CAPÍTULO 24 · Parte II · Materiais
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/kceh2328
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/sdpyvz59

AVALIAÇÃO QUÍMICO-MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL DA ADIÇÃO DE SILICATO DE ETILA EM PASTAS DE CIMENTO

Eduardo Pereira[1]; Adriana Fiori Moura[1]*; Eloise Aparecida Langaro[1]; Maria Vitoria Pedroso[1] e Matheus Villian Valenga[1]
*Autor de contato: a.fiorimoura@gmail.com

[1] Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil

RESUMO

Silicatos de etila podem formar sílica amorfa por hidrólise e condensação, com potencial de modificar os produtos de hidratação e a microestrutura de matrizes cimentícias. Este trabalho avalia os efeitos da adição do silicato de etila TS28 em pastas de cimento Portland CP V-ARI, com relação água/cimento de 0,57, nos teores de 1%, 5% e 10% em relação à massa de cimento, em comparação ao traço de referência. Aos 28 dias, as amostras foram investigadas por difração de raios X, termogravimetria e derivada termogravimétrica, e microscopia eletrônica de varredura. Os difratogramas indicaram a manutenção das fases hidratadas usuais, sem surgimento de novas fases cristalinas, com variações discretas na intensidade relativa das reflexões atribuídas à portlandita em teores mais elevados. As curvas TG/DTG evidenciaram resposta dependente do teor de adição, com redução do evento associado à desidroxilação de $Ca(OH)_2$ em 10%, aumento progressivo da massa residual e maior contribuição relativa do evento em altas temperaturas. As micrografias de MEV mostraram matriz heterogênea, com precipitados localizados e regiões de aspecto amorfo compatíveis com produtos silicatados de baixa cristalinidade. Em conjunto, os resultados indicam que o TS28 modifica a evolução dos produtos de hidratação e a organização microestrutural do sistema de forma dependente do teor de adição, contribuindo para o entendimento do mecanismo de atuação do TEOS em matrizes cimentícias.
Palavras-chave: Silicato de etila; TS28; pasta de cimento; DRX; TG/DTG.

ABSTRACT

Ethyl silicates may form amorphous silica through hydrolysis and condensation, with the potential to modify hydration products and the microstructure of cementitious matrices. This study evaluates the effects of adding the ethyl silicate TS28 to CP V-ARI Portland cement pastes at a water-to-cement ratio of 0.57, using contents of 1%, 5%, and 10% by mass of cement, compared with a reference mix. At 28 days, the samples were investigated by X-ray diffraction, thermogravimetry and derivative thermogravimetry, and scanning electron microscopy. XRD patterns indicated the persistence of the usual hydrated phases, with no appearance of new crystalline phases, and only discrete changes in the relative intensity of reflections attributed to portlandite at higher TS28 contents. TG/DTG curves showed a dosage-dependent response, including a reduction in the event associated with $Ca(OH)_2$ dehydroxylation at 10%, a progressive increase in residual mass, and a greater relative contribution of the high-temperature event. SEM micrographs revealed a heterogeneous matrix with localized precipitates and amorphous-like regions consistent with low-crystallinity silicate products. Overall, the results indicate that TS28 modifies the evolution of hydration products and the microstructural organization of the system in a dosage-dependent manner, contributing to the understanding of the mechanism of TEOS action in cementitious matrices.
Keywords: Ethyl silicate; TS28; cement paste; XRD; TG/DTG.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais cimentícios desempenham papel central na indústria da construção, em função de sua ampla disponibilidade, resistência mecânica e versatilidade. Apesar disso, propriedades intrínsecas, como porosidade e fissuração em idades iniciais, podem comprometer desempenho e durabilidade, reduzindo a vida útil em condições de exposição mais severas. Nesse contexto, estratégias de modificação da matriz por meio de aditivos e modificadores químicos têm sido investigadas visando aprimorar a microestrutura e, consequentemente, o comportamento do material.

Dentre essas alternativas, destaca-se o ortossilicato de tetraetila (TEOS, $Si(OC_2H_5)_4$), cujo uso é consolidado na conservação e restauração do patrimônio construído, especialmente na consolidação de materiais porosos. Sua aplicação é atribuída à capacidade de penetrar na rede porosa e formar uma fase de sílica predominantemente amorfa por hidrólise e condensação, contribuindo para a coesão interna do substrato, sem alterar de modo substancial sua permeabilidade natural, quando adequadamente especificado e aplicado (Cahyandaru, 2021; Kapetanaki *et al*., 2020; Zhao *et al*., 2013; Watanabe *et al*., 2021). A transposição desse conceito para matrizes cimentícias tem motivado estudos em que o TEOS é incorporado à mistura, com o objetivo de influenciar a evolução microestrutural desde as primeiras idades (Cai *et al*., 2016; Haoxiang *et al*., 2021; Xu *et al*., 2019). No contexto nacional, também se destaca a discussão sobre o emprego de silicatos em estratégias de proteção e mitigação de processos deletérios em materiais cimentícios, incluindo abordagens relacionadas à proteção superficial e interação com o substrato cimentício (Langaro, 2023).

Do ponto de vista químico, o TEOS apresenta grupos etóxi ($-OC_2H_5$), que conferem reatividade em meio aquoso. Sua transformação envolve, inicialmente, hidrólise com formação de silanóis e liberação de etanol, seguida por reações de condensação que resultam na formação de dióxido de silício (SiO_2) no interior do sistema poroso (Sandrolini *et al*., 2012). Em matrizes cimentícias, sobretudo na presença de hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$], a sílica pode participar de reações que conduzem à formação adicional de produtos do tipo silicato de cálcio hidratado (C-S-H), com implicações na densificação local da microestrutura e na evolução das propriedades do material (Barberena-Fernández *et al*., 2015; He *et al*., 2024). Entretanto, a cinética e a extensão dessas transformações são condicionadas pela disponibilidade de água, uma vez que a hidrólise e a policondensação do silicato competem, em diferentes graus, com a hidratação do cimento, tornando o teor de adição e as condições de mistura e cura variáveis críticas para obtenção de efeitos reprodutíveis, conforme também apontado em estudos voltados à proteção com silicatos e à interação com matrizes cimentícias (Langaro, 2023).

A literatura reporta efeitos do TEOS sobre a microestrutura de sistemas cimentícios, com possíveis implicações em porosidade, permeabilidade e indicadores de durabilidade, além de alterações no balanço de portlandita e na formação de produtos hidratados (Franzoni *et al*., 2013; Pigino *et al*., 2012; Husillos-Rodríguez *et al*., 2022; Koohestani *et al*., 2016; Langaro, 2023). Todavia, ainda são limitados os estudos que discutem, de forma integrada, evidências mineralógicas, térmicas e microestruturais da incorporação do TEOS diretamente em pastas, especialmente quando se busca isolar o efeito do teor de adição sob uma condição fixa de relação água/cimento.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos da adição de silicato de etila em pastas de cimento, na formulação comercial TS28, adotando-se a relação água/cimento de 0,57 e variando-se o teor de adição, com base em difração de raios X (DRX), análise termogravimétrica (TG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Buscando identificar tendências associadas à

evolução dos produtos de hidratação e a alterações microestruturais, contribuindo assim para o entendimento do mecanismo de atuação do TEOS em matrizes cimentícias.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para a realização deste estudo, o silicato de etila TS28 foi incorporado a pastas de cimento com relação água/cimento de 0,57, em teores de 1%, 5% e 10% em relação à massa de cimento, além do traço de referência sem adição. A quantidade de TS28 foi calculada com base na massa de cimento e a água de amassamento foi ajustada de modo a manter a relação água/cimento nominal, considerando a fração líquida do silicato incorporado.

O ligante empregado foi cimento Portland CP V-ARI, de alta resistência inicial, escolhido por sua baixa adição mineral, o que favorece a interpretação dos efeitos atribuídos ao silicato de etila. Por sua vez, o TS28, associado ao ortossilicato de tetraetila, caracteriza-se por baixa viscosidade e ausência de pré-hidrólise, com composição típica reportada em ficha técnica do fornecedor. A Tabela 1 apresenta a composição química do cimento e a Tabela 2 mostra as propriedades físicas do TS28.

Tabela 1 - Composição química média do cimento CPV, em %

Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Perda ao fogo	CaO livre	Resíd. Insol.	Equiv. Alcal.
4,39	18,6	3,69	61,3	3,37	2,7	3,56	1,65	0,83	0,68

Fonte: Cimento Itambé, 2025.

Tabela 2 - Propriedades físicas do silicato de etila utilizado

Propriedade	TS28
Composição	Orto silicato de tetraetila
Densidade a 20°C (g/cm³)	0,93 a 0,94
Teor mínimo de SiO_2 (%)	28
Viscosidade a 25°C (cP, aprox.)	1
Índice de refração a 25°C	1,381 a 1,383
Estado de hidrólise	Não hidrolisado
Proporção de sólidos[1]	10,91%

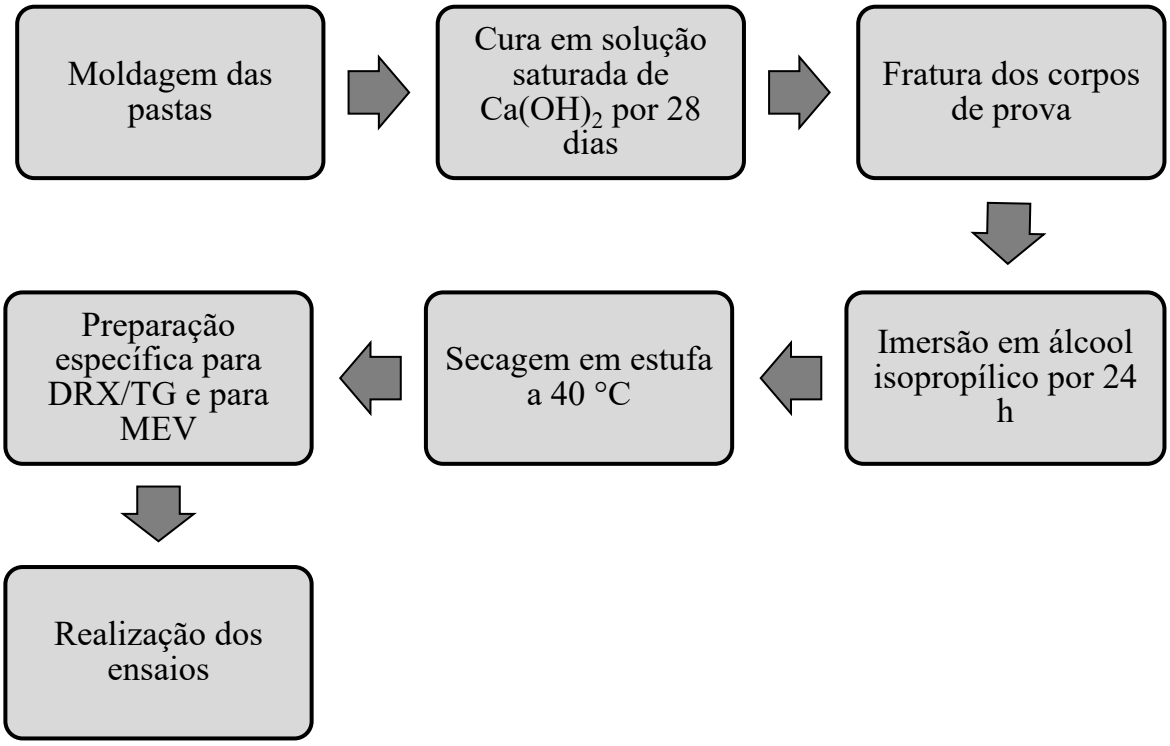
Fonte: Hergrand do Brasil Ltda, *[S.d.]* e autores[1].

As pastas foram moldadas em corpos de prova cilíndricos de 2 cm de diâmetro por 4 cm de altura. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram curados por imersão em solução saturada de hidróxido de cálcio até as idades de ensaio, com o objetivo de padronizar o meio de cura e reduzir a lixiviação de compostos solúveis, como orienta a NBR 5738:2015.

2.2 Métodos

A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, as principais etapas de preparo das amostras e de realização dos ensaios empregados na caracterização microestrutural das pastas.

Figura 1 - Fluxograma simplificado do procedimento experimental de preparo das amostras e realização dos ensaios microestruturais



Para a análise microestrutural das pastas, foi realizada a interrupção do processo de hidratação após 28 dias de cura. Inicialmente, os corpos de prova foram fraturados e os fragmentos obtidos foram imediatamente imersos em álcool isopropílico por 24 h, com o objetivo de cessar a hidratação. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 40 °C e armazenadas em recipientes hermeticamente fechados, de modo a evitar reidratação até a realização dos ensaios DRX, TG e MEV. Para DRX e TG, as amostras foram moídas e o material pulverulento foi peneirado em malha 200.

A DRX foi empregada para identificar as fases cristalinas presentes nas amostras moídas dos quatro traços avaliados, correspondentes ao traço de referência e às pastas com 1%, 5% e 10% de adição de TS28. As análises foram realizadas em difratômetro de raios X, com geometria de reflexão em modo pó, no intervalo de 2θ de 5° a 90°, com passo de 0,02°, sob varredura contínua.

A TG foi utilizada para avaliar a variação de massa das amostras em função da temperatura, permitindo identificar eventos associados à perda de água, à desidroxilação de produtos hidratados e à decomposição de carbonatos. O ensaio foi conduzido sob aquecimento controlado até 750 °C, em atmosfera de argônio, com registro contínuo da massa, possibilitando a interpretação das curvas TG/DTG.

Por fim, as análises de MEV foram realizadas em microscópio Tescan Mira 3 FEG SEM, equipado com detectores de elétrons secundários e retroespalhados. Para obtenção de imagens com adequada

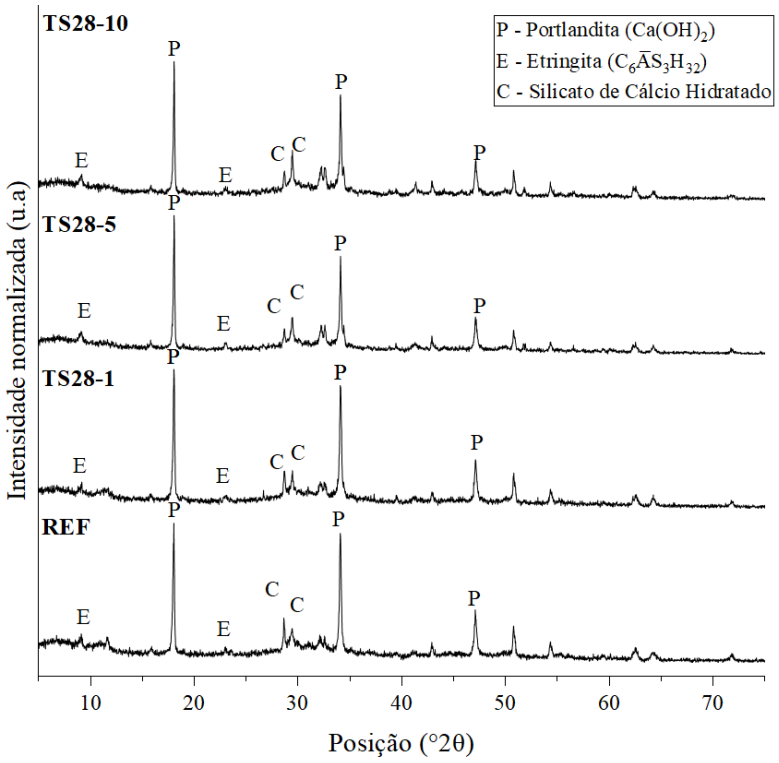
qualidade, as amostras foram secas e recobertas com fina camada de ouro, visando reduzir efeitos de carregamento e melhorar a condutividade elétrica superficial.

3. RESULTADOS

3.1 Difratometria de raios X

A Figura 2 apresenta os difratogramas das pastas aos 28 dias para o traço de referência e para as composições com adição de TS28. De modo geral, não se observou o surgimento de novas fases cristalinas associadas à incorporação do silicato de etila. Em todas as amostras foram identificadas reflexões atribuídas à portlandita e à etringita, além de sinais compatíveis com produtos silicatados hidratados, usualmente de baixa cristalinidade. As diferenças entre os traços manifestaram-se predominantemente como variações discretas de intensidade relativa dos picos, o que deve ser interpretado de forma qualitativa, uma vez que a intensidade foi normalizada e a difração de raios X apresenta sensibilidade limitada para fases amorfas, como a sílica formada por hidrólise e condensação do TEOS.

Figura 2 - DRX das pastas, em unidades arbitrárias



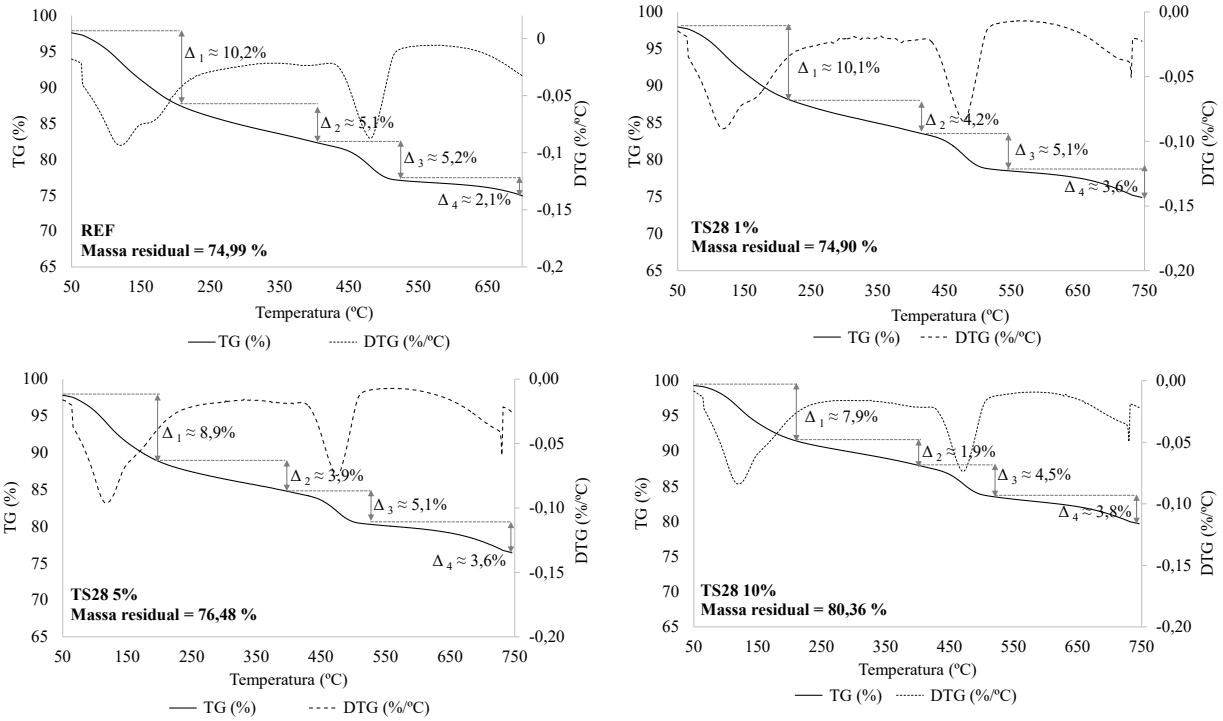
A ausência de novas fases cristalinas identificáveis por DRX, associada apenas a variações discretas na intensidade relativa das reflexões de portlandita, está em consonância com estudos que indicam que a incorporação de TEOS tende a modificar predominantemente a fração amorfa ou de baixa cristalinidade do sistema, sem induzir o surgimento de novas fases cristalinas detectáveis por difração de raios X, ao mesmo tempo em que pode promover consumo parcial de portlandita e reorganização local dos produtos de hidratação (Barberena-Fernández et al., 2015; Husillos-Rodríguez et al., 2022; Sandrolini et al., 2012).

Observa-se, nas composições com maior teor de TS28, tendência a leve redução da intensidade relativa das reflexões de portlandita, concomitante a discreta alteração do sinal na região associada a produtos silicatados hidratados. Esse comportamento sugere possível consumo parcial de $Ca(OH)_2$ e reorganização dos produtos de hidratação, hipótese coerente com a literatura que reporta a formação de gel silicatado e produtos do tipo C-S-H a partir da interação entre espécies silicatadas e portlandita, contribuindo para modificações locais da matriz hidratada (Barberena-Fernández et al., 2015; Sandrolini et al., 2012). Ainda assim, tais evidências devem ser interpretadas com cautela, uma vez que o DRX, isoladamente, não permite identificar diretamente a fração amorfa do sistema nem quantificar com precisão fases pouco cristalinas.

3.2 Termogravimetria

A Figura 3 apresenta as curvas TG/DTG das pastas aos 28 dias para o traço de referência e para as composições com 1%, 5% e 10% de TS28, na relação água/cimento de 0,57.

Figura 3 - Curvas TG e DTG das pastas aos 28 dias



Observam-se quatro faixas principais de perda de massa, associadas à evaporação de água e à decomposição de produtos hidratados. Em baixas temperaturas, aproximadamente entre 50 e 200 °C, ocorre a principal perda de massa (Δ_1), relacionada à eliminação de água fisicamente adsorvida e à desidratação inicial de produtos hidratados. Para todas as composições, esse patamar permanece elevado, com valores próximos a 7,9-10,2%, indicando contribuição expressiva de água livre e água fracamente ligada.

Na faixa intermediária, aproximadamente entre 200 e 450 °C, verifica-se perda adicional (Δ_2), usualmente atribuída à desidratação progressiva de hidratos, incluindo C-S-H e fases aluminato-sulfatadas. Nota-se que Δ_2 tende a diminuir com o aumento do teor de TS28, passando de cerca de 5,1% no traço de referência para 1,9% na composição com 10% de TS28, sugerindo redução

relativa de eventos associados a hidratos nessa região, ou redistribuição de água combinada para outras faixas de decomposição.

O evento mais característico ocorre entre aproximadamente 450 e 520 °C (Δ_3), associado à desidroxilação da portlandita. Para o traço de referência e para as composições com 1% e 5% de TS28, Δ_3 permanece em torno de 5,1%, enquanto para 10% de TS28 observa-se redução para aproximadamente 4,5%. Essa tendência indica diminuição relativa da fração de portlandita em teores elevados de TS28, em concordância com a interpretação dos difratogramas. Esse comportamento é coerente com estudos que atribuem ao TEOS a possibilidade de consumir parcialmente a portlandita por meio da reação de seus produtos de hidrólise com $Ca(OH)_2$, favorecendo a formação de produtos silicatados adicionais e alterando a distribuição dos eventos térmicos associados aos hidratos do sistema cimentício (Barberena-Fernández et al., 2015; Sandrolini et al., 2012; Husillos-Rodríguez et al., 2022).

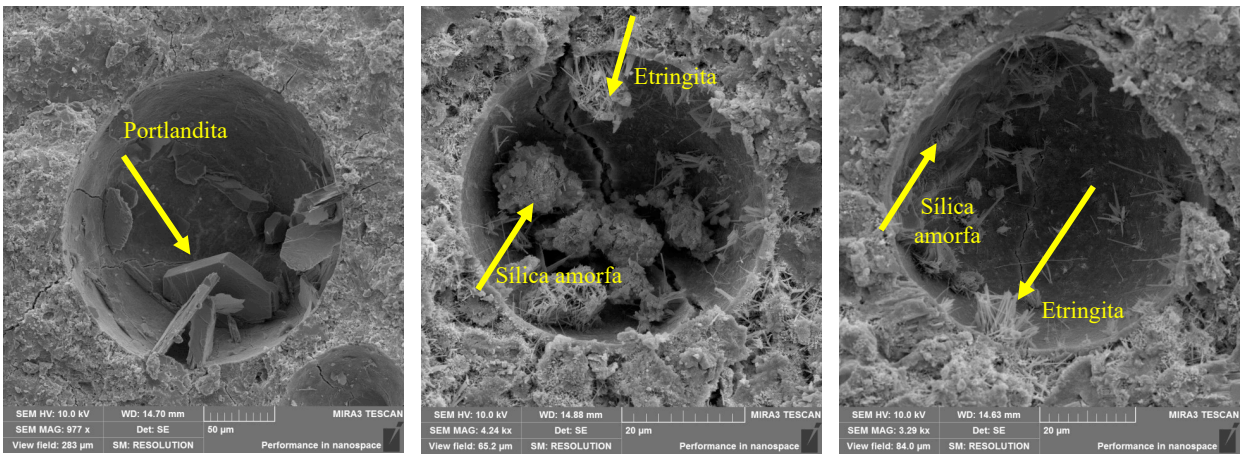
Em temperaturas elevadas, acima de aproximadamente 600 °C (Δ_4), observa-se a perda associada predominantemente à decomposição de carbonatos. Nesta faixa, o traço de referência apresenta Δ_4 de cerca de 2,1%, enquanto as pastas com TS28 exibem valores mais elevados, entre aproximadamente 3,6% e 3,8%. Esse comportamento sugere maior contribuição relativa de carbonatos nas amostras com adição de TS28. A interpretação desse resultado deve, contudo, ser realizada com cautela, uma vez que a contribuição de carbonatos pode ser influenciada não apenas pela evolução do sistema hidratado, mas também pelas condições de secagem, moagem, armazenamento e exposição das amostras ao CO_2 durante o preparo para os ensaios.

A massa residual aos 750 °C aumenta progressivamente com o teor de TS28, passando de cerca de 74,99% no traço de referência para 80,36% em 10% de TS28. Esse aumento é compatível com maior fração de resíduos inorgânicos e com a contribuição de fases de natureza predominantemente não volátil, incluindo sílica amorfa e produtos silicatados hidratados de baixa cristalinidade, cuja identificação não é direta por DRX. Em conjunto, os resultados de TG/DTG indicam que a adição de TS28, em teores mais elevados, tende a reduzir a contribuição relativa de portlandita e a alterar a distribuição das perdas de massa ao longo das faixas de temperatura, com aumento do resíduo final e intensificação relativa do evento em altas temperaturas.

3.3 Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 4 apresenta as MEV das pastas aos 28 dias. De modo geral, observa-se uma matriz heterogênea, com presença de vazios e regiões de menor compactação, além de feições morfológicas compatíveis com produtos de hidratação e precipitados localizados. Em particular, identificam-se cristais lamelares associados à portlandita e estruturas aciculares atribuídas à etringita, bem como regiões com aspecto de gel, compatíveis com produtos silicatados de baixa cristalinidade. Nas composições com TS28, nota-se a ocorrência de material de aparência amorfa em zonas específicas, o que é consistente com a formação de sílica predominantemente amorfa por hidrólise e condensação do silicato de etila e com sua possível interação com a matriz hidratada.

Figura 4 - Microscopias eletrônica de varredura das pastas



Essa interpretação é compatível com estudos que relatam, em sistemas contendo TEOS, modificações localizadas na morfologia do gel e na organização da microestrutura, com formação de regiões silicatadas de baixa cristalinidade e alteração da densificação típica da matriz hidratada, observáveis por técnicas complementares como MEV e EDS (Barberena-Fernández et al., 2015; Husillos-Rodríguez et al., 2022; Yang et al., 2024). No entanto, como essas evidências são espacialmente localizadas, sua extrapolação para o comportamento global do material deve ser feita com cautela.

A interpretação das micrografias deve ser conduzida de forma integrada aos resultados de DRX e TG/DTG. As variações discretas na intensidade relativa das reflexões de portlandita observadas no DRX, assim como a tendência de redução do evento associado à desidroxilação de $Ca(OH)_2$ em teores mais elevados de TS28 na TG/DTG, são compatíveis com a menor evidência de cristais bem desenvolvidos de portlandita em algumas regiões analisadas por MEV. Adicionalmente, a presença pontual de etringita observada nas micrografias encontra correspondência com os difratogramas, que indicam a ocorrência dessa fase, ainda que sem alterações marcantes entre os traços.

Por fim, ressalta-se que o MEV fornece evidências essencialmente qualitativas e localizadas, de modo que inferências globais sobre porosidade e desempenho devem ser feitas com cautela e preferencialmente ancoradas em ensaios específicos. Ainda assim, as micrografias reforçam a conclusão de que a adição de TS28 pode modificar a morfologia e a distribuição de produtos de hidratação, com indícios de formação de fases de baixa cristalinidade e reorganização microestrutural dependente do teor de adição.

4. CONCLUSÕES

Considerando o objetivo de avaliar os efeitos da adição de silicato de etila, na formulação TS28, sobre pastas de cimento com relação água/cimento de 0,57, por meio de difração de raios X, análise termogravimétrica e microscopia eletrônica de varredura, conclui-se que a incorporação do produto modifica a evolução químico-mineralógica e microestrutural do sistema de forma dependente do teor de adição.

No que se refere à difração de raios X, não se observou o surgimento de novas fases cristalinas identificáveis, mantendo-se a presença das fases hidratadas usuais, com variações discretas na intensidade relativa das reflexões atribuídas à portlandita, especialmente nos teores mais elevados. Esse comportamento sugere que a atuação do TS28 ocorre predominantemente sobre a fração

amorfa ou de baixa cristalinidade da matriz, e não pela formação de novas fases cristalinas detectáveis por DRX.

As análises de TG/DTG indicaram resposta dependente do teor de adição, com redução do evento associado à desidroxilação de $Ca(OH)_2$ no teor de 10%, aumento progressivo da massa residual a 750 °C e maior contribuição relativa do evento em altas temperaturas. Em conjunto, esses resultados apontam para alterações na distribuição dos produtos de hidratação e possível consumo parcial de portlandita em teores mais elevados de TS28, embora essa interpretação deva ser conduzida com cautela, em razão da complexidade do sistema e das limitações inerentes às técnicas empregadas.

As micrografias evidenciaram matriz heterogênea, com precipitados localizados e regiões de aspecto amorfo, compatíveis com produtos silicatados de baixa cristalinidade e com reorganização microestrutural induzida pela adição de TS28. Como se trata de evidência qualitativa e localizada, sua leitura deve ser feita de forma integrada aos resultados de DRX e TG/DTG.

Dessa forma, conclui-se que o objetivo proposto foi atendido, uma vez que os resultados permitiram identificar tendências associadas à evolução dos produtos de hidratação e às alterações microestruturais promovidas pelo TS28 em pastas de cimento. Assim, os achados obtidos contribuem para o entendimento do mecanismo de atuação do TEOS em matrizes cimentícias, constituindo base para estudos futuros que correlacionem essas evidências microestruturais com propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), em especial ao Programa Voluntário de Iniciação Científica (PROVIC), e ao Complexo de Laboratórios Multiusuários (CLABMU), pela infraestrutura e suporte técnico. A CAPES é reconhecida pelo apoio à pesquisa. As empresas Itambé e Datiquim são agradecidas pelo fornecimento de materiais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto, Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BARBERENA-FERNÁNDEZ, A. M.; CARMONA-QUIROGA, P. M.; BLANCO-VARELA, M. T. **Interaction of TEOS with cementitious materials: Chemical and physical effects.** Cement and Concrete Composites, v. 55, p. 145–152, 2015. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.09.010.

CAHYANDARU, N. A**pplication of TEOS Modular System on the Preservation of Andesite Type Rock**. Jurnal Konservasi Cagar Budaya Borobudur, v. 15, n. 1, p. 15–25, 2021. DOI: 10.33374/jurnalkonservasicagarbudaya.v15i1.256.

CAI, Y. *et al*. **The use of tetraethyl orthosilicate silane (TEOS) for surface-treatment of hardened cement-based materials: A comparison study with normal treatment agents.** Construction and Building Materials, v. 117, p. 144–151, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.028.

CIMENTO ITAMBÉ. **Relatórios de ensaio, Cimento CP V-ARI**. Curitiba: Cimento Itambé, 2025. Disponível em: (site do fabricante). Acesso em: 2025.

FRANZONI, E.; PIGINO, B.; PISTOLESI, C. **Ethyl silicate for surface protection of concrete: Performance in comparison with other inorganic surface treatments.** Cement and Concrete Composites, v. 44, p. 69–76, 2013. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.05.008.

HAOXIANG, W.; YONGGEN, W.; TIANLUN, L.; MO, L. **Reduction of water absorption of concrete by surface treatment with ethyl silicate.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 638, n. 1, 012116, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/638/1/012116.

HE, J. *et al*. **Ethyl silicate–nanolime treatment for the consolidation of calcareous building materials**. Construction and Building Materials, v. 418, 135437, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135437.

HERGRAND DO BRASIL LTDA. Ficha técnica do silicato de etila TS28. [S.l.]: Hergrand do Brasil Ltda, [s.d.].

HUSILLOS-RODRÍGUEZ, N. *et al*. **Effect of alkoxysilane on early age hydration in portland cement pastes.** Journal of Building Engineering, v. 50, 104127, 2022. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104127.

KAPETANAKI, K. *et al*. **TEOS Modified With Nano-Calcium Oxalate and PDMS to Protect Concrete Based Cultural Heritage Buildings.** Frontiers in Materials, v. 7, 2020. DOI: 10.3389/fmats.2020.00016.

KOOHESTANI, B.; BELEM, T.; KOUBAA, A.; BUSSIÈRE, B. **Experimental investigation into the compressive strength development of cemented paste backfill containing Nano-silica.** Cement and Concrete Composites, v. 72, p. 180–189, 2016. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.06.016.

LANGARO, E. A. **Estudo de diagnóstico e inibição da reação álcali-sílica utilizando cinza volante e proteção de superfície com silicatos.** 2023. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023. Disponível em: (repositório UFPR). Acesso em: 2026.

PIGINO, B.; LEEMANN, A.; FRANZONI, E.; LURA, P. **Ethyl silicate for surface treatment of concrete – Part II: Characteristics and performance.** Cement and Concrete Composites, v. 34, n. 3, p. 313–321, 2012. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.021.

SANDROLINI, F.; FRANZONI, E.; PIGINO, B. **Ethyl silicate for surface treatment of concrete – Part I: Pozzolanic effect of ethyl silicate**. Cement and Concrete Composites, v. 34, n. 3, p. 306–312, 2012. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.12.003.

WATANABE, N. *et al*. **Formation of amorphous silica nanoparticles and its impact on permeability of fractured granite in superhot geothermal environments.** Scientific Reports, v. 11, 5340, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-84744-2.

XU, F.; ZENG, W.; LI, D. **Recent advance in alkoxysilane-based consolidants for stone.** Progress in Organic Coatings, v. 127, p. 45–54, 2019. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.11.003.

YANG, J.; ZUO, W.; WU, Z.; SHE, W. **Towards a deeper understanding of the impact of tetraethoxysilane (TEOS) on early-age cement hydration.** Construction and Building Materials, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138624.

ZHAO, J. *et al*. **TEOS/PDMS-OH hybrid material for the consolidation of damaged pottery.** Heritage Science, v. 1, n. 1, p. 1–10, 2013. DOI: 10.1186/2050-7445-1-12.