CAPÍTULO 26 · Parte II · Materiais
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/9xdqnw35
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/pzppb993

EFEITOS COMPARATIVOS DA INCORPORAÇÃO DE SILICATO DE ETILA EM PASTAS E ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND

Maria Vitoria Pedroso[1], Adriana Fiori Moura[1]*; Eloise Aparecida Langaro[1] e Eduardo Pereira[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 para modificar a reologia e o desempenho de matrizes cimentícias. Este trabalho avaliou a incorporação direta do silicato de etila TS40 em pastas e argamassas de cimento Portland, com relação água/cimento de 0,47, nos teores de 1%, 5% e 10% em massa de cimento. Foram determinados o índice de consistência e a resistência à compressão aos 7 e 28 dias. Para o índice de consistência, os resultados foram analisados de forma descritiva, com base em médias, desvios padrão e variações percentuais em relação ao traço de referência. Para a resistência à compressão, os valores brutos foram submetidos à análise de variância de um fator, seguida do teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Os resultados mostraram que os teores de 1% e 5% preservaram ou elevaram o espalhamento, enquanto a dosagem de 10% reduziu a fluidez, sobretudo nas argamassas. Em termos mecânicos, a resposta ao TS40 dependeu da matriz, da idade e do teor de adição. Nas pastas, observaram-se diferenças entre dosagens específicas, com destaque para o efeito deletério do teor de 10%. Nas argamassas, a incorporação de 10% prejudicou a resistência aos 7 dias, enquanto, aos 28 dias, embora 1% tenha apresentado a maior média, não foram verificadas diferenças estatisticamente significativas entre os teores. Em conjunto, os resultados indicam que dosagens moderadas de TS40, particularmente entre 1% e 5%, são mais favoráveis do ponto de vista operacional, ao passo que teores elevados tendem a comprometer a trabalhabilidade e o desempenho mecânico.
Palavras-chave: silicato de etila; TS40; pasta de cimento; argamassa.

ABSTRACT

Ethyl silicates may form amorphous silica through hydrolysis and condensation, with the potential to modify the rheology and performance of cementitious matrices. This study evaluated the direct incorporation of the ethyl silicate TS40 into Portland cement pastes and mortars at a water-to-cement ratio of 0.47, using addition levels of 1%, 5%, and 10% by cement mass. Consistency and compressive strength were determined at 7 and 28 days. Consistency results were analyzed descriptively based on means, standard deviations, and percentage variations relative to the reference mixture. Compressive strength data were analyzed by one-way analysis of variance, followed by Tukey's test at a 5% significance level. The results showed that the 1% and 5% levels preserved or increased spread, whereas the 10% dosage reduced flowability, especially in mortars. From a mechanical standpoint, the response to TS40 depended on the matrix, testing age, and dosage level. In pastes, statistically significant differences were observed between specific dosages, with the 10% level showing the most detrimental effect. In mortars, the 10% dosage impaired early-age strength, while at 28 days the 1% level showed the highest mean value, although no statistically significant differences were found among the dosages. Overall, the results indicate that moderate TS40 dosages, particularly between 1% and 5%, are operationally more favorable, whereas high dosages tend to impair workability and mechanical performance.
Keywords: ethyl silicate; TS40; cement paste; mortar.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho e a durabilidade de materiais cimentícios são diretamente influenciados pela estrutura porosa efetiva, em especial pela percolação e pela tortuosidade dos poros capilares, que controlam o transporte de água e de espécies iônicas. Sob a ótica da patologia das construções, variações relativamente pequenas na conectividade efetiva podem alterar de modo expressivo a cinética de mecanismos como carbonatação, ingresso de cloretos, lixiviação e reações expansivas, visto que tais processos respondem principalmente a propriedades de transporte e não apenas à porosidade total (Basheer; Kropp; Cleland, 2001; Bentz; Garboczi, 1991; Langaro, 2023; Martys, 1995; Papadakis; Vayenas; Fardis, 1991).

Os silicatos de etila, em particular o ortossilicato de tetraetila, vêm sendo explorados como precursores sol-gel capazes de produzir uma rede de sílica amorfa por hidrólise e policondensação, sobretudo na presença de umidade e em meio alcalino. Em matrizes cimentícias, essa rede pode se desenvolver em poros capilares e gargantas porosas, alterar a distribuição de tamanhos de poros e consumir hidróxido de cálcio, favorecendo a formação de C-S-H adicional e o refinamento local da microestrutura (Barberena-Fernández; Carmona-Quiroga; Blanco-Varela, 2015; Brinker; Scherer, 1990; Sandrolini; Franzoni; Pigino, 2012). Apesar desse potencial, grande parte da literatura concentra-se em tratamentos superficiais por impregnação e em indicadores de durabilidade, havendo menor convergência sobre o comportamento reológico e mecânico quando o produto é incorporado diretamente à mistura (Barberena-Fernández; Carmona-Quiroga; Blanco-Varela, 2015; Cai et al., 2016; Sandrolini; Franzoni; Pigino, 2012).

Entre as formulações comerciais, o TS28 e o TS40, por exemplo, apresentam diferenças relevantes. O TS28 corresponde, em termos gerais, ao ortossilicato de tetraetila, de baixa viscosidade e não hidrolisado, ao passo que o TS40 é obtido a partir de hidrólise parcial e purificação do TS28, apresentando maior teor de SiO_2 e caráter parcialmente pré-hidrolisado. Essa distinção é crítica do ponto de vista de dosagem, pois a hidrólise compete com a água disponível para a hidratação do cimento, em especial em relações água/cimento menores, o que pode afetar simultaneamente reologia, adensamento e evolução da resistência (Evonik Operations GmbH, 2025; Wacker Chemie AG, 2022, 2024).

No âmbito de estudos prévios, a incorporação do TS28 em pastas e argamassas de cimento Portland já foi investigada, com evidências de alterações no estado fresco, no desempenho mecânico e em aspectos microestruturais, quando comparado ao traço de referência, conforme reportado por Moura et al. (2025). Neste contexto, o presente trabalho amplia a discussão ao introduzir o TS40 no mesmo delineamento experimental, permitindo avaliar, de forma comparativa, o papel do tipo de silicato, do teor de adição e da disponibilidade hídrica em diferentes relações água/cimento.

Desta forma, este estudo foi delineado para comparar os efeitos do TS40 incorporado diretamente em pastas e argamassas de cimento Portland, nos teores de 1%, 5% e 10%, para a relação água/cimento de 0,47. Foram avaliados o índice de consistência e a resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Empregou-se cimento Portland CP V ARI, água e agregado miúdo na forma de pó de pedra de origem gnáissica, com massa específica igual a 2,61 g/cm³. Foi utilizado silicato de etila TS40, um polissilicato parcialmente pré-hidrolisado, conforme especificações do fornecedor. A Tabela 1 reúne as propriedades físico-químicas informadas em ficha técnica. Essas propriedades embasam a discussão de aspectos reológicos e de demanda hídrica associados ao processo de hidrólise. A Tabela 2 mostra a composição química do cimento utilizado. Por fim, a Tabela 3 apresenta a granulometria do agregado utilizado na produção das argamassas.

Tabela 1 - Propriedades físicas do silicato de etila utilizado

Propriedade	TS40
Composição	Poli etóxi siloxano
Densidade a 20°C (g/cm³)	1,055 a 1,065
Teor mínimo de SiO_2 (%)	40
Viscosidade a 25°C (cP, aprox.)	5
Índice de refração a 25°C	1,396 a 1,398
Estado de hidrólise	Parcialmente hidrolisado
Proporção de sólidos[1]	40,88%

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

Tabela 2 - 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	2,70	3,56	1,65	0,83	0,68

Fonte: Itambé, 2025.

Tabela 3 - Granulometria do agregado utilizado

Peneira com abertura de malha		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99,0
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 µm	25	247,5
600 µm	300 µm	25	247,5
300 µm	150 µm	15	148,5

Fonte: ABNT NBR 15577-4, 2018.

2.2 Dosagem, moldagem e cura

Foram produzidas pastas e argamassas de cimento Portland adotando-se a relação água/cimento de 0,47, selecionada após triagem preliminar de trabalhabilidade em pastas, na qual proporções inferiores resultaram em mistura de difícil manuseio e proporções superiores produziram pastas excessivamente fluidas, prejudicando a moldagem e a comparabilidade entre composições. Produziu-se um traço de referência, sem adição, e três traços com incorporação de TS40 nos teores de 1%, 5% e 10%, em relação à massa de cimento. A água de amassamento foi ajustada para manter a relação água/cimento nominal, considerando a fração líquida do silicato incorporado. As pastas foram moldadas em corpos de prova cilíndricos de 2 cm por 4 cm. As argamassas foram produzidas no traço 1:2,25, mantendo-se a relação água/cimento correspondente, e moldadas em corpos de prova cilíndricos de 5 cm por 10 cm. Após a desmoldagem, todos os corpos de prova foram curados por imersão em solução saturada de $Ca(OH)_2$ até as idades de ensaio, com o objetivo de padronizar o meio de cura e reduzir a lixiviação de compostos solúveis.

2.3 Ensaios

No estado fresco, o índice de consistência foi determinado conforme a ABNT NBR 13276:2016, registrando-se três leituras do diâmetro de espalhamento para cada traço e calculando-se o valor médio. No estado endurecido, a resistência à compressão foi obtida aos 7 e 28 dias conforme a ABNT NBR 13279:2005, utilizando-se três corpos de prova por idade, totalizando seis por traço.

2.4 Análise estatística

Para os resultados de índice de consistência (IC), foram apresentados os valores médios, os desvios padrão e as variações percentuais em relação ao traço de referência. Não foi realizada análise estatística inferencial para esse ensaio, uma vez que as três leituras de espalhamento corresponderam a repetições de medida obtidas na mesma amostra, não configurando replicações experimentais independentes.

Para os resultados de resistência à compressão, os valores brutos foram submetidos à análise de variância de um fator, considerando o teor de TS40 como variável independente. As análises foram conduzidas separadamente para cada matriz, pasta e argamassa, e para cada idade de ensaio, 7 e 28 dias. Quando identificada diferença global significativa, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, adotando-se nível de significância de 5%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

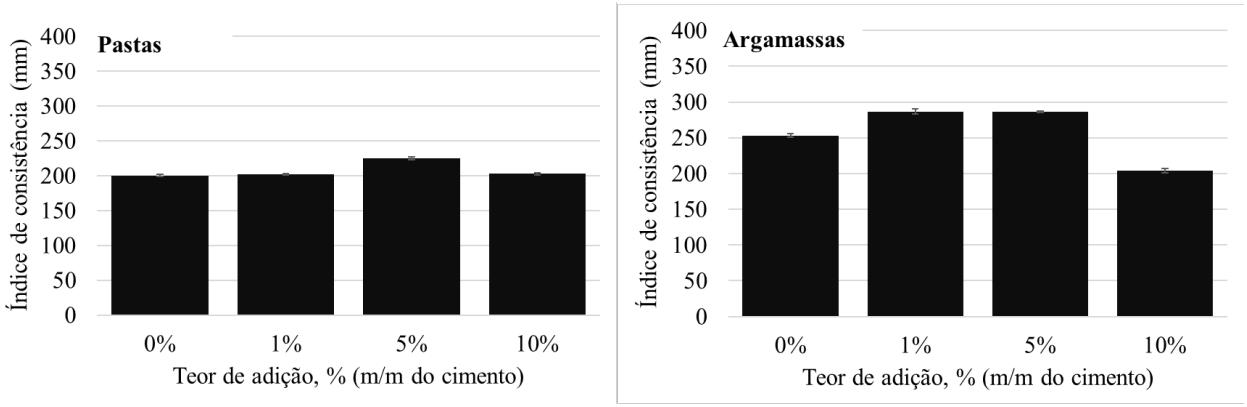
3.1 Índice de Consistência

Os resultados de IC são apresentados de forma descritiva na Tabela 4, por meio dos valores médios, dos desvios padrão e das variações percentuais em relação ao traço de referência. Como as três leituras de espalhamento foram obtidas na mesma amostra para cada traço, não foi aplicada análise estatística inferencial a esse ensaio. Verifica-se que o teor de 5% promoveu aumento de aproximadamente 12,3% nas pastas e 13,2% nas argamassas, enquanto a dosagem de 10% provocou redução de cerca de 19,5% no índice de consistência das argamassas. A Figura 1 ilustra o comportamento do índice de consistência de pastas e argamassas em função do teor de incorporação de TS40.

Tabela 4 - Índice de consistência das pastas e argamassas, em mm, em função do teor de adição do silicato de etila

Produto	Teor de adição do TEOS (%)	IC (mm)	DP (mm)	Variação em relação a referência (%)
Pasta	0%	200	1,53	0,00
	1%	202	1,00	0,83
	5%	225	2,00	12,31
	10%	203	1,53	1,16
Argamassa	0%	253	2,65	0,00
	1%	287	3,51	13,31
	5%	286	1,15	13,18
	10%	204	3,21	-19,50

Figura 1 - Índice de consistência das pastas e argamassas, em mm, em função do teor de adição do silicato de etila



Verifica-se que o espalhamento se manteve próximo ao traço de referência ou foi ampliado em teores baixos a intermediários, enquanto teores mais elevados tenderam a reduzir a fluidez, indicando a existência de uma faixa de dosagem mais favorável ao desempenho reológico para a relação água/cimento adotada.

Nas pastas, a incorporação de TS40 não resultou em perda progressiva da fluidez com o aumento do teor de adição. Verifica-se aumento do índice de consistência em teores intermediários, atingindo 225 mm para 5%, o que corresponde a um incremento de aproximadamente 12,3% em relação ao traço de referência (200 mm). Para os teores de 1% e 10%, os valores permaneceram próximos ao traço de referência, com variações inferiores a 2%, indicando que a adição não compromete significativamente o espalhamento nessas condições. Esses resultados sugerem a existência de uma faixa de dosagem na qual a fluidez pode ser preservada ou ligeiramente ampliada.

Nas argamassas, o efeito do teor de TS40 mostrou-se mais pronunciado do que nas pastas, evidenciando maior sensibilidade do sistema com agregado às alterações na fase líquida disponível. Em relação ao traço de referência (253 mm), os teores de 1% e 5% elevaram o índice de consistência para 287 mm e 286 mm, correspondendo a incrementos de aproximadamente 13,3% e 13,0%, respectivamente. Por outro lado, a adição de 10% resultou em redução expressiva do espalhamento, atingindo 204 mm, o que representa uma diminuição de cerca de 19,5%. Esse comportamento indica que, embora teores moderados favoreçam a trabalhabilidade, a superdosagem compromete significativamente a fluidez do sistema. A redução do espalhamento em teores elevados pode impactar negativamente a moldagem e o adensamento das argamassas, aumentando o risco de incorporação de vazios e, consequentemente, de prejuízos às propriedades mecânicas e à durabilidade.

A tendência observada é coerente com a competição por água entre as reações de hidrólise e condensação do silicato de etila e o processo de hidratação do cimento. Em teores intermediários, o caráter parcialmente pré-hidrolisado do TS40 pode reduzir a demanda hídrica imediata e favorecer maior estabilidade reológica, contribuindo para a manutenção do espalhamento. Em contrapartida, em teores elevados, a maior formação de espécies reativas e a intensificação dos processos de oligomerização e gelificação aumentam a viscosidade aparente e reduzem a água livre disponível, resultando na diminuição da fluidez.

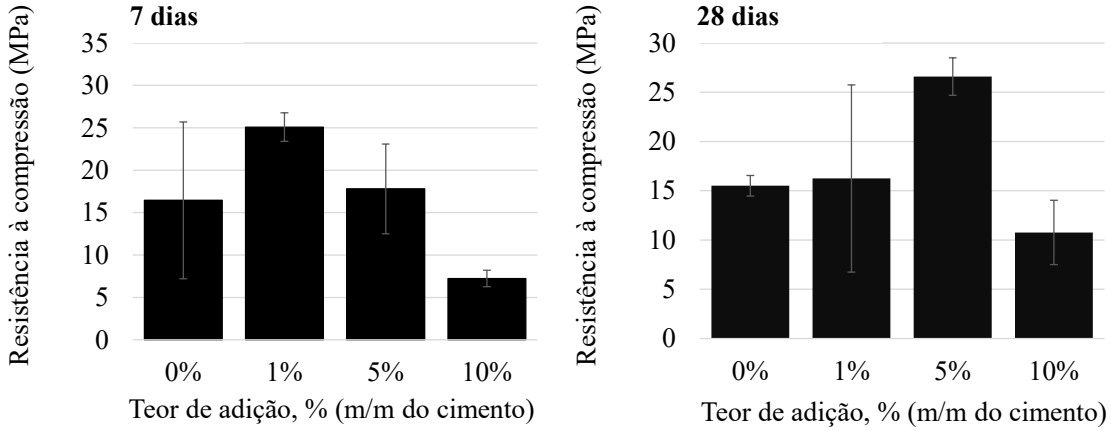
3.2 Resistência à compressão

Os valores médios de resistência à compressão, acompanhados dos respectivos desvios padrão e da variação percentual em relação ao traço de referência, são apresentados nas Tabelas 5 e 6. As Figuras 2 e 3 ilustram o comportamento da resistência à compressão de pastas e argamassas aos 7 e 28 dias, com barras de erro correspondentes ao desvio padrão. Adicionalmente, os resultados foram submetidos à análise de variância de um fator, seguida do teste de Tukey, ao nível de 5% de significância, para comparação entre os teores de TS40 em cada matriz e idade.

Tabela 5 - Resistência à compressão média das pastas aos 7 e 28 dias, em MPa, em função do teor de adição do silicato de etila

Idade (dias)	Teor de adição do TEOS (%)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Variação (%)
7	0%	16,45	9,25	0,00
	1%	25,08	1,68	52,46
	5%	17,80	5,28	8,21
	10%	7,24	0,96	-55,99
28	0%	15,50	1,04	0,00
	1%	16,25	9,51	4,84
	5%	26,60	1,90	71,61
	10%	10,76	3,26	-30,58

Figura 2 - Resistência à compressão média das pastas aos 7 e 28 dias, em MPa, em função do teor de adição do silicato de etila



Nas pastas, as resistências médias aos 7 dias foram de 16,45 MPa, 25,08 MPa, 17,80 MPa e 7,24 MPa para os teores de 0%, 1%, 5% e 10%, respectivamente. A análise de variância indicou efeito significativo do teor de TS40 nessa idade ($F = 5,50$; $p = 0,0240$). Entretanto, pelo teste de Tukey, verificou-se diferença estatisticamente significativa apenas entre os teores de 1% e 10% ($p = 0,0158$). Embora o teor de 1% tenha apresentado a maior média e o teor de 10% a menor, os teores de 0%, 1% e 5% não diferiram estatisticamente entre si. Esses resultados indicam que, aos 7 dias, a principal evidência estatística foi a redução de desempenho associada à superdosagem.

Aos 28 dias, as resistências médias das pastas foram de 15,50 MPa, 16,25 MPa, 26,60 MPa e 10,76 MPa para os teores de 0%, 1%, 5% e 10%, respectivamente. A análise de variância também indicou efeito significativo do teor de TS40 ($F = 5,05$; $p = 0,0298$). No entanto, o teste de Tukey apontou

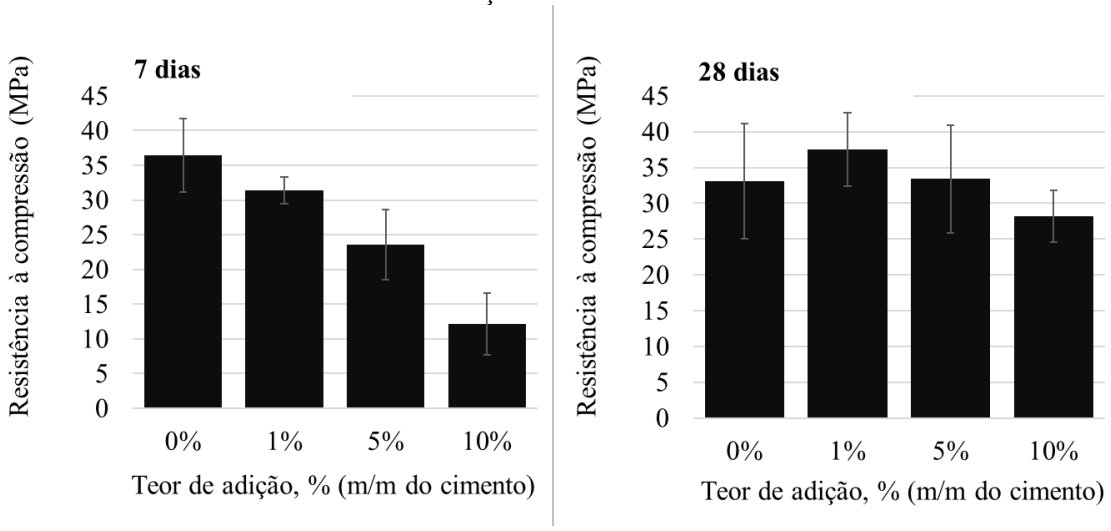
diferença significativa apenas entre os teores de 5% e 10% (p = 0,0227). Assim, embora 5% tenha apresentado a maior média de resistência aos 28 dias, esse teor não diferiu estatisticamente do traço de referência nem do teor de 1%, o que recomenda cautela na interpretação de eventual superioridade mecânica em relação às demais composições.

Os valores médios de resistência à compressão das argamassas, acompanhados dos respectivos desvios padrão e da variação percentual em relação ao traço de referência, são apresentados na Tabela 6. As tendências observadas são ilustradas na Figura 3, que apresenta a evolução da resistência aos 7 e 28 dias em função do teor de adição de TS40, com barras de erro correspondentes ao desvio padrão. De modo geral, verifica-se que o comportamento mecânico das argamassas é sensível ao teor de adição, refletindo as alterações na trabalhabilidade e na compacidade do sistema.

Tabela 6 - Resistência à compressão médias das argamassas aos 7 e 28 dias, em MPa, em função do teor de adição do silicato de etila

Idade (dias)	Teor de adição do TEOS (%)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Variação (%)
7	0%	36,38	5,28	0,00
	1%	31,38	1,96	-13,74
	5%	23,59	5,04	-35,15
	10%	12,11	4,47	-66,71
28	0%	33,07	8,00	0,00
	1%	37,47	5,11	13,31
	5%	33,40	7,50	1,00
	10%	28,18	3,59	-14,80

Figura 3 - Resistência à compressão média das argamassas aos 7 e 28 dias, em MPa, em função do teor de adição do silicato de etila



Nas argamassas, as resistências médias aos 7 dias foram de 36,38 MPa, 31,38 MPa, 23,59 MPa e 12,11 MPa para os teores de 0%, 1%, 5% e 10%, respectivamente. A análise de variância revelou efeito significativo do teor de TS40 ($F = 28,99$; $p = 1,05 \times 10^{-6}$). Pelo teste de Tukey, observaram-se diferenças significativas entre 0% e 5% (p = 0,0015), entre 0% e 10% (p < 0,0001), entre 1% e 10% (p < 0,0001) e entre 5% e 10% (p = 0,0039). As comparações entre 0% e 1% e entre 1% e 5%

não atingiram significância estatística ao nível de 5%. Esse comportamento indica que o aumento do teor de TS40, sobretudo para 10%, foi prejudicial ao desempenho mecânico inicial das argamassas, possivelmente em razão da redução de água livre, do aumento da viscosidade do sistema e da maior dificuldade de adensamento.

Aos 28 dias, as resistências médias das argamassas foram de 33,07 MPa, 37,47 MPa, 33,40 MPa e 28,18 MPa para os teores de 0%, 1%, 5% e 10%, respectivamente. Nessa idade, a análise de variância não indicou efeito significativo do teor de TS40 ($F = 1,82$; $p = 0,1847$). Consequentemente, embora o teor de 1% tenha apresentado a maior média numérica, não se pode afirmar superioridade estatisticamente significativa em relação aos demais grupos. Esse resultado sugere que, aos 28 dias, as diferenças observadas entre as argamassas foram insuficientes para caracterizar efeito estatístico do teor de adição.

A análise combinada dos resultados de consistência e resistência mostra que o desempenho mecânico não depende exclusivamente das variações de espalhamento. Nas pastas, por exemplo, a fluidez permaneceu próxima à referência para parte das composições, mas os resultados de resistência revelaram sensibilidade à dosagem, especialmente pela queda associada ao teor de 10%. Nas argamassas, por sua vez, os teores de 1% e 5% favoreceram a trabalhabilidade, mas isso não se traduziu automaticamente em ganho mecânico estatisticamente significativo aos 28 dias. Em conjunto, os resultados sugerem que dosagens moderadas podem ser operacionalmente mais favoráveis, enquanto teores elevados tendem a comprometer a compacidade e a uniformidade da matriz, com reflexos negativos sobre a resistência.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou os efeitos da incorporação de TS40 em pastas e argamassas de cimento Portland, com relação água/cimento de 0,47, considerando teores de 1%, 5% e 10%, com foco no comportamento no estado fresco e no desempenho mecânico aos 7 e 28 dias. Os resultados obtidos mostram que o efeito do TS40 depende do teor de adição, da idade de ensaio e do tipo de matriz.

No estado fresco, os teores de 1% e 5% preservaram ou elevaram o índice de consistência, com incrementos de até aproximadamente 13% nas argamassas, enquanto a dosagem de 10% resultou em redução de cerca de 19,5% no espalhamento, indicando prejuízo à trabalhabilidade e evidenciando tendência de superdosagem para a condição avaliada.

Nas pastas, a análise estatística indicou efeito do teor de TS40 aos 7 dias ($F = 5,50$; $p = 0,0240$) e aos 28 dias ($F = 5,05$; $p = 0,0298$). Contudo, pelo teste de Tukey, a diferença significativa aos 7 dias ocorreu apenas entre os teores de 1% e 10%, enquanto, aos 28 dias, foi observada apenas entre 5% e 10%. Assim, ainda que 5% tenha apresentado a maior média aos 28 dias, os resultados indicam principalmente o efeito deletério da dosagem de 10%, mais do que um ganho estatisticamente comprovado em relação ao traço de referência.

Nas argamassas, houve efeito significativo do teor aos 7 dias ($F = 28,99$; $p = 1,05 \times 10^{-6}$), com reduções estatisticamente evidentes sobretudo para o teor de 10%. Aos 28 dias, embora o teor de 1% tenha apresentado a maior média de resistência, não foi constatada diferença estatisticamente significativa entre os grupos avaliados ($F = 1,82$; $p = 0,1847$).

Em conjunto, os resultados indicam que dosagens moderadas de TS40, particularmente entre 1% e 5%, podem ser operacionalmente mais favoráveis por conciliarem manutenção da trabalhabilidade

e desempenho mecânico compatível, ao passo que a dosagem de 10% tende a prejudicar a fluidez e a resistência, especialmente nas idades iniciais. Portanto, para a relação água/cimento avaliada, a incorporação de TS40 deve ser conduzida com cautela, evitando-se teores elevados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) pela infraestrutura laboratorial, ao Complexo de Laboratórios Multiusuários (CLabmu), ao CNPq e à Fundação Araucária pelo apoio institucional, e às empresas Itambé e Datiquim pelo fornecimento de materiais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/confea/vf/viewer.aspx?Q=U2ZmRExiRTZMOXQ3RFlBK05FL2FoK1liaDVETEIwTHVuNGVvZU1IR1hpWT0=>. Acesso em: 22 fev. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/confea/vf/viewer.aspx?Q=U2ZmRExiRTZMOXZjbE9abUNCSGRpTGp1OEhwOEhvY1oxQWU2VFVzNnM5cz0=>. Acesso em: 22 fev. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-4: **Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018. Disponível em: < https://www.abntcatalogo.com.br/confea/pnm.aspx?Q=aXFpUE9PUS9wRllaMHJWaFkvekM5Y01JLzlhZW50L01GQlZnUEp0cDRxdz0=>. Acesso em: 21 abr. 2026.

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, 1 jan. 2015.

BASHEER, Lulu; KROPP, Joerg; CLELAND, David J. **Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review.** Construction and Building Materials, Near Surface Testing of. v. 15, n. 2, p. 93–103, 1 mar. 2001.

BENTZ, Dale P.; GARBOCZI, Edward J. **Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructural model.** Cement and Concrete Research, v. 21, n. 2, p. 325–344, 1 mar. 1991.

BRINKER, C. J.; SCHERER, G. W. **Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing**. 1. ed. Boston: Academic Press, 1990.

CAI, Yamei *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, ago. 2016.

EVONIK OPERATIONS GMBH. **Dynasylan® 40.** Germany: Evonik Operations GmbH, 25 out. 2025. Disponível em: <https://products.evonik.com/assets/n_/us/TDS_GEN_Dynasylan_40_EN_TDS_GEN_52000282_en_US.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2026.

HERGRAND DO BRASIL LTDA. **Catálogo técnico Siliethyl TS28 e Siliethyl TS40.** São Paulo: Hergrand do Brasil Ltda, *[S.d.]*.

ITAMBÉ. **Relatórios de Ensaio.** Brasil: *[S.n.]*. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/assessoria-tecnica/relatorios-de-ensaio/?pro=371>. Acesso em: 17 jul. 2025.

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

MARTYS, N. S. **Survey of concrete transport properties and their measurement: NISTIR**. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology (NIST), 1995. Disponível em: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir5592.pdf>.

PAPADAKIS, Vagelis G.; VAYENAS, Costas G.; FARDIS, Michael N. **Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem.** Chemical Engineering Science, v. 46, n. 5, p. 1333–1338, 1 jan. 1991.

SANDROLINI, Franco; FRANZONI, Elisa; PIGINO, Barbara. **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, 1 mar. 2012.

WACKER CHEMIE AG. **Wacker® Silicate Tes 40 WN.** München: Wacker Chemie AG, 11 set. 2022. Disponível em: <https://www.wacker.com/2130a57b-6d88-45d6-94a0-6f593f72df8c>. Acesso em: 22 fev. 2026.

WACKER CHEMIE AG. **Wacker® Silicate Tes 28.** München: Wacker Chemie AG, 16 jun. 2024. Disponível em: <https://www.wacker.com/h/en-us/medias/WACKER-SILICATE-TES-28-en-2024.06.16.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2026.