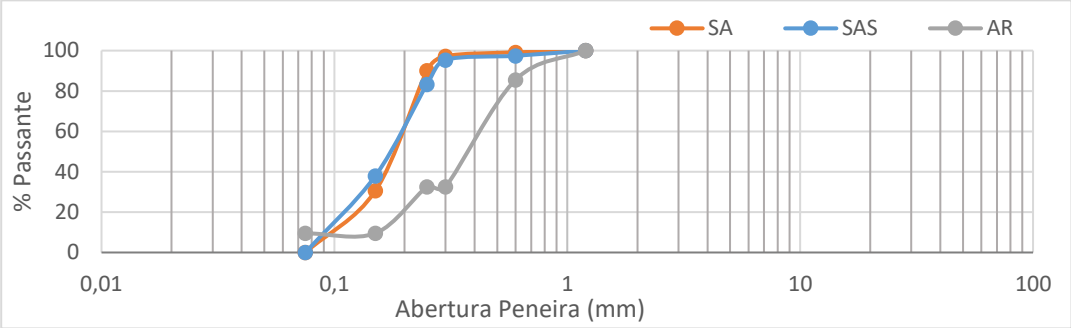
Tabela 01: Propriedades físicas do solo arenoso com baixo teor de argila.

Propriedades	Símbolo	SBA	SA	SAS	AR
Porcentagem de Areia (%)	-	94,52	97,12	99,59	75,04

Porcentagem de Finos (<0,075mm) (%)	-	5,48	31,26	38,11	89,31
Massa Especifíca (g/cm³)	Ps	2,66	2,59	2,61	2,61

Fonte: Autores (2025)

Figura 1: Curva Granulométrica.

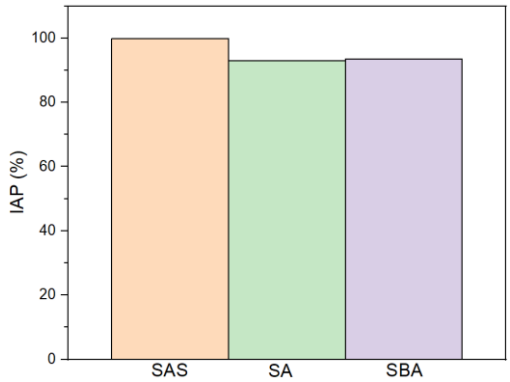


Fonte: Autores.

3.2 ATIVIDADE POZOLÂNICA DOS SOLOS

O índice de atividade pozolânica (ver Figura 1) apresentou que o solo SAS possuiu maior atividade com 99,86%, seguido pelo solo SBA com 93,58% e SA com 92,92%, atendendo aos requisitos físicos da NBR 12653 (ABNT, 2014) para pozolanas naturais de valores de >94%.

Figura 2: Índice de atividade pozolânica.

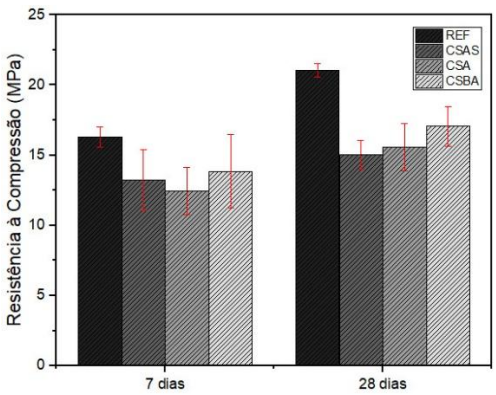


Fonte: Autores.

3.3 INFLUÊNCIA DA IAP NA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO

A Figura 2 apresenta dos resultados das propriedades mecânicas dos solos estabilizados quimicamente com cimento CPV-ARI e a influência do índice de pozolanicidade de cada solo nas propriedades finais.

Figura 3: resistência a compressão simples.



Fonte: Autores.

Os resultados observados mostraram que o cimento de referência (CP-V-ARI) apresentou uma resistência média aos 7 dias de 16,29Mpa e 21,05Mpa aos 28 dias, refletindo a hidratação típica do cimento Portland, sem a influência de adições. Para o cimento com solo arenoso de baixo teor de argila (SBA), a resistência aos 7 dias foi de 13,85Mpa e 17,06Mpa aos 28 dias, representando um ganho de aproximadamente 18,81% em relação ao cimento de referência. Esse resultado sugere que o solo utilizado apresenta algum grau de pozolanicidade que corrobora com o resultado do IAP, contribuindo para o desenvolvimento de resistência, embora a substituição parcial reduza a quantidade de clínquer ativo, principal responsável pela resistência do cimento. No caso do cimento com solo argiloso (SA), a resistência aos 7 dias foi de 12,46Mpa e 15,58Mpa os 28 dias, um ganho significativo de 20,02% em relação ao cimento de referência, indicando que a reatividade limitada do solo não foi suficiente para compensar a menor proporção de clínquer no período avaliado. Já o cimento com solo argilo-siltoso (SAS) apresentou resistência de 13,23Mpa aos 7 dias e 15,04MPa aos 28 dias, com um ganho de 12,03% em relação ao cimento de referência. Apesar disso, o desempenho foi superior ao da mistura com argila, sugerindo que uma menor proporção de solo permite um equilíbrio entre a hidratação do clínquer e as reações pozolânicas iniciais.

5 CONCLUSÃO

Com base nos objetivos propostos, ao analisar o solo argilo siltoso (SAS), observa-se um índice de pozolanicidade de 99,86%, um valor relativamente elevado. Isso indica que, apesar do teor reduzido de argila, o solo contém uma quantidade significativa de sílica amorfa ou outras fases reativas, capazes de interagir com o hidróxido de cálcio, contribuindo para o ganho de resistência. Entretanto nas misturas CSAS e CSA, obtivemos resultados menores, o que indica provável necessidade de compensação na mistura Cimento + Solo, fazendo que com a parcela pozolânica presente na mistura não tenha proporcionalidade equivalente com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), assim reduzindo os produtos de reação provenientes da reação química entre ambos.

Verifica-se que a substituição parcial do CP-V ARI pelos solos SBA, SAS e AS apresenta resultados relevantes e distintos. Essa substituição pode acarretar certa perda de resistência inicial. No entanto, considerando que se trata de solos com características pozolânicas, é esperado que ocorra uma evolução no desempenho ao longo do tempo.

A aplicação de solos pozolânicos em matrizes cimentícias surge como uma alternativa sustentável e econômica, especialmente em projetos de menor exigência estrutural. Essa prática contribui para a redução do consumo de cimento, um componente de alto impacto ambiental na produção de cimento, e possibilita o aproveitamento de recursos locais, minimizando os custos de transporte e promovendo a sustentabilidade na construção civil. No entanto, é indispensável realizar uma caracterização específica dos solos a serem utilizados, considerando suas propriedades químicas, mineralógicas e granulométricas, a fim de garantir a compatibilidade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 16605 DE 06/2017 - Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12826 - Cimento Portland e Outros Materiais em Pó - Determinação Do Índice de Finura Por Meio de Peneirador Aerodinâmico

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 16607 DE 12/2018 - Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5752 DE 06/2014 Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias

CHECCUCCI, Érica de Sousa; AMORIM, Arivaldo Leão de. Método para análise de componentes curriculares: identificando interfaces entre um curso de graduação e BIM. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 5, n. 1, jun. 2014. ISSN 1980-6809. Disponível em: <http://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8634540>. Acesso em: 11 mar. 2016. doi:http://dx.doi.org/10.20396/parc.v5i1.8634540.

HABERT, G.; DENELE, M.; SHAFTI, A.; BOYER, B. Environmental impact of Portland cement production. *Environmental Science & Technology*, v. 54, n. 1, p. 194-202, 2020.

LE, Q. D.; NGUYEN, P. T.; PHAN, T. L.; NGUYEN, D. M. Carbon dioxide emissions from cement industry in Vietnam. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 192, n. 10, p. 1-11, 2020.

WORLD BUSSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPER – WBCSD. Cement Sustainability Initiative. Cement technology roadmap 2009: carbon emissions reductions up to 2050. Paris, 2010.

WRI. World Resources Institute Annual Report 2020. World Resources Institute, 2020.