



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIA EDUARDA BEZERRA LEITE DE QUEIROZ

**RETRAÇÃO AUTÓGENA E POR SECAGEM EM ARGAMASSAS DE ALTA
RESISTÊNCIA COM ESCÓRIA ATIVADA E MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO**

Recife

2023

MARIA EDUARDA BEZERRA LEITE DE QUEIROZ

**RETRAÇÃO AUTÓGENA E POR SECAGEM EM ARGAMASSAS DE ALTA
RESISTÊNCIA COM ESCÓRIA ATIVADA E MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas com ênfase em construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto

Recife

2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Rosineide Mesquita Gonçalves da Luz, CRB-4 / 1361

Q3r

Queiroz, Maria Eduarda Bezerra Leite de
Retração autógena e por secagem em argamassas de alta resistência
com escória ativada e microfibras de polipropileno / Maria Eduarda Bezerra
Leite de Queiroz. – 2023.
101 f.: il., figs. e tabs.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.
Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. Argamassa de escória álcali-ativada. 3. Fibra de
polipropileno. 4. Retração autógena. 5. Retração por secagem I. Melo Neto,
Antônio Acácio de (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2023-126

MARIA EDUARDA BEZERRA LEITE DE QUEIROZ

**RETRAÇÃO AUTÓGENA E POR SECAGEM EM ARGAMASSAS DE ALTA
RESISTÊNCIA COM ESCÓRIA ATIVADA E MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas com ênfase em construção Civil.

Aprovada em: 17/03/2023

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência

Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência

Prof. Dr^a. Yêda Vieira Póvoas (Examinadora Externa)

Universidade de Pernambuco

Participação por videoconferência

Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda (Examinador Externo)

Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter dado força e disciplina durante essa trajetória, fortalecendo-me nos momentos mais difíceis e guiando-me nas incertezas.

Aos meus pais, Fernando e Vera, que sempre se fizeram presentes em todos os momentos da minha vida, apoiando-me em cada caminhada e proporcionando as melhores condições de estudo.

Ao meu irmão, que mesmo longe é minha maior inspiração e admiração. À minha segunda mãe, Maria Lima, por toda dedicação, todo cuidado e carinho.

Às minhas avós, em especial Maria do Socorro e Maria do Monte, hoje meus anjos de guarda, que onde quer que estejam foram importantíssimas na minha vida. E a minha avó Fernanda, sempre me colocando em suas orações.

Ao Professor Antônio Acácio, por toda a atenção, paciência e disponibilidade ao longo desses anos, sempre muito prestativo e respeitoso, dono de um conhecimento imenso, a quem devo todo o ensinamento passado. À professora Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo pela revisão do texto deste trabalho e pelas valiosas contribuições.

A todos os colegas de laboratório, em especial Victor Estolano e Sofia Ximenes, os quais proporcionaram uma ajuda imensa, tanto na parte experimental como no conhecimento técnico. Foram meu braço direito nessa caminhada, e serei eternamente grata a eles.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) por todo o conhecimento adquirido e aos funcionários e técnicos pela ajuda e disponibilidade.

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À PERNAMBUCO QUÍMICA S/A pela doação do silicato de sódio, em particular ao Eng. João Jungmann que sempre respondeu às nossas solicitações.

À CIMENTO MIZU S/A pela doação da escória granulada de alto-forno moída, em particular à José Antero e à Roberto Lima.

À SIKA pela doação da microfibras de polipropileno.

Por fim, agradeço aos meus amigos e toda minha família por toda convivência ao longo dos anos.

RESUMO

Os ligantes álcali-ativados vêm sendo cada vez mais estudados por possuírem desempenho mecânico similar e emitirem menos dióxido de carbono em relação ao cimento Portland. No entanto, ainda existem algumas barreiras para viabilizar o uso da escória ativada em larga escala, como sua intensa retração. Nesse contexto, o presente trabalho foi baseado na análise do comportamento mecânico de argamassas de escória ativada por silicato de sódio, utilizando adição de fibra de polipropileno (PP). Foram testados diferentes teores de fibra de polipropileno (0,1%, 0,2% e 0,3%) para cada relação água/ligante (0,40, 0,48 e 0,56). Destaca-se o estudo da retração por secagem e autógena durante 56 dias, essa com pouca exploração na literatura. Além disso, ensaios de resistência à tração na flexão e a compressão foram realizados com 1 dia, 3 dias, 7 dias e 28 dias com corpos de prova em cura submersa. O ensaio de microscopia eletrônica de varredura se deu em amostras ensaiadas aos 28 dias de cura. Os resultados mostraram que a inserção de microfibras de polipropileno causou uma diminuição na retração autógena e por secagem nas argamassas. Também foi observado que quanto maior a relação água/ligante, maior foi a retração autógena e por secagem. Em contrapartida, foram observados resultados conflitantes na resistência à tração na flexão, onde não ficou clara a influência das fibras. Na resistência à compressão, não foi observada uma melhora à medida que o teor de fibras aumentou. A microscopia eletrônica de varredura revelou que as fibras romperam sem ter existido desprendimento da matriz álcali-ativada e que podem ter sido levemente degradadas pela alta alcalinidade da argamassa. Por fim, pôde-se concluir que o uso de microfibras de polipropileno em argamassas com escória ativada levou à uma mitigação da retração autógena e da retração por secagem, com destaque para o teor de 0,3%, nas relações $a/l = 0,40$ e $0,48$, apresentando menor atuação na relação $a/l = 0,56$. Ainda assim, o uso de microfibras para combater a retração se mostrou um caminho viável para a viabilização de misturas álcali-ativadas para aplicações em larga escala.

Palavras-chave: argamassa de escória álcali-ativada; fibra de polipropileno; retração autógena; retração por secagem.

ABSTRACT

Alkali-activated binders have been increasingly studied because they have similar mechanical performance and emit less carbon dioxide compared to Portland cement. However, there are still some barriers to enable the use of activated slag on a large scale, such as its intense shrinkage. In this context, the present work was based on the analysis of the mechanical behavior of slag mortars activated by sodium silicate, using addition of polypropylene fiber (PP). Different contents of polypropylene fiber (0.1%, 0.2% and 0.3%) were tested for each water/binder ratio (0.40, 0.48 and 0.56). The study of drying and autogenous shrinkage for 56 days stands out, the latter with little exploration in the literature. In addition, tensile and compressive strength tests were carried out at 1 day, 3 days, 7 days and 28 days with specimens in submerged cure, and scanning electron microscopy tests on samples tested at 28 days of cure. The results showed that the insertion of polypropylene microfibers caused a decrease in autogenous and drying shrinkage in mortars. It was also observed that the higher the water/binder ratio, the greater the autogenous and drying shrinkage. On the other hand, conflicting results were observed in tensile strength, where the influence of the fibers was not clear. In compressive strength, no improvement was observed as the fiber content increased. Scanning electron microscopy revealed that the fibers ruptured without detaching the alkali-activated matrix and that they may have been slightly degraded by the high alkalinity of the mortar. Finally, it could be concluded that the use of polypropylene microfibers in mortars with activated slag led to a mitigation of autogenous and drying shrinkage for water/binder ratio 0.40 and 0.48, highlighting the content of 0.3% polypropylene fiber, showing low performance for water/binder ratio 0.56. Even so, the use of microfibers to combat shrinkage proved to be a viable way to make alkali-activated mixtures viable for large-scale applications.

Keywords: alkali-activated slag mortar; polypropylene fiber; autogenous shrinkage; drying shrinkage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Desenho esquemático representante da contração de Le Chatelier	22
Figura 2 -	Comportamento do compósito sem fibra (a) e com a fibra atuando como ponte de transferência de tensões (b).....	26
Figura 3 -	Comportamento da argamassa sem fibra (a), com adição de fibra rígida (b) e com fibra flexível (c)	27
Figura 4 -	Comportamento da retração por secagem combinando os diferentes comprimentos e teores da fibra PP	31
Figura 5 -	DRX da escória anidra de alto forno	34
Figura 6 -	Distribuição do tamanho das partículas da EAF.....	34
Figura 7 -	Distribuição granulométrica do agregado miúdo	35
Figura 8 -	Fibras de PP (grumos (a) <i>versus</i> soltas (b)).....	36
Figura 9 -	Exemplificação da nomenclatura.....	37
Figura 10 -	Rompimento do corpo de prova para a resistência à tração na flexão..	40
Figura 11 -	Ensaio de compressão da metade obtida no ensaio de tração na flexão	42
Figura 12 -	Barra de referência encaixada no pórtico de retração com medidor digital	43
Figura 13 -	Armazenamento das amostras de retração por secagem	43
Figura 14 -	Amostras de retração autógena embrulhadas com fita de empacotamento na lateral e fita metálica ao redor dos pinos.....	44
Figura 15 -	Efeito da relação água/ligante na resistência à tração na flexão ao longo do tempo	47
Figura 16 -	Resistência média à tração na flexão <i>versus</i> relação água/ligante sem fibra.....	47
Figura 17 -	Resistência à tração na flexão $a/l = 0,40$ (a), $0,48$ (a) e $0,56$ (a).....	49
Figura 18 -	Resistência à tração na flexão <i>versus</i> teor de fibra $a/l = 0,40$ (a), $0,48$ (b) e $0,56$ (c)	50
Figura 19 -	Efeito da relação água/ligante na resistência à compressão ao longo do tempo.....	52
Figura 20 -	Resistência à compressão <i>versus</i> relação água/ligante.....	52
Figura 21 -	Resistência à compressão $a/l = 0,40$ (a), $0,48$ (b) e $0,56$ (c) em todos os teores de fibra PP	54
Figura 22 -	Resistência à compressão <i>versus</i> teor de fibras $a/l = 0,40$ (a), $0,48$ (b)	

e 0,56 (c).....	57
Figura 23 - Retração por secagem das argamassas de escória álcali ativada sem fibra com variação da relação água/ligante (a) detalhada nos sete primeiros dias (b)	58
Figura 24 - Correlação entre a retração por secagem sem fibra e a relação água/ligante em todas as idades do ensaio	60
Figura 25 - Taxa de retração instantânea para as diferentes relações água/ligante (a) detalhada nos sete primeiros dias (b)	61
Figura 26 - Taxa de retração acumulada para as diferentes relações água/ligante (a) detalhada nos sete primeiros dias (b)	61
Figura 27 - Perda de massa das argamassas de escória álcali ativada sem fibra com variação da relação água/ligante (a) detalhada nos sete primeiros dias (b).....	62
Figura 28 - Variação de massa versus relação a/l sem fibra	63
Figura 29 - Retração por secagem versus variação de massa para relação a/l = 0,40 sem fibra	64
Figura 30 - Retração por secagem versus variação de massa para relação a/l = 0,48 sem fibra	65
Figura 31 - Retração por secagem versus variação de massa para relação a/l = 0,56 sem fibra	66
Figura 32 - Retração por secagem dos três teores de fibra de polipropileno na relação a/l = 0,40 (a) detalhada nos sete primeiros dias (b)	67
Figura 33 - Retração por secagem dos três teores de fibra de polipropileno na relação a/l = 0,48 (a) detalhada nos sete primeiros dias (b)	68
Figura 34 - Retração por secagem dos três teores de fibra de polipropileno na relação a/l = 0,56 (a) detalhado nos sete primeiros dias (b)	70
Figura 35 - Retração por secagem versus teor de fibra PP relação a/l 0,40 (a), 0,48 (b) e 0,56 (c)	71
Figura 36 - Variação da massa ao longo do tempo relação a/l = 0,40 (a) detalhado nos sete primeiros dias (b).....	72
Figura 37 - Variação da massa ao longo do tempo relação a/l = 0,48 (a) detalhado nos sete primeiros dias (b).....	72
Figura 38 - Variação da massa ao longo do tempo relação a/l = 0,56 (a) detalhado nos sete primeiros dias (b).....	73

Figura 39 -	Discretização da variação da massa versus teor de fibra PP na relação $a/l = 0,40$ (a), $0,48$ (b) e $0,56$ (c)	73
Figura 40 -	Sumarização da variação de massa versus teor de fibra com linha de tendência de todas as relações a/l	74
Figura 41 -	Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,40$ $0,1\%$	75
Figura 42 -	Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,40$ $0,2\%$	75
Figura 43 -	Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,40$ $0,3\%$	76
Figura 44 -	Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,48$ $0,1\%$	76
Figura 45 -	Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,48$ $0,2\%$	77
Figura 46 -	Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,48$ $0,3\%$	77
Figura 47 -	Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,56$ $0,1\%$	78
Figura 48 -	Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,56$ $0,2\%$	78
Figura 49 -	Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,56$ $0,3\%$	79
Figura 50 -	Retração autógena das argamassas de escória álcali-ativada sem fibra.....	80
Figura 51 -	Variação da taxa de retração autógena acumulada das argamassas de escória sem fibra.....	80
Figura 52 -	Discretização dos resultados da retração autógena sem fibra versus relação água/ligante.....	82
Figura 53 -	Retração autógena dos três teores de fibra de polipropileno na relação $a/l = 0,40$ (a) detalhado nos sete primeiros dias (b)	83
Figura 54 -	Variação da taxa de retração autógena acumulada das argamassas com fibra $a/l = 0,40$ (a) detalhado nos cinco primeiros dias (b)	83
Figura 55 -	Retração autógena dos três teores de fibra de polipropileno na relação $a/l = 0,48$ (a) detalhado nos sete primeiros dias (b)	85
Figura 56 -	Variação da taxa de retração autógena acumulada das argamassas com fibra $a/l = 0,48$ (a) detalhado nos cinco primeiros dias (b)	85
Figura 57 -	Retração autógena dos três teores de fibra de polipropileno na relação $a/l = 0,56$ (a) detalhado nos sete primeiros dias (b)	87
Figura 58 -	Variação da taxa de retração autógena acumulada das argamassas com fibra $a/l = 0,56$ (a) detalhado nos cinco primeiros dias (b)	87
Figura 59 -	Discretização dos resultados da retração autógena versus teor de fibra PP relação $a/l = 0,40$ (a), $0,48$ (b) e $0,56$ (c).....	88

Figura 60 - Linha de tendência de todas as relações a/l em todos os teores de fibra PP	89
Figura 61 - Imagens do MEV para a fibra de PP com aproximação de 20 μm (a) e 2 μm (b e c).....	90
Figura 62 - Imagem MEV da fibra PP inserida na argamassa de escória 100 μm (a) e 20 μm (b e c).....	91
Figura 63 - Resultado do EDS para os espectros analisados	92
Figura 64 - Imagem MEV da fibra PP com indicação dos espectros 1 (a) e 2 (b) ..	93
Figura 65 - Resultado de EDS dos espectros 1 e 2 analisados.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Caracterização química da escória de alto-forno (EAF).....	33
Tabela 2 -	Caracterização física da escória de alto-forno.....	33
Tabela 3 -	Propriedades do silicato de sódio	35
Tabela 4 -	Caracterização física do agregado miúdo	35
Tabela 5 -	Propriedades da fibra SikaFiber-12 Micro PP.....	36
Tabela 6 -	Nomenclatura dos traços 1:2.....	37
Tabela 7 -	Tolerância de tempo para ruptura	41
Tabela 8 -	Resistências médias de tração na flexão (padrão) para todas as relações a/l.....	46
Tabela 9 -	Resistência à tração na flexão e taxa de desempenho (TD) a/l = 0,40	48
Tabela 10 -	Resistência à tração na flexão e taxa de desempenho (TD) a/l = 0,48	48
Tabela 11 -	Resistência à tração na flexão e taxa de desempenho (TD) a/l = 0,56	48
Tabela 12 -	Resumo das resistências média à compressão (padrão) em todas as idades.....	51
Tabela 13 -	Resumos das resistências média à compressão em todas as idades de todos os traços.....	53
Tabela 14 -	Relação das resistências à compressão com o controle a/l = 0,40.....	55
Tabela 15 -	Relação das resistências à compressão com o controle a/l = 0,48.....	55
Tabela 16 -	Relação das resistências à compressão com o controle a/l = 0,56.....	55
Tabela 17 -	Retração por secagem e a sua respectiva taxa de desempenho (TD) nas diferentes relações água/ligante das argamassas controle de escória álcali-ativada com silicato de sódio.....	59
Tabela 18 -	Perda de massa e a sua respectiva taxa de desempenho (TD) em todas as idades.....	63
Tabela 19 -	Retração por secagem e a taxa de desempenho (TD) nos diferentes teores de fibra ao longo do ensaio relação a/l = 0,40	67
Tabela 20 -	Retração por secagem e a taxa de desempenho (TD) nos diferentes teores de fibra ao longo do ensaio relação a/l = 0,48	68

Tabela 21 - Retração por secagem e a taxa de desempenho (TD) nos diferentes teores de fibra ao longo do ensaio relação a/l = 0,56	70
Tabela 22 - Retração autógena e a sua respectiva taxa de desempenho (TD) da argamassa controle de escória álcali ativada com silicato de sódio.....	81
Tabela 23 - Retração autógena e a taxa de desempenho (TD) dos diferentes teores de fibra na relação a/l = 0,40	84
Tabela 24 - Retração autógena e a taxa de desempenho (TD) dos diferentes teores de fibra na relação a/l = 0,48	86
Tabela 25 - Retração autógena e a taxa de desempenho (TD) dos diferentes teores de fibra na relação a/l = 0,56	88

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	ESCÓRIA DE ALTO FORNO E ATIVAÇÃO ALCALINA.....	19
2.2	FENÔMENO DA RETRAÇÃO.....	21
2.3	FIBRAS DE POLIPROPILENO.....	23
2.3.1	Interação fibra-agregado.....	27
2.3.2	Zona de transição matriz-fibra.....	28
2.4	MISTURA DE ESCÓRIA ÁLCALI ATIVADA COM USO DE MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO.....	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS.....	32
3.1.1	Escória de alto-forno.....	32
3.1.2	Silicato de sódio.....	34
3.1.3	Agregado miúdo.....	35
3.1.4	Microfibras de polipropileno.....	36
3.2	DOSAGEM.....	36
3.3	PROCEDIMENTO DE MISTURA E MOLDAGEM DAS ARGAMASSAS....	38
3.3.1	Argamassa de controle de escória ativada com silicato de sódio.....	38
3.3.2	Argamassa de escória ativada com silicato de sódio e com adição de fibras.....	38
3.4	MÉTODOS DE ENSAIO.....	40
3.4.1	Resistência à tração na flexão.....	40
3.4.2	Resistência à compressão.....	41
3.4.3	Retração por secagem.....	42
3.4.4	Retração autógena.....	44
3.4.5	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
4.1	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	46
4.1.1	Influência da relação água/ligante.....	46

4.1.2	Influência do teor da fibra de polipropileno.....	48
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	51
4.2.1	Influência da relação água/ligante.....	51
4.2.2	Influência do teor de fibra de polipropileno.....	53
4.3	RETRAÇÃO.....	57
4.3.1	Por secagem.....	58
4.3.1.1	Influência da relação água/ligante na retração por secagem das argamassas controle de escória ativada.....	58
4.3.1.2	Correlação da retração por secagem com a perda de massa nas argamassas controle de escória ativada.....	61
4.3.1.3	Influência do teor da fibra de polipropileno na retração por secagem.....	66
4.3.1.4	Correlação da retração por secagem com a perda de massa nos diferentes teores de fibra PP.....	71
4.3.2	Retração Autógena.....	79
4.3.2.1	Influência da relação água/ligante.....	79
4.3.2.2	Influência do teor de fibra de polipropileno.....	82
4.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	89
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
	REFERÊNCIAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

Nesse tópico introdutório, o foco se deu na contextualização do assunto tema da pesquisa, justificando a sua relevância no estudo em pós-graduação, nos objetivos abordados no trabalho e na estrutura da dissertação.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O engajamento de líderes mundiais na mitigação dos impactos causados pelo setor industrial ao meio ambiente é cada vez mais recorrente em debates internacionais. O ramo da construção civil é um dos maiores responsáveis por gerar resíduos em quantidades exacerbadas e potencialmente poluidoras. Esse fato agrava-se ainda mais com a produção de clínquer para cimento Portland, elemento que tem grande participação na emissão de carbono, que, segundo a *Global Cement and Concrete Association* (2021), corresponde, na atualidade, a aproximadamente 7% das emissões globais de carbono.

Empresas da construção civil estão desenvolvendo alternativas de minimização dos efeitos negativos resultantes de suas atividades ao meio ambiente. A empresa *Hoffman Green Cement Technologies* (2022), por exemplo, desenvolveu o cimento nominado H-UKR, baseado no uso da escória de alto forno (EAF). O cimento H-UKR não possui absolutamente nada de clínquer e possui uma pegada carbono quatro vezes menor se comparada ao cimento tradicional, com potencial de chegar a 25 MPa em 12 horas e até 112 MPa aos 28 dias (*Hoffman Green Cement Technologies*, 2022).

A EAF é um coproduto obtido na fabricação do ferro gusa, visto na atualidade como elemento de significativo potencial de faturamento para uma empresa. Conforme Aço Brasil (2017), em 2016 cerca de 97% da EAF foi vendida, 1% doada ou reaproveitada e 2% mantida em estoque. A fonte cita ainda que dentre as alternativas do seu aproveitamento, cerca de 99% da EAF destinou-se a produção de cimento que é o principal aglomerante de argamassas e concretos massivamente utilizados nas obras de construção civil.

Neste contexto surge a utilização da escória granulada de alto forno finamente moída como aglomerante exclusivo, sem uso do clínquer, por meio da

ativação alcalina. Além de possuir algumas características semelhantes aos produtos à base de cimento Portland, como alta resistência mecânica e durabilidade, os materiais álcali-ativados também são mais sustentáveis em relação às emissões de CO₂ (DAVIDOVITS, 2015; MCLELLAN *et al.*, 2011; PACHECO-TORGAL; JALALI, 2010). No entanto, pesquisadores vem estudando maneiras de mitigar alguns problemas que ainda limitam o uso da EAF álcali-ativada em larga escala, como sua intensa retração.

Em relação a solução da intensa retração, esta dissertação propõe o uso de microfibras de polipropileno (PP) na mitigação da retração. Em materiais à base de cimento Portland, o uso de fibras para combater a retração é amplamente difundido na literatura. No entanto, em materiais álcali-ativados, apesar de existir um arcabouço literário (CHOI *et al.*, 2016; MA *et al.*, 2020; ZHAO *et al.*, 2021) sobre o assunto, ainda existem lacunas em relação aos efeitos do uso de fibras nas propriedades físicas e mecânicas das misturas, além dos mecanismos de rompimento e degradação das fibras. Neste cenário, esta dissertação propõe avaliar a influência da incorporação de microfibras de polipropileno nas propriedades físicas e mecânicas de misturas à base de escória álcali-ativada, com foco no estudo da retração autógena e da retração por secagem.

É importante ressaltar que este trabalho está inserido na linha de pesquisa do Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTag) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. O grupo de pesquisa do LabTag visa a reciclagem de resíduos para construção civil e o desenvolvimento de materiais sustentáveis, incluindo o uso de materiais à base de escória álcali-ativada, como os relatados nos trabalhos de Araújo Júnior (2019), Souza (2020) e Lima (2022).

1.2 OBJETIVOS

Em razão dos aspectos relatados anteriormente desse material, esta pesquisa surge com uma proposta geral de analisar a viabilidade do uso de microfibras de polipropileno em argamassas álcali ativadas de alta resistência, no que diz respeito a mitigação da retração, medidas através dos ensaios de retração autógena e por secagem, e a contribuição nas propriedades mecânicas de tração na flexão e compressão.

Os objetivos específicos do trabalho estão mencionados a seguir:

- Analisar a atuação de três teores de microfibras de PP (0,1%, 0,2% e 0,3%) no controle da retração tanto autógena como por secagem de argamassas de escória granulada de alto forno álcali-ativadas, comparadas ao padrão sem fibra, nos 4 primeiros dias e aos 7 dias, 14 dias, 21 dias, 28 dias e 56 dias após moldagem;
- Comparar o comportamento das argamassas de escória granulada de alto forno nas propriedades de tração na flexão, de compressão e de retração, usando três variações de relação água/ligante (a/l), sendo esses 0,40, 0,48 e 0,56;
- Analisar a influência dos percentuais de fibra nas propriedades mecânicas de resistência à compressão e à tração na flexão;
- Avaliar a integridade das fibras de PP após a ruptura através da microscopia eletrônica de varredura, verificando a possível ocorrência de degradação química, e a forma de ruptura, se por ruptura total, parcial ou escorregamento da fibra.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação foi estruturada em capítulos para uma melhor organização do conteúdo a ser abordado, de forma a ser intuitiva, didática e facilmente compreendida.

No capítulo 1 buscou-se fazer uma breve contextualização da importância do estudo da escória de alto forno nas argamassas em detrimento do uso de cimento Portland como justificativa para sua relevância na pesquisa. Objetivos geral e específicos foram explicitados.

No capítulo 2 foi feita uma abordagem básica e objetiva das características dos materiais constituintes da argamassa, além de fazer uma retrospectiva das contribuições já dadas por alguns autores no âmbito do uso de microfibras de polipropileno, a qual serviu como base para o desenvolvimento do tema dessa dissertação. A descrição dos tipos de retração também foi enfoque dessa parte por ser um alvo muito importante a ser estudado.

O capítulo 3 descreve a caracterização dos materiais utilizados na confecção dos corpos de prova, além dos métodos de ensaio utilizados e do procedimento de dosagem e mistura das amostras.

O capítulo 4 apresenta a discussão dos resultados obtidos, com destaque para os ensaios de retração autógena e por secagem e na análise microestrutural das argamassas.

Por fim, o capítulo 5 foi utilizado para as conclusões e as sugestões de estudo para a continuidade do tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção buscou-se fazer um breve desenvolvimento sobre o assunto principal, foco da pesquisa, com informações essenciais que se fazem necessárias ao entendimento do tema, estruturado de forma a manter a melhor organização da linha de raciocínio.

2.1 ESCÓRIA DE ALTO FORNO E ATIVAÇÃO ALCALINA

A NBR 11172 (ABNT, 1990) define escória granulada de alto forno como um subproduto de ferro gusa em fornos elevados, sendo resultado do resfriamento brusco, com característica de forma granulada. Quando cominuído em finuras semelhantes à do cimento Portland, apresenta propriedades hidráulicas latentes. É composto principalmente de óxido de cálcio, silício e alumínio.

A EAF granulada é um material amorfo composto em especial de cálcio e aluminossilicatos, em que a álcali ativação se dá através da exposição desse material vítreo em pH alto (meio básico), favorecendo uma ampla aceleração da dissolução dos aluminossilicatos. Estes podem, então, reagir com água, álcalis presentes e íons de cálcio, formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) gel e o sílico aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H), caracterizando uma fase aglomerante (CARTWRIGHT *et al.*, 2014).

Segundo a ArcelorMittal (2019), a escória pode ser produzida de duas maneiras, de acordo com a forma de resfriamento:

- Esfriadas ao ar: esse processo acontece de forma lenta, tal que há tempo suficiente para que os componentes se organizem em uma estrutura cristalina de fases distintas, não apresentando propriedades aglomerantes. Recebem o nome de escória bruta de alto forno e podem ser utilizadas como material inerte nas misturas, uma vez que não são reativas; e
- Esfriadas com água: nesse caso a escória líquida é bruscamente resfriada através de jatos de água sob alta pressão. Como isso acontece rapidamente, não há formação de uma estrutura bem definida, o que confere a ela um grande potencial hidráulico. É esse amorfismo que torna a escória granulada de alto forno atrativa para o mercado da construção civil.

A escória de alto forno só desperta interesse como aglomerante quando resfriada abruptamente ao sair do forno sob a forma de líquido viscoso porque há uma redução na movimentação dos íons com o abaixamento da temperatura, limitando a organização dos mesmos em uma estrutura cristalina mais estável. É a forma vítrea amorfa que confere a esse material um grande poder aglomerante (JOHN, 1995).

Embora a escória granulada de alto forno possua capacidade de reagir com a água, isso se dá muito lentamente, pois uma camada de aluminossilicato se forma na superfície da partícula de escória em poucos minutos após o contato com a água. Pelo fato dessa camada ser de baixa permeabilidade, isso dificulta a continuação da hidratação a menos que um ativador químico seja utilizado. A taxa de hidratação é mais rápida em meios com concentração alta de álcalis, sendo relatado que em pH abaixo de 9,5 o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) gel não é produzido. A característica de reatividade da escória depende da composição química, da quantidade da fase amorfa, da distribuição do tamanho das partículas e da forma da superfície (SONG *et al.*, 2000).

Segundo Taylor (1997) o principal produto de hidratação da escória de alto forno é o C-S-H gel, tendo relação Ca/Si entre 1,1 e 1,2 e Al/Ca em torno de 0,19. Caso seja usado hidróxido de sódio (NaOH) como ativador, a estrutura é mais bem ordenada, quando comparada com o ativador de silicato de sódio, que é menos cristalino. Além disso alguns produtos secundários podem surgir em decorrência da presença do magnésio da escória que pode vir a aparecer em uma fase do tipo hidrotalcita.

Wang; Scrivener (1995) estudaram os produtos de hidratação de cimento de escória álcali ativada variando os ativadores em hidróxido de sódio e silicato de sódio. Eles se formam por um mecanismo de dissolução e precipitação nas idades iniciais, sendo observado que os produtos da hidratação de pastas ativadas com hidróxido de sódio são mais cristalinos do que aqueles com ativador de silicato de sódio, até mesmo após um ano. Os autores ainda identificaram que hidrotalcita, monossulfoaluminato (AFm) e, principalmente, silicato de cálcio hidratado (C-S-H) gel são os elementos originados da ativação.

Pacheco-Torgal *et al.* (2014) esclarece que o gel C-S-H formado tem composição e estrutura que variam em relação aquele formado pelo cimento

Portland e que os tipos de produtos secundários dependem do ativador utilizado com a correspondente concentração, bem como as condições de cura e pH.

Das potencialidades da escória de alto forno, surge a produção do cimento de escória confeccionado sem a utilização do clínquer. É nessa aplicação que a escória precisa de um ativador uma vez que a simples hidratação com água não é suficiente para ganhos de resistência logo nas primeiras idades. A ativação é influenciada por ações de diversas naturezas: (i). Térmica: constitui-se na elevação da temperatura, que acelera a solubilidade; (ii). Mecânica: consiste no processo de moagem da escória para torná-la a mais fina possível, aumentando a superfície específica e, conseqüentemente, a dissolução; (iii). Química: mais utilizada, pois atua a fim de que os compostos hidratados comecem a se precipitar mais rapidamente com a maior quantidade de íons na solução e, além disso, torna o meio básico, contribuindo para a dissolução mais acelerada (JOHN, 1995). Dentre os ativadores químicos, utilizam-se aqueles que possuem a capacidade de elevar o pH da solução. Dentre alguns, destacam-se o hidróxido de potássio e o de sódio, bem como o silicato de sódio e o metassilicato.

Taylor (1997) acrescenta ainda que cimentos de escória álcali-ativadas desenvolvem um rápido endurecimento, com altas resistências, baixo calor de hidratação, boa resistência ao ataque químico e baixa permeabilidade. No entanto, apresentam perda de trabalhabilidade em poucos minutos, além de eflorescência e alta retração de secagem.

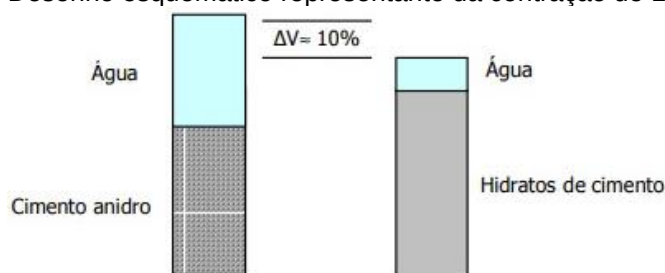
2.2 FENÔMENO DA RETRAÇÃO

Retração é o fenômeno de redução de volume das argamassas que possuem aglomerantes tais como o cimento Portland ou a escória granulada de alto forno, sendo intrinsecamente associada ao aparecimento de fissuras. A ocorrência desse processo pode se dar tanto nas primeiras idades, ainda no estado fresco, quanto em idade mais avançadas, após o endurecimento. Dentre os vários tipos de retração, tem-se:

- Retração plástica: ocorre quando há perda de água por exsudação no seu estado ainda fresco. Condições adversas, como baixa umidade relativa do ar, muito vento e elevadas temperaturas na superfície da argamassa, aceleram essa perda por favorecerem a evaporação da água de amassamento (AOKI; MEDEIROS, 2010);

- **Retração química:** acontece uma vez que os produtos formados após a hidratação do cimento têm volume inferior aos materiais anidros que os deram origem. Esse fenômeno foi descoberto por Le Chatelier. Segundo Bouny (1994 *apud* BASTOS, 2001), depois da hidratação completa, a contração chega a 10% do volume da pasta inicialmente (Figura 1). Embora os compostos resultantes tendam a contrair 10%, não significa que o volume total da argamassa retrairá o mesmo, pois muitos outros fatores também influenciam;

Figura 1 - Desenho esquemático representante da contração de Le Chatelier



Fonte: Bastos (2001).

- **Retração térmica:** é causada pela liberação de calor por efeito da reação exotérmica de hidratação do cimento. Nos primeiros momentos, o calor emitido expande a argamassa, mas no decorrer do resfriamento há essa contração (AOKI; MEDEIROS, 2010). Isso não é o que acontece com as argamassas de revestimento, pois elas têm pouca espessura e o calor facilmente é perdido para o meio externo. Nesses casos, a variação de volume está intimamente relacionada com as mudanças de temperatura diárias que promovem a dilatação ou encolhimento dos seus elementos constitutivos (BASTOS, 2001);

- **Retração autógena:** origina-se a partir do consumo de água durante a hidratação do cimento, sem que haja interferência do meio externo. Há a utilização da água existente nos poros capilares para a reação de hidratação do aglomerante. Segundo Acker (1995, *apud* VELASCO, 2008), ela é mais acentuada quanto mais jovem for a mistura, alcançando 60% a 90% do seu valor máximo aos 28 dias. A medida que a água e o cimento vão interagindo, aquela vai dando espaço aos produtos de hidratação que leva a uma diminuição da umidade relativa da microestrutura. Isso aumenta a pressão dos poros capilares causando a retração autógena no esqueleto sólido dos produtos hidratados (WEHBE; GHAREMANINEZHAD, 2017); e

- Retração por secagem ou hidráulica: acontece já no estado endurecido a partir da evaporação da água presente nos poros da matriz da argamassa que ao ser eliminada gera uma tensão capilar negativa. A água perdida estava fisicamente adsorvida nos silicatos de cálcio hidratado (VELASCO, 2008). A mudança de volume é devido a perda de água livre, e à medida que a secagem continua a água adsorvida mantida por tensão hidrostática nos pequenos capilares também é diminuída. Assim essas ocorrências produzem tensões de tração que obrigam a argamassa a retrair (GUNEYISI; GESOGLU; OZBAY, 2010).

Melo Neto (2002) estudou a influência de diferentes ativadores no comportamento de retração por secagem de argamassas feitas com escória durante 112 dias. Todas as argamassas tiveram um desempenho de retração acima da argamassa referência de cimento Portland CPV-ARI. A de silicato de sódio com módulo de sílica 1,7 e concentração de 4,5% Na₂O foi o que teve o resultado mais exacerbado, seguido do ativador de hidróxido de cálcio e de hidróxido de sódio. A menor retração foi alcançada com a cal hidratada mais a gipsita.

Pesquisas semelhantes foram desenvolvidas por Atis *et al.* (2009) que estudaram a influência de três diferentes ativadores na escória álcali ativada: silicato de sódio líquido, hidróxido de sódio e carbonato de sódio, abreviados por eles como LSS, SH e SC, respectivamente, com diferentes concentrações de sódio (4%, 6% e 8%), comparando com a argamassa referência de cimento Portland. Com silicato de sódio líquido, o módulo de sílica foi testado em 0,75, 1,00, 1,25 e 1,50. Resultados de retração por secagem mostraram que o uso do ativador LSS elevou de 3 a 6 vezes a retração, comparado ao cimento Portland, à medida que aumentava o módulo de sílica, a uma concentração fixa de 4% de sódio. E para 8%, a retração aumentou de 3 a 3,6 vezes em relação ao cimento tradicional. Para o ativador SH a retração foi de 2,1 a 3 vezes maior com a variação da concentração de sódio de 4% para 8%. A menor variação de retração foi observada para o SC, sendo similar ou até menor a argamassa de referência. Conclui-se a mesma tendência observada por Melo Neto (2002) de que o silicato de sódio é o ativador gerador de maior retração.

2.3 FIBRAS DE POLIPROPILENO

O módulo de elasticidade baixo, a deformação elevada durante a ruptura e a resistência à tração alta decorrentes do uso da fibra de polipropileno despertam

grande potencial na utilização em argamassas, na qual sinais de deformabilidade são requeridos em detrimento dos comportamentos de fragilidade normalmente apresentados no rompimento (ARAÚJO, 2005).

Conforme Domone; Illston (2010), polipropileno é um polímero termoplástico amorfo. Quando é aquecido, as ligações intermoleculares ficam enfraquecidas, tornando o material macio e flexível, com características de um derretimento viscoso em altas temperaturas. Resfriado, volta a solidificar. No entanto esse ciclo de aquecimento e resfriamento torna-o mais quebradiço (DOMONE; ILLSTON, 2010).

Segundo Amaral *et al.* (2012), o uso dessas fibras poliméricas pode ter caráter de reforço primário, quando utilizadas em maiores quantidades e com alto módulo de elasticidade, ou secundário, com baixo módulo, em teores bem inferiores. Ainda segundo os autores, seu uso no controle da retração plástica, nas primeiras idades, tem sido cada vez maior. O motivo é porque a fibra cria uma malha que impede a segregação do material mais pesado, minorando a água exsudada, e atua como uma ponte de transferência de tensões durante o aparecimento das fissuras para suportar a carga aplicada a matriz.

Donato (2003) acrescenta que, como as fibras de PP possuem um menor módulo de elasticidade quando comparado com a matriz cimentícia, então não é esperado que ela aumente a tensão de fissuração do compósito. Em termos de resistência, sua maior contribuição ocorre na fase após a fissuração por atuarem como pontes de transferência de tensão ao atravessarem a fissura.

O uso de microfibras de polipropileno tem como efeito principal melhorar as características da argamassa e do concreto e reduzir ou controlar o efeito negativo da retração, pois, segundo Rodrigues; Montardo (2002), elas têm um grande potencial de uso devido as suas características de serem quimicamente inertes, não absorverem água e ainda não enferrujarem ou apodrecerem, apresentando compatibilidades físicas e químicas com a matriz cimentícia. Lucena (2017) ainda acrescenta que, diferente das fibras de aço, as fibras poliméricas não sofrem corrosão, bem como não são atacadas por micro-organismos (fato observado em fibras vegetais), nem se degradam em meio alcalino (fibra de vidro). Por outro lado, autores relatam que dentre as desvantagens das fibras de polipropileno estão a sensibilidade a luz do sol, baixa aderência à matriz cimentícia, bem como resistência ao fogo (SILVA, 2011).

No entanto, em relação à baixa resistência ao fogo, Domone; Illston (2010) explicam que as fibras de polipropileno após derreterem em temperaturas relativamente baixas, em torno de 130°C - 160°C, ainda criam caminhos para o vapor de água escapar em casos de incêndio, evitando pressões exageradas no interior da argamassa.

As fibras poliméricas são confeccionadas a partir de diversos filamentos muito finos. Ocorre através do processo de extrusão em que há o pressionamento do material pastoso por furos extremamente finos em uma peça chamada de fieira, com consequente estiramento durante o processo de solidificação para orientar as moléculas e adquirir um formato definitivo e pré-determinado (SIQUEIRA, 2006).

Essas fibras são filamentos finos, alongados e fibrilados que, segundo Kumar *et al.* (2014), são disponíveis em três formas diferentes:

- Monofilamento: tem um único filamento de fibra e possui seção transversal uniforme. É um tipo de microfibras;
- Multifilamento: vários filamentos ou fios contínuos. O seu diâmetro depende de quantos fios de monofilamento foram utilizados e como eles são combinados entre si; e
- Fibrilado: são fabricadas na forma de filmes ou fitas torcidas previamente que, após serem cortadas, se expandem em uma rede aberta, permitindo e facilitando a penetração de materiais cimentícios. Após a mistura na argamassa, essas microfibras são desagregadas devido ao atrito com os agregados, melhorando a ligação com a matriz.

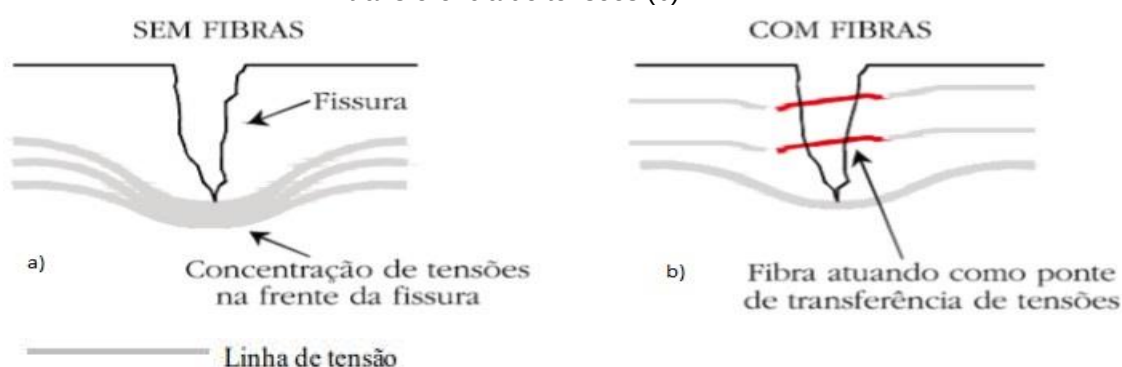
Além dos benefícios de controle da fissuração, as microfibras de polipropileno podem acarretar aumento da resistência ao desgaste da argamassa e da resistência a impactos, bem como da resistência ao fogo (NTC Brasil, 2016). Estas fibras são empregadas em pequenas quantidades como um reforço da argamassa, que, devido a sua facilidade de dispersão, consegue atingir amplamente a mistura.

É plausível ressaltar que a orientação e a uniformidade de distribuição da fibra na matriz são condições essenciais para seu bom desempenho. Fibras paralelas ao sentido de ruptura não tem efeito no controle da fissuração, enquanto que as posicionadas perpendicularmente têm efeito máximo no bloqueio (JOHNSTON, 1994 *apud* RODRIGUES; MONTARDO, 2002). Falhas na uniformização e dispersão da mistura podem ainda aparecer. São notadas visualmente através de regiões com grande concentração de fibras, enquanto outras têm pouca, ou até ausência das

mesmas. Além disso, um emaranhado de fibras na forma de novelos também pode surgir. Nesse caso, um efeito reverso ocorre porque esse ponto passa a ser considerado falho, uma vez que as fibras não são devidamente envolvidas pela matriz cimentícia e também pela presença de alta porosidade (SILVA, 2006).

No geral, uma definição importante das fibras é o fator de forma, índice que relaciona o comprimento com o diâmetro da circunferência que tem área equivalente a seção transversal da fibra (NUNES; AGOPYAN, 1998). Segundo os autores, o aumento desse parâmetro pode representar uma maior resistência ao arrancamento da fibra ou, de outra forma, pode ser interpretado como mais quantidade de fibra capaz de interceptar uma fissura, atuando como uma ponte de transferência de tensões. Fornece, portanto, informações acerca da tenacidade do compósito (NUNES; AGOPYAN, 1998). Os autores ainda descrevem os dois importantes mecanismos de transferência da tensão: (i) Mecanismo elástico que atua na fase pré-fissuração do compósito enquanto a tensão de cisalhamento da interface matriz-fibra não atinge o limite máximo suportável da resistência ao cisalhamento; e (ii) Mecanismo por atrito, atuante após a ocorrência de fissuras, quando a tensão de cisalhamento ultrapassa a máxima da interface, levando ao arrancamento da fibra que passa a assumir a função de uma ponte para a transferência da tensão por atrito, Figura 2.

Figura 2 - Comportamento do compósito sem fibra (a) e com a fibra atuando como ponte de transferência de tensões (b)



Fonte: Nunes; Agopyan (1998).

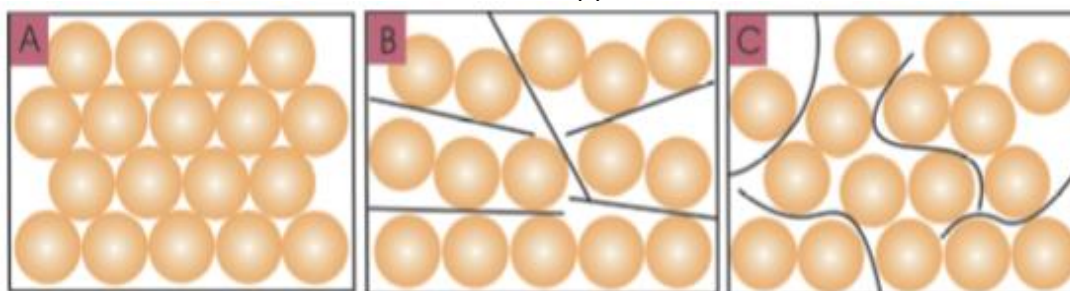
A formação da fissura cria um obstáculo na direção da propagação da linha de tensão e a consequência desse fenômeno é a concentração dessa tensão na extremidade da abertura, que pode ser notada através do desvio das linhas, Figura 2(a). Caso a tensão seja superior à resistência da matriz, ocorre a ruptura frágil, sem

aviso. O papel da fibra é criar uma ponte a qual permite que a tensão ultrapasse a abertura, Figura 2(b), sem que desvios das trajetórias de tensões sejam observados. Além de evitar uma grande intensidade de tensão, diminui a velocidade com que a fissura acontece. Nesse caso, há indícios de comportamento não frágil ou pseudo-dúctil (FIGUEIREDO, 2011).

2.3.1 Interação fibra-agregado

Conforme relatado por Silva (2006), quando as fibras não estão apropriadamente dispersas na mistura, elas formam emaranhados concentrados em alguns pontos específicos. Na microestrutura desse elemento é possível, então, observar um atrito desenvolvido pelo contato de interação fibra-fibra e fibra-agregado. A autora também explica que pequenos vazios são formados nos espaços entre o contato dos agregados entre si (Figura 3(a)). Fibras que são adicionadas com comprimentos menores que esses espaços ajudam no seu preenchimento, com vantagens diretas no empacotamento. Por outro lado, quando fibras de maiores tamanhos são adicionadas há o aumento desses vazios. As fibras mais rígidas (Figura 3(b)) não conseguem acompanhar os contornos existentes na curvatura das partículas, e por isso causam uma maior porosidade do que as flexíveis, as quais são moldadas pelas partículas ao longo do seu comprimento (Figura 3(c)). A flexibilidade da fibra de polipropileno facilita ainda mais o entrelaçamento do agregado com os filamentos (Figura 3(c)), aumentando o atrito e dificultando seu movimento. Na interface dessas duas interações surgem vazios, tão menores quanto menor o módulo de elasticidade das fibras. Fibras rígidas de aço (Figura 3(b)), por exemplo, têm mais vazios do que as flexíveis de PP (Figura 3(c)).

Figura 3 - Comportamento da argamassa sem fibra (a), com adição de fibra rígida (b) e com fibra flexível (c)



Fonte: Silva (2006).

2.3.2 Zona de transição matriz-fibra

A superfície de contato da fibra com a matriz cimentícia é uma região de grande influência no comportamento do material compósito fibroso. É através dela que ocorre a transferência de esforços por atrito entre o reforço de PP e a matriz, afetando o desempenho do material, a exemplo da sua tenacidade, capacidade de absorção de energia até sua ruptura (BORGES, 2017).

Os filamentos permitem uma boa fixação mecânica com a matriz cimentícia, que favorece o chamado “efeito ponte” (MENDES, 2019). Por outro lado, da literatura também é relatado que as fibras de polipropileno possuem uma característica de superfície hidrófuga que a protege da molhagem com a pasta de cimento, acarretando em uma fraca ligação na interface (OLIVEIRA, 2001; GAO; LIANG; PATNAIK, 2016). Algum tratamento superficial pode ser proposto como uma alternativa para a melhoria da aderência (OLIVEIRA, 2001).

O desempenho da zona de transição é afetado diretamente pela diminuição da porosidade, quando há uma melhora na adesão dos materiais que formam o compósito, permitindo, assim, que os mesmos trabalhem em conjunto (BORGES, 2017). A concentração de vazios facilita o escorregamento da fibra quando a matriz apresenta as primeiras fissuras, situação não ideal quando se busca uma solução com comportamento pseudo-dúctil. Segundo Oliveira (2001), o arrancamento da fibra é também influenciado, dentre outros, pela forma, textura da superfície e fator de forma.

Como a deformação da fibra tende a ser maior que a da matriz, esta irá romper antes que seja atingida a resistência daquela, sendo a fibra responsável pelo comportamento do material compósito após a fissuração (CAMPELLO, 2013).

2.4 MISTURA DE ESCÓRIA ÁLCALI ATIVADA COM USO DE MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO

Na construção civil, a combinação de argamassas com matriz de ruptura frágil e fibras de polipropileno (PP) usadas como reforço, por apresentarem certa ductilidade, origina um material compósito (ARAÚJO, 2005). Esse material novo surge a partir da junção de dois ou mais elementos com características diferentes, levando a formação de um material que possui propriedades as quais isoladamente

nenhum possui (BUDINSKI, 1996 *apud* ARAÚJO, 2005). Um completa os pontos fracos do outro.

Araújo (2005) afirma que materiais compósitos fibrosos apresentam outros desempenhos na absorção de energia de deformação, bem como uma diferente atuação no estado pós-fissuração, na resistência mecânica e nas propriedades tais como ductilidade e rigidez.

É com base nessas informações que um compósito formado por fibras de polipropileno e argamassa de escória álcali ativada será desenvolvido nesta dissertação.

Algumas pesquisas de relevante importância foram desenvolvidas ao longo de décadas a fim de estudar argamassas de escória granulada de alto forno utilizando fibras de polipropileno. Os testes desenvolvidos por Puertas *et al.* (2003) indicam que as quantidades de 0,5% e 1,0% dessas fibras não tem muito efeito na resistência à compressão e à flexão aos 2 dias e 28 dias de idade. Em alguns casos pode existir ainda uma leve diminuição dos resultados uma vez que a fibra reduz a trabalhabilidade, prejudicando a compactação dos corpos de prova e aumentando os vazios. Ainda nesse estudo, foi observada a retração das amostras por um período de 45 dias, submetido a duas condições de umidade relativa. Com umidade maior que 95%, a retração é desenvolvida majoritariamente nos primeiros dias. Entre 10 dias e 15 dias de armazenagem, começa a existir uma estabilização da retração até o fim do teste. Quando testadas em umidade abaixo de 50%, observa-se uma retração contínua crescente e ao final dos 45 dias ela ainda não se encontra constante.

Outra contribuição foi dada por Nguyen *et al.* (2018), quando da utilização de 2% de dois tipos de fibra polipropileno – multifilamento (PP-MF) e fibriladas (*Split-film*) (PP-SF) –, as quais foram revestidas por uma camada hidrofílica para melhorar a aderência com a matriz cimentícia. Ambas as argamassas preparadas com PP-MF e PP-SF apresentaram resistência à flexão maiores a 7 dias e 28 dias em comparação à argamassa de referência. As misturas sem adições apresentaram um comportamento típico de falha frágil, enquanto as argamassas PP-MF e PP-SF tiveram maior ductilidade devido à inserção fibrosa. Esta atrasou a propagação da fissura e a falha repentina do material, como consequência da boa ligação entre as fibras e a matriz cimentícia. Ainda nesse estudo, os reforços fibrosos de PP-MF, apesar de terem atingido a referência aos 7 dias, não desenvolveram efeito benéfico

na resistência à compressão aos 28 dias, enquanto os de PP-SF aumentaram 24% na mesma data e não ultrapassaram a referência aos 7 dias.

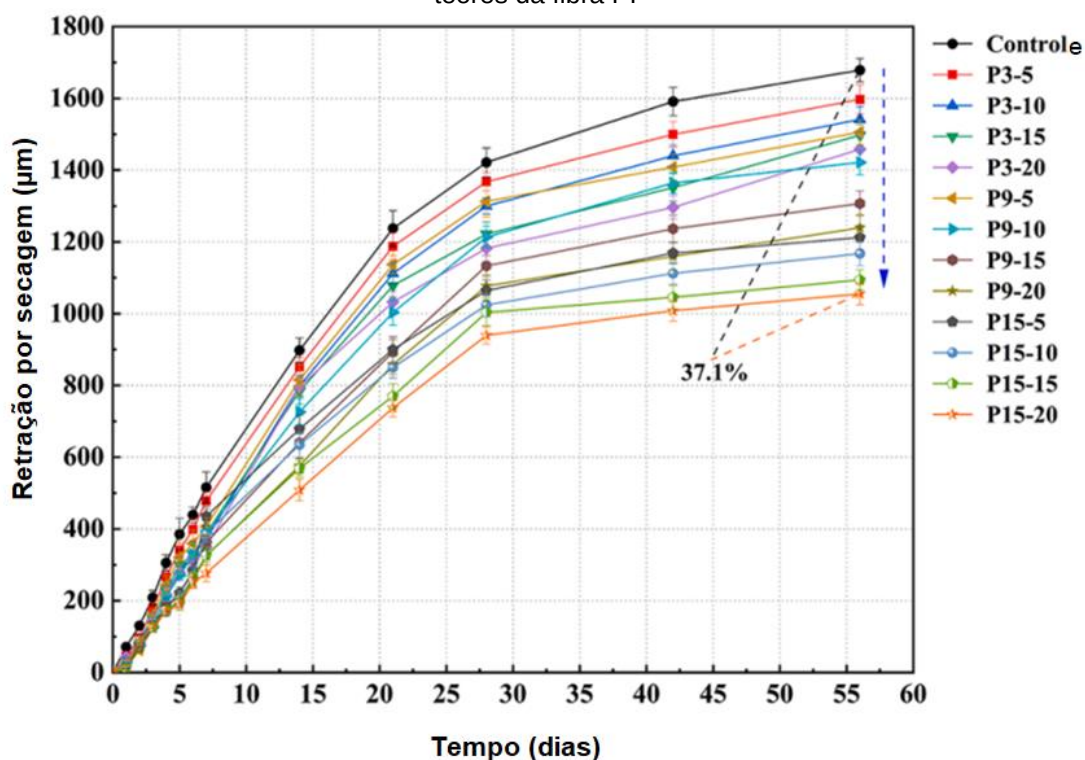
Xu; Chen; Wang (2020) produziram argamassas álcali-ativadas com hidróxido de sódio com 0,00% (controle), 0,05%, 0,10%, 0,15% e 0,20% de fibras e concluíram que as resistências à compressão aos 3 dias deram todas menores que o controle (-3,91%, -2,40%, -3,38% e -4,94%, respectivamente). Isso pode ser explicado pela hidrofobicidade da fibra de polipropileno que forma uma barreira entre a água e as partículas de cimento, reduzindo a sua velocidade de hidratação. Aos 7 dias e 28 dias todos deram levemente acima do controle, o que pode estar associado a capacidade da fibra de interromper a iniciação de microfissuras, absorver tensão, evitar a propagação e diminuir a porosidade. Aos 28 dias os ganhos de resistência foram 0,96%, 1,27%, 1,40% e 1,89% para os respectivos teores de fibra. Ainda nesse trabalho fica evidente que o maior teor de fibra apresentou a menor retração por secagem ao longo dos 54 dias. A fibra de polipropileno (PP), uniformemente distribuída na argamassa, além de colmatar as fissuras e inibir o crescimento, também impede a sedimentação do agregado e a segregação da água, evitando o acúmulo desta na superfície e consequentemente sua evaporação. Além disso, a fibra de PP transforma os macroporos prejudiciais a argamassa em microporos descontínuos e não conectados, bloqueando assim a passagem de uma umidade que venha a escapar. Reduz-se, então, a perda de umidade e a decorrente retração. Nas propriedades físicas, houve uma diminuição da porosidade aparente e da absorção de água, com o aumento da quantidade de fibra. Esse resultado pode estar vinculado a diminuição dos vazios, uma vez que menos poros provenientes da evaporação da água são formados e ao efeito da fibra de preencher espaços vazios.

Estudo ainda mais recente divulgado por Xu *et al.* (2021), agora estudando o efeito da fibra com diferentes comprimentos (3 mm, 9 mm e 15 mm) e teores (0,00%, 0,05%, 0,10%, 0,15% e 0,20%) na argamassa de escória, demonstrou que a fibra de PP alterou os resultados de resistência a compressão em torno de 5%, quando comparado com a argamassa controle sem fibra, podendo até apresentar queda no valor, a exemplo do comprimento de 3 mm. O que se observa é um aumento não superior a 6% dessa propriedade mecânica quando da dimensão maior da fibra uma vez que ela favorece uma maior estabilidade estrutural da argamassa de escória álcali ativada com hidróxido de sódio. Essa influência da fibra só se manifesta mais

notoriamente na resistência à flexão. Aos 28 dias, para o tamanho de 15 mm e 0,2% de dosagem, houve um ganho de 15,1% em relação ao controle. Já para 3 mm e 9 mm, o aumento foi de 7,7% e 11,6%, respectivamente, comprovando uma tendência de melhora com fibras mais compridas.

Outro tópico importante abordado por eles é a retração por secagem e sua associação com a perda de massa durante 56 dias de ensaio. Considerando a mesma dosagem 0,2%, as argamassas produzidas com fibra 15 mm reduziu a retração em 37,1%, enquanto a de 9 mm e 3 mm, diminuiu em 26,2% e 13,1%, respectivamente. A tendência vista na Figura 4 mostra que quanto maior o teor de fibra e a sua dimensão, melhores são os resultados de contenção da retração. Essa queda está vinculada a uma menor perda de umidade do corpo de prova, evitando a formação de vazios e garantindo um melhor desempenho da mistura. A fibra conseguiu proporcionar uma redução de até 52,3% na perda de água, segundo Xu *et al.* (2021).

Figura 4 – Comportamento da retração por secagem combinando os diferentes comprimentos e teores da fibra PP



Fonte: Xu *et al.* (2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de produzir uma argamassa de escória álcali ativada com silicato de sódio, estritamente vinculada aos objetivos específicos detalhados nesta pesquisa. Em razão dos apontamentos que ainda precisam de maior dedicação nos estudos de escória álcali-ativada e, devido a disponibilidade no laboratório, utilizou-se a fibra de polipropileno como agente de interferência no comportamento das propriedades dessa argamassa.

O planejamento do experimento se desenvolveu em três etapas: (i) Descreve e caracteriza os materiais utilizados na produção da argamassa de escória; (ii) Detalha o procedimento de dosagem e mistura dos elementos empregados na sua formação, bem como o processo de moldagem e cura; (iii) Apresenta os métodos de ensaio aplicados no estudo da argamassa de escória álcali ativada, com suas respectivas peculiaridades.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

Antes da preparação das argamassas, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais. A seguir serão apresentados o detalhamento dos resultados dos ensaios conduzidos.

3.1.1 Escória de alto-forno

A escória foi utilizada como ligante na argamassa, em substituição ao cimento Portland, por ser o resíduo objeto do estudo. A caracterização química da escória de alto forno por meio da fluorescência de raios-X (FRX) foi realizada no Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), por meio de um espectrômetro Rigaku RIX 3000. Os resultados encontram-se na Tabela 1.

Os resultados mostram os percentuais de óxidos da escória, com destaque para os percentuais de SiO_2 , MgO e CaO . De acordo com Pacheco-Torgal *et al.* (2014), a basicidade da escória pode ser calculada pelo índice $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$, a qual foi calculada em 1,27 para a escória utilizada nesta pesquisa. Como o índice é maior que 1, a escória é classificada como básica.

Tabela 1 - Caracterização química da escória de alto-forno (EAF)

Óxidos	Percentual
CaO	42
SiO ₂	37,73
Al ₂ O ₃	10,91
MgO	6,04
TiO ₂	0,52
K ₂ O	0,46
Na ₂ O	0,4
Fe ₂ O ₃	0,38
SO ₃	0,33
Perda ao fogo	1,24

Fonte: O autor (2022).

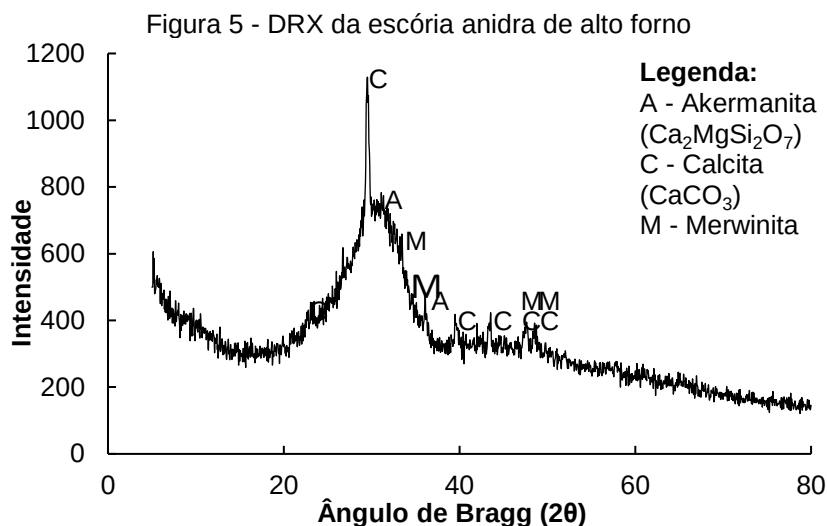
A caracterização física é apresentada na Tabela 2, com dados fornecidos pela empresa fornecedora do material.

Tabela 2 - Caracterização física da escória de alto-forno

Ensaio	Norma	Resultado
Finura Blaine (m ² /kg)	NBR 16372 (ABNT, 2015)	442,2
Massa específica (g/cm ³)	NBR 16605 (ABNT, 2017)	2,79
Resíduo na peneira #325 (%)		1,33
Índice de finura #200 (%)		0,07

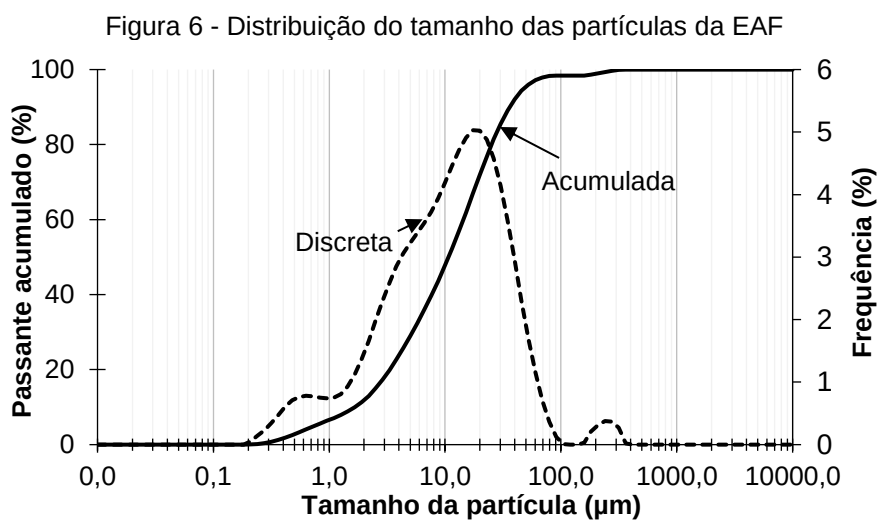
Fonte: Cimento Mizu S/A (2018).

A análise de difração de Raio-X (DRX) da escória foi realizado no laboratório de tecnologia dos aglomerantes (Labtag) da UFPE, apresentado na Figura 5. O ensaio foi conduzido em um difratômetro da marca Bruker modelo D2 Phaser, com as seguintes configurações: velocidade de varredura 5,1°/min; passo angular 0,05°; intervalo de varredura 5 – 80° (2θ); corrente 10 mA; tensão 30 kV; e rotação da amostra 15 rpm. Observa-se um halo amorfo característico da escória entre 20° e 35° e as indicações das fases mineralógicas. Além disso, as fases mineralógicas observadas foram calcita (CaCO₃), akermanita (Ca₂MgSi₂O₇) e merwinita (Ca₃Mg(SiO₄)₂).



Fonte: O autor (2022).

A Figura 6 exibe a distribuição do tamanho das partículas (μm) da escória de alto forno feitas pelo ensaio de granulometria a laser no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da UFPE. O ensaio foi realizado utilizando um granulômetro Malvern Mastersizer 2000.



Fonte: O autor (2022).

3.1.2 Silicato de sódio

O silicato de sódio foi o ativador utilizado nesta pesquisa, sendo fornecido pela Pernambuco Química S/A, cujas características são apresentadas na Tabela 3. O módulo de sílica foi de 1,72, conforme solicitado à equipe técnica desta empresa.

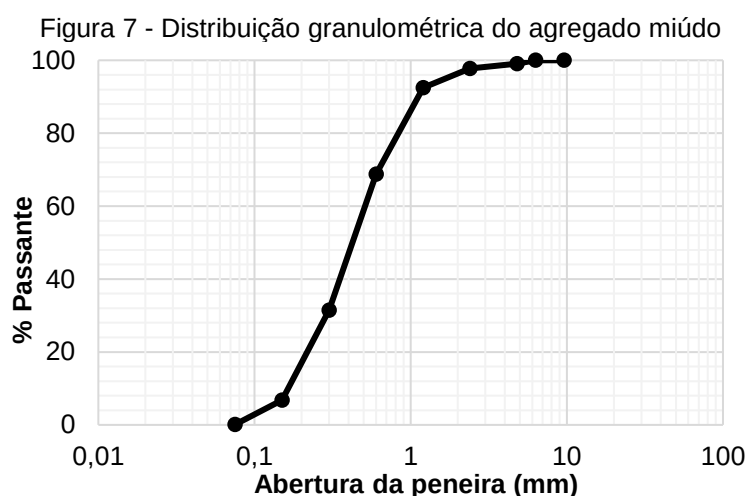
Tabela 3 - Propriedades do silicato de sódio

Alcalinidade - Na ₂ O	18,40%
Sílica - SiO ₂	31,77%
Sólidos	50,17%
Relação - SiO ₂ /Na ₂ O	1,72
Massa específica	1,64 g/cm ³
Estado físico (25 °C)	Líquido

Fonte: Pernambuco Química S/A (2021).

3.1.3 Agregado miúdo

Após a devida lavagem e secagem da areia em estufa (105°C), uma pequena quantidade foi selecionada para a definição da massa específica por meio do frasco de Chapman, conforme norma do DNER-ME 194-98. Para a determinação da curva granulométrica, do diâmetro máximo e do módulo de finura foi utilizada a NBR NM 24 (ABNT, 2003). Na Figura 7 observa-se a curva granulométrica da areia e na Tabela 4, os demais resultados obtidos.



Fonte: O autor (2021).

Tabela 4 - Caracterização física do agregado miúdo

Ensaio	Resultado
Massa específica (DNER-ME 194/98)	2,64 g/cm ³
Módulo de Finura (ABNT NBR NM 248:2003)	2,04
Dimensão máxima característica (ABNT NBR NM 248:2003)	2,4 mm

Fonte: O autor (2021).

3.1.4 Microfibras de polipropileno

Na ficha técnica do produto SikaFiber®-12 Micro Polipropileno (PP) constam as propriedades destacadas na Tabela 5. Trata-se de uma microfibra sintética de monofilamento de polipropileno, compatível com todos os aditivos químicos usados para ajudar na atuação da argamassa.

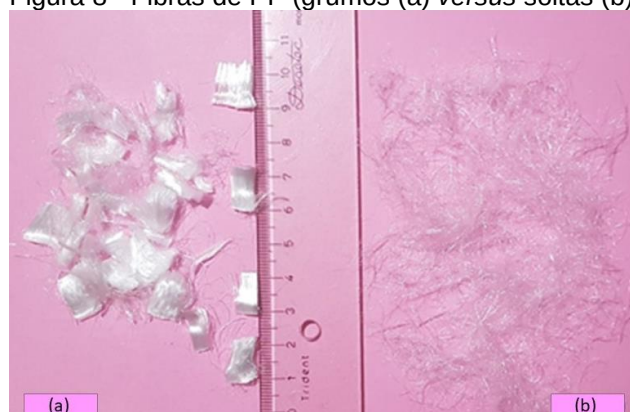
Tabela 5 - Propriedades da fibra SikaFiber-12 Micro PP

Massa específica	0,91 g/cm ³
Cor	branca
Dimensões	12 mm ± 1 mm
Base química	100% polipropileno
Ponto de fusão	165 °C

Fonte: Ficha Técnica SikaFiber (2017).

Vale destacar que as fibras foram fornecidas de forma aglomerada, Figura 8 (a), o que dificulta seu espalhamento uniforme durante a mistura. Dessa forma, elas foram soltas manualmente umas das outras, conforme Figura 8 (b).

Figura 8 - Fibras de PP (grumos (a) versus soltas (b))



Fonte: O autor (2022).

3.2 DOSAGEM

Foram preparadas misturas de argamassa, cujas dosagens de ativador alcalino foram definidas com base nos trabalhos de John (1995), Melo Neto (2008) e Araújo Júnior (2019) e em testes preliminares, em que foram realizados experimentos com o objetivo de atingir no mínimo 60 MPa aos 28 dias de resistência à compressão com a maior relação água/ligante, que foi definida em 0,56.

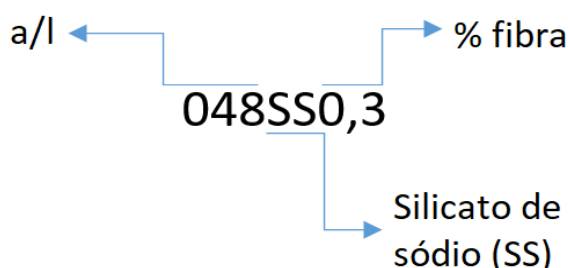
A relação ligante/areia foi de 1:2, enquanto a relação água/ligante variou em 0,40, 0,48 e 0,56. Alguns trabalhos anteriores como os de Puertas *et al.* (2003) e Xu; Chen; Wang (2020), juntamente com alguns ensaios exploratórios em laboratório foram primordiais para definir a quantidade de fibra de PP na mistura, cujos teores variam em 0,1%, 0,2% e 0,3% do volume total da argamassa (volume dos corpos de prova + 20% de segurança a perda), além da referência sem fibra. A Tabela 6 resume e esclarece todas as proporções utilizadas nas misturas, bem como as suas siglas de nomenclatura, de forma a simplificar a compreensão do leitor.

Tabela 6 - Nomenclatura dos traços 1:2		
a/l	Fibra %	Nomenclatura
		Silicato de sódio (SS)
0,40	0,0	040SS0,0
	0,1	040SS0,1
	0,2	040SS0,2
	0,3	040SS0,3
0,48	0,0	048SS0,0
	0,1	048SS0,1
	0,2	048SS0,2
	0,3	048SS0,3
0,56	0,0	056SS0,0
	0,1	056SS0,1
	0,2	056SS0,2
	0,3	056SS0,3

Fonte: O autor (2022).

O nome foi elaborado para que seja intuitiva a identificação do traço. Assim, na Figura 9, usando uma sigla para exemplificar, construiu-se as seguintes correlações:

Figura 9 - Exemplificação da nomenclatura



Fonte: O autor (2022).

3.3 PROCEDIMENTO DE MISTURA E MOLDAGEM DAS ARGAMASSAS

A seguir será descrito o procedimento de mistura no momento de preparação da argamassa de escória. Pequenas mudanças ocorreram entre a argamassa controle e aquela com a inserção da fibra PP, a fim de minimizar o aparecimento de grumos e a sua mal distribuição no volume total da mistura. Por muitas vezes mencionado a seguir de forma simplificada, entende-se por velocidade baixa 140 rpm e por velocidade alta 285 rpm.

3.3.1 Argamassa de controle de escória ativada com silicato de sódio

Na mistura controle (sem fibras), o passo a passo se deu da seguinte forma:

- Colocar toda a escória e metade da areia, misturando 30 segundos a seco em velocidade baixa;
- Adicionar quase toda a água, deixando um pouco para lavagem do recipiente de silicato de sódio;
- Misturar por 2 minutos em velocidade baixa;
- Parar a mistura e raspar o fundo e a lateral da cuba da argamassadeira, adicionando-se em seguida todo o silicato de sódio;
- O resto de água reservada anteriormente deve ser colocado dentro do recipiente de silicato de sódio. Com a utilização de uma espátula de silicone, o silicato grudado no fundo e na lateral deve ser desprendido para ser lançado na mistura logo em seguida;
- Misturar por 3 minutos em velocidade baixa;
- Adicionar a outra metade da areia e misturar por 2 minutos em velocidade baixa; e
- Por fim, misturar 1 minuto em velocidade alta.

3.3.2 Argamassa de escória ativada com silicato de sódio e com adição de fibra

Para a mistura com fibras, têm-se:

- Colocar toda a escória, areia e fibra (materiais secos) e misturar por 90 segundos em velocidade baixa;

- Adicionar quase toda a água, deixando um pouco para lavagem do recipiente de silicato de sódio;
- Misturar por 1 minuto em velocidade baixa;
- Parar a mistura e raspar o fundo e a lateral da cuba da argamassadeira, adicionando-se em seguida todo o silicato de sódio;
- O resto de água reservada anteriormente deve ser colocado dentro do recipiente de silicato de sódio. Com a utilização de uma espátula de silicone, o silicato grudado no fundo e na lateral deve ser desprendido para ser lançado na mistura logo em seguida;
- Misturar por 5 minutos em velocidade baixa;
- Parar a mistura, raspar fundo e lateral da cuba, desprender as fibras eventualmente aderidas na pá e misturar 1 minuto em velocidade alta; e
- No final, desenganchar as fibras remanescentes da pá novamente e misturar manualmente com o resto da mistura.

O mesmo procedimento descrito em 3.3.1 e 3.3.2 foi seguido para a moldagem dos corpos de prova de dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm, também compactados com 2 camadas de 30 golpes cada. Papel filme foi colocado em cima dos corpos de prova para impedir o contato com o ambiente. Após as 24 h, eles eram desmoldados e colocados na cura submersa em água até a data prevista do rompimento. No total, a mistura levou 8 minutos e 30 segundos, sendo em ambos os casos o tempo de 6 minutos o contato do silicato de sódio com a escória de alto forno moída.

3.3.3 Moldagem dos corpos de prova

Para os ensaios de resistência à tração e compressão, foram utilizados corpos de prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm.

O processo de moldagem para os ensaios de retração por secagem e autógena foi conduzido utilizando corpos de prova (CP) de dimensões 2,5 cm x 2,5 cm x 28,5 cm. No molde foi inicialmente colocada uma lâmina de papel filme na parte inferior e nas laterais, para evitar que o corpo de prova ficasse aderido às barras metálicas divisórias, provocando a quebra durante a desforma. Em seguida o molde era preenchido em duas camadas, sendo a primeira até o centro do pino

interno, compactando-as com 30 golpes cada por meio de um soquete de neoprene retangular. Após finalizada a moldagem, colocou-se um papel filme em cima dos corpos de prova para evitar o contato com o meio externo até o momento da desmoldagem, 24 h depois.

3.4 MÉTODOS DE ENSAIO

Os ensaios realizados nos corpos de prova da argamassa de escória álcali ativada serão brevemente descritos nos itens que se seguem. As imagens dos equipamentos utilizados concretizam a ideia relatada no texto.

3.4.1 Resistência à tração na flexão

Corpos de prova de dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm foram utilizados na determinação da resistência à tração na flexão (R_f), conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005). O rompimento se deu nas idades de 1 dia, 3 dias, 7 dias e 28 dias para todos os traços. Três corpos de prova foram moldados para cada idade. A amostra é posicionada simetricamente no equipamento e uma carga é aplicada até o rompimento da mesma em duas metades, conforme Figura 10.

Figura 10 - Rompimento do corpo de prova para a resistência à tração na flexão



Fonte: O autor (2022).

O cálculo da resistência (R_f), em MPa, é obtido através da Equação 1:

$$R_f = \frac{(1,5 * F_t * L)}{40^3} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

F_t = carga máxima aplicada no prisma (N); e

L = distância entre os suportes (mm).

Os limites do tempo de ruptura foram respeitados conforme evidenciado na Tabela 7:

Tabela 7 - Tolerância de tempo para ruptura	
Idade de ruptura (dia)	Tolerância (hora)
1	1
3	2
7	4
28	8

Fonte: NBR 13279 (2005).

3.4.2 Resistência à compressão

Assim como no ensaio de tração na flexão, o ensaio de compressão, Figura 11, também aconteceu em 1 dia, 3 dias, 7 dias e 28 dias, por meio das duas metades obtidas no item anterior. Dois suportes metálicos foram necessários para que a área de contato 4 cm x 4 cm fosse garantida no momento em que a carga estivesse comprimindo a amostra. A NBR 13279 (ABNT, 2005) também especifica este ensaio. Os mesmos limites de tempo de ruptura são válidos, de acordo com Tabela 07.

Figura 11 - Ensaio de compressão da metade obtida no ensaio de tração na flexão



Fonte: O autor (2022).

3.4.3 Retração por secagem

O modelo e as dimensões da fôrma de retração seguem a norma internacional C490/C490M (ASTM, 2017). Após 24 h da moldagem, os corpos de prova (2,5 cm x 2,5 cm x 28,5 cm) são desmoldados e seguem para o ambiente de condições controladas, com umidade relativa variando de 49% a 52% e temperatura na faixa de 19°C - 21°C, onde são armazenados para leituras em 1 dia, 2 dias, 3 dias, 4 dias, 7 dias, 9 dias, 11 dias, 14 dias, 21 dias, 28 dias e 56 dias de idade após a moldagem, por meio de um aparato metálico. Esse equipamento é constituído de um pórtico, onde na parte superior é acoplado um relógio digital para medir o comprimento das barras nos respectivos dias, conforme indicado na Figura 12. Ao ligar o leitor, acomoda-se no pórtico uma barra metálica que servirá de referência para o comprimento inicial zero, uma vez que a sua dimensão é fixa. Após o encaixe da barra de referência, faz-se um giro de 360° para garantir sua melhor centralização no eixo principal e com isso minimizar erros de excentricidade. O leitor é, então, zerado e a barra removida para que o corpo de prova possa ser colocado nesse lugar e medido. Além disso, com o mesmo objetivo, ele também é rotacionado 360°. Ressalta-se que cada vez que o relógio for ligado, a barra de referência deve seguir esse mesmo procedimento descrito acima e sempre deverá ser posta em igual sentido para que os erros sejam menores. É possível notar que ao girar a

amostra em uma volta, o valor indicado no micrômetro sofre variações. Por padrão, registrou-se sempre a menor leitura do visor.

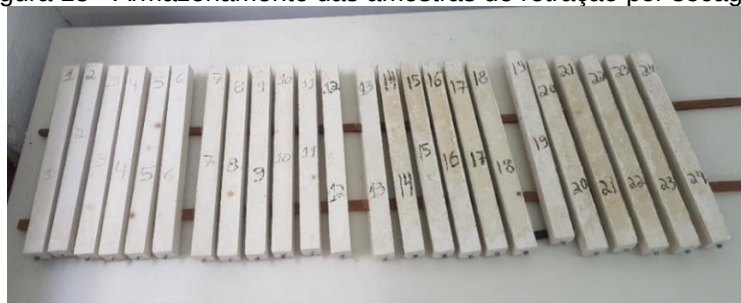
Figura 12 - Barra de referência encaixada no pórtico de retração com medidor digital



Fonte: O autor (2022).

Seis corpos de prova foram moldados para cada traço, os quais foram mantidos expostos ao ambiente de condições controladas. Para garantir que a face inferior das amostras também tivesse contato com o meio externo, duas ripas foram posicionadas embaixo dos corpos de prova, servindo de apoio para manter a sua elevação, conforme observado na Figura 13.

Figura 13 - Armazenamento das amostras de retração por secagem



Fonte: O autor (2022).

O gráfico da retração ao longo do tempo foi obtido a partir de uma adaptação da equação contida no item 7.1 da C490/C490M (ASTM, 2017), com o objetivo de se

obter os dados com as unidades mais convencionais da literatura. De acordo com esta Equação 2:

$$L = \frac{(L_i - L_{xi}) \times 1000000}{G} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

L_i = leitura inicial no dia 1 (dia da desforma – 24 h após moldagem) em mm;

L_{xi} = leitura nas demais idades do ensaio (mm);

G = distância horizontal interna entre os pinos do corpo de prova (mm); e

L = variação da retração (mm/mm x 10^{-6}).

3.4.4 Retração autógena

A retração autógena se diferencia da por secagem a partir do momento em que todos os corpos de prova desmoldados são vedados. Para isso foi utilizada fita de empacotamento 3M Scotch, garantindo o seu isolamento em relação ao ambiente. Ao redor do pino foi colocada uma fita metálica, vedando ainda melhor essa região que é a mais crítica em termos de perda de umidade para o meio. Todos os corpos de prova foram mantidos na mesma sala com temperatura na faixa 19°C – 21°C e umidade variando em 49% a 52%. O processo de leitura das amostras e os gráficos são feitos da mesma maneira, conforme descrito no item anterior. A Figura 14 ilustra como elas são embrulhadas.

Figura 14 - Amostras de retração autógena embrulhadas com fita de empacotamento na lateral e fita metálica ao redor dos pinos



Fonte: O autor (2022).

3.4.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura foi realizado por meio de um microscópio Mira3 Tescan com filamento de tungstênio. Para realizar uma análise qualitativa dos elementos químicos da amostra, foi utilizado um espectrômetro por energia dispersiva (EDS) da Oxford Instruments. As amostras foram retiradas de amostras de argamassa que foram ensaiadas à tração na flexão, com o objetivo de verificar a integridade física, química e o posicionamento das fibras na matriz da argamassa.

Para a realização dos ensaios, as amostras foram congeladas e liofilizadas em um liofilizador Liotop L101. Posteriormente, as amostras foram inseridas em um dessecador com sílica gel e hidróxido de bário para evitar carbonatação e reidratação. Antes dos ensaios, as amostras foram metalizadas por meio da técnica *sputtering*, utilizando um metalizador de ouro e paládio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão explicados os resultados obtidos nos respectivos ensaios com o objetivo de descrever o comportamento da fibra na argamassa de escória álcali ativada com silicato de sódio e compreender de que forma ela pode estar contribuindo ou prejudicando os parâmetros estudados.

4.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os resultados da propriedade mecânica de resistência à tração na flexão (MPa) em todas as variações de água/ligante utilizadas no presente trabalho serão discutidos a seguir. As resistências são calculadas com base na média dos resultados de três corpos de prova prismáticos para cada mistura. Gráficos serão utilizados para melhor compreensão e discussão dos dados.

4.1.1 Influência da relação água/ligante

As resistências médias (fcm) da tração na flexão (MPa) em 1 dia, 3 dias, 7 dias e 28 dias das misturas controle estão na Tabela 8. É possível observar que à medida que a relação a/l se eleva, as resistências à tração diminuem. Essa perda se acentua ao longo do tempo. No primeiro dia, a queda da resistência foi de 1,36% e 25,8%, respectivamente, para o 0,48 e 0,56, comparando-se com o 0,40. Aos 28 dias, essa diferença se intensificou, atingindo 23,26% e 31,98%, na ordem, conforme índices TD da Tabela 8. Esse comportamento é esperado, pois, assim como nas misturas à base de cimento Portland, a relação gel/poros diminui com o aumento da relação água/ligante, levando a um declínio da resistência.

Tabela 8 - Resistências médias de tração na flexão (padrão) para todas as relações a/l

Traço	Resistência média à tração na flexão (MPa)							
	1 dia	TD	3 dias	TD	7 dias	TD	28 dias	TD
040SS0,0	3,72	-	6,59	-	6,46	-	9,00	-
048SS0,0	3,67	-1,36%	6,54	-0,66%	5,90	-8,66%	6,91	-23,26%
056SS0,0	2,76	-25,80%	5,12	-22,26%	5,18	-19,79%	6,12	-31,98%

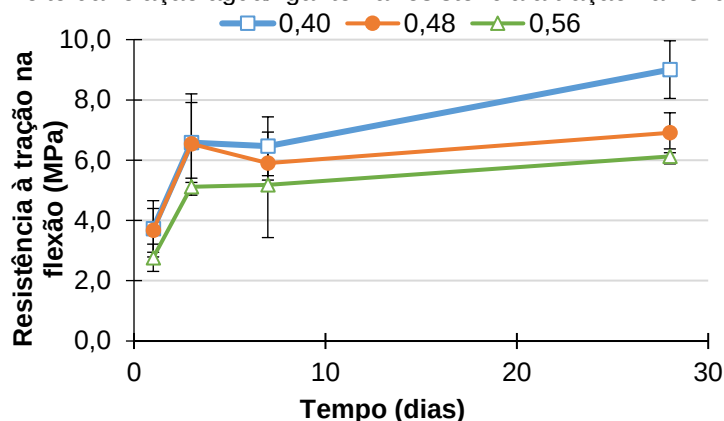
Fonte: O autor (2022).

*TD = Taxa de desempenho = (resistência à tração na flexão da amostra i – resistência à tração na flexão do controle no respectivo dia) / resistência à tração na flexão do controle no respectivo dia X 100%.

Analisando a mesma relação a/l é observada a evolução da resistência à tração na flexão ao longo das idades, conforme Figura 15. Existe uma tendência de maior velocidade no ganho de resistência até o terceiro dia. No entanto do terceiro ao sétimo dia ocorreu uma estabilização, voltando a crescer até os 28 dias, porém a uma taxa mais lenta. Isso pode ser notado pelas inclinações da reta da Figura 15.

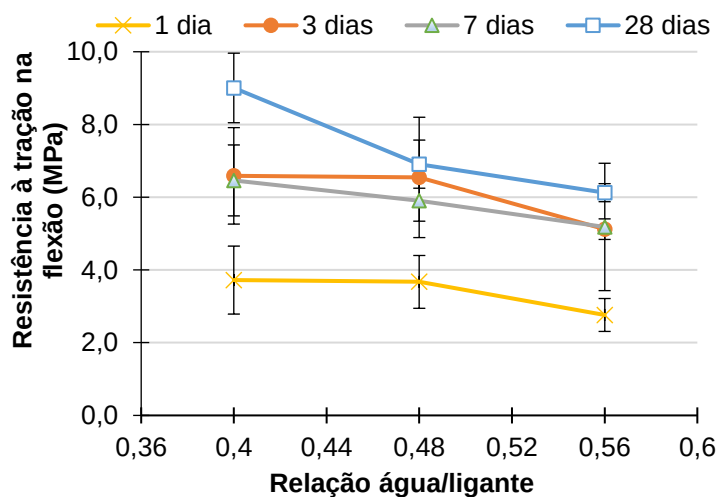
Na Figura 16 a redução da resistência à tração na flexão com o aumento da relação a/l fica mais evidente. Além disso, as idades seguem a tendência de ganho de resistência ao longo do tempo.

Figura 15 - Efeito da relação água/ligante na resistência à tração na flexão ao longo do tempo



Fonte: O autor (2022).

Figura 16 - Resistência média à tração na flexão versus relação água/ligante sem fibra



Fonte: O autor (2022).

4.1.2 Influência do teor da fibra de polipropileno

Os resultados médios de resistência à tração na flexão, que dizem respeito a influência da inserção das fibras em argamassas de cimento de escória álcali-ativada com silicato de sódio, constam nas Tabelas 9, 10 e 11.

Tabela 9 - Resistência à tração na flexão e taxa de desempenho (TD) $a/l = 0,40$

Traço	Resistência média à tração na flexão (MPa)							
	1 dia	TD	3 dias	TD	7 dias	TD	28 dias	TD
040SS0,0	3,72	-	6,59	-	6,46	-	9,00	-
040SS0,1	4,43	19,03%	6,67	1,32%	7,45	15,26%	7,44	-17,38%
040SS0,2	4,44	19,20%	6,81	3,35%	8,08	25,13%	7,93	-11,88%
040SS0,3	4,47	19,99%	6,59	0,08%	7,58	17,32%	8,21	-8,85%

Fonte: O autor (2022).

Tabela 10 - Resistência à tração na flexão e taxa de desempenho (TD) $a/l = 0,48$

Traço	Resistência média à tração na flexão (MPa)							
	1 dia	TD	3 dias	TD	7 dias	TD	28 dias	TD
048SS0,0	3,67	-	6,54	-	5,90	-	6,91	-
048SS0,1	3,83	4,21%	6,11	-6,64%	6,16	4,42%	6,74	-2,50%
048SS0,2	3,68	0,14%	5,65	-13,63%	6,00	1,66%	6,91	-0,03%
048SS0,3	3,72	1,34%	5,56	-14,97%	6,21	5,25%	8,45	22,27%

Fonte: o autor (2022).

Tabela 11 - Resistência à tração na flexão e taxa de desempenho (TD) $a/l = 0,56$

Traço	Resistência média à tração na flexão (MPa)							
	1 dia	TD	3 dias	TD	7 dias	TD	28 dias	TD
056SS0,0	2,76	-	5,12	-	5,18	-	6,12	-
056SS0,1	2,81	1,92%	4,56	-10,92%	5,58	7,59%	6,05	-1,26%
056SS0,2	1,69	-38,79%	4,44	-13,26%	5,59	7,83%	6,04	-1,45%
056SS0,3	2,66	-3,74%	5,32	3,91%	5,61	8,17%	6,26	2,15%

Fonte: O autor (2022).

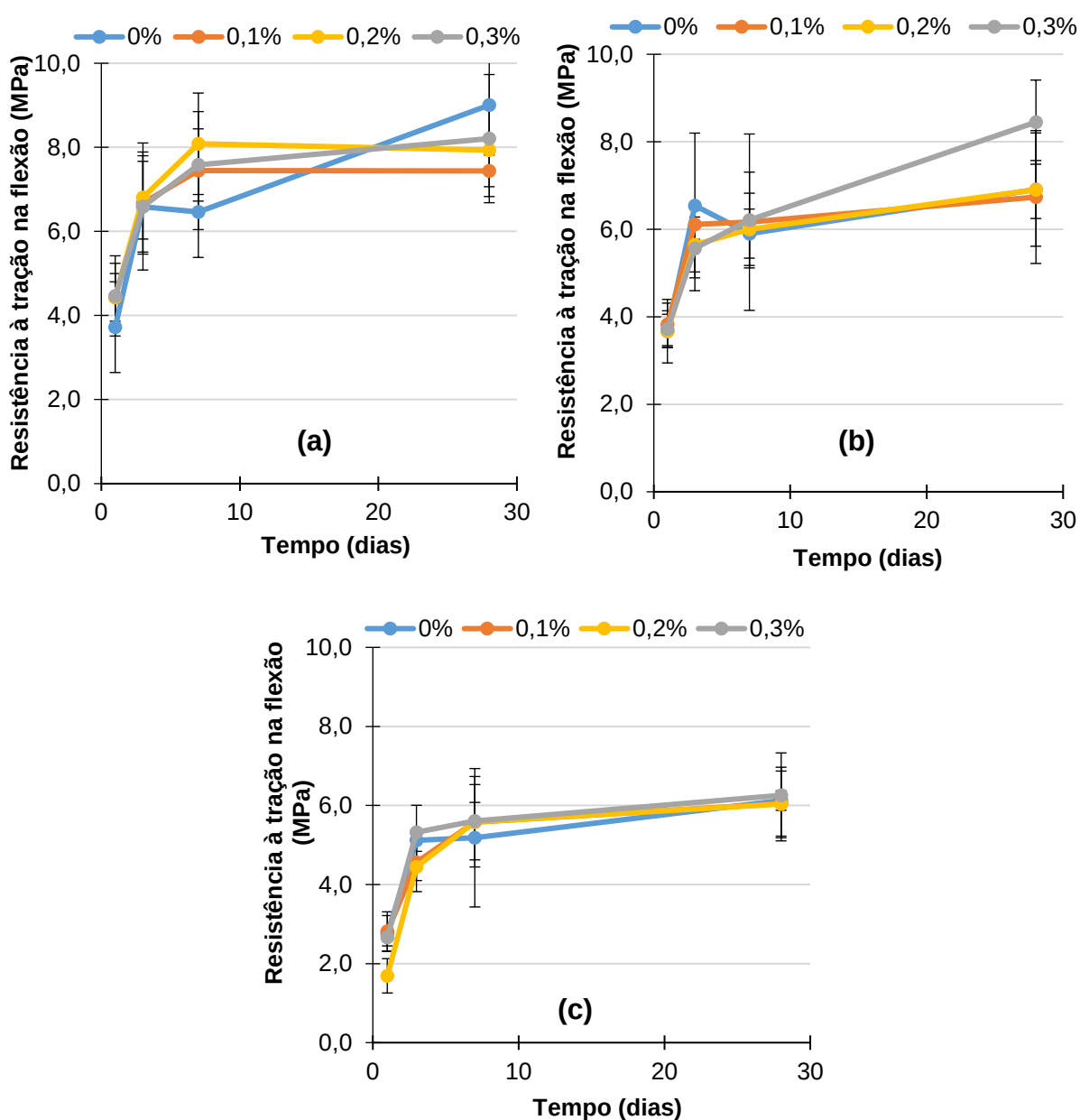
A forma gráfica da resistência à tração na flexão para todos os casos de fibra $a/l = 0,40$ está representada na Figura 17 (a). É possível notar nesse caso que a fibra teve seu melhor desempenho aos sete dias, existindo uma inversão de comportamento aos 28 dias, quando a fibra fez cair a resistência à tração em todos os casos. A adição de 0,3% teve a menor queda de 8,85%, seguido de 0,2% com 11,88% e 0,1% com 17,38%, conforme índices TD da Tabela 9.

Na relação $a/l = 0,48$, Figura 17 (b), a resistência é afetada negativamente pela adição de fibra em todos os teores no terceiro dia. No caso isolado do teor de

0,3% de PP, a fibra reduziu em 14,97% aos três dias. Por outro lado, apresentou uma recuperação com uma resistência 22,27% maior em relação ao controle aos 28 dias, conforme taxa TD da Tabela 10.

Mais uma vez é possível notar na Figura 17 (c) o ganho de resistência ao longo do tempo em todas as misturas. No entanto, diferente do que foi encontrado por Xu *et al.* (2021), não é percebida uma tendência de melhora com a adição da fibra. Os autores, em seu artigo, obtiveram todos os resultados acima do controle, tanto variando a dosagem de PP, quanto o comprimento da fibra.

Figura 17 – Resistência à tração na flexão $a/l = 0,40$ (a), $0,48$ (a) e $0,56$ (a)



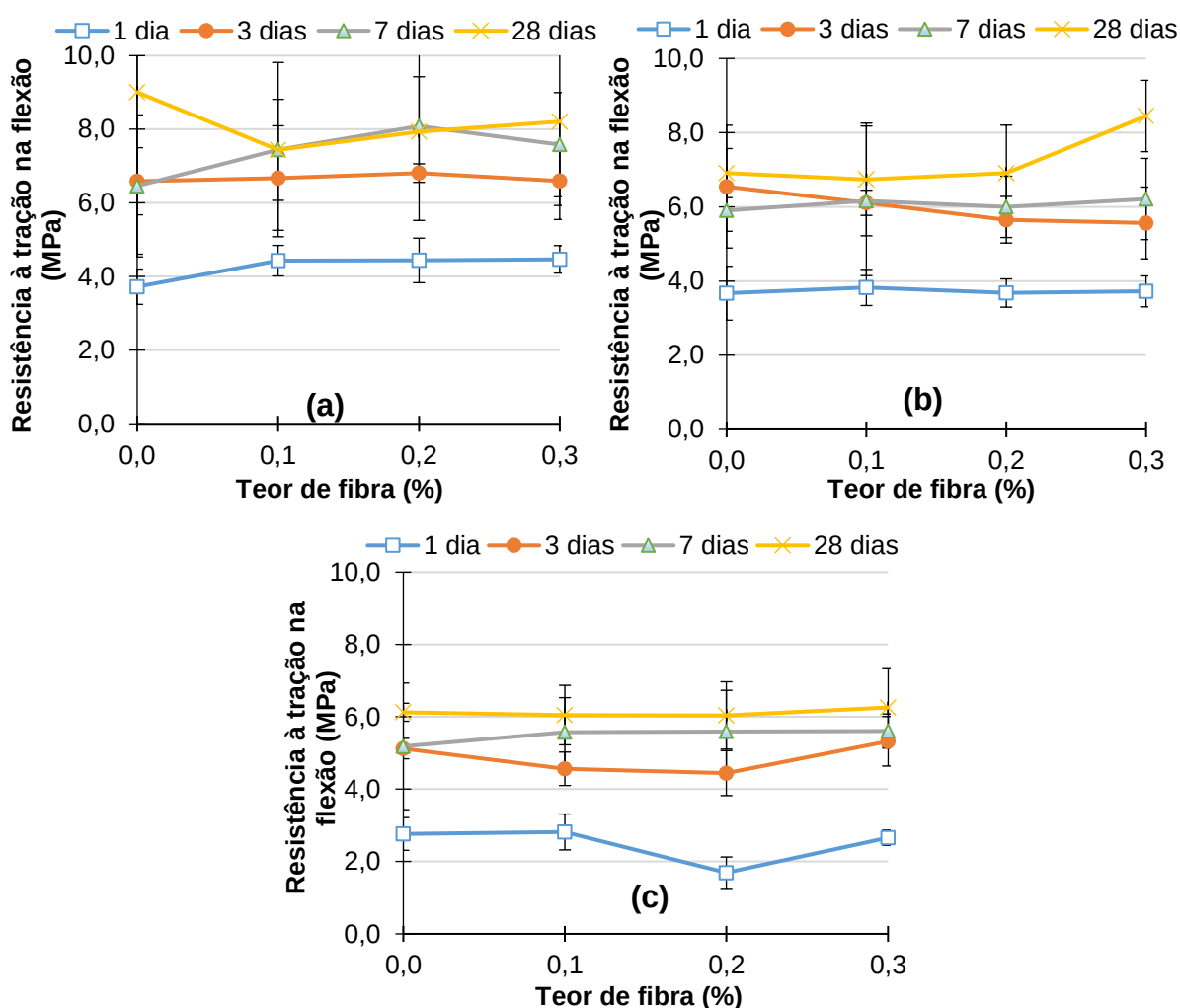
Fonte: O autor (2022).

Da Figura 18 (a) é possível visualizar que em 1 dia e 3 dias as retas tendem a uma horizontal, o que demonstra a pouca interferência da fibra na resistência à tração na flexão. Aos 7 dias houve um ganho de resistência, conforme a taxa TD da Tabela 9, sendo a maior de 25,13% no teor de 0,2% PP. Aos 28 dias ocorreu o fato inverso, com perda de resistência tanto maior quanto menor a adição de PP.

Da Figura 18 (b), em 1 dia e 7 dias a resistência se manteve próximo ao controle, constatado na horizontalidade da reta. Isto é, o aumento da fibra pouco faz variar a resistência à tração. Aos 28 dias, sobressai o acentivo da reta de 0,3% PP, além do declive gradual da reta na idade dos 3 dias.

Na relação $a/l = 0,56$, Figura 18 (c), a fibra apresentou seu melhor desempenho aos 7 dias em todos os teores, favorecendo o aumento da resistência. Não foi observado a mesma tendência de comportamento nas demais idades.

Figura 18 - Resistência à tração na flexão versus teor de fibra $a/l = 0,40$ (a), $0,48$ (b) e $0,56$ (c)



Fonte: o autor (2022).

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Serão apresentados os resultados da propriedade mecânica de resistência à compressão (MPa) em todas as variações de água/ligante. Gráficos serão utilizados para melhor compreensão e discussão dos dados.

4.2.1 Influência da relação água/ligante

Os resultados, correspondentes a média de 6 corpos de prova, da resistência à compressão (fcm) para as três variações de água/ligante, objeto desse estudo, nas idades de 1 dia, 3 dias, 7 dias e 28 dias, em argamassas de escória álcali ativada com silicato de sódio seguem representados na Tabela 12. O intervalo de confiança encontra-se indicado pelas barras de erro em todas as idades rompidas, conforme Figura 19. Nota-se que a elevação da relação a/l implica a redução da resistência à compressão da argamassa em todas as idades. No primeiro dia houve uma diminuição de 16,93% e 58,94%, respectivamente, para relação a/l = 0,48 e 0,56 em comparação a a/l = 0,40. No entanto, aos 28 dias ocorreu uma recuperação desses valores, em que a queda da compressão passou a ser de 8,01% e 25,45% para a relação a/l = 0,48 e 0,56, na ordem, tendo como referência o 0,40, conforme consta na Tabela 12 (índices TD). Isso significa que a diferença foi restituída em mais da metade comparada ao primeiro dia.

Tabela 12 - Resumo das resistências média à compressão (padrão) em todas as idades

Traço	Resistência média à compressão (MPa)							
	1 dia	TD	3 dias	TD	7 dias	TD	28 dias	TD
040SS0,0	24,93	-	54,47	-	64,26	-	86,66	-
048SS0,0	20,71	-16,93%	48,03	-11,83%	60,31	-6,15%	79,72	-8,01%
056SS0,0	10,24	-58,94%	33,70	-38,14%	50,03	-22,14%	64,60	-25,45%

Fonte: O autor (2022).

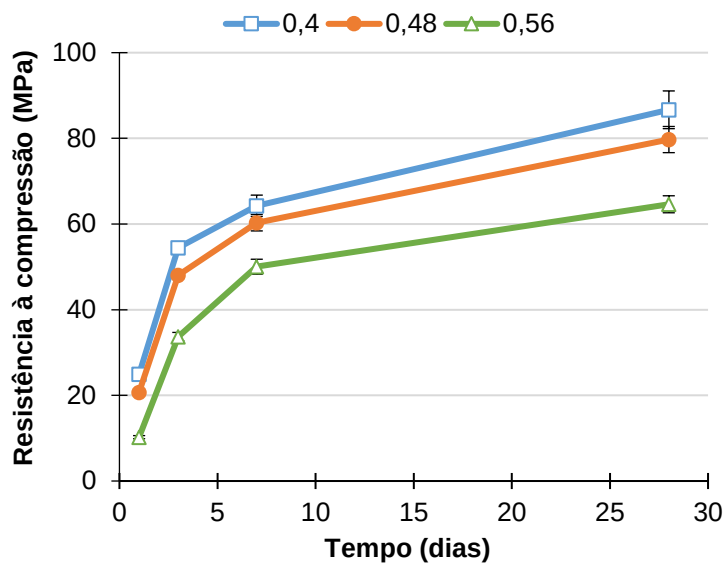
TD = Taxa de desempenho = (resistência à compressão da amostra i – resistência à compressão do controle no respectivo dia) / resistência à compressão do controle no respectivo dia X 100%.

Analisando cada relação a/l isoladamente é observada a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo. Ocorre uma tendência de maior velocidade no ganho de resistência até o terceiro dia, da mesma forma que

aconteceu na tração, seguido da diminuição dessa taxa dos 7 dias aos 28 dias, conforme consta nas inclinações das retas da Figura 19.

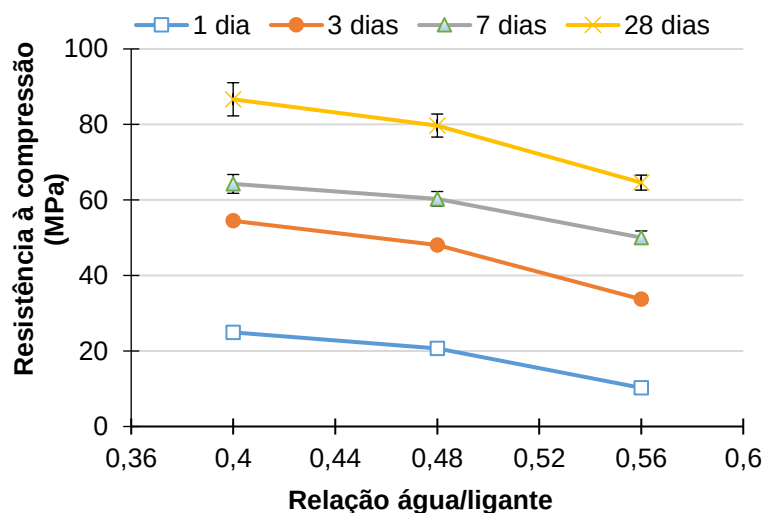
Na Figura 20 é possível perceber que a queda na resistência à compressão é mais expressiva quando se compara a relação a/l de 0,48 com 0,56, em verificação do 0,40 com o 0,48.

Figura 19 - Efeito da relação água/ligante na resistência à compressão ao longo do tempo



Fonte: O autor (2022).

Figura 20 - Resistência à compressão *versus* relação água/ligante



Fonte: o autor (2022).

4.2.2 Influência do teor de fibra de polipropileno

As resistências médias à compressão dos diferentes teores de fibra de todos os traços, bem como o padrão já discutido anteriormente, estão sumarizadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Resumos das resistências média à compressão em todas as idades de todos os traços

Traço	Resistência média à compressão (MPa)			
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
040SS0,0	24,93	54,47	64,26	86,66
040SS0,1	31,25	54,32	69,13	88,78
040SS0,2	26,98	48,89	68,34	89,12
040SS0,3	25,08	49,00	67,14	90,16
048SS0,0	20,71	48,03	60,31	79,72
048SS0,1	21,85	40,08	59,37	77,09
048SS0,2	17,31	41,10	57,17	76,02
048SS0,3	17,57	41,31	55,58	77,97
056SS0,0	10,24	33,70	50,03	64,60
056SS0,1	9,52	26,45	49,40	65,78
056SS0,2	5,39	22,83	50,09	67,23
056SS0,3	8,10	27,49	44,80	65,75

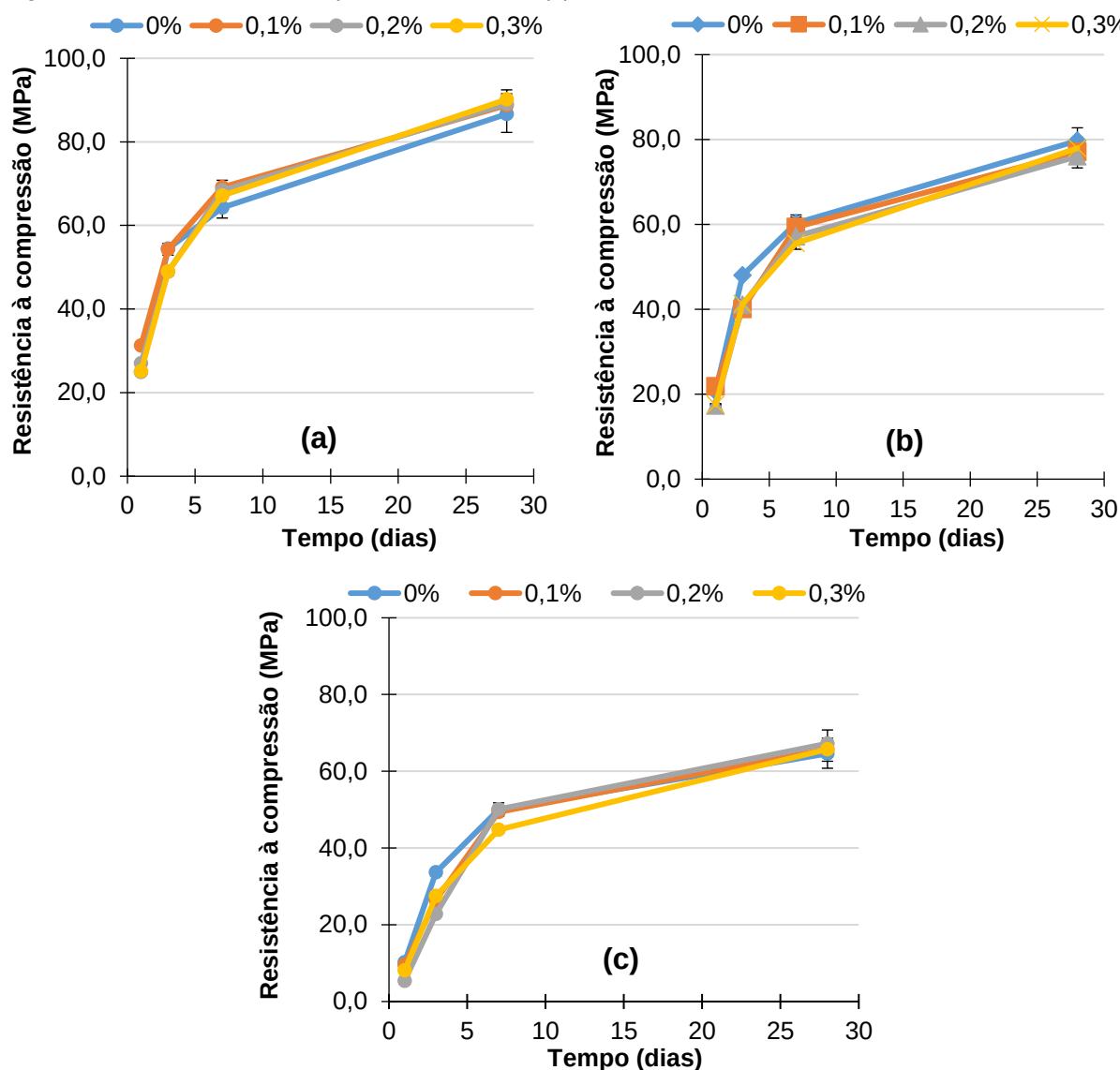
Fonte: O autor (2022).

O comportamento do teor de fibra de polipropileno na resistência à compressão (MPa) de argamassa de cimento de escória álcali ativada com silicato de sódio está representado na Figura 21 (a) na relação $a/l = 0,40$, com fibras variando em 0,1%, 0,2% e 0,3%. Há uma evolução crescente da resistência ao longo do tempo. Logo após a desmoldagem, 24 h depois da mistura, os corpos de prova já atingem valores acima de 20 MPa, alcançando em três dias em torno de 50 MPa em todos os traços. Já aos 28 dias ficaram muito próximos a 90 MPa.

Com relação $a/l = 0,48$, Figura 21 (b) novamente é percebida uma tendência de aumento da compressão do traço ao longo do tempo, com resistências atingindo quase 80 MPa aos 28 dias, cerca de 10 MPa a menos em relação a $a/l = 0,40$.

Por fim na combinação de $a/l = 0,56$, Figura 21 (c), por se tratar de uma relação com maior teor de água, os resultados foram abaixo dos traços anteriores, com compressão em torno de 65 MPa aos 28 dias.

Figura 21 - Resistência à compressão $a/l = 0,40$ (a), $0,48$ (b) e $0,56$ (c) em todos os teores de fibra PP



Fonte: O autor (2022).

Nas primeiras idades há uma tendência de variar para baixo a resistência à compressão da argamassa com a adição da fibra de PP, em comparação a mistura padrão. Esse comportamento é revertido aos 28 dias, apresentando similaridade ao trabalho apresentado por Xu; Chen; Wang (2020). Segundo os autores, isso ocorre devido a fibra que cria obstáculos, os quais impedem a rápida hidratação da partícula nos primeiros dias. Já em idade mais tardia, a fibra atua de modo a limitar o início e propagação de microfissuras, desviar sua direção, bem como absorver tensões.

O aumento do teor da fibra de polipropileno na relação $a/l = 0,40$ não apresentou nem 5% de aumento na resistência à compressão aos 28 dias, ficando limitado ao valor máximo de 4,04% para o teor de fibra 0,3%, concordando com o

trabalho de Xu *et al.* (2021). Os demais resultados foram 2,44% e 2,84% para 0,1% e 0,2%, respectivamente (índice TD da Tabela 14).

A influência da fibra na argamassa $a/l = 0,48$ também apresentou variações de mesma ordem. No entanto, nessa situação ocorreu um comportamento inverso a relação $a/l = 0,40$. Em todos os casos, aos 28 dias, a adição de fibra proporcionou uma queda da resistência mecânica, com maior perda de 4,64% vinculada ao teor de 0,2%. As demais perdas estão sintetizadas na Tabela 15, índice TD, sendo 3,3% e 2,19% para 0,1% e 0,3%, respectivamente.

A mesma tendência da relação 0,40 foi observada para a relação $a/l = 0,56$, aos 28 dias, com valores que não ultrapassam os 5% de melhoria. Nessa idade, a fibra variou a resistência, aumentando em 4,07% com teor de 0,2%. As demais quantidades tiveram ganhos menores, com 1,82% e 1,78% para 0,1% e 0,3%, respectivamente, conforme índice TD da Tabela 16.

Tabela 14 - Relação das resistências à compressão com o controle $a/l = 0,40$

Traço	Resistência média à compressão (MPa)							
	1 dia	TD	3 dias	TD	7 dias	TD	28 dias	TD
040SS0,0	24,93	-	54,47	-	64,26	-	86,66	-
040SS0,1	31,25	25,35%	54,32	-0,28%	69,13	7,57%	88,78	2,44%
040SS0,2	26,98	8,24%	48,89	-10,24%	68,34	6,34%	89,12	2,84%
040SS0,3	25,08	0,61%	49,00	-10,05%	67,14	4,47%	90,16	4,04%

Fonte: O autor (2022).

Tabela 15 - Relação das resistências à compressão com o controle $a/l = 0,48$

Traço	Resistência média à compressão (MPa)							
	1 dia	TD	3 dias	TD	7 dias	TD	28 dias	TD
048SS0,0	20,71	-	48,03	-	60,31	-	79,72	-
048SS0,1	21,85	5,49%	40,08	-16,55%	59,37	-1,56%	77,09	-3,30%
048SS0,2	17,31	-16,40%	41,10	-14,42%	57,17	-5,21%	76,02	-4,64%
048SS0,3	17,57	-15,14%	41,31	-13,98%	55,58	-7,84%	77,97	-2,19%

Fonte: O autor (2022).

Tabela 16 - Relação das resistências à compressão com o controle $a/l = 0,56$

Traço	Resistência média à compressão (MPa)							
	1 dia	TD	3 dias	TD	7 dias	TD	28 dias	TD
056SS0,0	10,24	-	33,70	-	50,03	-	64,60	-
056SS0,1	9,52	-6,98%	26,45	-21,49%	49,40	-1,26%	65,78	1,82%
056SS0,2	5,39	-47,30%	22,83	-32,25%	50,09	0,13%	67,23	4,07%
056SS0,3	8,10	-20,90%	27,49	-18,42%	44,80	-10,45%	65,75	1,78%

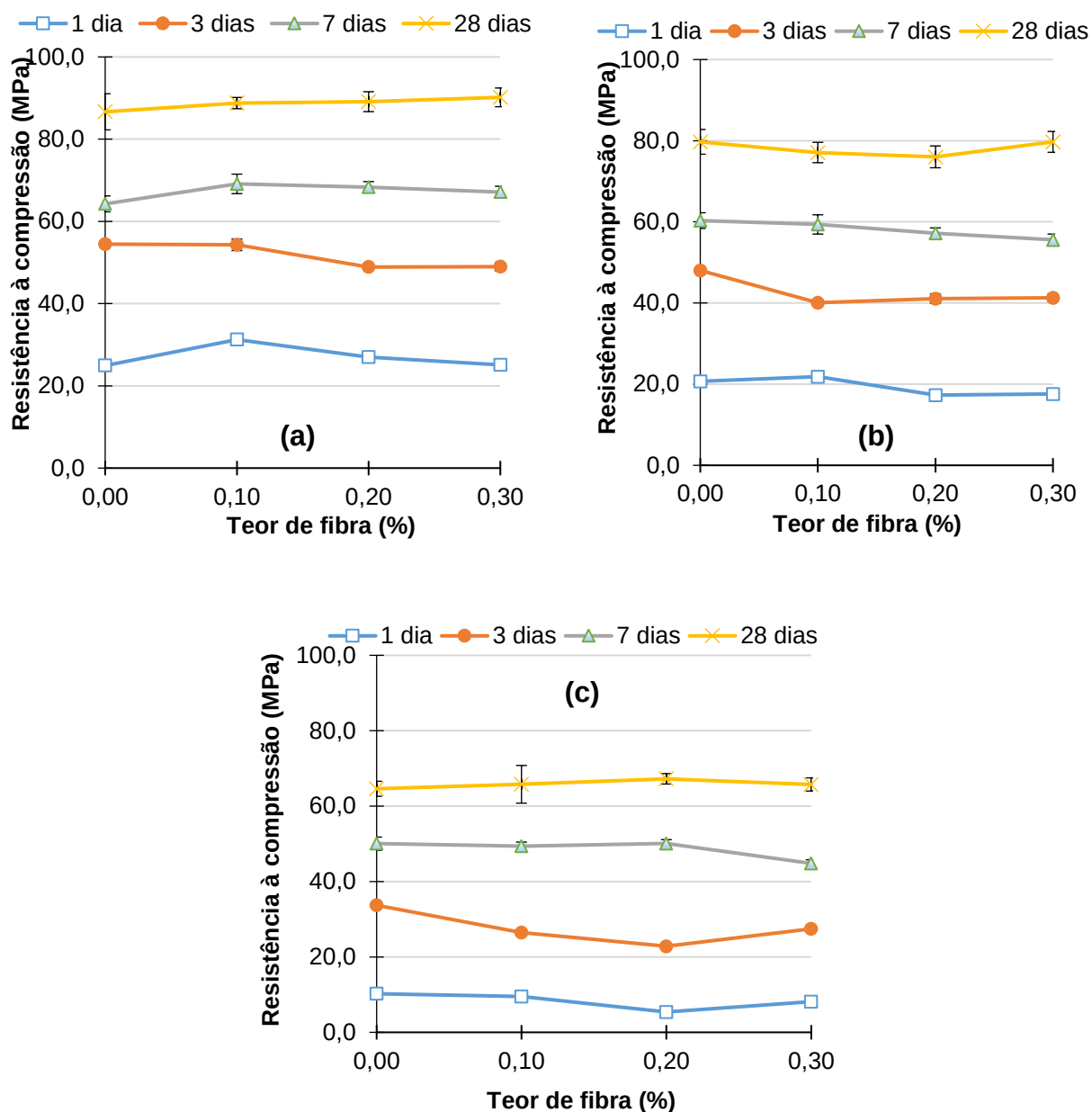
Fonte: O autor (2022).

Na Figura 22 (a), (b) e (c), é possível notar que as fibras provocaram efeitos semelhantes em todas as relações água/ligante. A sua influência gerou uma variação em torno das misturas padrão, sem fibra. Ocorre que pode existir casos em que há a sobreposição das barras de erro, levando a resultados estatisticamente iguais. Quanto maior a horizontalidade das retas da figura menor é a interferência da fibra PP na resistência à compressão.

Na Figura 22 (b), relação $a/l = 0,48$, é percebido o resultado desfavorável da resistência com a adição de fibras PP devido ao declive das retas em todas as idades. A queda mais expressiva se deu aos 3 dias, com redução, em relação ao controle, de 16,55%, 14,42% e 13,98%, respectivamente, para 0,1%, 0,2% e 0,3%, tanto maior quanto menor o teor de fibra PP.

Na relação $a/l = 0,56$, Figura 22 (c), com um dia e aos 3 dias ocorreram quedas mais significantes. As reduções chegaram a 6,98%, 47,30% e 20,90% em um dia para 0,1%, 0,2% e 0,3%, respectivamente. Já aos 3 dias atingiram 21,49%, 32,25% e 18,42%, na ordem. No entanto, a recuperação ocorreu aos 28 dias, quando todos os teores de fibra superaram o controle, conforme já detalhado anteriormente.

Figura 22 - Resistência à compressão versus teor de fibras $a/l = 0,40$ (a), $0,48$ (b) e $0,56$ (c)



Fonte: O autor (2022).

4.3 RETRAÇÃO

As leituras de retração foram feitas em 1 dia, 2 dias, 3 dias, 4 dias, 7 dias, 9 dias, 11 dias, 14 dias, 21 dias, 28 dias e 56 dias após a mistura. Os valores dos gráficos, em cada dia de ensaio, correspondem a média da leitura de 6 corpos de prova para cada traço realizado.

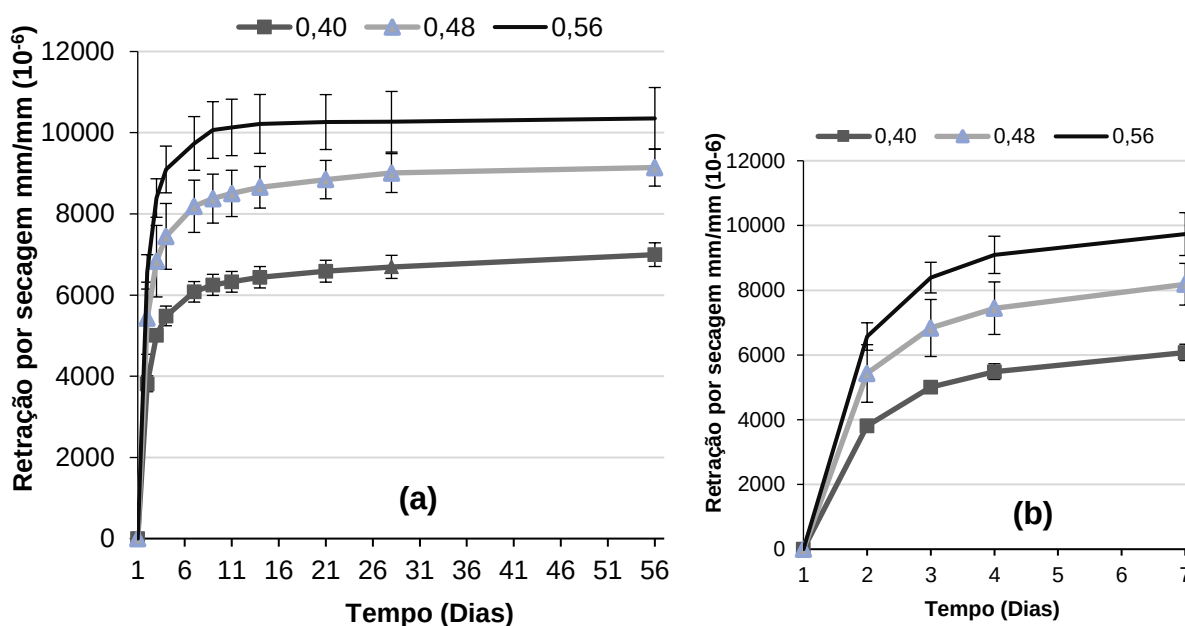
4.3.1 Por secagem

Os resultados do ensaio de retração por secagem serão apresentados por meio de gráficos e tabelas, assim como o da variação de massa. Primeiro será comparado as três variações de água/ligante (a/l) sem fibra, para em seguida avaliar a adição dos três diferentes teores de fibra de polipropileno em cada relação a/l.

4.3.1.1 Influência da relação água/ligante na retração por secagem das argamassas controle de escória ativada

Os resultados da retração por secagem ($\text{mm/mm } 10^{-6}$) ao longo do tempo estão representados na Figura 23. É possível notar em qualquer relação a/l que o período mais significativo da retração por secagem ocorre até aproximadamente o sétimo dia, constatado na maior inclinação da linha do gráfico. A partir dessa idade, há uma ocorrência de suavização do comportamento, tendendo a uma estabilização que se estende até o último dia de leitura do ensaio, aos 56 dias. Isso é notado pela horizontalidade da linha.

Figura 23 - Retração por secagem das argamassas de escória álcali ativada sem fibra com variação da relação água/ligante (a) detalhada nos sete primeiros dias (b)



Fonte: O autor (2022).

A relação $a/l = 0,48$ e $a/l = 0,56$ apresentaram uma retração por secagem 42,38% e 72,33% maior, respectivamente, em comparação a relação $a/l = 0,40$ (parâmetro de retração na pesquisa) já no segundo dia. Essa diferença em percentual vai diminuindo ao longo do tempo e encontra-se resumida na Tabela 17, índice TD.

O pico da retração ocorre nas primeiras idades. Aos sete dias, a retração apresentada já equivale a 86,92%, 89,55% e 94,04% da retração total aos 56 dias, nas relações $a/l = 0,40$, $0,48$ e $0,56$, respectivamente.

É possível perceber no gráfico discriminado na Figura 24 um comportamento claro de aumento de retração por secagem com a elevação da relação água/ligante nas argamassas de escória álcali ativada com silicato de sódio.

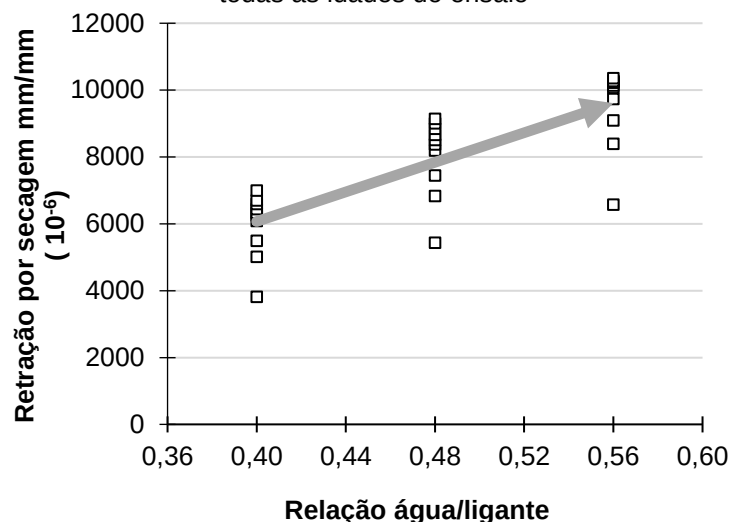
Tabela 17 - Retração por secagem e a sua respectiva taxa de desempenho (TD) nas diferentes relações água/ligante das argamassas controle de escória álcali-ativada com silicato de sódio

	040SS0,0		048SS0,0		056SS0,0	
Tempo (dias)	Retração por secagem mm/mm (10^{-6})	TD	Retração por secagem mm/mm (10^{-6})	TD	Retração por secagem mm/mm (10^{-6})	TD
1	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00
2	3813,07	-	5429,08	42,38%	6571,24	72,33%
3	5009,15	-	6833,99	36,43%	8390,20	67,50%
4	5486,27	-	7445,42	35,71%	9094,44	65,77%
7	6080,39	-	8186,93	34,64%	9735,29	60,11%
9	6250,98	-	8376,47	34,00%	10066,01	61,03%
11	6326,80	-	8504,25	34,42%	10130,39	60,12%
14	6438,56	-	8655,88	34,44%	10216,67	58,68%
21	6588,24	-	8844,77	34,25%	10262,09	55,76%
28	6694,12	-	9005,56	34,53%	10269,28	53,41%
56	6995,42	-	9142,16	30,69%	10351,96	47,98%

Fonte: O autor (2022).

TD = Taxa de desempenho = (retração por secagem do dia i – retração por secagem da argamassa controle $a/l = 0,40$ no respectivo dia) / retração por secagem da argamassa controle $a/l = 0,40$ no respectivo dia X 100%.

Figura 24 - Correlação entre a retração por secagem sem fibra e a relação água/ligante em todas as idades do ensaio

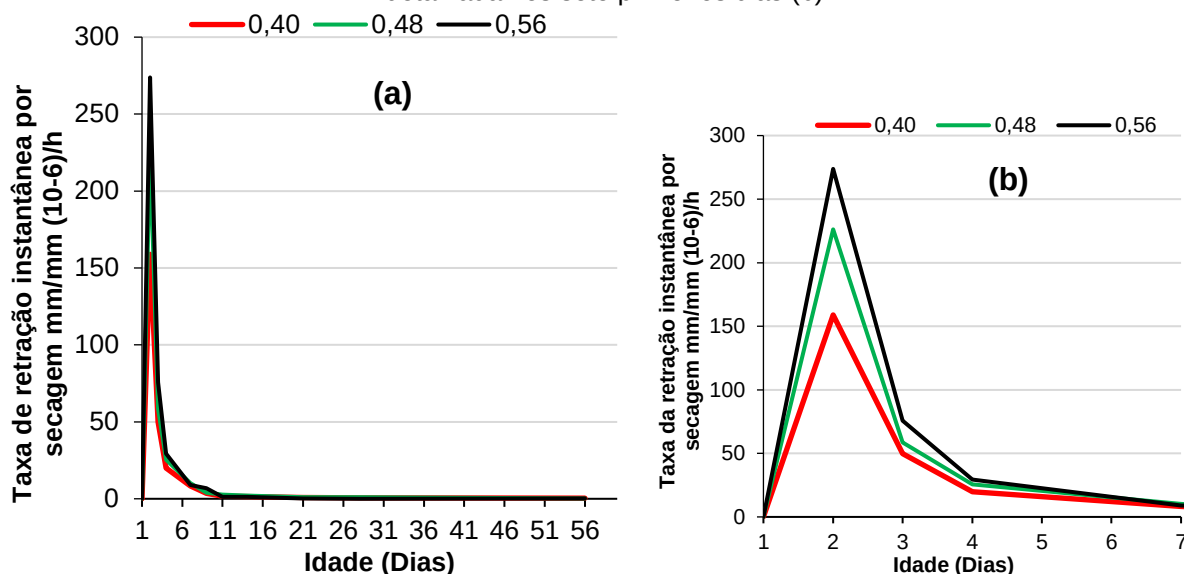


Fonte: O autor (2022).

Na Figura 25 a taxa de retração instantânea representa a relação entre a diferença de retração entre duas leituras consecutivas e o tempo (em horas) decorrido entre essas respectivas leituras. Assim, uma maior taxa de retração instantânea significa que houve uma maior retração de uma leitura para outra subsequente considerando o mesmo intervalo de tempo. O comportamento do gráfico na Figura 25 demonstra o quanto as taxas são elevadas nas primeiras idades, em comparação aos demais dias, tendendo a se estabilizar ao longo do tempo. Essa taxa cresce juntamente com o aumento da relação a/l, já que para maiores relações dessa, observa-se uma retração por secagem mais elevada.

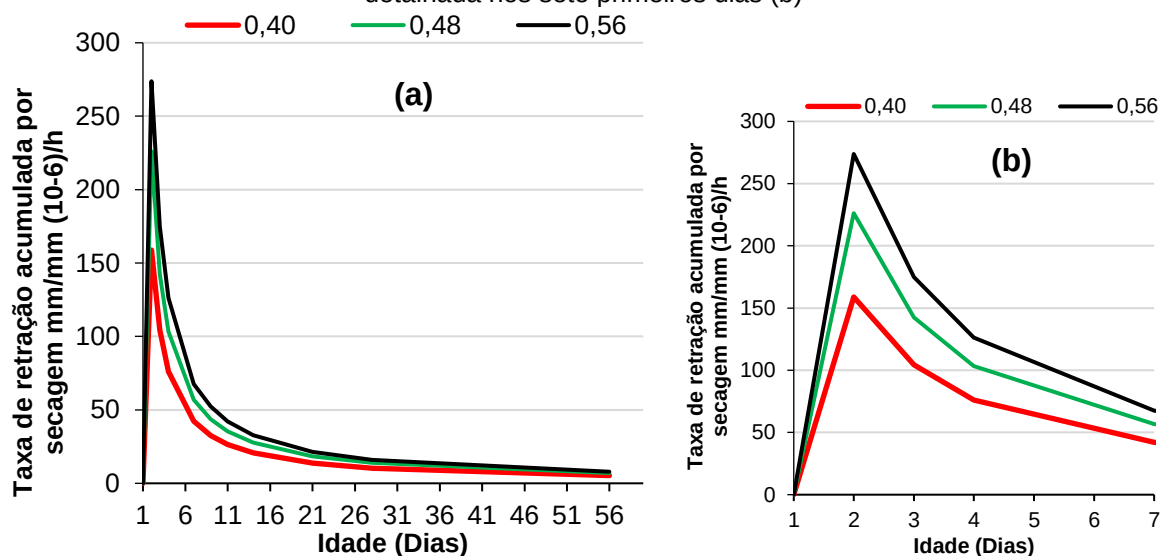
A taxa de retração acumulada diz respeito à retração em comparação ao primeiro dia de leitura, ou seja, é a relação entre a diferença de retração do dia da leitura considerada e o primeiro dia de leitura com o tempo (em horas) decorrido desde o dia 1 até o dia da respectiva leitura. A mesma tendência da taxa instantânea é observada na Figura 26 para a acumulada.

Figura 25 - Taxa de retração instantânea para as diferentes relações água/ligante (a) detalhada nos sete primeiros dias (b)



Fonte: O autor (2022).

Figura 26 - Taxa de retração acumulada para as diferentes relações água/ligante (a) detalhada nos sete primeiros dias (b)

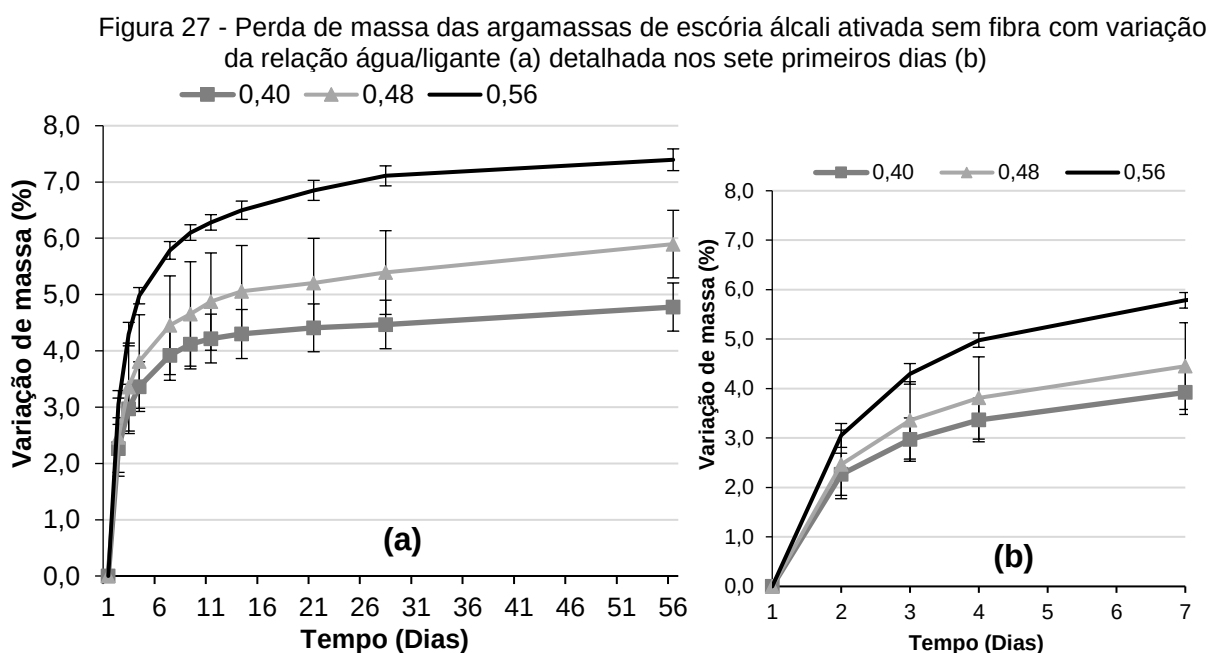


Fonte: O autor (2022).

4.3.1.2 Correlação da retração por secagem com a perda de massa nas argamassas controle de escória ativada

Ao longo do ensaio, além da leitura de retração por secagem, também acontecia a medição da massa de cada corpo de prova em cada dia de ensaio. O resultado do gráfico da Figura 27 apresentou uma tendência muito semelhante ao gráfico de retração por secagem da Figura 23.

Nas primeiras idades, a linha do gráfico apresentando alta inclinação, Figura 27, demonstra uma perda de massa mais intensa, coincidindo com o mesmo período de maior retração por secagem. Isso significa que existe uma associação entre uma maior perda de massa para o ambiente externo com uma maior retração por secagem das argamassas de escória álcali ativada com silicato de sódio. Aos 7 dias, a variação de massa já representava 82,01%, 75,59% e 78,24% da variação total nas relações $a/l = 0,40$, $0,48$ e $0,56$, respectivamente. A partir dessa data começa a ocorrer uma estabilização da perda de massa, com queda da inclinação, constatado na tendência de horizontalidade da linha do gráfico.



Fonte: O autor (2022).

Na Tabela 18 o resultado da variação de massa para $a/l = 0,40$ foi 2,27% do primeiro para o segundo dia, obtendo-se no mesmo período 2,47% e 3,05%, respectivamente para relação $a/l = 0,48$ e $a/l = 0,56$. Isso significa uma variação de massa 8,83% e 34,65% (índice TD) maior em relação a referência $a/l = 0,40$, para $a/l = 0,48$ e $a/l = 0,56$, nesta ordem. A tendência mostrou um crescimento dessa variação (resumido no índice TD) ao longo dos 56 dias, aquele com o máximo de 23,39% e este, 54,76%.

Tabela 18 - Perda de massa e a sua respectiva taxa de desempenho (TD) em todas as idades

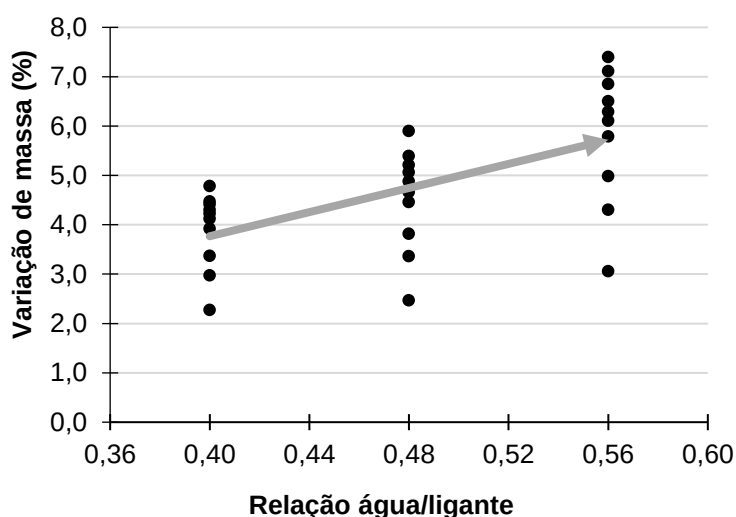
Tempo (dias)	040SS0,0		048SS0,0		056SS0,0	
	Variação da massa (%)	TD	Variação da massa (%)	TD	Variação da massa (%)	TD
1	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2,27	-	2,47	8,83%	3,05	34,65%
3	2,97	-	3,36	13,11%	4,30	44,79%
4	3,36	-	3,81	13,27%	4,98	48,03%
7	3,92	-	4,46	13,67%	5,79	47,60%
9	4,12	-	4,66	13,00%	6,10	48,11%
11	4,22	-	4,88	15,55%	6,28	48,91%
14	4,30	-	5,06	17,70%	6,50	51,16%
21	4,41	-	5,21	18,09%	6,85	55,41%
28	4,47	-	5,39	20,63%	7,11	59,07%
56	4,78	-	5,90	23,39%	7,40	54,76%

Fonte: O autor (2022).

*TD = Taxa de desempenho = (variação de massa do dia i – variação de massa da argamassa controle a/l = 0,40 no respectivo dia) / variação de massa da argamassa controle a/l = 0,40 no respectivo dia X 100%.

Na discretização dos dados obtidos, representados na Figura 28, a indicação da linha de tendência torna mais evidente a influência da relação água/ligante, mostrando um grau de proporção com a variação de massa.

Figura 28 - Variação de massa versus relação a/l sem fibra



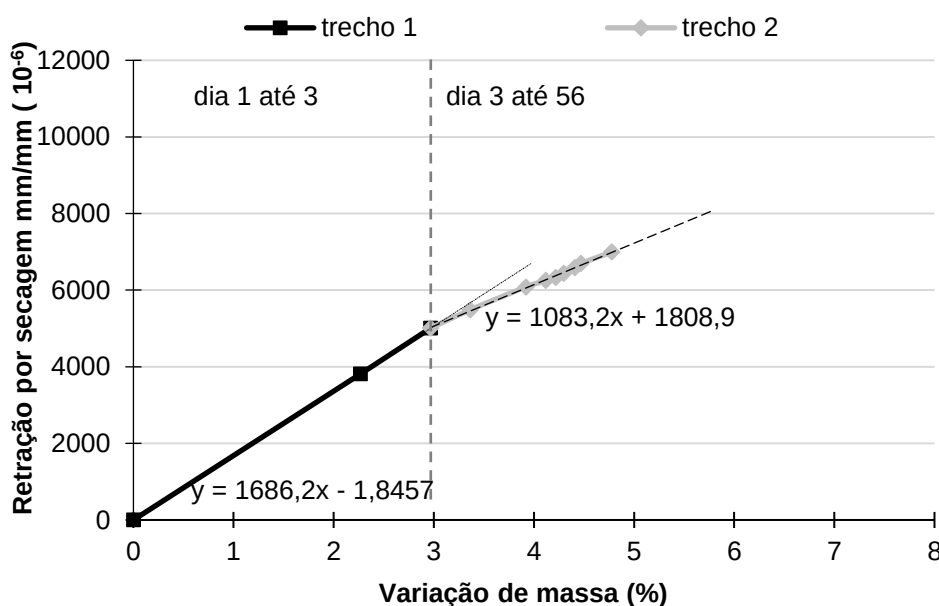
Fonte: O autor (2022).

As Figuras 29, 30 e 31 estabelecem a relação entre a retração por secagem e a variação de massa para cada relação a/l foco da pesquisa. A linha do gráfico da

Figura 29 apresenta duas tendências de crescimento da retração por variação de massa, uma do primeiro ao terceiro dia e outra do terceiro até o último dia 56. Essas variáveis se correlacionam por meio de uma linha de tendência linear do tipo $y = a.x + b$, sendo que o coeficiente angular “a” representa a inclinação da reta que define a quantidade de retração por secagem por cada variação da massa.

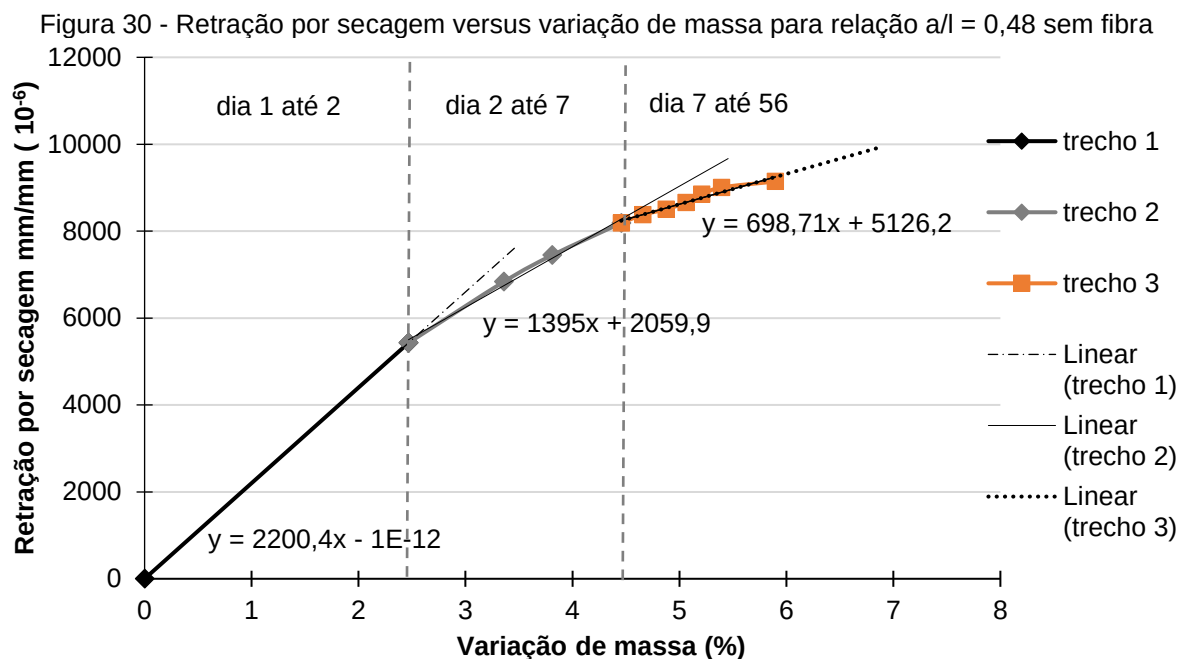
Na Figura 29 tem-se essa associação para a relação $a/l = 0,40$ sem fibra. No primeiro trecho, que se estende até o terceiro dia, ocorre a maior retração, a uma taxa de $1686 \text{ mm/mm } (10^{-6})/\%$, decaindo do terceiro até o dia 56 (trecho 2) para uma taxa de $1083 \text{ mm/mm } (10^{-6})/\%$. O resultado apresenta semelhança ao encontrado por Melo Neto (2008), sendo o trecho 1 quando ocorre a maior de perda de água no momento da desmoldagem, sucedendo-se pela perda gradual da água remanescente (trecho 2).

Figura 29 - Retração por secagem versus variação de massa para relação $a/l = 0,40$ sem fibra



Fonte: O autor (2022).

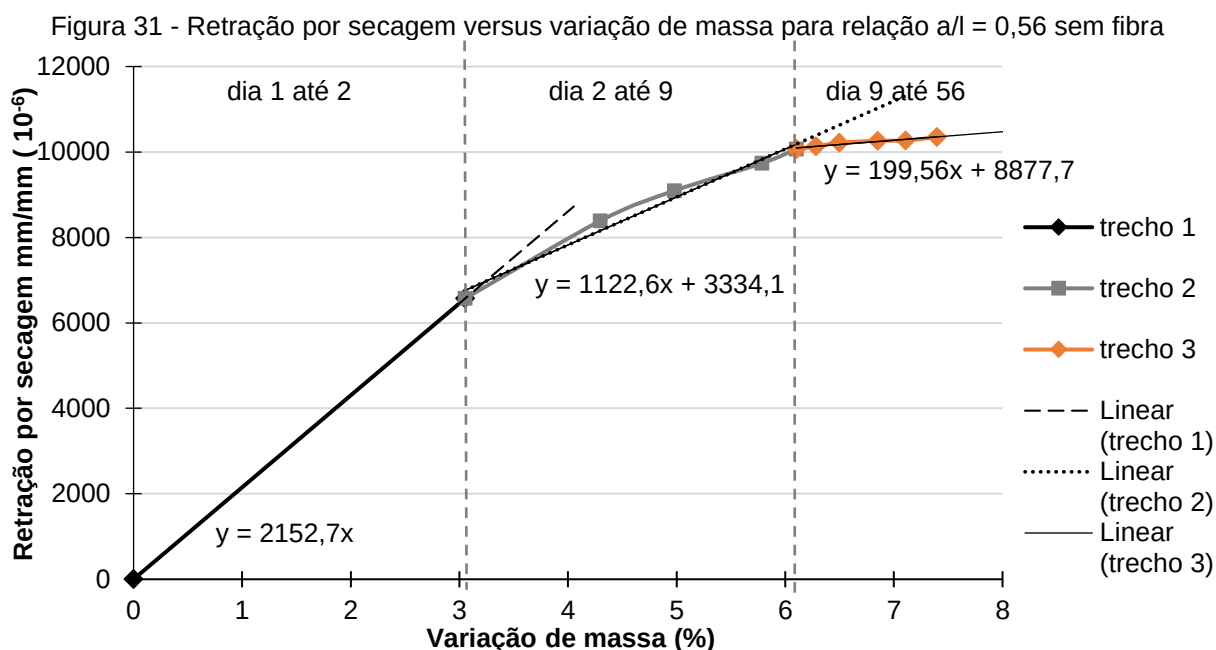
Na relação $a/l = 0,48$, Figura 30, o comportamento mostrou três estágios (trechos): (i) do dia 1 ao 2, intervalo de 24 h, a uma taxa de $2200 \text{ mm/mm } (10^{-6})/\%$; (ii) do dia 2 até o 7, decaindo para $1395 \text{ mm/mm } (10^{-6})/\%$; (iii) e do dia 7 até o 56, a uma taxa $698 \text{ mm/mm } (10^{-6})/\%$.



Fonte: O autor (2022).

O trecho 1 é o que sucede a desmoldagem do corpo de prova, sendo o primeiro contato desse com o meio externo, explicando, portanto, a taxa mais acentuada da retração por variação de massa. A fôrma metálica, juntamente com o papel filme na parte superior, ajudam a manter o corpo de prova isolado de interferências externas. No trecho 2 percebe-se uma diminuição da taxa, uma vez que uma parte da água de amassamento já foi evaporada e outra já foi consumida para a formação dos produtos hidratados. No trecho 3 há uma estabilização da perda de massa juntamente com a retração por secagem.

Na Figura 31 o comportamento foi muito similar ao gráfico da relação $a/l = 0,48$. No entanto, os três estágios identificados ocorreram: (i) nas primeiras 24 h, a uma taxa de 2152 mm/mm (10^{-6})/%; (ii) do dia 2 ao 9, com 1122 mm/mm (10^{-6})/%; (iii) do dia 9 ao 56, decaindo para 199 mm/mm (10^{-6})/%.



Fonte: O autor (2022).

4.3.1.3 Influência do teor da fibra de polipropileno na retração por secagem

O desempenho da fibra de polipropileno nos três diferentes teores na argamassa de escória álcali-ativada com silicato de sódio na relação a/l = 0,40 está representado na Figura 32.

A fibra mostrou sua influência no combate à retração por secagem já no dia dois, quando provocou, em relação à mistura controle sem fibra, uma queda de 7,73%, 17,04% e 33,58% para o teor de 0,1%, 0,2% e 0,3%, respectivamente, conforme mostram os índices TD da Tabela 19. Aos 56 dias, continuou atuando na diminuição da retração por secagem, porém em valores menores, sendo eles 5,21%, 9,71% e 11,49% para os teores de 0,1%, 0,2% e 0,3%, respectivamente. Nessa mesma ordem da quantidade de PP, aos 7 dias, a retração indicada já representava 93,39%, 87,89% e 84,07% da retração total resultante aos 56 dias. Nesse caso, fica evidente a intensidade da retração nas primeiras idades com posterior estabilização ao longo do tempo.

Existe ainda uma correlação entre a adição da fibra e a diminuição da retração por secagem, sendo a quantidade de 0,3% de fibra PP o melhor resultado do ensaio.

Figura 32 - Retração por secagem dos três teores de fibra de polipropileno na relação $a/l = 0,40$ (a) detalhada nos sete primeiros dias (b)

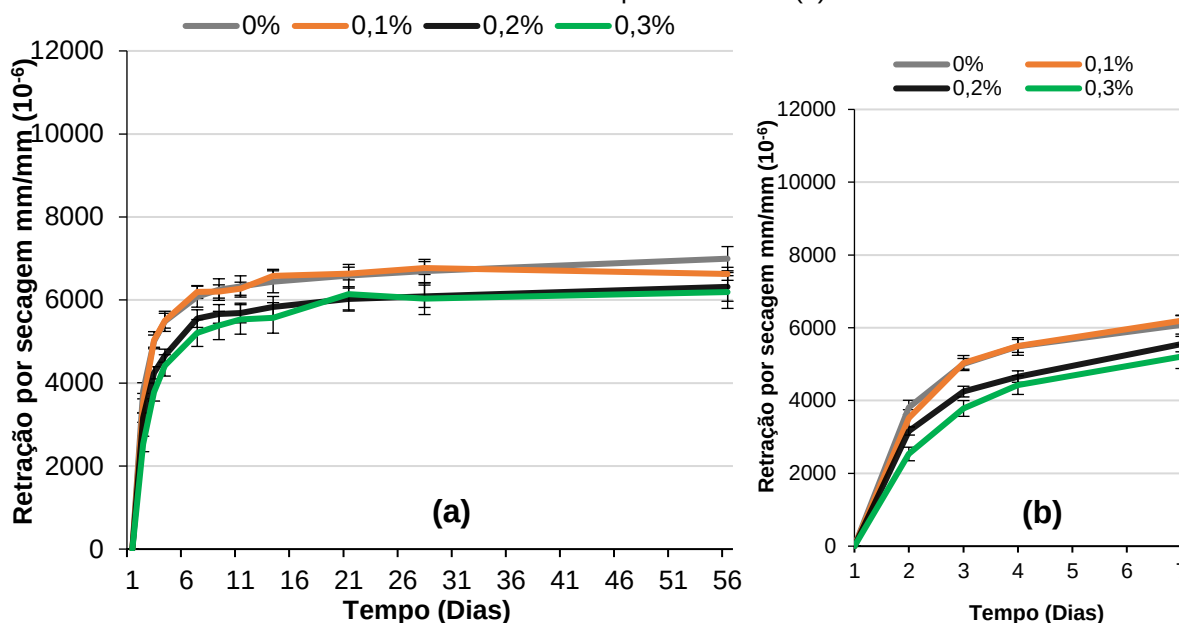


Tabela 19 - Retração por secagem e a taxa de desempenho (TD) nos diferentes teores de fibra ao longo do ensaio relação $a/l = 0,40$

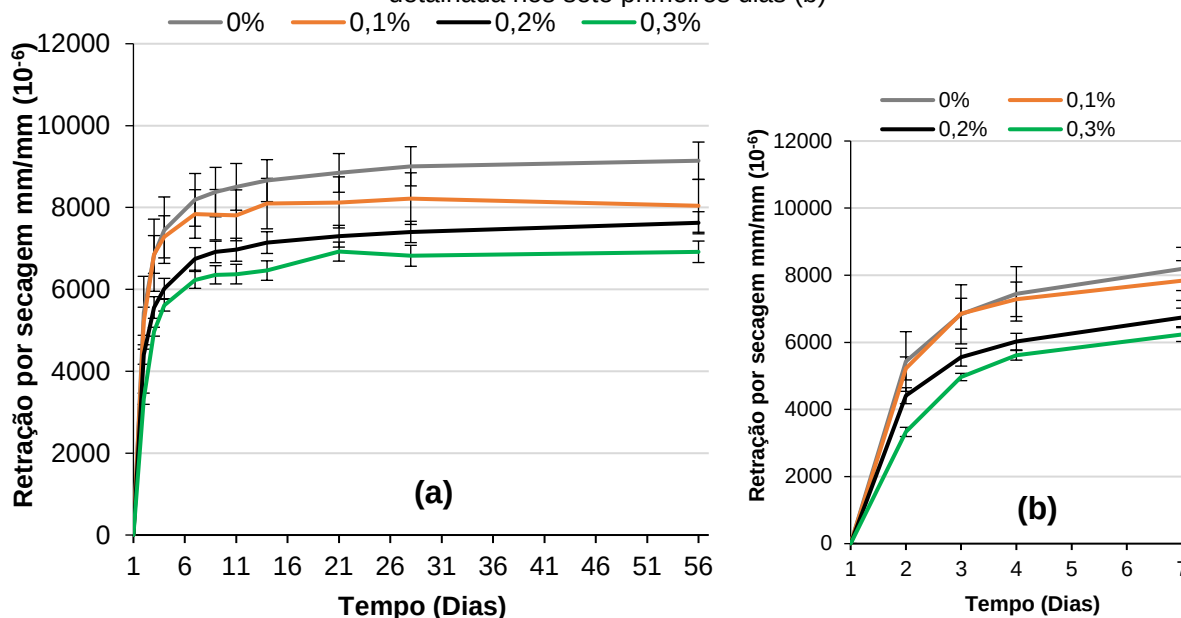
	040SS0,0		040SS0,1		040SS0,2		040SS0,3	
Tempo (dias)	Retração por secagem mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração por secagem mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração por secagem mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração por secagem mm/mm (10 ⁻⁶)	TD
1	0,00	-	0,00	0,00	0	0,00	0	0
2	3813,07	-	3518,30	-7,73%	3163,40	-17,04%	2532,68	-33,58%
3	5009,15	-	5031,37	0,44%	4246,41	-15,23%	3783,66	-24,47%
4	5486,27	-	5501,31	0,27%	4658,82	-15,08%	4424,84	-19,35%
7	6080,39	-	6192,16	1,84%	5551,63	-8,70%	5205,23	-14,39%
9	6250,98	-	6205,23	-0,73%	5665,36	-9,37%	5386,27	-13,83%
11	6326,80	-	6271,90	-0,87%	5686,27	-10,12%	5532,03	-12,56%
14	6438,56	-	6582,35	2,23%	5832,68	-9,41%	5568,63	-13,51%
21	6588,24	-	6637,25	0,74%	6024,18	-8,56%	6139,87	-6,81%
28	6694,12	-	6769,93	1,13%	6090,20	-9,02%	6033,99	-9,86%
56	6995,42	-	6630,72	-5,21%	6316,34	-9,71%	6191,50	-11,49%

Fonte: O autor (2022).

Na relação $a/l = 0,48$, Figura 33, a fibra de PP causou no segundo dia uma diminuição da retração em 3,82%, 18,79% e 38,67% (índice TD da Tabela 20) nas argamassas de escória ativada para os teores de 0,1%, 0,2% e 0,3% respectivamente, quando comparadas com a mistura $a/l = 0,48$ sem fibra. Ainda com

influência da ação da fibra, nessa ordem, aos 56 dias as porcentagens de redução foram equivalentes a 12,04%, 16,58% e 24,33%.

Figura 33 - Retração por secagem dos três teores de fibra de polipropileno na relação a/l = 0,48 (a) detalhada nos sete primeiros dias (b)



Fonte: O autor (2022).

Tabela 20 - Retração por secagem e a taxa de desempenho (TD) nos diferentes teores de fibra ao longo do ensaio relação a/l = 0,48

	048SS0,0		048SS0,1		048SS0,2		048SS0,3	
Tempo (dias)	Retração por secagem mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração por secagem mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração por secagem mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração por secagem mm/mm (10 ⁻⁶)	TD
1	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
2	5429,08	-	5221,57	-3,82%	4408,82	-18,79%	3329,41	-38,67%
3	6833,99	-	6852,94	0,28%	5557,19	-18,68%	4966,01	-27,33%
4	7445,42	-	7283,01	-2,18%	6020,26	-19,14%	5613,73	-24,60%
7	8186,93	-	7841,83	-4,22%	6744,12	-17,62%	6231,37	-23,89%
9	8376,47	-	7823,53	-6,60%	6914,38	-17,45%	6354,90	-24,13%
11	8504,25	-	7808,50	-8,18%	6967,97	-18,06%	6372,55	-25,07%
14	8655,88	-	8094,77	-6,48%	7142,16	-17,49%	6458,82	-25,38%
21	8844,77	-	8123,53	-8,15%	7298,69	-17,48%	6923,53	-21,72%
28	9005,56	-	8216,34	-8,76%	7402,61	-17,80%	6820,26	-24,27%
56	9142,16	-	8041,18	-12,04%	7626,47	-16,58%	6918,30	-24,33%

Fonte: O autor (2022).

Nas primeiras idades se desenvolve a retração por secagem mais acentuada. Aos 7 dias a retração apresentada já alcançava valores superiores a 88%, atingindo

97,52%, 88,43% e 90,07% do valor total da retração aos 56 dias para 0,1%, 0,2% e 0,3%, respectivamente. A partir dessa data a retração dá início ao processo da estabilização ao longo do tempo.

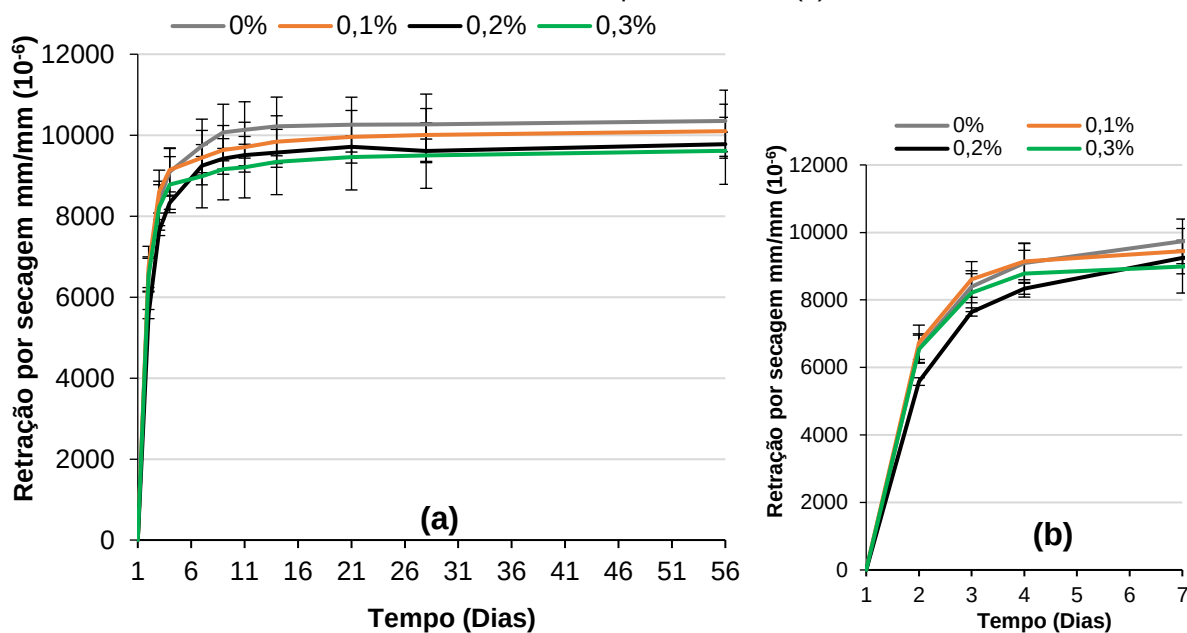
As linhas do gráfico, Figura 33, estão mais espaçadas, indicando que a fibra PP apresentou resultados ainda mais significativos em comparação ao seu efeito na relação $a/l = 0,40$. O aumento da quantidade do teor de fibra implica menor retração, sendo o 0,3% o maior destaque. Isso está de acordo com o encontrado por Xu; Chen; Wang (2020) e Xu *et al.* (2021).

O comportamento é repetido na relação $a/l = 0,56$, representada na curva da Figura 34. No último dia de ensaio a fibra diminuiu a retração por secagem em 2,44%, 5,55% e 7,13%, respectivamente, para 0,1%, 0,2% e 0,3% (índices TD da Tabela 21). A sua contribuição nesse caso foi menos significativa, comparada aos demais casos, constatado na linha de tendência da Figura 35 que apresenta uma declividade menos acentuada.

A retração aos 7 dias ultrapassa os 93%, equivalendo a 93,53%, 94,55% e 93,47% da retração total para 0,1%, 0,2% e 0,3% de fibra PP. Com isso, fica constatado que quanto maior a relação a/l , maior é a proporção de retração concentrada nos primeiros dias.

A Figura 35 traz uma organização discretizada dos dados obtidos durante cada dia de ensaio em todos os teores de PP analisados, ressaltando a linha de tendência da retração por secagem decaindo com o aumento da quantidade de fibra. As equações indicadas são referentes as respectivas linhas de tendências lineares.

Figura 34 - Retração por secagem dos três teores de fibra de polipropileno na relação a/l = 0,56 (a) detalhado nos sete primeiros dias (b)



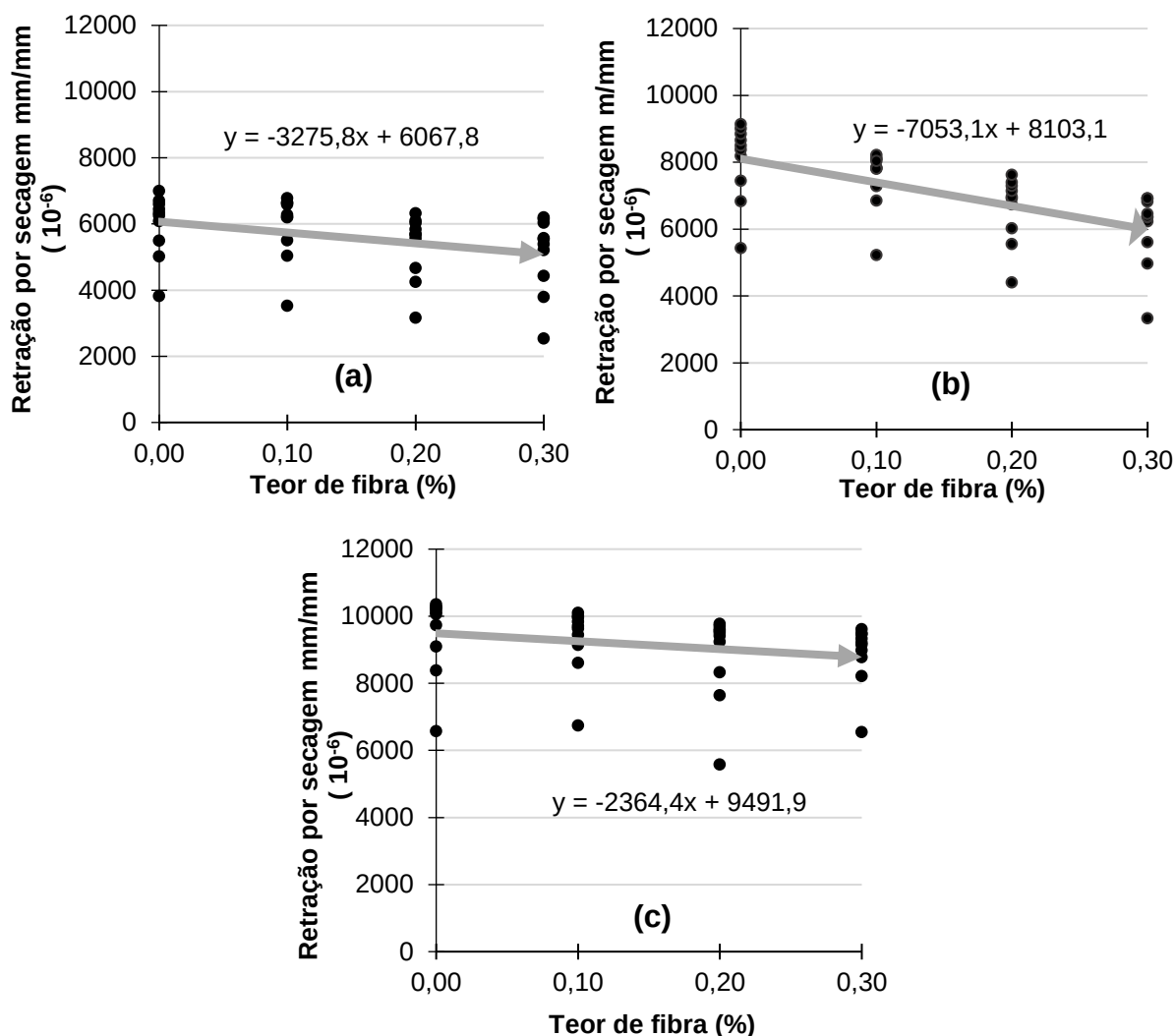
Fonte: O autor (2022).

Tabela 21 - Retração por secagem e a taxa de desempenho (TD) nos diferentes teores de fibra ao longo do ensaio relação a/l = 0,56

	056SS0,0		056SS0,1		056SS0,2		056SS0,3	
Tempo (dias)	Retração por secagem mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração por secagem mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração por secagem mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração por secagem mm/mm (10 ⁻⁶)	TD
1	0,00	-	0,00	0,00	0	0,00	0	0
2	6571,24	-	6745,75	2,66%	5581,70	-15,06%	6543,14	-0,43%
3	8390,20	-	8607,19	2,59%	7643,14	-8,90%	8215,69	-2,08%
4	9094,44	-	9141,83	0,52%	8332,03	-8,38%	8778,43	-3,47%
7	9735,29	-	9445,75	-2,97%	9244,44	-5,04%	8986,93	-7,69%
9	10066,01	-	9637,91	-4,25%	9418,30	-6,43%	9158,82	-9,01%
11	10130,39	-	9705,23	-4,20%	9511,76	-6,11%	9209,80	-9,09%
14	10216,67	-	9843,79	-3,65%	9571,90	-6,31%	9337,91	-8,60%
21	10262,09	-	9961,44	-2,93%	9709,80	-5,38%	9461,44	-7,80%
28	10269,28	-	10005,88	-2,56%	9613,73	-6,38%	9496,08	-7,53%
56	10351,96	-	10099,35	-2,44%	9777,78	-5,55%	9614,38	-7,13%

Fonte: O autor (2022).

Figura 35 - Retração por secagem versus teor de fibra PP relação a/l 0,40 (a), 0,48 (b) e 0,56 (c)

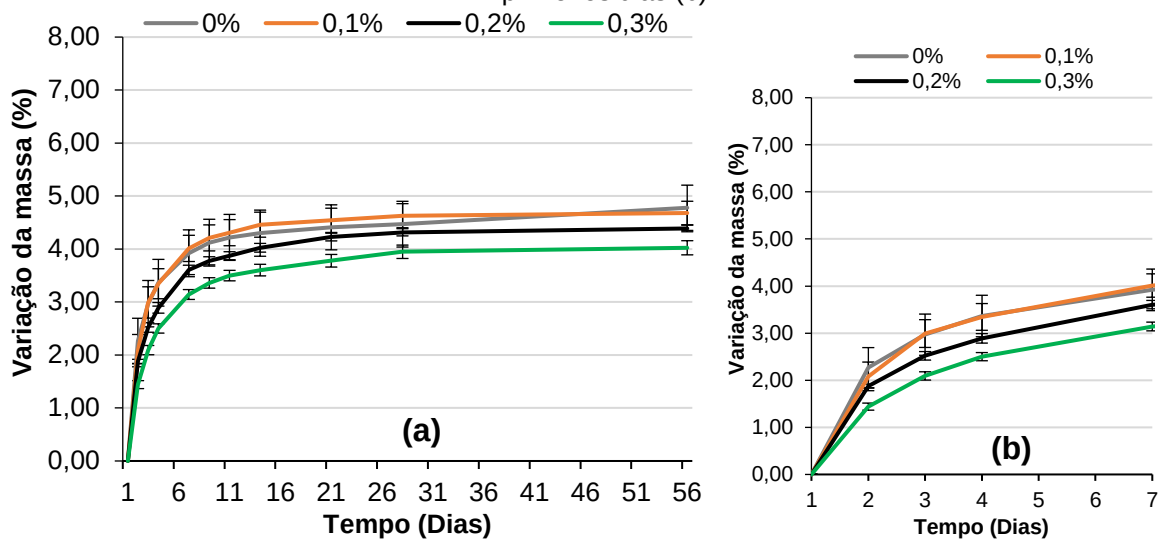


Fonte: O autor (2022).

4.3.1.4 Correlação da retração por secagem com a perda de massa nos diferentes teores de fibra PP

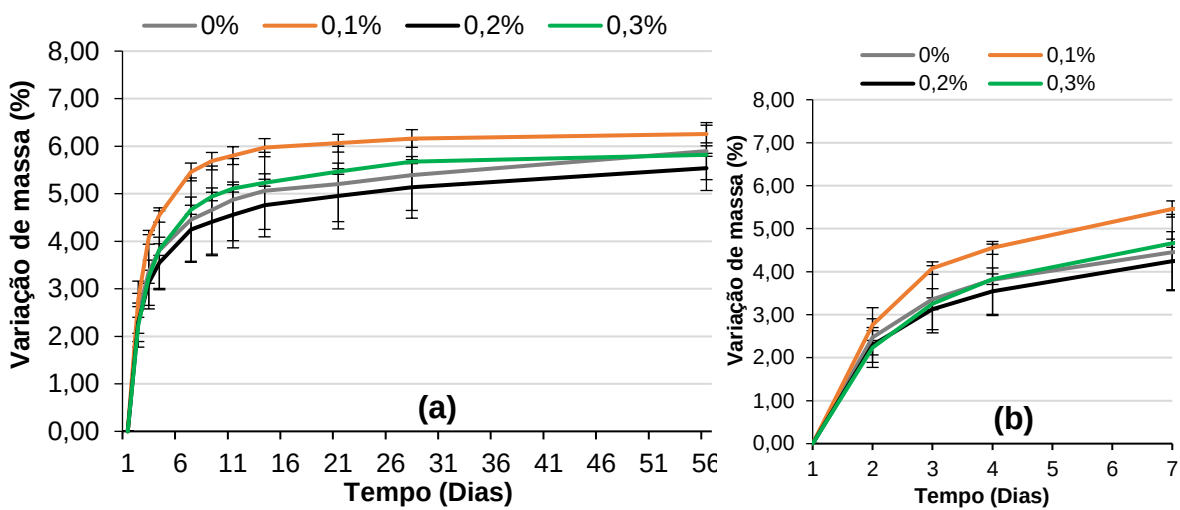
Nas Figuras 36, 37 e 38, tem-se o comportamento da variação da massa ao longo de todo o ensaio nas diferentes dosagens de fibra PP. Nos respectivos casos, o gráfico acompanha uma tendência similar a observada e discutida para a retração por secagem, com a maior perda de massa ocorrendo nas primeiras idades, sendo que aos 7 dias todos os casos já superam em 75% a variação total ao final do ensaio. Percebe-se ainda uma correspondente relação de proporção entre o aumento da relação a/l e a variação da massa.

Figura 36 - Variação da massa ao longo do tempo relação $a/l = 0,40$ (a) detalhado nos sete primeiros dias (b)



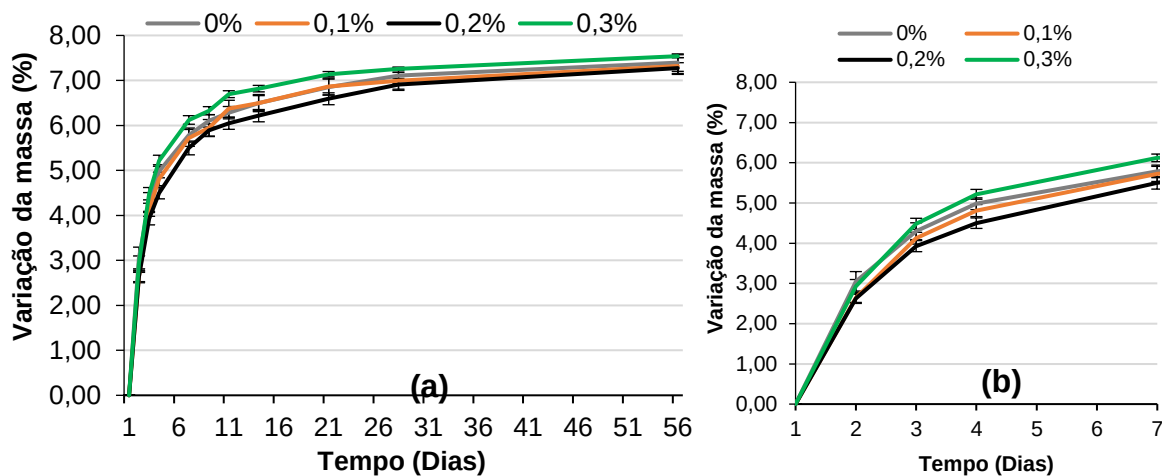
Fonte: O autor (2022).

Figura 37 - Variação da massa ao longo do tempo relação $a/l = 0,48$ (a) detalhado nos sete primeiros dias (b)



Fonte: O autor (2022).

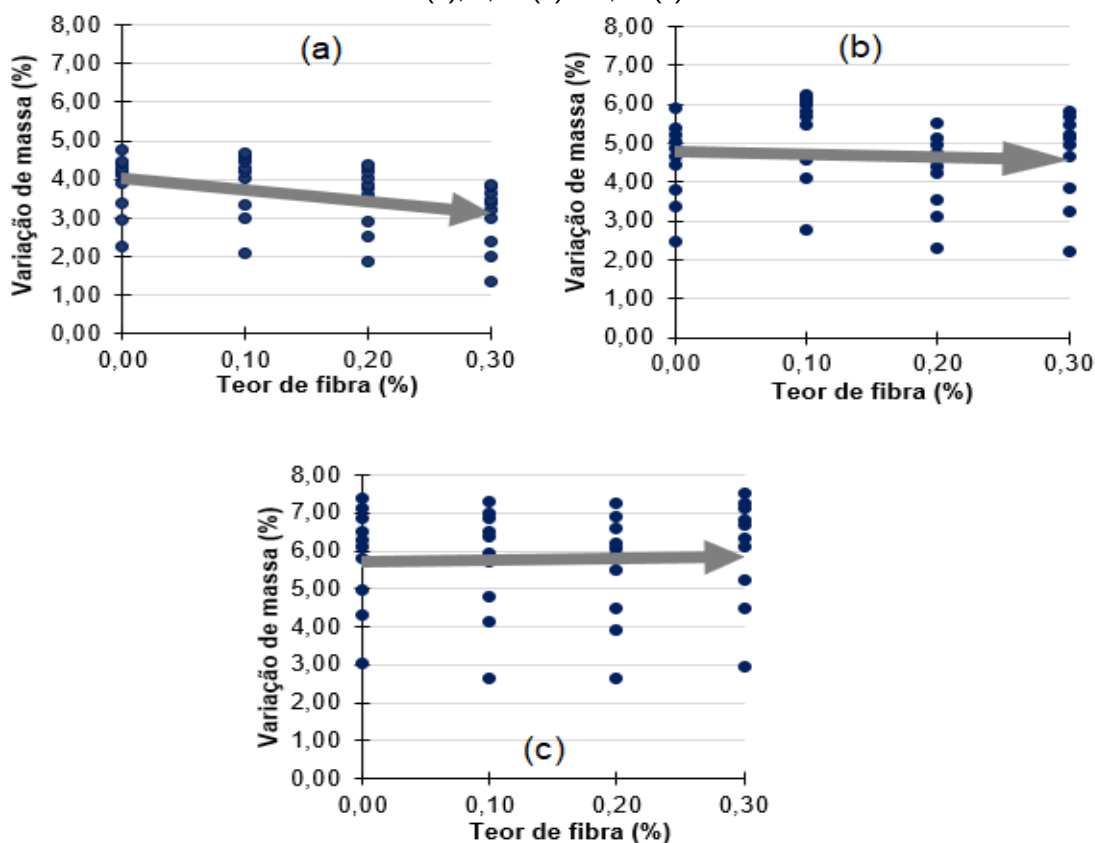
Figura 38 - Variação da massa ao longo do tempo relação $a/l = 0,56$ (a) detalhado nos sete primeiros dias (b)



Fonte: O autor (2022).

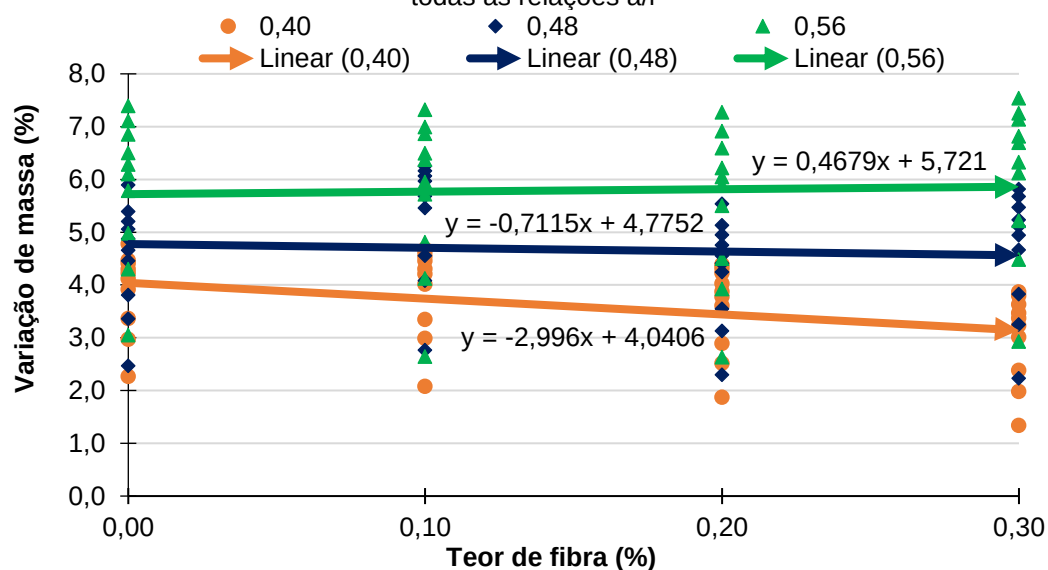
Com os dados discretizados nos gráficos de variação de massa por teor de fibra PP, Figura 39, resumido na Figura 40, nota-se que a fibra perde seu papel relevante no combate a perda de massa à medida que aumenta a relação a/l .

Figura 39 - Discretização da variação da massa versus teor de fibra PP na relação $a/l = 0,40$ (a), 0,48 (b) e 0,56 (c)



Fonte: O autor (2022).

Figura 40 - Sumarização da variação de massa versus teor de fibra com linha de tendência de todas as relações a/l

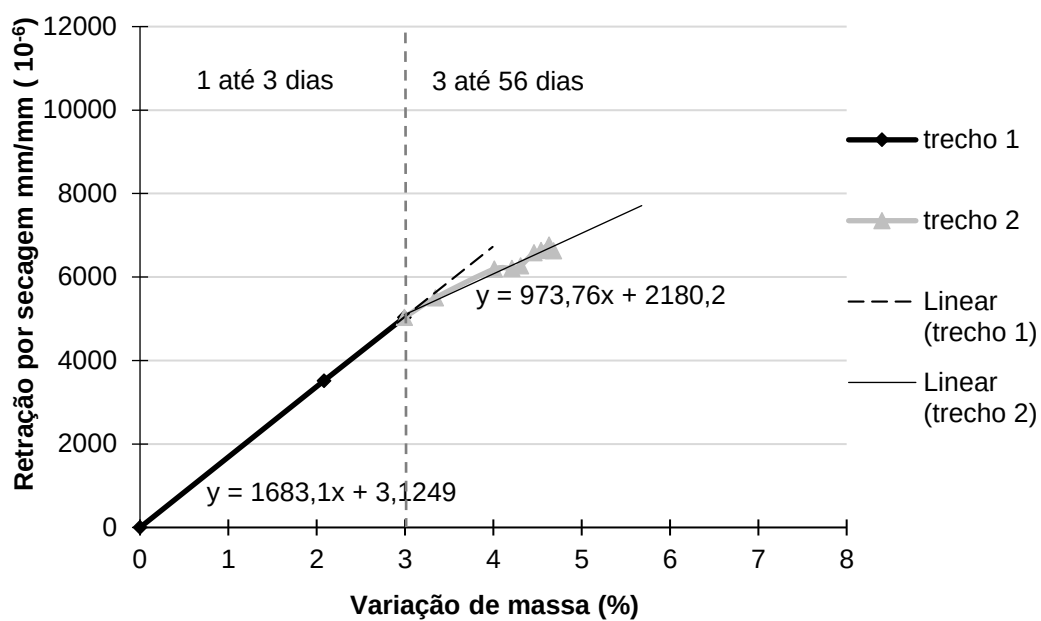


Fonte: O autor (2022).

A seguir estarão representados os gráficos da retração por secagem *versus* variação de massa. O perfil da curva em todos os casos $a/l = 0,40$ e $a/l = 0,48$ apresentam dois trechos bem definidos que retratam diferentes tendências na taxa de intensidade de retração para cada porcentagem de variação de massa. O trecho 1, do início até o terceiro dia, seguido pelo trecho 2 até o último dia de ensaio.

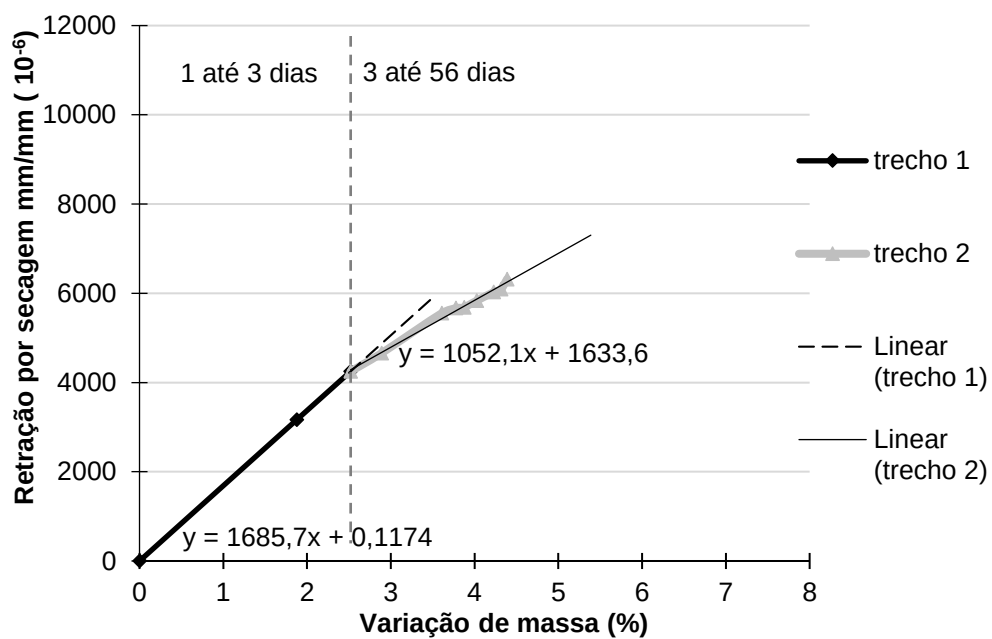
Na relação $a/l = 0,40$, indicados nas Figuras 41, 42 e 43, a taxa de retração por secagem por variação de massa na mistura controle, $1686 \mu\text{m}/\%$, foi alterada para $1683 \mu\text{m}/\%$, $1685 \mu\text{m}/\%$ e $1800 \mu\text{m}/\%$ nos respectivos teores de 0,1%, 0,2% e 0,3% PP no trecho 1. Durante esse período as duas primeiras quantidades ficaram com valores muito próximo da referência, enquanto que o teor de 0,3% mostrou uma taxa mais elevada. No trecho 2 percebe-se a mesma tendência.

Figura 41 - Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,40$ 0,1%



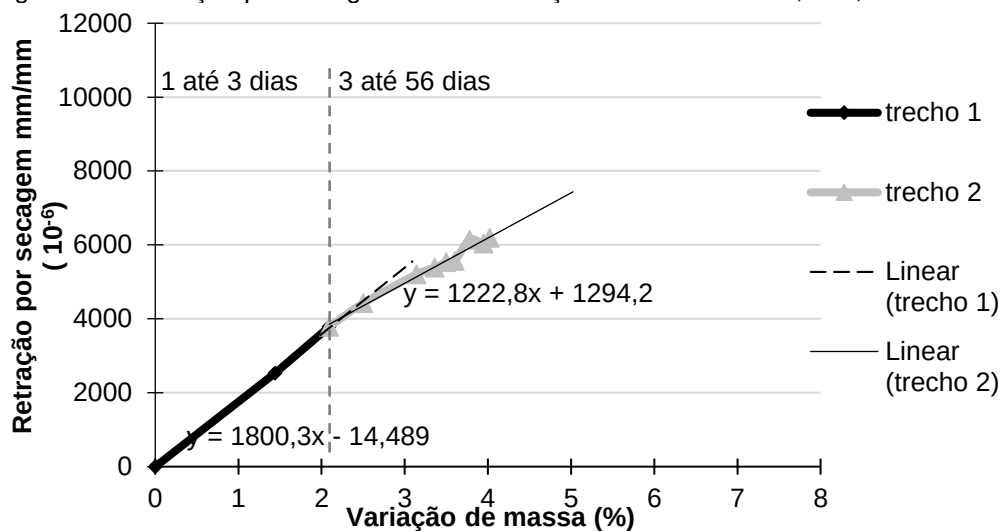
Fonte: O autor (2022).

Figura 42 - Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,40$ 0,2%



Fonte: O autor (2022).

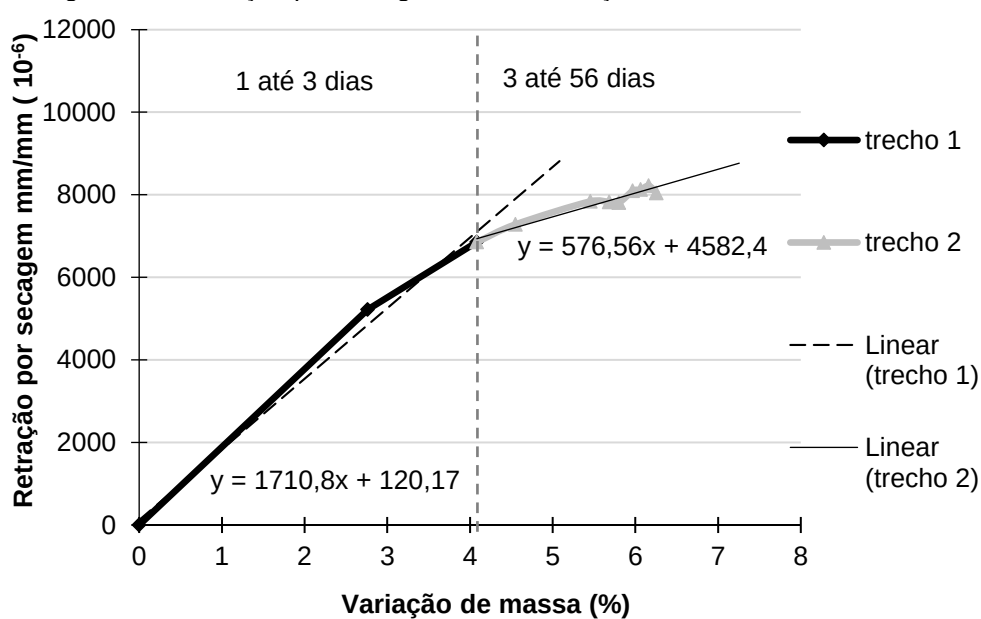
Figura 43 - Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,40$ 0,3%



Fonte: O autor (2022).

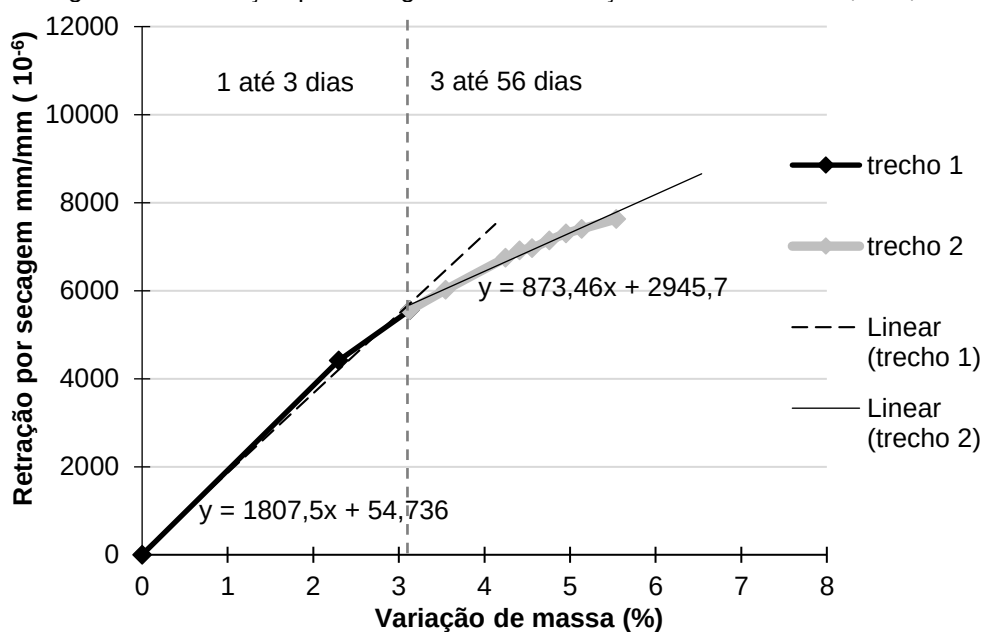
Na relação $a/l = 0,48$, Figuras 44, 45 e 46, a fibra PP causou um efeito de redução na quantidade de trechos identificados em relação ao traço controle, o qual possui três, em todos teores de fibras, destacando-se dois comportamentos principais: (i) do dia um até o 3; e (ii) do dia 3 até o último dia de ensaio. Do primeiro trecho para o segundo, a taxa que representa a retração por variação de massa cai aproximadamente três vezes no teor de 0,1%, e metade nos demais teores.

Figura 44 - Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,48$ 0,1%



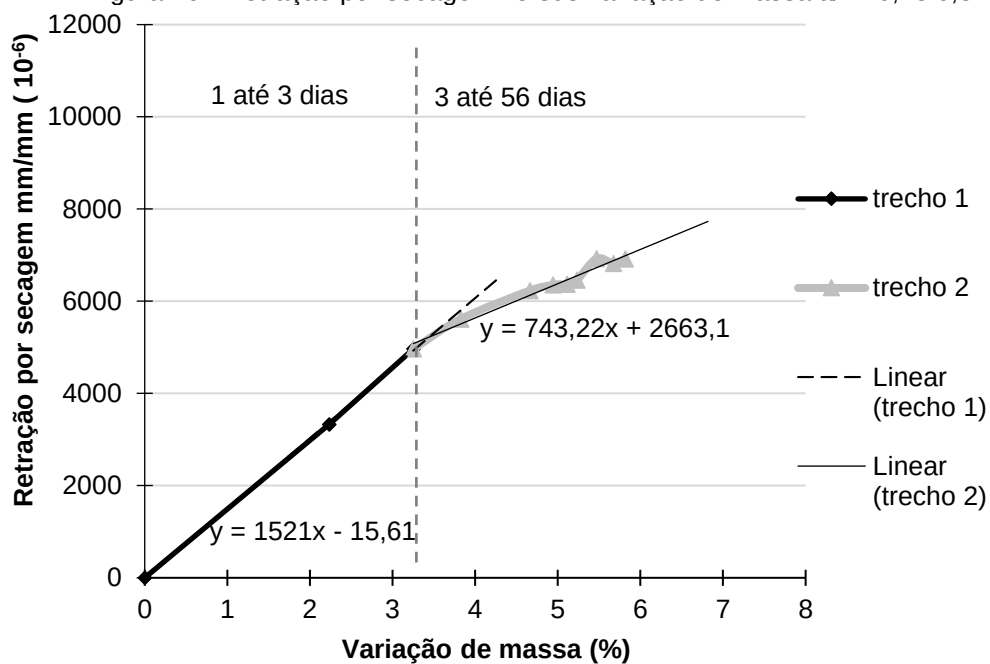
Fonte: O autor (2022).

Figura 45 - Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,48$ 0,2%



Fonte: O autor (2022).

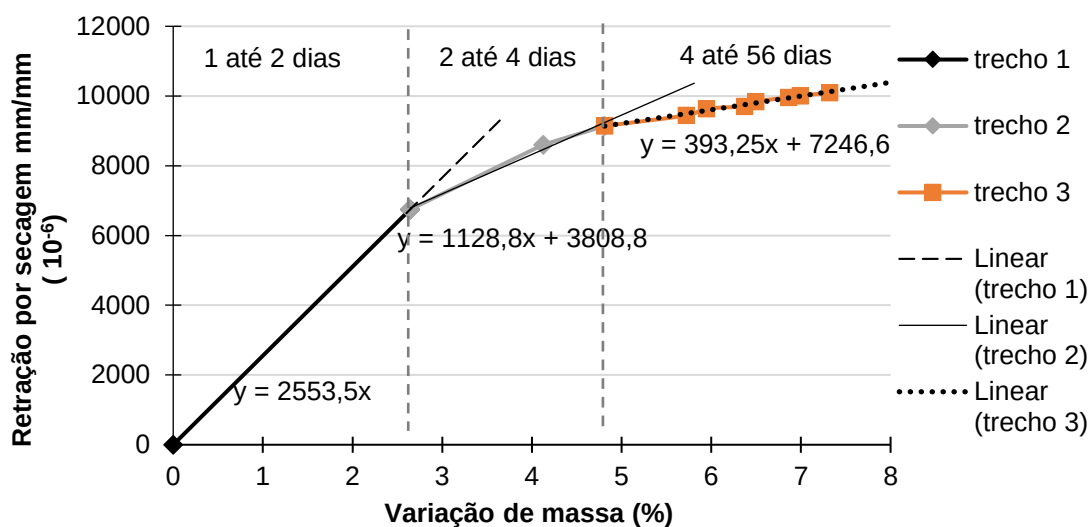
Figura 46 - Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,48$ 0,3%



Fonte: O autor (2022).

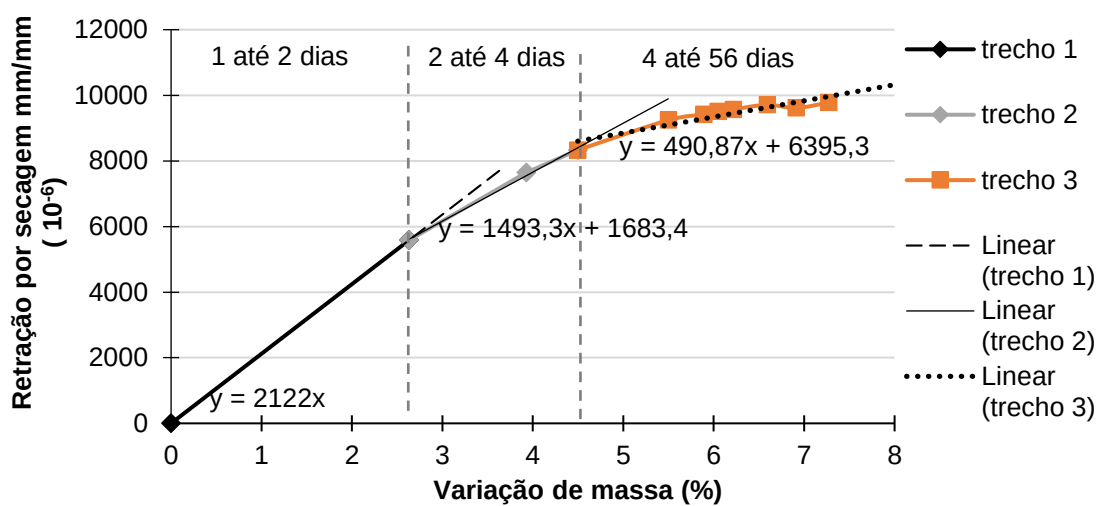
Na relação $a/l = 0,56$, mantiveram-se os três estágios observados: (i) nas primeiras 24 h (do dia 1 ao 2); (ii) do dia 2 ao 4; e (iii) do dia 4 até o último dia, Figuras 47, 48 e 49.

Figura 47 - Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,56$ 0,1%



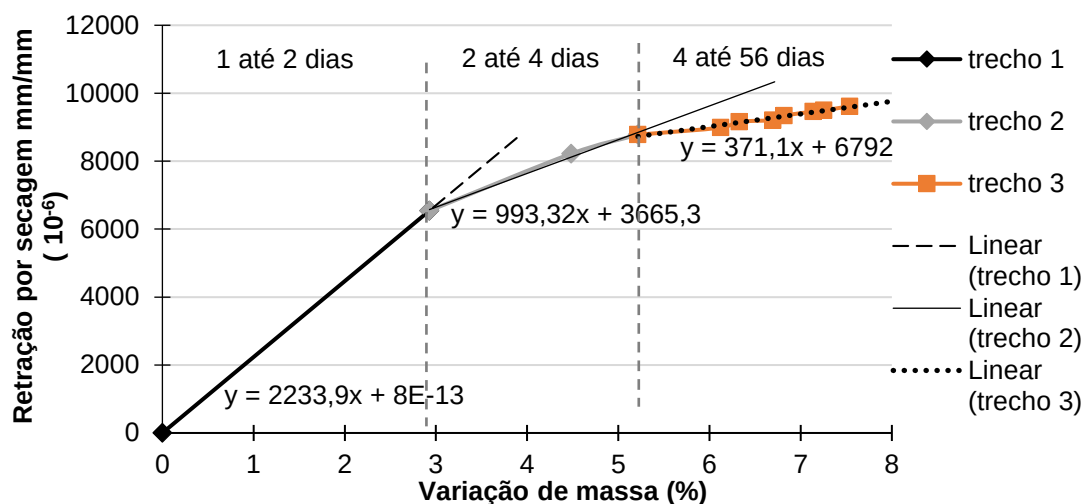
Fonte: O autor (2022).

Figura 48 - Retração por secagem versus variação de massa $a/l = 0,56$ 0,2%



Fonte: O autor (2022).

Figura 49 - Retração por secagem versus variação de massa a/l = 0,56 0,3%



Fonte: O autor (2022).

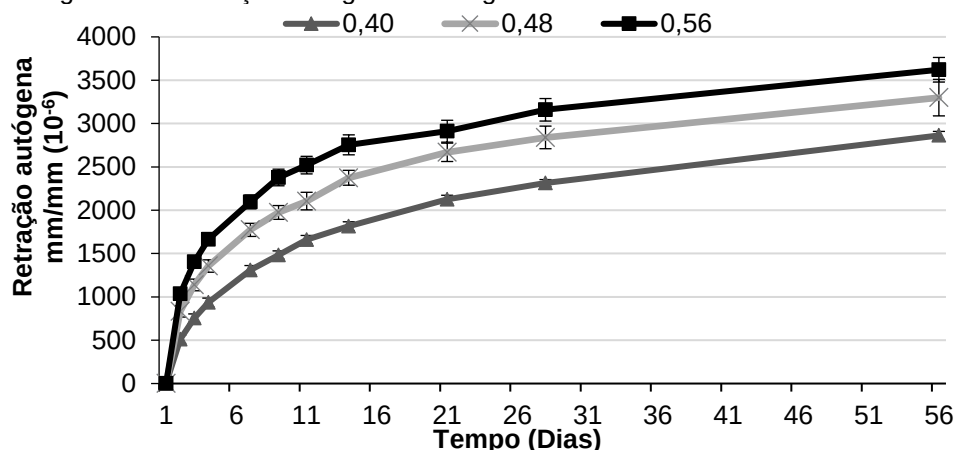
4.3.2 Retração Autógena

Os resultados do ensaio de retração autógena serão apresentados por meio dos gráficos e tabelas a seguir. Seguindo a mesma linha de raciocínio da retração por secagem, primeiro será analisada as três variações de água/ligante (a/l) sem fibra, para em seguida comparar a adição dos três diferentes teores de fibra de polipropileno com a argamassa controle, dentro da mesma relação a/l.

4.3.2.1 Influência da relação água/ligante

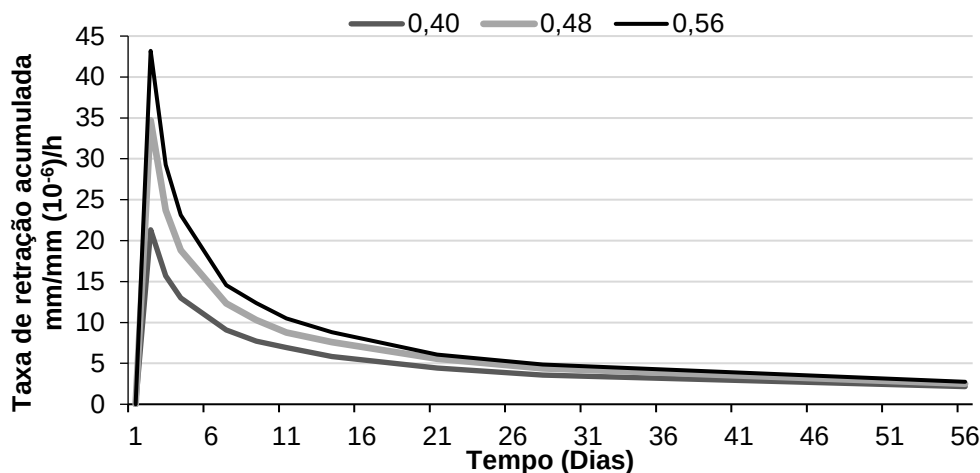
Na Figura 50 é possível notar o gráfico da retração autógena das argamassas controle de escória álcali-ativada com silicato de sódio. A linha do gráfico tem uma inclinação mais intensa nas primeiras idades que corresponde justamente aos pontos mais altos da taxa de retração acumulada observada na Figura 51. Tanto maior a relação a/l, maior a retração autógena e sua respectiva taxa acumulada. Ao longo do ensaio a curva do gráfico da Figura 50 tende a diminuir a sua inclinação em concordância com a diminuição da taxa de retração acumulada da Figura 51, convergindo a um mesmo patamar em todas as relações a/l.

Figura 50 - Retração autógena das argamassas de escória álcali-ativada sem fibra



Fonte: O autor (2022).

Figura 51 - Variação da taxa de retração autógena acumulada das argamassas de escória sem fibra



Fonte: O autor (2022).

Conforme consta no índice TD da Tabela 22, no segundo dia de leitura, os resultados apresentaram um crescimento de retração de 62,77% e 102,55% para relação a/l = 0,48 e a/l = 0,56, respectivamente, ao ser comparada com a/l = 0,40. Essa diferença foi decaindo ao longo do ensaio até atingir o mínimo de 15,24% e 26,48%, mesma ordem, aos 56 dias. A retração por secagem sem fibra foi maior que a retração autógena, nessa mesma data, em 2,44, 2,77 e 2,86 vezes na sequência a/l = 0,40, 0,48 e 0,56.

Enquanto o período inicial, até os 7 dias, é o mais crítico da retração por secagem, concentrando mais de 85% da retração total em todas as relações a/l, na retração autógena isso ocorre de maneira mais espaçada. No mesmo período isso corresponde a 45,75%, 53,75% e 57,87% da retração total autógena, nas relações

$a/l = 0,40$, $0,48$ e $0,56$, respectivamente. Na relação $a/l = 0,40$, a faixa dos 80% só é atingida aos 28 dias, enquanto nas demais é alcançado aos 21 dias.

Tabela 22 - Retração autógena e a sua respectiva taxa de desempenho (TD) da argamassa controle de escória álcali ativada com silicato de sódio

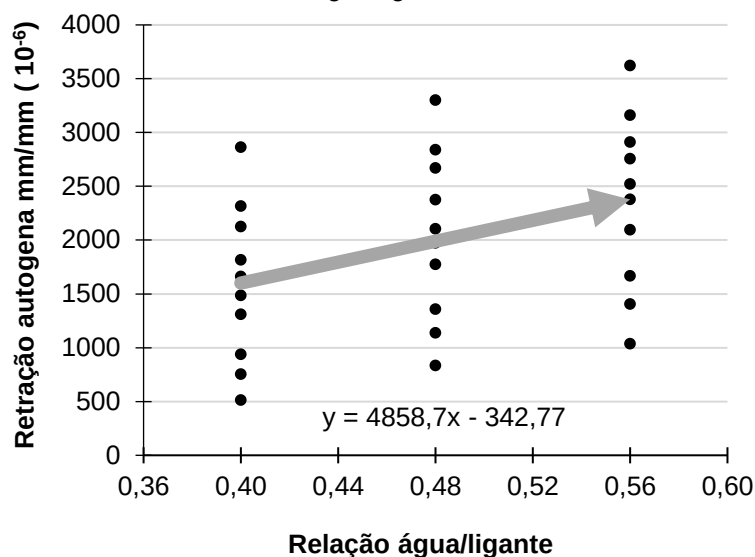
Tempo (dias)	040SS0,0		048SS0,0		056SS0,0	
	Retração autógena mm/mm (10^{-6})	TD	Retração autógena mm/mm (10^{-6})	TD	Retração autógena mm/mm (10^{-6})	TD
1	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00
2	511,76	-	833,01	62,77%	1036,60	102,55%
3	754,25	-	1137,91	50,87%	1405,88	86,40%
4	936,60	-	1355,88	44,77%	1665,36	77,81%
7	1309,80	-	1773,20	35,38%	2095,42	59,98%
9	1483,66	-	1974,18	33,06%	2377,78	60,26%
11	1660,13	-	2105,23	26,81%	2520,26	51,81%
14	1815,03	-	2374,51	30,82%	2754,25	51,75%
21	2124,18	-	2668,30	25,62%	2911,76	37,08%
28	2315,03	-	2840,20	22,68%	3158,82	36,45%
56	2862,75	-	3299,02	15,24%	3620,92	26,48%

Fonte: O autor (2022).

TD = Taxa de desempenho = (retração autógena do dia i – retração autógena da argamassa controle $a/l = 0,40$ no respectivo dia) / retração autógena da argamassa controle $a/l = 0,40$ no respectivo dia X 100%.

A equação da linha de tendência e os valores individuais dos resultados representados na Figura 52, da retração autógena por relação água/ligante, ajudam a visualizar a tendência geral, constatando a elevação da retração.

Figura 52 - Discretização dos resultados da retração autógena sem fibra versus relação água/ligante

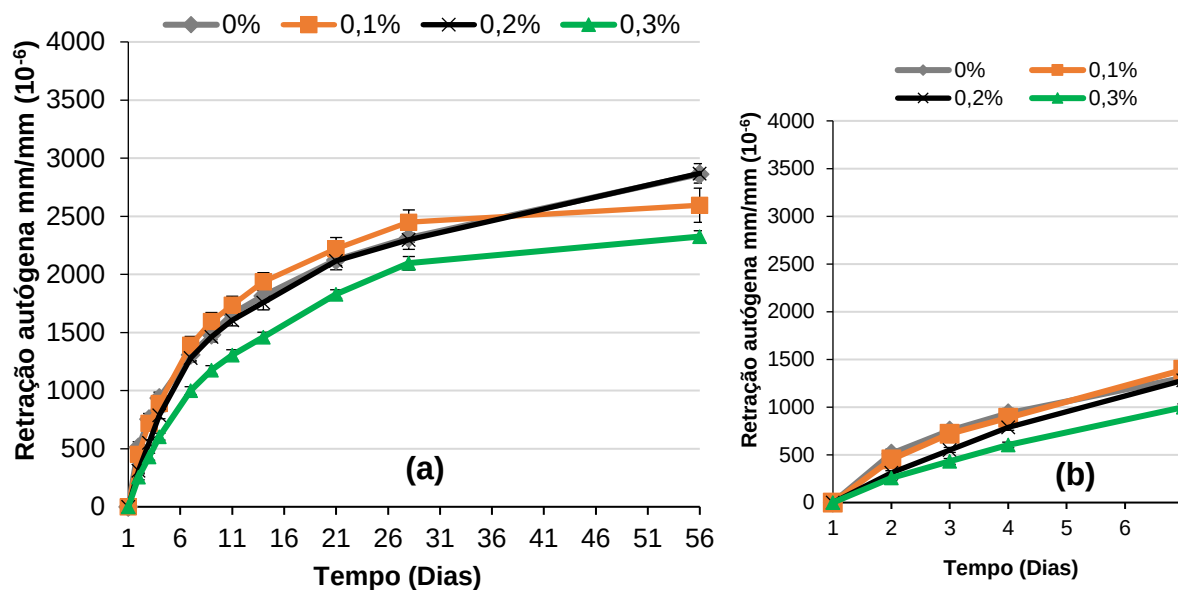


Fonte: O autor (2022).

4.3.2.2 Influência do teor de fibra de polipropileno

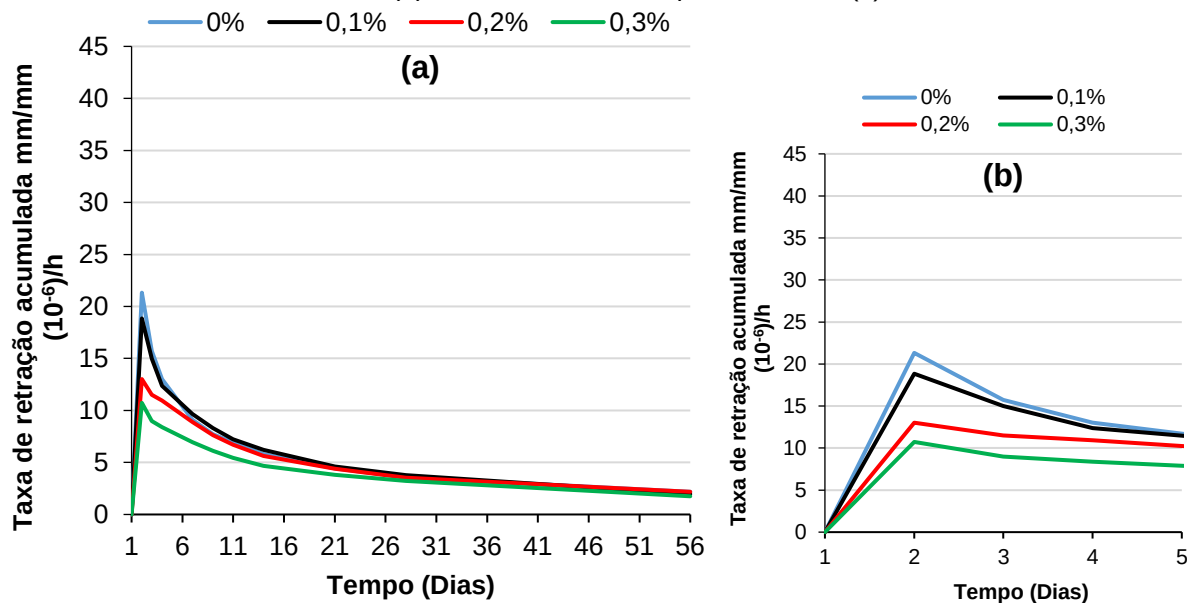
Na relação $a/l = 0,40$, a retração autógena, Figura 53, e a taxa de retração acumulada, Figura 54, aponta que o comportamento da fibra teve seu melhor desempenho com 0,3% fibra PP, sendo 18,77% de redução da retração autógena no último dia comparado ao controle, conforme indicado no índice TD Tabela 23. Aos 7 dias a retração equivale a 53,60%, 44,62% e 42,97% da retração total para teores de 0,1%, 0,2% e 0,3%, respectivamente, com aproximadamente 5%, 20% e 10% da retração total acontecendo entre a leitura do dia 28 e do dia 56. O resultado segue a tendência do que foi relatado por Acker (1995, apud VELASCO, 2008). Nesse período a retração por secagem era menor que 5% do total em todos os casos.

Figura 53 - Retração autógena dos três teores de fibra de polipropileno na relação a/l = 0,40 (a) detalhado nos sete primeiros dias (b)



Fonte: O autor (2022).

Figura 54 - Variação da taxa de retração autógena acumulada das argamassas com fibra a/l = 0,40 (a) detalhado nos cinco primeiros dias (b)



Fonte: O autor (2022).

Tabela 23 - Retração autógena e a taxa de desempenho (TD) dos diferentes teores de fibra na relação a/l = 0,40

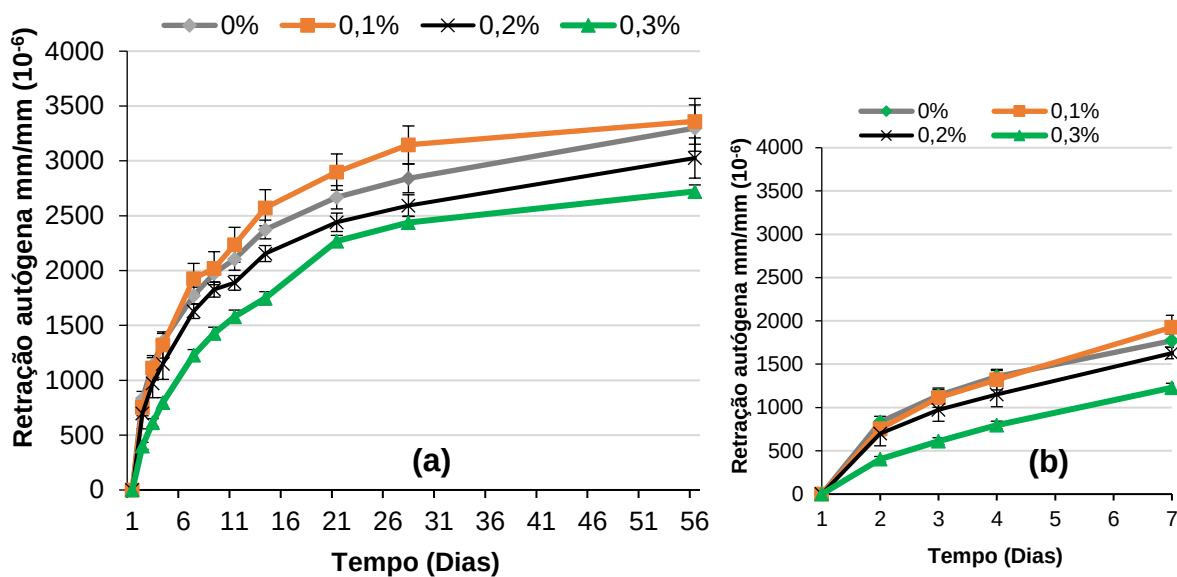
	040SS0,0		040SS0,1		040SS0,2		040SS0,3	
Tempo (dias)	Retração autógena mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração autógena mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração autógena mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração autógena mm/mm (10 ⁻⁶)	TD
1	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
2	511,76	-	452,29	-11,62%	312,42	-38,95%	257,52	-49,68%
3	754,25	-	719,61	-4,59%	551,63	-26,86%	431,37	-42,81%
4	936,60	-	890,20	-4,95%	788,24	-15,84%	603,92	-35,52%
7	1309,80	-	1390,85	6,19%	1280,39	-2,25%	999,35	-23,70%
9	1483,66	-	1594,12	7,44%	1462,09	-1,45%	1177,78	-20,62%
11	1660,13	-	1736,60	4,61%	1605,88	-3,27%	1307,19	-21,26%
14	1815,03	-	1937,25	6,73%	1756,86	-3,20%	1459,48	-19,59%
21	2124,18	-	2220,26	4,52%	2115,69	-0,40%	1830,72	-13,82%
28	2315,03	-	2449,02	5,79%	2298,69	-0,71%	2095,42	-9,49%
56	2862,75	-	2594,77	-9,36%	2869,28	0,23%	2325,49	-18,77%

Fonte: O autor (2022).

A análise da relação a/l = 0,48 mostrou mais claramente a influência da fibra PP na contenção da retração autógena, Figura 55. O gráfico da taxa de retração acumulada encontra-se na Figura 56, destacando o pico de retração autógena ainda maior e com comportamento similar à relação a/l = 0,40.

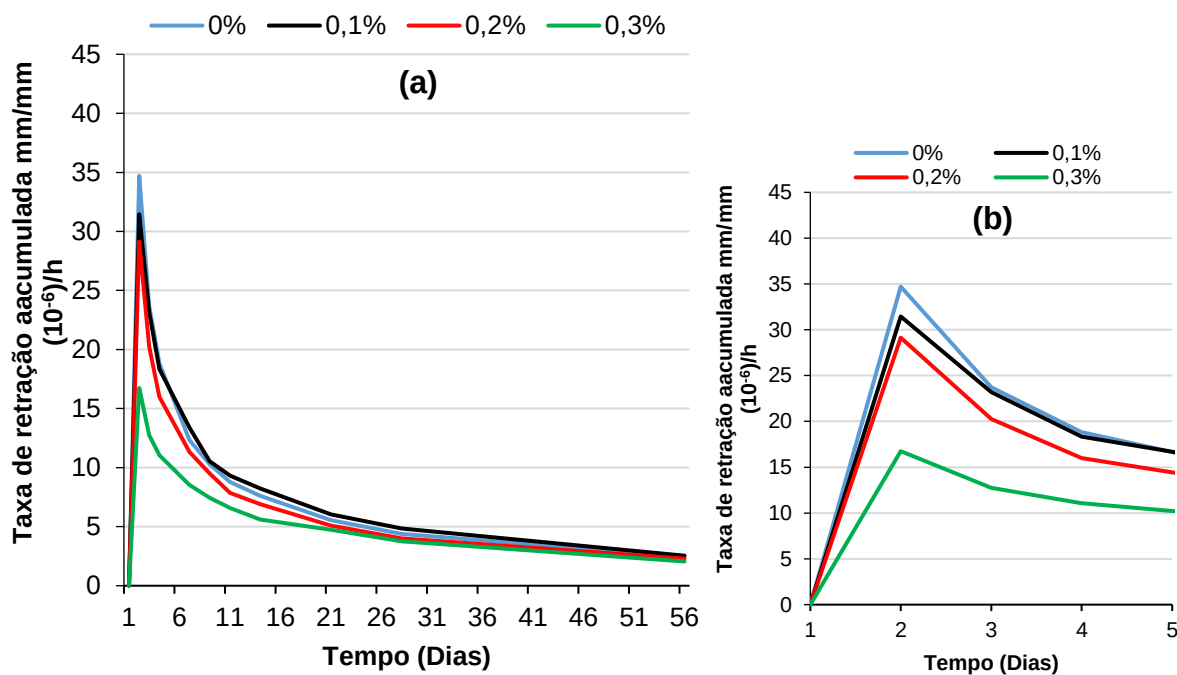
O teor de 0,3% PP também apresentou o melhor resultado, com queda de 17,5% no último dia, conforme Tabela 24 (índice TD). Aos 7 dias a retração apresentada equivale a 57,37%, 53,82% e 45,14% da retração total para 0,1%, 0,2% e 0,3%, respectivamente. Na retração por secagem, esse percentual na mesma idade foi 97,52%, 88,43% e 90,07%, mesma ordem. A retração autógena se dá de forma mais distribuída ao longo do tempo.

Figura 55 - Retração autógena dos três teores de fibra de polipropileno na relação $a/l = 0,48$ (a) detalhado nos sete primeiros dias (b)



Fonte: O autor (2022).

Figura 56 - Variação da taxa de retração autógena acumulada das argamassas com fibra $a/l = 0,48$ (a) detalhado nos cinco primeiros dias (b)



Fonte: O autor (2022).

Tabela 24 - Retração autógena e a taxa de desempenho (TD) dos diferentes teores de fibra na relação a/l = 0,48

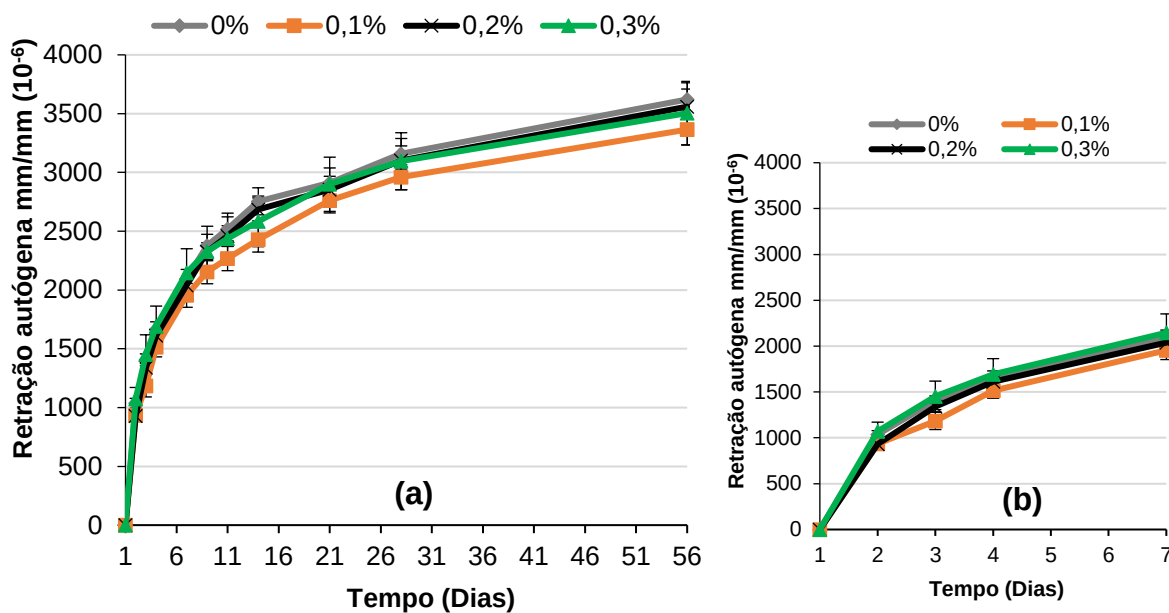
	048SS0,0		048SS0,1		048SS0,2		048SS0,3	
Tempo (dias)	Retração autógena mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração autógena mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração autógena mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração autógena mm/mm (10 ⁻⁶)	TD
1	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	833,01	-	754,90	-9,38%	699,35	-16,05%	401,96	-51,75%
3	1137,91	-	1113,73	-2,13%	972,55	-14,53%	612,42	-46,18%
4	1355,88	-	1321,57	-2,53%	1151,31	-15,09%	796,73	-41,24%
7	1773,20	-	1928,10	8,74%	1628,76	-8,15%	1228,76	-30,70%
9	1974,18	-	2021,57	2,40%	1827,12	-7,45%	1428,10	-27,66%
11	2105,23	-	2235,29	6,18%	1887,91	-10,32%	1579,74	-24,96%
14	2374,51	-	2572,55	8,34%	2155,23	-9,23%	1747,71	-26,40%
21	2668,30	-	2898,04	8,61%	2440,20	-8,55%	2267,32	-15,03%
28	2840,20	-	3146,41	10,78%	2593,46	-8,69%	2438,56	-14,14%
56	3299,02	-	3360,78	1,87%	3026,14	-8,27%	2721,57	-17,50%

Fonte: O autor (2022).

No comportamento da relação a/l = 0,56, os valores ficaram muito mais próximos da referência, conforme é notado nas Figura 57 em todas as quantidades de PP. Na Figura 58, o pico do gráfico é o maior analisado dos casos, coerente com a constatação de que o crescimento da relação a/l implica maior retração autógena. Aos 7 dias a retração apresentada equivale a 58,08%, 57,30% e 61,23% da retração total para 0,1%, 0,2% e 0,3%, respectivamente. No entanto, nesse caso não houve um comportamento mais previsível da inserção da fibra PP como aconteceu anteriormente, sobressaindo o melhor resultado para o 0,1% de fibra PP que apresentou uma redução de 7,08% no dia 56 em comparação a referência (Tabela 25). Nesse caso, constatou-se que a fibra perdeu mais a sua capacidade de conter a retração autógena quando comparada aos demais casos.

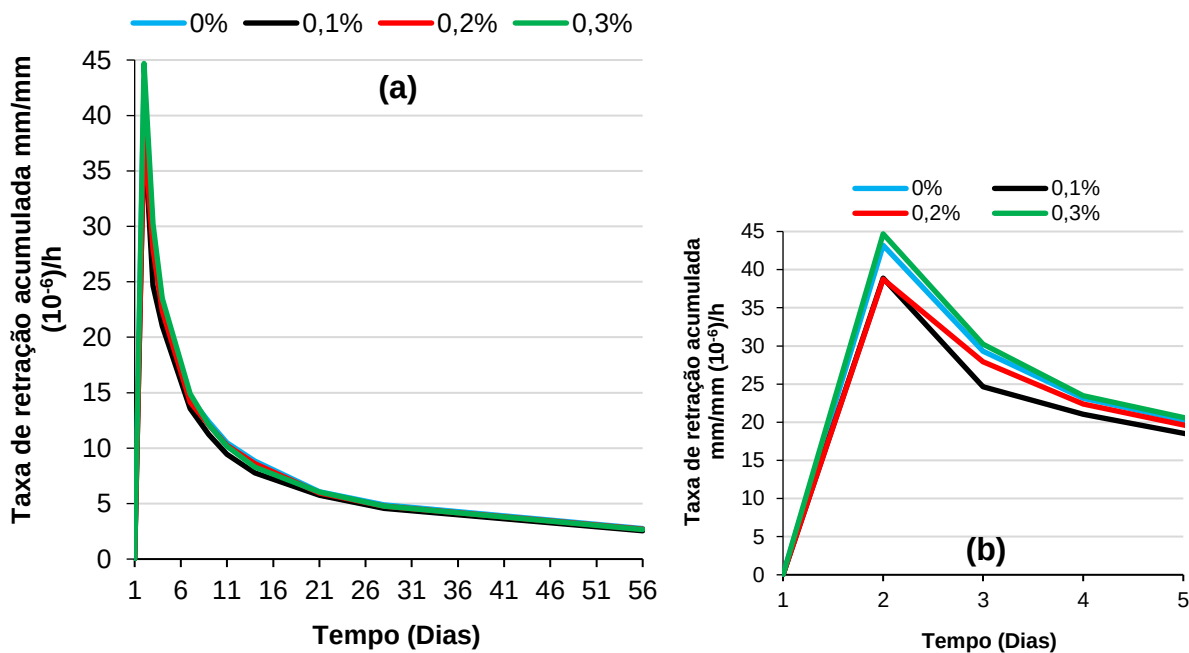
Na discretização dos valores, Figura 59 (a), (b) e (c), tem-se a linha de tendência da retração autógena diminuindo com o aumento do teor de fibra, a exceção da relação a/l = 0,56, Figura 59 (c). Nesse caso, não se verifica uma linha de tendência com declividade notadamente percebida, mas sim uma característica de horizontalidade, significando a pouca influência da fibra PP na redução da retração autógena. A declividade da relação a/l = 0,48 é a mais acentuada, indicando o melhor resultado de redução da retração.

Figura 57 - Retração autógena dos três teores de fibra de polipropileno na relação $a/l = 0,56$ (a) detalhado nos sete primeiros dias (b)



Fonte: O autor (2022).

Figura 58 - Variação da taxa de retração autógena acumulada das argamassas com fibra $a/l = 0,56$ (a) detalhado nos cinco primeiros dias (b)



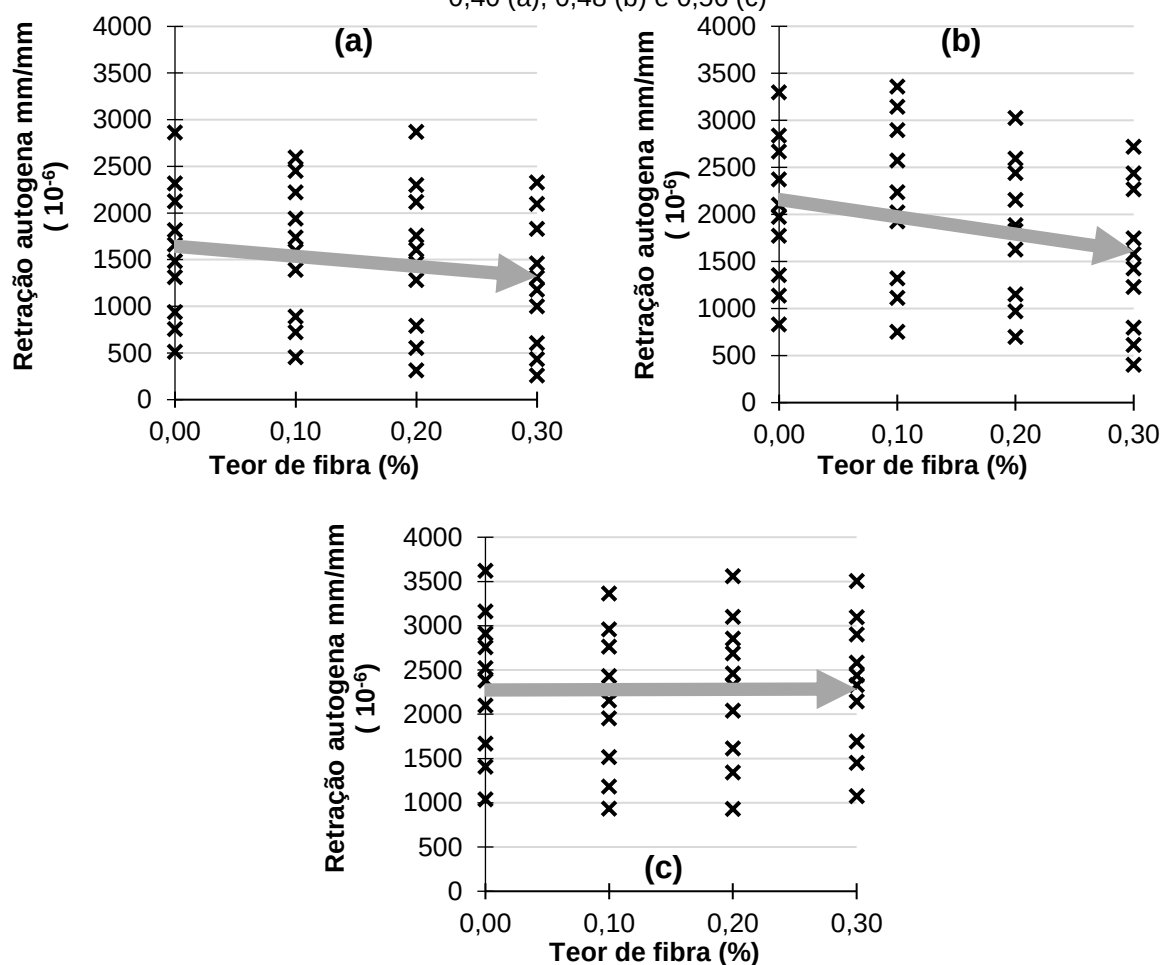
Fonte: O autor (2022).

Tabela 25 - Retração autógena e a taxa de desempenho (TD) dos diferentes teores de fibra na relação a/l = 0,56

	056SS0,0		056SS0,1		056SS0,2		056SS0,3	
Tempo (dias)	Retração autógena mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração autógena mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração autógena mm/mm (10 ⁻⁶)	TD	Retração autógena mm/mm (10 ⁻⁶)	TD
1	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
2	1036,60	-	933,33	-9,96%	930,07	-10,28%	1072,55	3,47%
3	1405,88	-	1183,66	-15,81%	1341,18	-4,60%	1450,98	3,21%
4	1665,36	-	1513,73	-9,11%	1611,11	-3,26%	1691,50	1,57%
7	2095,42	-	1954,25	-6,74%	2039,22	-2,68%	2145,75	2,40%
9	2377,78	-	2155,56	-9,35%	2325,49	-2,20%	2329,41	-2,03%
11	2520,26	-	2267,32	-10,04%	2459,48	-2,41%	2438,56	-3,24%
14	2754,25	-	2428,76	-11,82%	2685,62	-2,49%	2583,66	-6,19%
21	2911,76	-	2762,09	-5,14%	2853,59	-2,00%	2899,35	-0,43%
28	3158,82	-	2959,48	-6,31%	3100,65	-1,84%	3095,42	-2,01%
56	3620,92	-	3364,71	-7,08%	3559,48	-1,70%	3504,58	-3,21%

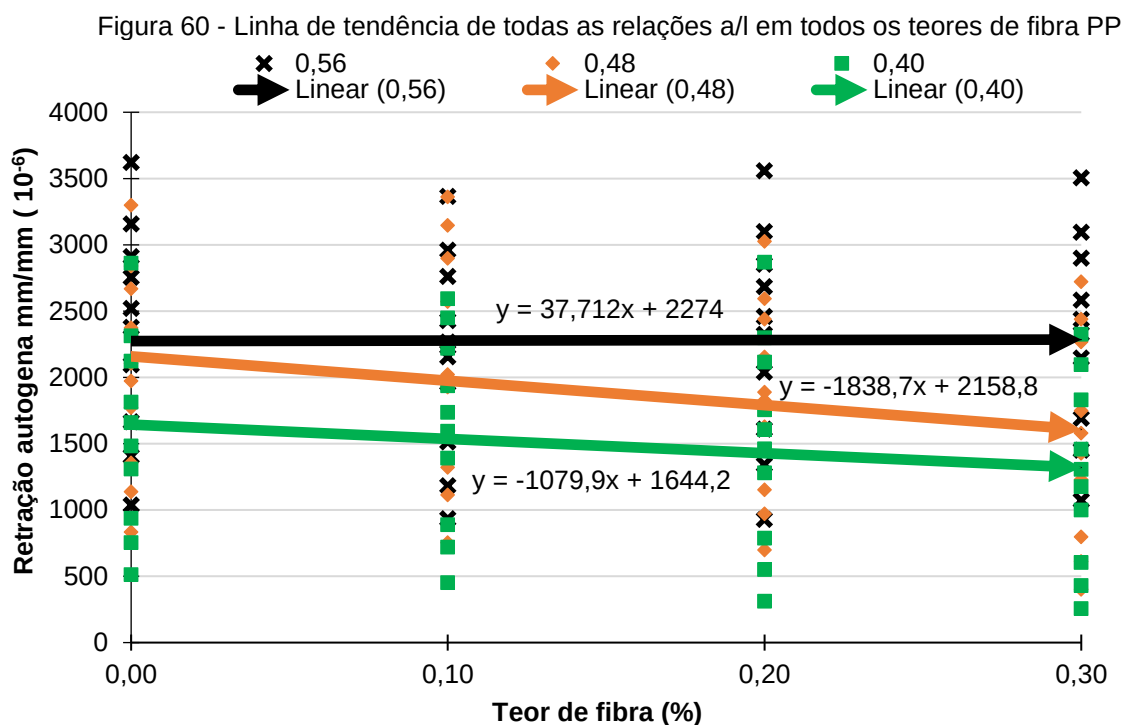
Fonte: O autor (2022).

Figura 59 - Discretização dos resultados da retração autógena versus teor de fibra PP relação a/l = 0,40 (a), 0,48 (b) e 0,56 (c)



Fonte: O autor (2022).

Resumidamente, na Figura 60, todas as equações das linhas de tendências nas três variações da relação a/l estão evidenciadas. A declividade mais acentuada é apresentada na relação 0,48, apresentando a maior eficiência da fibra PP na contenção de retração em condições autógenas.



Fonte: O autor (2022).

4.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Em razão das limitações na quantidade de ensaios possíveis utilizando esta técnica do MEV, optou-se por realizar esta determinação apenas em amostras com relação a/l = 0,40. Pois, em teoria, a probabilidade de fissuras é maior em amostras com maior consumo de ligante. O objetivo da utilização do MEV foi a observação da ocorrência dos seguintes fenômenos: (i) degradação da fibra; e (ii) o comportamento da fibra na mitigação da retração, se a mesma ocorre por rompimento ou por escorregamento da fibra. A questão da aderência da fibra é fundamental na mitigação da retração em compostos cimentícios. Um escorregamento da fibra é indesejável e pode ser detectado por imagens onde se observa o espaço vazio deixado pela fibra que porventura tenha escorregado (BHUTTA *et. al.*, 2017).

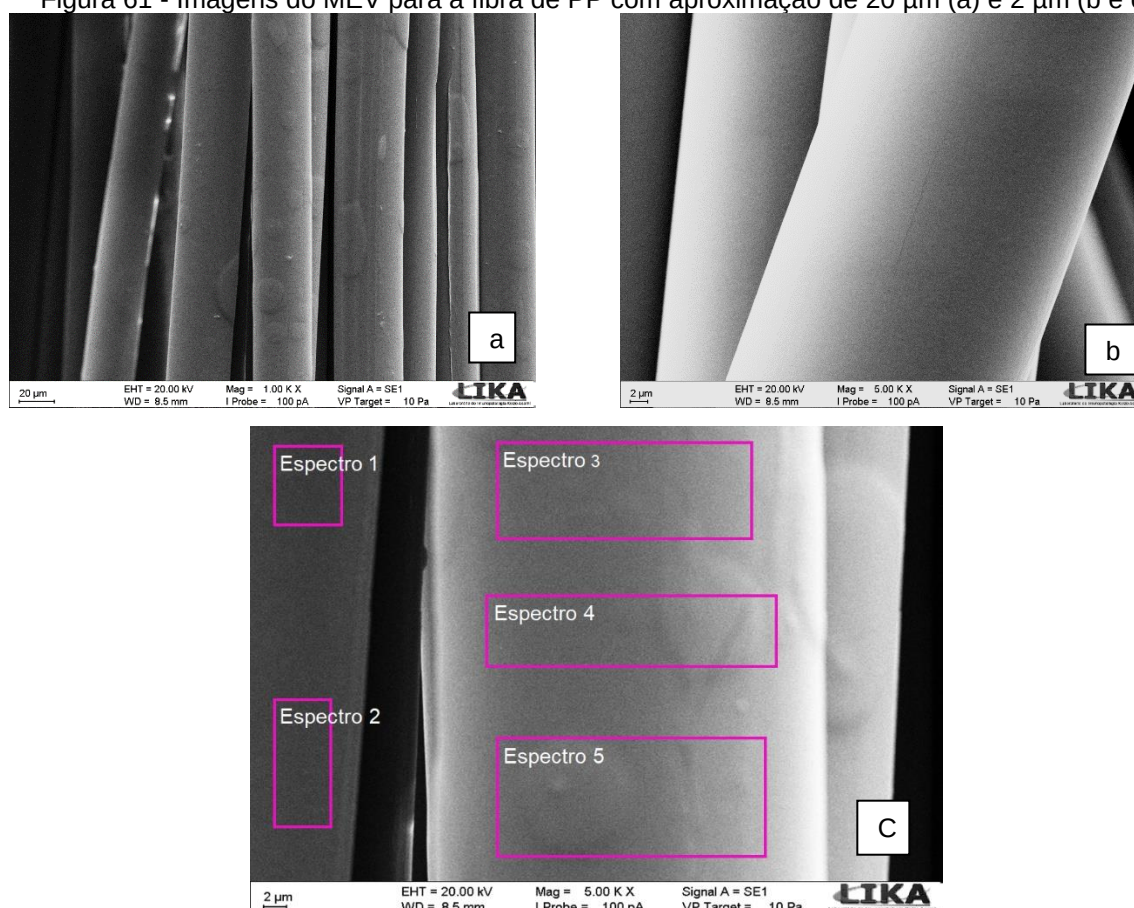
As amostras ensaiadas foram oriundas dos ensaios de resistência à tração na flexão, as quais foram selecionadas, e tiveram sua hidratação interrompida após 28

dias, sendo seu armazenamento em sacos plásticos dentro do refrigerador à temperatura negativa (-30°C). Após alguns meses, foi utilizado um liofilizador, por um período de 24 horas, para realizar a sublimação da água congelada, com posterior acondicionamento em um dessecador até a realização do MEV.

O ensaio de MEV foi realizado no Laboratório de Imunopatologia Keizo Asa (LIKA) da UFPE. As imagens da Figura 61 mostram a fibra de PP em seu estado natural, antes da inserção na argamassa de escória, com aproximações de 20 μm (a) e 2 μm (b). Percebe-se que a fibra PP possui uma superfície lisa.

Análises de Espectroscopia por energia dispersiva (EDS) identificaram os elementos químicos presentes em alguns pontos da amostra. O resultado da Figura 61 (c) mostrou que, em todos os 5 espectros analisados, foi identificado 100% carbono.

Figura 61 - Imagens do MEV para a fibra de PP com aproximação de 20 μm (a) e 2 μm (b e c)



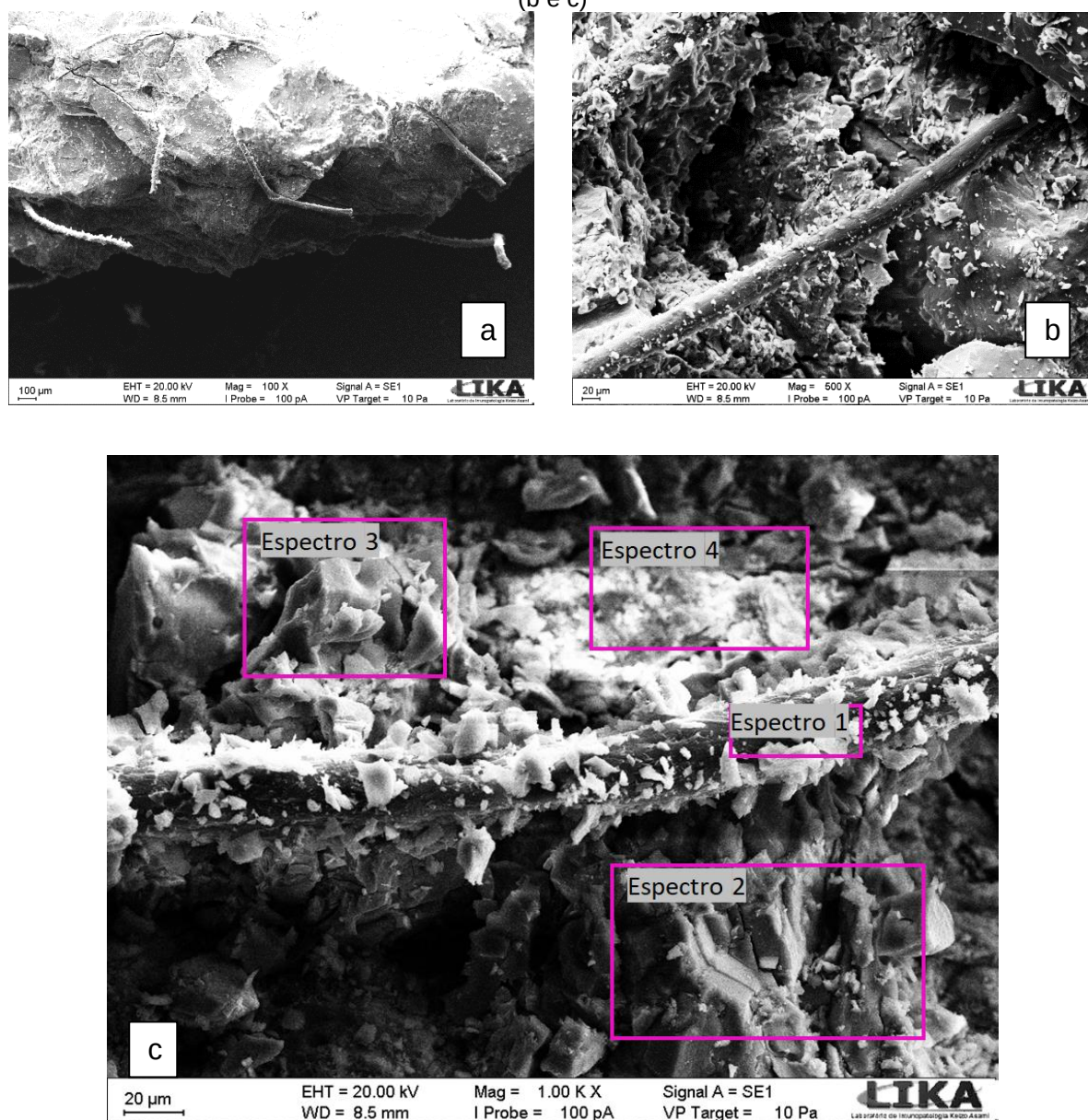
Fonte: O autor (2022).

A imagem do MEV da fibra PP inserida na matriz cimentícia da argamassa de escória álcali ativada encontra-se na Figura 62 (a), (b) e (c). O resultado da

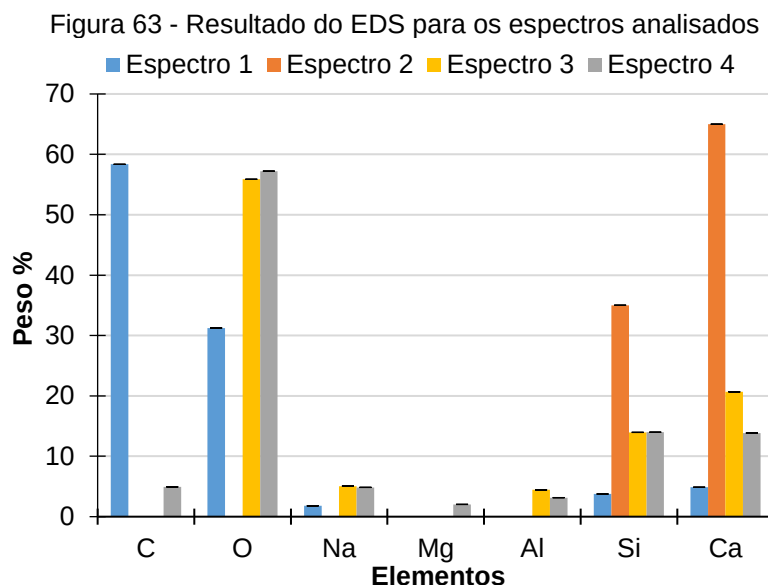
identificação dos elementos por EDS dos 4 espectros definidos na Figura 62 (c), consta no gráfico da Figura 63.

O espectro 1 identificou a maior parte de carbono, o qual está associado à presença da fibra PP, além de oxigênio e silício e cálcio, em menores quantidades, elementos que compõem o CSH. O mesmo pode ser observado para o espectro 3 e 4, onde o oxigênio é predominante, seguido principalmente de cálcio e silício. É importante ressaltar que não foram encontrados indícios de escorregamento da fibra na matriz cimentícia, o que permite supor que ocorreu a boa aderência entre a fibra PP e a matriz de escória álcali ativada.

Figura 62 - Imagem MEV da fibra PP inserida na argamassa de escória 100 μm (a) e 20 μm (b e c)



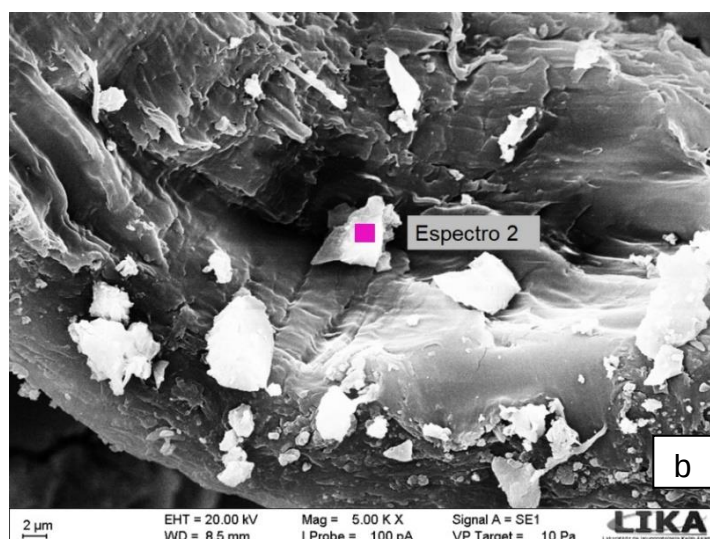
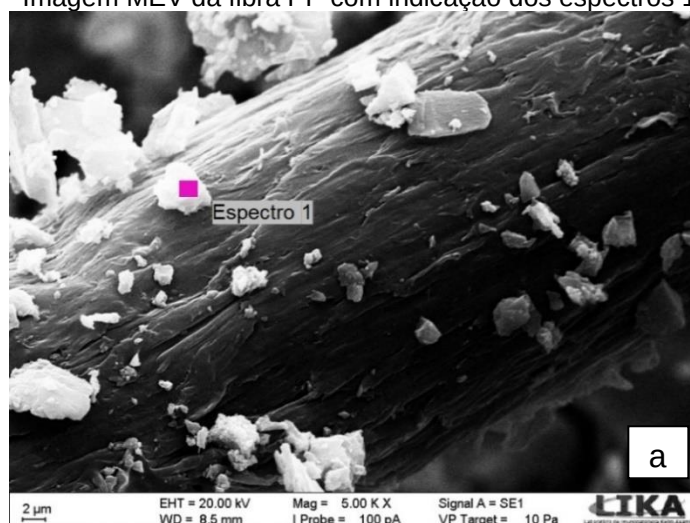
Fonte: O autor (2022).



Fonte: O autor (2022).

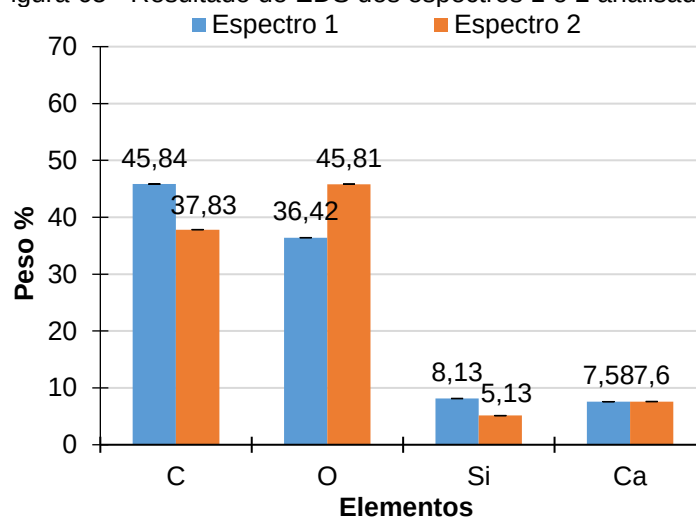
Análise mais minuciosa da amostra de fibra de PP buscou identificar os elementos do composto depositado na superfície da fibra, conforme indicado na imagem do MEV da Figura 64 (a) e (b). O resultado dos principais elementos encontrados nos espectros 1 e 2 por EDS estão no gráfico da Figura 65, mostrando em ambos os casos a predominância do carbono, vinculado a fibra de PP, seguido principalmente de oxigênio, silício e cálcio, indicativo de CSH. Fica claro também a presença de ranhuras na superfície, antes lisa, da fibra. Portanto, outra resposta que se buscava era sobre a degradação da fibra de PP em matriz de escória álcali ativada, e os resultados limitados ao escopo desse trabalho permitem supor que houve uma degradação superficial da fibra. Porém, essa degradação não parece ter afetado de forma significativa o desempenho mecânico da fibra de PP e a mesma conseguiu auxiliar na mitigação da retração elevada deste tipo de ligante.

Figura 64 - Imagem MEV da fibra PP com indicação dos espectros 1 (a) e 2 (b)



Fonte: O autor (2022).

Figura 65 - Resultado de EDS dos espectros 1 e 2 analisados



Fonte: O autor (2022).

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção serão apresentadas de forma sucinta as conclusões obtidas a partir dos resultados dos ensaios analisados.

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto a utilização da fibra de polipropileno com o intuito de mitigar a questão da retração que é um problema relevante em argamassas de escória de alto forno.

No ensaio de tração na flexão é observado um crescimento da resistência ao longo do tempo, porém, com a diminuição da resistência à medida que se aumenta a relação a/l. Observou-se na relação $a/l = 0,40$ que a fibra provocou uma diminuição da resistência à tração na flexão aos 28 dias em relação a amostra sem fibra, porém essa tendência não se repetiu para as demais relações. De modo geral, o ensaio de resistência à tração na flexão em argamassas é notadamente afetado pela grande variabilidade dos resultados e devido a limitação da quantidade de amostras ensaiadas não foi possível obter com a fibra PP um comportamento bem definido do seu efeito na resistência à tração nas argamassas de escória.

Os resultados de resistência a compressão apresentaram comportamento semelhante a tração na flexão no que diz respeito ao ganho de resistência ao longo do tempo e a diminuição com a elevação da relação a/l. Aos 28 dias, no entanto, a inserção de fibra de PP, em todos os casos, alterou o resultado para valores que não se modificaram nem 5% em relação as amostras controle. O aumento do teor de fibra se mostrou sem efeito significativo na resistência a compressão.

O comportamento da retração por secagem nas argamassas controle mostrou uma tendência de maior retração principalmente nos sete primeiros dias, coincidindo o mesmo período com a maior perda de massa para o meio externo. Tanto na retração por secagem como na autógena, o comportamento observado apresentou a mesma tendência, na qual, quanto maior a relação a/l incorre no aumento de retração. A inserção de fibras de polipropileno permitiu a diminuição da retração por secagem ao final dos 56 dias em todas as relações a/l, porém seu melhor desempenho ocorreu para a $a/l = 0,48$. Nesta variação, as reduções obtidas foram próximas a 12%, 16 % e 24% para os teores de 0,1%, 0,2% e 0,3%,

respectivamente. O efeito das fibras foi menor na relação $a/l = 0,56$, podendo ser um indicativo da existência de um teor ótimo de a/l com o qual a fibra exerce sua melhor atividade. De acordo com os resultados, a utilização de fibras interage com a variação da massa provocada pela evaporação de água, notadamente nas amostras com relação a/l de 0,40 e 0,48, sendo o efeito desta interação diminuído à medida que a relação a/l se eleva de 0,48 para 0,56. Faz-se necessário outras determinações com respeito a porosidade para tentar se aprofundar no fenômeno que provoca esta interação.

A fibra de PP utilizada em teores de 0,3% apresentou bom desempenho no combate a retração autógena aos 56 dias nas relações $a/l = 0,40$ e 0,48, com 18,77% e 17,5% de redução, respectivamente. Aos 7 dias a retração autógena total se manteve abaixo de 62% em todos os casos, constatando que o avanço da retração autógena ocorre de maneira mais distribuída ao longo do tempo. Os resultados na relação $a/l = 0,56$ apontam para um menor efeito da fibra na mitigação da retração autógena.

Analizando os resultados entre as amostras sem fibra, a retração por secagem foi 2,44, 2,77 e 2,86 vezes maior que a retração autógena para as relações $a/l = 0,40$, 0,48 e 0,56, respectivamente. Com a adição de fibra PP, ambas apresentaram um comportamento muito similar, com o maior desempenho da fibra acontecendo na relação 0,48 e o menor na relação 0,56. A tendência da curva entre eles se difere no tempo de ocorrência da retração, sendo mais de 84% da retração total por secagem acontecendo nos sete primeiros dias, enquanto na autógena isso não passa de 62% em todos os casos.

Nas imagens obtidas através do MEV, verificou-se que não houve escorregamento da fibra na matriz cimentícia durante o rompimento, no entanto essa apresentou ranhuras na superfície, antes lisa, sugerindo uma possível degradação pela alta alcalinidade da argamassa de escória.

Dessa forma a fibra de polipropileno se mostrou uma adição viável para o combate da retração tanto autógena quanto por secagem, principalmente na relação $a/l = 0,48$ para teor de 0,3%, podendo ter aplicações em larga escala para produção de argamassas de escória ativada com alta resistência.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo dos ensaios, alguns tópicos se mostraram relevantes para serem abordados em estudos de novas dissertações:

- Analisar a interação química microestrutural entre a fibra PP e matriz cimentícia, identificando possível ataque a fibra;
- Analisar se a utilização de diferentes tipos de ativadores de escória álcali ativada nas argamassas modificam o processo de interação química da matriz com a fibra PP;
- Analisar a reologia do cimento de escória álcali-ativada com fibra de Polipropileno;
- Analisar o comportamento da fibra de polipropileno e seu efeito na retração restringida em argamassas de escória ativada;
- Analisar o comportamento de fibras metálicas na mitigação da retração autógena e por secagem no cimento de escória ativada;

Por fim, estudar a durabilidade de argamassas de escória álcali-ativada na aplicação como argamassas de emboço e reboco.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM C490/C490M - 17: Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete. ASTM, 2017.

_____. DNER-ME 194. Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman, 1998.

_____. NBR 11172: Aglomerantes de origem mineral. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

_____. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. NBR NM 248. Agregados - Determinação da composição granulométrica [s.l.]: ABNT, 2003.

AMARAL, E. C.; BOTELHO, R. A.; LAMEIRAS, F.S.; TOLENTINO, E. **O efeito do tratamento térmico a 300 °C na conectividade da estrutura de poros de argamassas de cimento Portland reforçadas por fibras de polipropileno**. 2012.

AOKI, J.; MEDEIROS, G. **Retração – Redução de Efeito e Compensação**. 2010.

ARAÚJO, C. T. F. **Estudo do comportamento de juntas de argamassa reforçadas com fibras de polipropileno**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Alagoas, 2005.

ARAÚJO JÚNIOR, N. T. **Concreto de alta resistência produzido com escória álcali-ativada**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

ARCELORMITTAL. **Escória de alto forno**. 2019.

ATIS, C. D.; BILIM, C.; CELIK, O.; KARAHAN, O. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. **Construction and Building Materials**, p. 548-555, 2009.

BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. 2001. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo – Escola Politécnica, São Paulo, 2001.

BHUTTA, A.; FAROOQ, M.; ZANOTTI, C.; NEMKUMAR, B. Pull-out behavior of different fibers in geopolymer mortars: effects of alkaline solution concentration and curing. **Materials and Structures**. 2017.

BORGES, A. P. S. N. **Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e polipropileno para uso em paredes estruturais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

CAMPELLO, E. **Comportamento Mecânico de Argamassas Reforçadas por Fibras Sintéticas e Metálicas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal Fluminense, 2013.

CARTWRIGHT, C. *et al.* **Shrinkage Characteristics of Alkali-Activated Slag Cements**. American Society of Civil Engineers. 2014.

CHOI, J. il; LEE, B. Y.; RANADE, R.; LI, V. C.; LEE, Y. Ultra-high-ductile behavior of a polyethylene fiber-reinforced alkali-activated slag-based composite. **Cement and Concrete Composites**, v. 70, p. 153–158. 2016.

CIMENTO MIZU, S/A. **Certificado de ensaios em escória**. 2018.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer Institute Library. Technical paper #24, False-CO₂-values. 2015.

DOMONE, P.; ILLSTON, J. **Construction Materials - Their nature and behaviour**. Fourth edition. Spon Press Publishing, 2010.

DONATO, M. **Comportamento mecânico de concreto compactado com rolo reforçado com fibras de polipropileno**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

GAO, Z.; LIANG, R. Y.; PATNAIK, A. Mass Loss and Capacity Loss of Reinforced Concrete Slabs with and without Polypropylene Fibers Corroded with Pre-existing Cracks and Sustained Loading. 2016.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. **Clinker Substitutes**. 2021.

GUNEYISI, E.; GESOGLU, M; OZBAY, E. Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, 2010.

HOFFMANN GREEN CEMENT TECNOLOGIES. **H-UKR, alkali-activated slag cement**. 2022.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **A indústria do aço no Brasil**. 2017.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 1995.

KUMAR, R.; GOEL, P.; MATHUR, R.; BHATTACHARJEE, B. Suitability of Synthetic Fiber for the Construction of Concrete Pavements. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 73, pp. 448-452, 2014.

LIMA, V. M. E. **Misturas binárias de cinza do bagaço da cana-de-açúcar com escória álcali-ativada**. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

LUCENA, J. C. T. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos 2017.

MA, Y.; LIU, W.; HU, J.; FU, J.; ZHANG, Z.; WANG, H. Optimization on the piezoresistivity of alkali-activated fly ash/slag mortar by using conductive aggregates and carbon fibers. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, 103735, 2020.

MCLELLAN, B. C.; WILLIAMS, R. P.; LAY, J.; VAN RIESSEN, A.; CORDER, G. D. Costs and carbon emissions for geopolymers pastes in comparison to ordinary portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 9–10, p. 1080–1090, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>>.

MELO NETO, A. A. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2002.

MELO NETO, A. A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.

MENDES, A. P. L. **Efeito da adição de fibras sintéticas e naturais nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas autonivelantes com metacaulinita**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas, Manaus. 2019.

NGUYEN, H.; CARVELLI, V.; ADESANYA, E.; KINNUNEN, P.; ILLIKAINEN, M. High performance cementitious composite from alkali-activated ladle slag reinforced with polypropylene fibers. **Cement and Concrete Composites**. 2018.

NTC BRASIL. **Fibras de polipropileno**. 2016. Disponível em: <<https://www.ntcbrasil.com.br/blog/fibras-de-polipropileno/>>.

NUNES, N. L.; AGOPYAN, V. **A influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço**. Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, M. L. L. **Influência da adição de fibras de polipropileno em argamassas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. **Cimento Portland normal versus ligantes geopoliméricos: durabilidade e desempenho ambiental**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. Figura 1, p. 1–9, 2010. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/10733>>.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J. A.; LEONELLI, C.; PALOMO, A.; CHINDAPRASIRT, P. (Ed.). **Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes**. [s.l.]: Woodhead Publishing, 2014. 852 p.

PERNAMBUCO QUÍMICA, S/A. **Certificado de análise silicato de sódio alcalino**. 2021.

PUERTAS, F.; AMAT, T.; FERNANDEZ-JIMÉNEZ, T.; VÁZQUEZ, T. Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. **Cement and concrete research**. 2003.

RODRIGUES, P. F.; MONTARDO, J. P. A Influência da Adição de Fibras de Polipropileno nas Propriedades dos Concretos para Pisos e Pavimentos. **Instituto Brasileiro do Concreto - 44º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2002.

SIKA. **Ficha técnica de produto – SikaFiber® 12 Micro PP**. 2017.

SILVA, N. G. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

SILVA, R. P. **Argamassas com adição de fibras de polipropileno – Estudo do comportamento reológico e mecânico**. Dissertação de Mestrado. Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

SIQUEIRA, J. E. L. **Utilização de fibras naturais e sintéticas em argamassas de revestimento de alvenaria: estudo comparativo de desempenho**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

SONG, S. *et al.* Hydration of alkali-activated ground granulated blast furnace slag. **Journal of materials science**. p. 249–257. 2000.

SOUZA, T. B. **Produção de concreto celular utilizando escória álcali-ativada**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

TAYLOR, H. **Cement chemistry**. 2 ed. London: Thomas Telford Publishing, 1997.

VELASCO, R. V. **Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas**. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

WANG, S.; SCRIVENER, K. L. Hydration products of alkali activated slag cement. **Cement and concrete research**, v. 25, n. 3, p. 561-571, 1995.

WEHBE, Y.; GHAREMANINEZHAD, A. Combined effect of shrinkage reducing admixtures (SRA) and superabsorbent polymers (SAP) on the autogenous shrinkage, hydration and properties of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, p. 151-162, 2017.

XU, Y.; CHEN, H.; WANG, P. Effect of Polypropylene Fiber on Properties of Alkali-Activated Slag Mortar. *Advances in civil engineering - Hindawi*. 2020.

XU, Y.; XING, G.; ZHAO, J.; ZHANG, Y. The effect of polypropylene fiber with different length and dosage on the performance of alkali-activated slag mortar. **Construction and Building Materials**. 2021.

ZHAO, Y.; SHI, T.; CAO, L.; KAN, L.; WU, M. Influence of steel slag on the properties of alkali-activated fly ash and blast-furnace slag based fiber reinforced composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 116, p. 103875, 2021.