



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

SOFIA XIMENES LOPES

**AVALIAÇÃO DE ARGAMASSAS ÁLCALI-ATIVADAS COM INCORPORAÇÃO DE
VERMICULITA EXPANDIDA**

Recife

2023

SOFIA XIMENES LOPES

**AVALIAÇÃO DE ARGAMASSAS ÁLCALI-ATIVADAS COM INCORPORAÇÃO DE
VERMICULITA EXPANDIDA**

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.

Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

- L864a Lopes, Sofia Ximenes.
 Avaliação de argamassas álcali-ativadas com incorporação de vermiculita
 expandida / Sofia Ximenes Lopes, 2023.
 93 f.: il.
- 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 álcali-ativada. 3. Argamassa de escória de
 alto-forno. 4. Vermiculita. 5. Retração autógena. 6. Retração por secagem. I. Melo
 Neto, Antônio Acácio de (Orientador). II. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE

BCTG / 2023 - 236

SOFIA XIMENES LOPES

**AVALIAÇÃO DE ARGAMASSAS ÁLCALI-ATIVADAS COM INCORPORAÇÃO DE
VERMICULITA EXPANDIDA**

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. Área de concentração: Estruturas

Aprovada em: 28/04/2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dra. Yêda Vieira Póvoas (Examinadora Externa)
Universidade de Pernambuco

Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. João Manoel de Freitas Mota (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pois tudo o que acontece é por anuência divina.

Aos meus familiares pelo apoio ao longo dos anos.

Ao Professor Antônio Acácio, por toda a solicitude dispensada, a imensa paciência, a disponibilidade quase que integral, pelo conhecimento passado ao longo desses anos – o que, creiam, foi descomunal.

A todos os colegas do Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes – LABTAG.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) por todo o conhecimento passado, em especial ao Prof. Arnaldo Carneiro.

Aos funcionários e técnicos pela ajuda e disponibilidade.

Agradeço aos meus amigos que forneceram todo o apoio ao longo desse período, em especial Yane Coutinho, Roberta Tabaczensky, Victor Estolano, Dhiego Revoredo e Eduarda Queiroz.

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

RESUMO

O aumento considerável das emissões de CO₂, bem como o elevado consumo de recursos naturais, têm motivado a procura de processos e materiais sustentáveis. Em particular, a indústria da construção civil tem sido foco de muitos estudos devido ao seu alto consumo energético e elevadas taxas de emissão de CO₂. Diversos materiais têm sido investigados objetivando a substituição parcial ou total do cimento, como por exemplo a escória de alto-forno, um rejeito industrial cujo uso em cimento é uma alternativa sustentável ao seu descarte, além de resultar na diminuição da demanda de clínquer e consequente diminuição da quantidade de CO₂ emitido. Outra alternativa frequentemente adotada é a utilização de agregados alternativos para redução do uso de recursos naturais e energéticos. Nesse sentido, a vermiculita se apresenta como uma opção por sua alta disponibilidade e características isolantes térmicas e acústicas. Apesar das diversas vantagens no emprego da escória de alto-forno, um fator limitante para sua utilização é a elevada retração apresentada por esse sistema, o que pode vir a favorecer a entrada de agentes agressivos. Desta forma, torna-se necessário viabilizar alternativas que possam mitigar este fenômeno, favorecendo sua aplicação. Neste contexto, o presente trabalho objetivou analisar a influência de vermiculita substituindo parcialmente o agregado miúdo em argamassas de escória álcali-ativada, com foco na retração. Foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido, buscando quantificar a influência da adição da vermiculita nestas misturas. Os resultados indicaram que a adoção da vermiculita para uma mesma relação água/ligante = 0,48 ocasionou a diminuição do índice de consistência das misturas, a diminuição da densidade de massa no estado fresco em até 2,86%, o aumento do teor de ar incorporado (de até 91%), o aumento da absorção por capilaridade em 40,88% e a redução da resistência à compressão das misturas em até 34,73%. Com relação à retração, houve drástica redução da retração autógena das misturas; para a retração por secagem, houve aumento para misturas com uso de vermiculita no estado seco, sendo diretamente proporcional ao teor empregado, e redução para misturas com uso de vermiculita no estado saturado. A partir dos resultados obtidos, confirmou-se a viabilidade do uso da vermiculita como agente redutor do fenômeno de retração em argamassas de escória álcali-ativada.

Palavras-chave: argamassa álcali-ativada; argamassa de escória de alto-forno; vermiculita; retração autógena; retração por secagem.

ABSTRACT

The considerable increase in CO₂ emissions and the high consumption of natural resources have motivated the search for sustainable processes and materials. In particular, the construction industry has been focus of several studies because of its high energy consumption and significant CO₂ emissions. Several materials have been evaluated to totally or partially replace cement, such as blast-furnace slag, an industrial byproduct. The use of slag in cement can be a sustainable alternative to the disposal of this material, and lead to reductions in clinker demand and CO₂ emissions. The use of alternative aggregates is another approach frequently adopted to reduce the consumption of natural and energy resources. In this regard, vermiculite is an option owing to its availability and excellent acoustic and thermal insulation properties. Despite the advantages of using slag, systems containing this material exhibit high shrinkage, which may favor the ingress of aggressive agents. Therefore, this phenomenon must be studied to enable the widespread use of slag as a binder. This study aimed to evaluate the influence of vermiculite partially replacing fine aggregate in alkali-activated slag mortars, particularly focusing on shrinkage. Tests in fresh and hardened states were performed to quantify the influence of vermiculite in different mixtures. The results indicated that the use of vermiculite for the same water/binder ratio of 0.48 resulted in a reduction of the consistency index of mixtures, reduction of density in fresh state of up to 2.86%, increase of the incorporated air content (up to 91%), increase of the capillary absorption of 40.88%, and reduction of the compressive strength of up to 34.73%. Considering shrinkage results, a considerable reduction of autogenous shrinkage was observed; as for the drying shrinkage, an increase was obtained for mixtures in which dry vermiculite was used, directly proportional to the percentage adopted, whereas a decrease was observed for mixtures in which vermiculite in saturated condition was used. From the results obtained, the viability of using vermiculite as a reducing agent of the shrinkage phenomenon in alkali-activated slag mortars was confirmed.

Keywords: alkali-activated slag mortars; blast-furnace slag mortar; vermiculite; autogenous shrinkage; drying shrinkage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Processo e reação de ativação alcalina, originando géis de alto teor de cálcio e baixo teor de cálcio.....	18
Figura 2 -	Programa experimental.....	28
Figura 3 -	Escória de alto-forno moída.....	29
Figura 4 -	Silicato de sódio.....	30
Figura 5 -	Agregado miúdo.....	31
Figura 6 -	Vermiculita expandida.....	31
Figura 7 -	Difratograma da escória de alto-forno moída.....	33
Figura 8 -	Distribuição granulométrica.....	33
Figura 9 -	Curva granulométrica do agregado miúdo.....	34
Figura 10 -	Curva granulométrica da vermiculita expandida.....	35
Figura 11 -	Difratograma da vermiculita expandida.....	36
Figura 12 -	Estrutura folheada da vermiculita expandida.....	36
Figura 13 -	Argamassa produzida com substituição de areia por vermiculita.	38
Figura 14 -	Processo de determinação da massa de areia a ser substituída por vermiculita.....	41
Figura 15 -	Corpos de prova para ensaios de compressão axial.....	44
Figura 16 -	Chapas metálicas para aplicação da carga.....	44
Figura 17 -	Prensa.....	44
Figura 18 -	Armazenamento dos corpos de prova de retração.....	45
Figura 19 -	Envelopamento de corpos de prova de retração por secagem (a); Pinos (b)....	46
Figura 20 -	Corpos de prova para microtomografia.....	46
Figura 21 -	Liofilizador Liotop, modelo L101.....	47
Figura 22 -	Amostras identificadas e acondicionadas em saco plástico, com sílica gel e hidróxido de bário.....	47
Figura 23 -	Microtomógrafo: (a) parte externa; (b) parte interna.....	48
Figura 24 -	Filtro utilizado: cobre de 0,5 mm.....	48
Figura 25 -	Índice de consistência das argamassas V0, V5, V10 e V15.....	50
Figura 26 -	Índice de consistência para todas as argamassas estudadas.....	51
Figura 27 -	Índice de consistência das argamassas com 5% de vermiculita.....	52
Figura 28 -	Índice de consistência das argamassas com 10% de vermiculita.....	52

Figura 29 - Índice de consistência das argamassas com 15% de vermiculita.....	52
Figura 30 - Densidade de massa no estado fresco das argamassas estudadas.....	53
Figura 31 - Redução percentual da densidade de massa em relação à mistura V0.....	54
Figura 32 - Diminuição percentual em relação a V0, argamassas com 5% de vermiculita.....	54
Figura 33 - Diminuição percentual em relação a V0, argamassas com 10% de vermiculita.....	54
Figura 34 - Diminuição percentual em relação a V0, argamassas com 15% de vermiculita.....	55
Figura 35 - Teor de ar incorporado para as argamassas estudadas.....	56
Figura 36 - Aumento percentual do teor de ar incorporado em relação à argamassa V0....	57
Figura 37 - Taxa de absorção das argamassas.....	58
Figura 38 - Variação percentual da taxa de absorção em relação à argamassa V0.....	59
Figura 39 - Resistência à compressão para as argamassas com vermiculita seca (V0, V5, V10 e V15).....	60
Figura 40 - Resistência à compressão das argamassas de referência (V0) e com 5% de vermiculita.....	60
Figura 41 - Resistência à compressão das argamassas de referência (V0) e com 10% de vermiculita.....	60
Figura 42 - Resistência à compressão das argamassas de referência (V0) e com 15% de vermiculita.....	61
Figura 43 - Resistência à compressão das argamassas estudadas.....	61
Figura 44 - Variação percentual da resistência à compressão em relação à argamassa V0.....	62
Figura 45 - Resistência à compressão das composições aos 3 dias.....	63
Figura 46 - Resistência à compressão das composições aos 7 dias.....	63
Figura 47 - Resistência à compressão das composições aos 28 dias.....	63
Figura 48 - Retração autógena para as argamassas V0, V5S0, V10S0 e V15S0.....	65
Figura 49 - Taxa de retração acumulada – retração autógena para as argamassas V0, V5S0, V10S0 e V15S0.....	65
Figura 50 - Variação percentual da taxa de retração acumulada para todos os dias – retração autógena para as argamassas V5S0, V10S0 e V15S0.....	66
Figura 51 - Retração autógena para V0 e argamassas com 5% de vermiculita.....	67

Figura 52 - Taxa de retração autógena acumulada para argamassas com 5% de vermiculita.....	67
Figura 53 - Retração autógena para V0 e argamassas com 10% de vermiculita.....	68
Figura 54 - Taxa de retração autógena acumulada para argamassas com 10% de vermiculita.....	68
Figura 55 - Retração autógena para V0 e argamassas com 15% de vermiculita.....	69
Figura 56 - Taxa de retração autógena acumulada para argamassas com 15% de vermiculita.....	69
Figura 57 - Retração autógena para argamassas com melhor desempenho.....	70
Figura 58 - Taxa de retração autógena acumulada para argamassas com melhor desempenho.....	70
Figura 59 - Análise da retração para as composições estudadas.....	71
Figura 60 - Retração por secagem e variação de massa para argamassa V0.....	72
Figura 61 - Retração por secagem para V0, V5S0, V10S0 e V15S0.....	73
Figura 62 - Retração por secagem para V0 e argamassas com 5% de vermiculita.....	73
Figura 63 - Retração por secagem para V0 e argamassas com 10% de vermiculita.....	74
Figura 64 - Retração por secagem para V0 e argamassas com 15% de vermiculita.....	74
Figura 65 - Retração por secagem para argamassas com melhor desempenho.....	75
Figura 66 - Análise da retração para as composições estudadas.....	76
Figura 67 - Perda de massa versus retração por secagem (V0S0, V5S0, V10S0 e V15S0) – saturação igual a zero.....	76
Figura 68 - Perda de massa versus retração por secagem (V0 e misturas com 5% de vermiculita) – saturação variável.....	77
Figura 69 - Perda de massa versus retração por secagem (V0 e misturas com 10% de vermiculita) – saturação variável.....	77
Figura 70 - Perda de massa versus retração por secagem (V0 e misturas com 15% de vermiculita) – saturação variável.....	78
Figura 71 - Matriz de poros da argamassa V0S0.....	78
Figura 72 - Porosidade das argamassas analisadas.....	79

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização e Justificativa	13
1.2	Objetivos	14
1.3	Estrutura do Trabalho	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Materiais álcali-ativados	15
2.2	Ligantes à base de escória álcali-ativada	16
2.2.1	Ativação Alcalina	17
2.2.	Produtos hidratados	19
2.2.3	Propriedades dos ligantes de escória álcali-ativada	20
2.3	Retração em sistemas álcali-ativados	21
2.3.1	Síntese de retração em sistemas álcali-ativados	22
2.3.2	Principais fatores para o processo de retração	22
2.4	Mitigação da retração em sistemas álcali-ativados	24
2.5	Vermiculita como agente de cura interna	25
2.5.1	Absorção e dessorção de água	25
2.5.2	Efeitos da vermiculita nas propriedades das argamassas	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Programa Experimental	28
3.2	Materiais	29
3.2.1	Escória de alto-forno	29
3.2.2	Silicato de sódio	30
3.2.3	Hidróxido de sódio	30
3.2.4	Agregado miúdo	31
3.2.5	Vermiculita	31
3.2.6	Desmoldante	32
3.3	Métodos	32
3.3.1	Caracterização dos materiais	32
3.3.2	Argamassas	37
3.3.3	Preparo das Misturas	40
3.3.4	Processo de cura	42

3.4	Caracterização no estado fresco	42
3.5	Caracterização no estado endurecido	43
3.5.1	Compressão axial	43
3.5.2	Retração autógena e por secagem	44
3.5.3	Microtomografia	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	Propriedades no estado fresco	50
4.1.1	Índice de consistência	50
4.1.2	Densidade de massa no estado fresco	53
4.1.3	Teor de ar incorporado	56
4.2	Propriedades no estado endurecido	57
4.2.1	Absorção por capilaridade	57
4.2.2	Resistência à compressão	59
4.3	Variação dimensional (retração autógena e por secagem)	64
4.3.1	Retração Autógena	64
4.3.2	Retração por Secagem	71
4.3.3	Microtomografia de raio-X (porosidade)	78
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
5.1	Conclusões	80
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	81
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

Os índices globais de concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, segundo o *Global Monitoring Laboratory* – GML (WANG et al., 2021), apresentaram um aumento de 31,7% dos anos de 1959 a 2022. Essas excessivas emissões de CO_2 são dióxido de carbono (CO_2) provenientes de atividades humanas, como geração de energia e produção de cimento Portland, que se tornou um dos materiais mais utilizados no mundo (SOUSA, 2021). O aumento das emissões, atrelado ao consumo excessivo de recursos naturais têm motivado a procura de processos e materiais alternativos com características sustentáveis.

Em se tratando da construção civil, Pulido-Arcas, Flores-Alés e Pérez-Fargallo (2022) indicam que este setor consome 36% da energia produzida e é responsável por 36% das emissões de CO_2 à escala global, sendo 11% concernentes à fabricação de materiais de construção, dentre eles o cimento Portland. Estima-se que 0,73–0,99 toneladas de CO_2 são emitidas na atmosfera para cada tonelada de cimento produzida (SUN et al., 2022), das quais aproximadamente 54% são decorrentes do processo de decomposição do calcário na produção do clínquer. De acordo com Sousa (2021), 4,1 bilhões de toneladas de cimento Portland foram consumidas em 2018, com uma emissão média de 3,53 bilhões de toneladas de CO_2 , sendo 1,91 bilhões provenientes do processo de decomposição do calcário.

Frente a esta realidade, diversos produtos têm sido destinados à substituição parcial ou total do cimento Portland visando à diminuição das emissões de CO_2 como por exemplo os geopolímeros e os materiais álcali-ativados. Os aglomerantes produzidos com o uso destes materiais possuem propriedades semelhantes ou superiores às verificadas para o cimento Portland tradicional, com liberação de CO_2 no seu processo de fabricação 80 a 86% menor (RAMÍREZ; GUTIÉRREZ; PUERTAS, 2017). Ademais, a utilização de materiais cimentícios/ligantes provenientes de resíduos industriais é uma alternativa sustentável para o descarte de resíduos e diminuição do teor de clínquer no cimento (XU et al., 2023; AMER et al. 2021; GUPTA; CHAUDHARY, 2020; FRANCO DE CARVALHO et al., 2019; JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019; LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

Outra alternativa que vem sendo explorada, conforme Pulido-Arcas, Flores-Alés e Pérez-Fargallo (2022) e Jayadurgalakshmi e Kandasamy (2022) é a adoção de agregados alternativos como, por exemplo, a vermiculita e a perlita como substituição parcial do agregado natural (areia de quartzo), devido a disponibilidade, sua menor densidade, o que favorece as aplicações estruturais, a baixa condutividade térmica, o que propicia maior isolamento térmico e, conseqüentemente, menor perda de energia durante a fase de utilização das edificações, e baixa energia incorporada.

Considerando o exposto, Sousa (2021), Amer et al. (2021), Sun, Ye e Schutter (2022) e Xu et al. (2023) apontam como promissora a utilização de materiais álcali-ativados como alternativa à utilização de cimento Portland e evidenciam as seguintes vantagens: elevada resistência ao fogo, maior durabilidade, excelente resistência química, particularmente ao ataque de sulfatos e ácidos, e melhor desenvolvimento de resistência mecânica, principalmente nas primeiras idades (XU et al., 2023; AMER et al., 2021; SOUSA, 2021; JIAO et al., 2018; RASHAD, 2016; BERNAL et al., 2011).

Entretanto, apesar dessas inúmeras vantagens, Moraes (2019), Liang et al. (2022) e Xu et al. (2023) ressaltam a grande magnitude das retrações que ocorrem em sistemas com materiais álcali-ativados, que podem ocasionar fissuras e deformações, favorecendo a entrada de agentes agressivos. Portanto, esse aspecto deve ser considerado para viabilizar a aplicação de materiais álcali-ativados em escala industrial.

1.1 Contextualização e Justificativa

Diversos estudos têm evidenciado a elevada retração de cimentos de escória álcali-ativada quando comparadas àquela de cimento Portland. Taylor (1997), por exemplo, indica este aspecto como uma das principais características negativas desse tipo de aglomerante. Collins e Sanjayan (2000) obtiveram retração por secagem três vezes superior à do cimento Portland do tipo I, sendo este fato ressaltado por Moraes (2019). Por outro lado, Ramirez, Gutierrez e Puertas (2017) evidenciaram os processos de perda de consistência e retração em seus estudos.

Sequencialmente, vários outros trabalhos foram executados buscando compreender os fenômenos que ocasionavam as elevadas retrações. Lee et al. (2014) evidenciaram a influência da distribuição de poros, em que a maior porção de microporos proporcionaria maiores tensões capilares e maiores deformações. Ma e Ye (2015), Ye e Radlńska (2016) e Fang et al. (2018) explicitaram que os sistemas com menores volumes de microporos obtiveram as maiores variações dimensionais, indicando como possível explicação a reorganização dos géis aluminossilicatos. Hojati e Radlńska (2017) e Mastali et al. (2018) demonstraram a influência do material precursor e ativador alcalino nas reações de retração, relacionando-os com o volume de água livre no sistema.

A partir destes problemas levantados, o presente trabalho propõe analisar o efeito da aplicação da cura interna com o uso vermiculita na mitigação da retração deste tipo de ligante, uma vez que, a vermiculita sendo um agregado leve de alta absorção, proporcionaria o efeito de cura interna auxiliando no processo de hidratação, ocasionado pela lenta liberação de água

no interior da matriz, propiciando o refinamento da estrutura de poros com consequente redução ou erradicação da retração (MA; LIU; SHI, 2019), o que viabilizaria a utilização de misturas álcali-ativadas como argamassas de revestimento/assentamento.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo analisar e compreender o efeito da vermiculita em argamassas de escória álcali-ativada, verificando como a substituição parcial do agregado por este material interfere nas propriedades finais das argamassas no estado fresco e endurecido. Os objetivos específicos são:

- Analisar as propriedades das argamassas produzidas com vermiculita no estado fresco e endurecido;
- Avaliar o fenômeno de retração autógena e por secagem nas argamassas estudadas;
- Correlacionar os teores de umidade aplicados à vermiculita com as propriedades estudadas.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho foi estruturado em capítulos buscando uma melhor organização e exposição do conteúdo. No Capítulo 1 são apresentados os objetivos e justificativas do estudo, contextualizando a importância da aplicação da escória álcali-ativada em substituição ao cimento Portland, e evidenciando os benefícios de sua aplicação frente à preservação ambiental e algumas dificuldades na sua utilização.

No Capítulo 2 são apresentadas as características dos materiais empregados, os fenômenos físicos e químicos envolvidos no processo de ativação alcalina e de retração, bem como os efeitos gerais da aplicação da vermiculita em argamassas, utilizando para isso contribuições literárias já consagradas e estudos recentes.

No Capítulo 3 estão descritos os materiais utilizados, as dosagens empregadas, e a metodologia adotada para os respectivos ensaios. No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos para as diferentes análises e as comparações necessárias para o entendimento dos fenômenos verificados.

Por fim, no Capítulo 5, expõe-se as conclusões obtidas e sugestões de estudos futuros para a continuidade do tema em questão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, procede-se a apresentação, de modo sucinto, de diversos estudos relacionados aos ligantes à base de escória álcali-ativada e suas principais características físicas. Também são mencionados, abreviadamente, observações a respeito dos fenômenos de retração em materiais cimentícios e por fim, são assinaladas breves considerações no que concerne a influência da adição da vermiculita e seus efeitos nas propriedades dos ligantes.

2.1 Materiais álcali-ativados

Provis e Deventer (2007) definem os materiais álcali-ativados como sendo aluminossilicatos sólidos e estáveis, originados da ativação alcalina de um precursor sólido e em pó, sendo a ativação alcalina um processo químico onde estruturas vítreas, amorfas total ou parcialmente e/ou metaestável são transformadas em materiais compactos com características cimentantes (PALOMO; GRUTZECK; BLANCO, 1999), sendo a fonte de aluminossilicatos denominada de “precursor” e a fonte alcalina, o “ativador”.

Este material vem sendo estudado desde a década 40, sendo o processo de ativação da escória proposto por Purdon (1940 *apud* PUERTAS, 1995), e tendo sua ascensão na década de 60 em diante com os estudos de Glukhovsky (PUERTAS, 1995) e de Davidovits (PROVIS; DEVENTER, 2007; PACHECO-TORGAL et al., 2008; JUENGER et al., 2011), surgindo com maior proeminência na extinta União das Repúblicas Socialistas (ARAÚJO, 2020).

Conforme Langaro (2016), os aglomerantes álcali-ativados podem ser classificados em dois grupos, dependendo da composição do material precursor, a saber:

- Sistema alcalino ou geopolímero: materiais ricos em SiO_2 e Al_2O_3 , que resultam na formação de compostos solúveis de metais alcalinos, com baixo ou nenhum teor de cálcio e que, quando ativadas resultam em aluminossilicatos amorfo, o qual apresenta elevada resistência mecânica. (ALONSO; PALOMO, 2001; SHI et al. 2011; LANGARO, 2016);
- Sistema alcalino terroso: possui como produto final o gel de C-S-H formado pela ativação do material precursor por meio de solução alcalina. Forma compostos ricos em cálcio, geralmente acima de 35% (ALONSO; PALOMO, 2001; SHI et al. 2011; PROVIS; DEVENTER, 2014; LANGARO, 2016). O principal exemplo desse sistema, conforme Caetano (2021), é a escória de alto forno, objetivo de estudo deste trabalho.

2.2 Ligantes à base de escória álcali-ativada

A escória de alto-forno é o material precursor mais utilizado, dentre os materiais do sistema álcali-ativado com alto teor de cálcio, conforme Moraes (2019), possuindo uma concentração de cálcio entre 35 – 40%. Metha (2003) e Neville (2013) definem escória de alto-forno como um subproduto da indústria siderúrgica, originado na fabricação do ferro-gusa, no entanto, trata-se de um material não metálico, essencialmente constituído de silicatos e aluminatos de cálcio e magnésio, possui impurezas oriundas dos alto-fornos, como por exemplo: minério de ferro, coque, fundente – basicamente calcário e dolomita – apresentando, devido ao resfriamento brusco, microestrutura vítrea (amorfa) e consequentemente, reativa (MEHTA; MONTEIRO, 2001; DAL MOLIN, 2005). Puertas (1995) evidencia as vantagens e desvantagens desse tipo de cimento, quando comparado ao cimento Portland (ver Tabela 1).

Tabela 1 – Vantagens dos cimentos e concretos de escória álcali-ativada em comparação aos de cimento Portland

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Maior resistência mecânica e ganho acelerado de resistência à compressão	Rápido endurecimento
Menor calor de hidratação	
Menos permeável	
Melhor comportamento frente a carbonatação	Possibilidade de que se produza maior reação álcali-agregado
Maior resistência ao processo de gelo-degelo	
Maior resistência a elevadas temperaturas	
Maior resistência química	Maior retração e formação de microfissuras
Maior resistência mecânica na zona de transição	
Maior proteção de passivação	
Resistência bacteriológica e biocida	Maior formação de eflorescências
Menor custo para a produção	
Maior economia de energia	

Fonte: Adaptado de Puertas (1995).

Porém, diversas características influenciam no potencial aglomerante dos cimentos de escória, como por exemplo, a finura do material precursor (TALLING; BRANDSTETR, 1989), sua composição química (CINCOTTO; BATTAGIN; AGOPYAN, 1992; JOHN, 1995; MELO NETO, 2002; SUN et al., 2022), teor de fase vítrea (CINCOTTO; BATTAGIN; AGOPYAN, 1992; JOHN, 1995; SUN et al., 2022), etc, sendo a sua capacidade aglomerante diretamente proporcional a velocidade de dissolução do material precursor (MARTINS, 2016).

O estudo de Wang e Scrivener (1995) já evidenciava este fato, relacionando o desempenho do produto final diretamente com a natureza e concentração do ativador utilizado, uma vez que este material possui a finalidade de acelerar a solubilização da escória de alto-forno, contribuindo para a formação de hidratos estáveis de baixa solubilidade, auxiliando na formação de uma estrutura compacta (JOHN, 1995; PUERTAS, 1995).

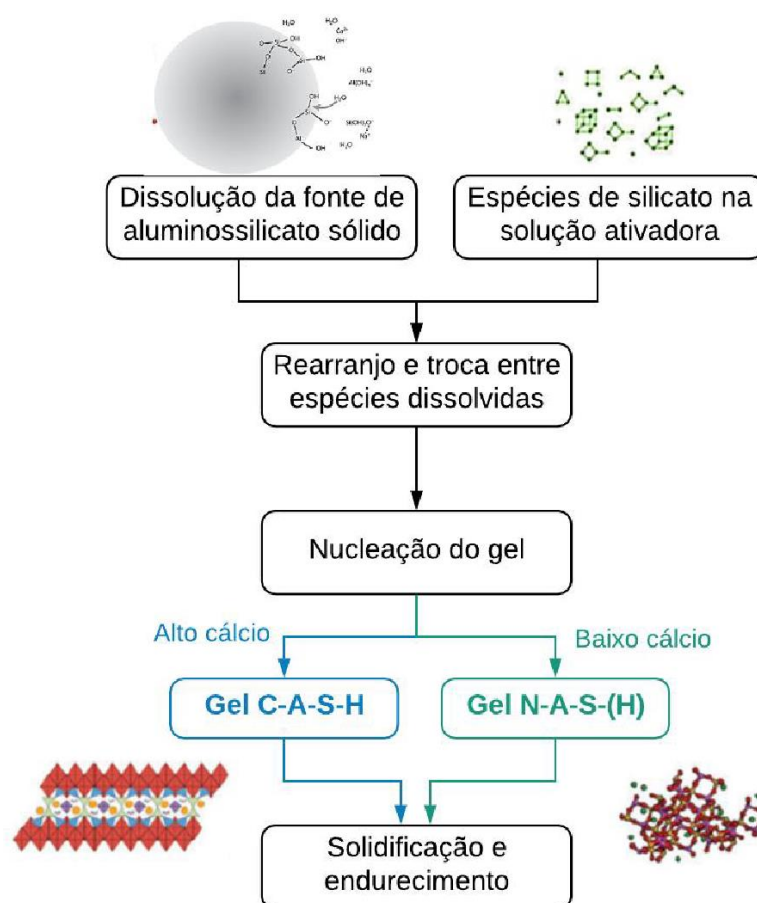
Apesar de tantas variáveis envolvidas na fabricação de cimentos de escória álcali-ativada, Shi et al. (2011) evidenciam que, se projetados de forma adequada, estes ligantes manifestam melhor desempenho do que os de cimento Portland, sobretudo em ambientes corrosivos.

2.2.1 Ativação Alcalina

O processo de ativação alcalina remonta a Purdon (1940 *apud* PUERTAS, 1995) e conforme John (1995) e Melo Neto (2002; 2008), dentre os ativadores alcalinos mais antigos encontram-se a cal hidratada, o cimento Portland, os sulfatos de cálcio hidratado – como por exemplo a gipsita, o hemidrato e a anidrita -, os hidróxidos de metais alcalinos, os silicatos alcalinos de sódio ou potássio e ainda, a combinação desses elementos.

A Figura 1 demonstra o processo de ativação alcalina para um precursor do tipo aluminossilicato sólido originando géis de alto teor de cálcio (sistema alcalino terroso) e baixo teor de cálcio (sistema alcalino ou geopolímero). Inicialmente há o processo de dissolução da fonte de aluminossilicatos que se combinam e se rearranjam ao entrar em contato com o silicato da solução ativadora, originando o início da nucleação do gel; para os sistemas com alto teor de cálcio será formado um gel C-A-S-H (gel de silicato de alumina e cálcio hidratado) e, para os sistemas de baixo teor de cálcio haverá, como resultante da reação, um gel de aluminossilicatos. Após estas reações, ocorrerá a solidificação e endurecimento dos componentes. Resumidamente, Provis e Deventer (2007) definem os ativadores alcalinos como sendo materiais constituídos, em sua maioria, de hidróxidos e silicatos com elevado valor de pH. Por outro lado, o processo de ativação alcalina é definido por Pinto (2004) como sendo uma reação química de hidratação dos aluminossilicatos com um metal alcalino ou alcalino-terroso, sendo este último denominado de ativador químico, sendo classificados de acordo com sua composição.

Figura 1 – Processo e reação de ativação alcalina, originando géis de alto teor de cálcio e baixo teor de cálcio.



Fonte: Adaptado de PROVIS; BERNAL (2014).

Segundo Sun et al. (2022) as características dos ativadores são determinantes para as propriedades finais do produto, assim sendo, são diversos os estudos que discorreram a respeito da ativação alcalina e buscaram verificar o ativador que propiciasse um produto final com melhor desempenho mecânico e químico, sendo evidenciado, segundo Melo Neto (2002; 2008), Pacheco-Torgal (2014), Provis e Deventer (2014), Martins (2016), Mastali et al. (2018), Sahin, Erdogan e Bayer (2018) e Araújo Júnior (2019) que o silicato de sódio provou-se ser o que apresenta melhor performance em sua resistência mecânica e química, sendo este o escolhido para a execução deste trabalho.

Além disso, a respeito do silicato de sódio, Provis e Deventer (2014) evidenciam sua versatilidade, uma vez que existem diversas maneiras de se manipular sua composição originando diversos efeitos na estrutura do ligante formado, uma vez que, sua composição química afeta diretamente a solubilidade dos compostos e altera o pH do mesmo, a saber: o pH das soluções cresce com a elevação do teor de Na_2O e, conseqüentemente diminui com o crescimento do módulo de sílica (JOHN, 1995).

2.2.2 Produtos hidratados

Os produtos hidratados oriundos da hidratação da escória álcali-ativada são influenciados pela composição do material precursor e pela natureza dos ativadores (SHI; DAY, 1995), no entanto, conforme Richardson et al. (1994), John (1995), Wang et al. (1995), Melo Neto (2002), Ben Haha et al. (2012), Moraes (2019), o principal produto da hidratação da escória trata-se do gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Diversos outros produtos secundários também são formados, como por exemplo a hidrocalcita (mais comum), o monossulfoaluminato de cálcio hidratado, a hidrogranada, o aluminato tetracálcio, o monocarboaluminato de cálcio e em menores quantidades, a stratlingita (C_2ASH_8) também foi encontrada (RICHARDSON et al., 1994; JOHN, 1995; WANG et al., 1995; MELO NETO, 2002; BEN HAHHA et al., 2012; PACHECO-TORGAL, 2014; MORAES, 2019).

Segundo Melo Neto (2008), a cinética do processo de hidratação e a natureza da mesma são similares as verificadas para o cimento Portland, e diversos outros autores corroboram o mesmo, como por exemplo Shi et al. (2011), Puertas et al. (2011), Palomo et al. (2014), Provis, Palomo e Shi (2015) e Moraes (2019). O desenvolvimento da reação de hidratação do cimento de escória álcali-ativada, de acordo com Provis (2018), segue o padrão verificado para os sistemas com alto teor de cálcio, a saber: inicia-se com a dissolução das partículas do material precursor, devido ao alto pH da solução ativadora; em seguida verifica-se o processo de nucleação e crescimento da fases originadas e, posteriormente, devido a dinâmica química de equilíbrio e difusão de espécies reativas, em reações progressivas, há a formação de espécies reativas, à medida que o tempo de cura se prolonga – processo semelhante ao verificado para o cimento Portland.

Existem apenas algumas diferenças entre os cimentos de escória e os de cimento Portland, que conseqüentemente, influenciam diretamente no produto final obtido. Dessas distinções pode-se citar a predominância de C-S-H fortemente ligado a hidrocalcita – enquanto que no cimento Portland há a presença significativa de outros compostos, como o hidróxido de cálcio, a etringita, a hidrogranada, etc.; a relação Ca/Si - que para os cimentos de escória é verificado um valor de 1 a até 1,2, enquanto que para o cimento Portland esta relação está entre 1,5 e 1,8. Há ainda a incorporação de álcalis do ativador no C-S-H resultante da ativação alcalina da escória; a morfologia distinta verificada para o C-S-H formado em cada caso – o cimento de escória apresenta estrutura de textura lisa e granular ou folicular, enquanto que a verificada no cimento Portland apresenta uma morfologia fibrilar, entre outros (TAYLOR, 1997; JOHN, 1995; WANG et al., 1995; SHI; DAY, 1995; RICHARDSON; CABRERA, 2000;

BROUGH; ATKINSON, 2002; MELO NETO, 2002, CHEN; BROUWERS, 2007, PUERTAS et al., 2011; BEN HAHHA et al., 2012, PROVIS; PALOMO, SHI, 2015).

2.2.3 Propriedades dos ligantes de escória álcali-ativada

Com vistas a propor um substituinte ao cimento Portland torna-se necessário verificar se os novos materiais atendem aos requisitos técnicos básicos para sua aplicação, conforme o setor da construção civil, sendo primordial a verificação das principais propriedades exigidas, tais como, resistência mecânica, durabilidade, permeabilidade, tempo de cura, trabalhabilidade e outras, uma vez que, a depender da matéria-prima empregada e dos processos adotados, os materiais álcali-ativados podem apresentar uma pluralidade de propriedades e características, conforme mencionado anteriormente. Visando uma melhor compreensão das propriedades apresentadas pelos ligantes de escória álcali-ativadas, destacam-se algumas características apresentadas no estado fresco e endurecido conforme segue.

2.2.3.1 Propriedades no estado fresco

Tratando-se das propriedades no estado fresco, as de maior impacto para a utilização dos ligantes de escória álcali-ativada são trabalhabilidade e tempo de pega, uma vez que estas limitam sua aplicação (ARAÚJO JÚNIOR, 2019). Diversos autores analisaram as propriedades apresentadas pelos ligantes a base de escória álcali-ativada e verificaram um tempo de início de pega variável entre 15 e 30 minutos (WANG et al., 1995; MITHUN; NARASIMHAN, 2014; PUERTAS et al., 2018). Também foi evidenciado uma menor trabalhabilidade inicial para este tipo de ligante (COLLINS; SANJAYAN, 2000), além de uma relação existente entre o módulo de sílica e a concentração do ativador com a trabalhabilidade do material (MITHUN; NARASIMHAN, 2014; ARAÚJO JÚNIOR, 2019). O aumento do módulo de sílica, para um mesmo teor de Na_2O , diminui a trabalhabilidade das misturas, e a elevação do teor de Na_2O também ocasiona a diminuição da mesma, conforme Zhang et al. (2018).

Assim sendo, percebe-se, com base nos estudos apresentados, que os ligantes de escória álcali-ativada possuem tempo de início de pega inferior e menor trabalhabilidade quando comparado ao de cimento Portland. Verifica-se, ainda, a influência do teor de silicato de sódio e do módulo de sílica para a manutenção do tempo de início de pega e sua consistência.

2.2.3.2 Propriedades no estado endurecido

Tratando-se das propriedades no estado endurecido, Zhang et al. (2018) mencionam que os materiais álcali-ativados apresentam boa resistência mecânica, especialmente os que utilizam como material precursor a escória de alto-forno, podendo vir a superar a resistência verificada para os de cimento Portland (JIAO et al., 2018; MORAES, 2019; SOUSA, 2021); Azevedo et

al. (2020 e 2021) ressalta a baixa permeabilidade deste tipo de material, Sousa (2021) evidencia a elevada durabilidade e a maior resistência química frente ao ataque de sulfatos e ácidos.

Contudo, referindo-se a classe dos materiais álcali-ativados, incorporando o metacaulim, as cinzas volantes, a escória de alto-forno e demais materiais passíveis de ativação alcalina, salienta-se que as propriedades anteriormente mencionadas são influenciadas por diversos fatores, como por exemplo, o tipo e o teor do ativador, a concentração de Na_2O , o módulo de sílica e o tipo do material percussor utilizado.

Referindo-se a porosidade do material, Melo Neto (2008) evidencia um teor de poros totais inferior ao apresentado pelo cimento Portland, com distribuição diferenciada na matriz do ligante, apresentando acentuado teor de poros localizados na faixa de mesoporos, conforme explicitado por Shi e Day (1995) e confirmado por Collins e Sanjayan (2001).

Conforme os mesmos autores, os ligantes à base de escória possuem porosidade total constituída de 95% de mesoporos, enquanto que o cimento Portland de alta resistência inicial apresenta apenas 54% de poros nesta faixa de diâmetro, o que conforme Wang et al. (1995) propicia a baixa permeabilidade da escória álcali-ativada, favorecendo a durabilidade do mesmo, uma vez que o valor de diâmetro limite¹ encontra-se também na faixa de mesoporos (SATO, 1998).

Essa porosidade singular, verificada para os ligantes de escória álcali-ativada, possui como principal fator causador a predominância, quase que total, da formação de géis de C-S-H e hidrotalcita dentre os produtos hidratados (YOUNG, 1988; MELO NETO, 2008; BEN HAHA et al. 2011) e consequentemente, menor organização cristalina (JOHN, 1995).

Ainda evidenciando o fator durabilidade, Juenger et al. (2011) relacionou esta propriedade com o processo de cura adotado, evidenciando a necessidade de maior controle, principalmente em materiais com maior teor de água, a fim de se obter uma estrutura de poros mais refinada e favorável.

2.3 Retração em sistemas álcali-ativados

Uma vez que os sistemas que se utilizam de ativação alcalina apresentam grande diversidade no que concerne aos ativadores empregados e suas concentrações, bem como aos materiais precursores utilizados, há grande variação nos mecanismos de retração observados, entretanto a grande parte dos estudos demonstram elevada retração para os ligantes álcali-ativados, em comparação aos de cimento Portland (COLLINS; SANJAYAN, 2000;

¹ Diâmetro limite – menor dimensão de poro acima da qual se estabelece um percurso de poros conectados, determinado pela inflexão da curva de porosidade acumulada.

PALACIOS; PUERTAS, 2007; MELO NETO et al., 2008; CARTWRIGHT et al., 2013; LEE et al., 2014; CARTWRIGHT et al., 2015; MA; YE; 2015; YE; RADLINSKA, 2016; YE et al., 2017; FANG et al., 2018; MORAES, 2019, LIANG et al., 2022; XU et al., 2023).

2.3.1 Síntese de retração em sistemas álcali-ativados

Em sistemas álcali-ativados, três são os principais fenômenos que governam a variação volumétrica verificada nestes ligantes:

- a) Retração Química: contração volumétrica ligada a reatividade do material, sendo resultante da menor ocupação dos produtos hidratados em relação ao material imediatamente antes do desencadeamento das reações químicas (LEE et al., 2014; CARTWRIGHT et al., 2015). Sendo influenciado pela concentração do ativador alcalino empregado e pelo módulo de sílica – quanto maior a concentração do ativador, quanto mais elevado o módulo de sílica, tem-se um produto mais reativo com maior retração química (HOJATI; RADLINSKA, 2017; KUMARAPPA et al. 2018);
- b) Retração Autógena: relacionada ao teor de micro e mesoporos da matriz (COLLINS; SANJAYAN, 2000; MELO NETO et al., 2008; LEE et al., 2014), aos mecanismos de reorganização e rearranjo do gel aluminossilicatos (MA; YE, 2015; FANG et al., 2018), ao teor de ativador empregado, uma vez que o aumento da reação do sistema proporcionaria maior reação química com elevação da tensão superficial, reduzindo a umidade relativa interna ocasionando maior estresse capilar (KUMARAPPA et al., 2018);
- c) Retração Hidráulica: relacionado as características físicas do material precursor (formato, tamanho do grão e textura da superfície) devido a maior facilidade de absorção, desprendimento de água e formação de meso e macroporos que facilitaria a movimentação de água livre no interior da matriz do ligante (XIE; AZBAKKALOGU, 2015; YUAN et al., 2017) e a sensibilidade deste material a variação de umidade relativa do ambiente (YE; RADLINSKA, 2016).

2.3.2 Principais fatores para o processo de retração

Moraes (2019) menciona que são diversos os fatores que influenciam no processo de retração de ligantes álcali-ativados, a saber: microestrutura, porosidade, finura, reatividade do material precursor, tipo e teor do ativador utilizado, condições do processo de mistura e cura, temperatura, tempo de cura, etc. A seguir esses fatores são detalhados.

2.3.2.1 Influência da porosidade

A respeito da porosidade, Collins e Sanjayan (2000) ressaltaram em seus estudos a interdependência entre o teor de mesoporos apresentados e a retração verificada, corroborando

a teoria de que a secagem da água dos mesoporos influi diretamente no fenômeno de retração. Os respectivos autores realizaram comparações entre o concreto de escória álcali-ativada e o concreto de cimento Portland, buscando relacionar a magnitude do fenômeno de retração com a distribuição e o tamanho dos poros apresentados em cada material, evidenciando uma maior distribuição de poros, cerca de 82%, na faixa de mesoporos para o concreto de escória – que apresentou maior retração –, enquanto que o de cimento Portland apresentou apenas 36,4%, sendo verificada para este menor variação de volume.

Essa relação direta foi verificada por Melo Neto (2008), entretanto o citado autor observou que a distribuição do tamanho de poros foi influenciada pela concentração do ativador utilizado. Lee et al. (2014) também verificou resultados semelhantes, evidenciando o efeito de auto dessecação e tensão capilar que, segundo os autores, seria devido ao elevado volume de mesoporos existentes.

Entretanto, Fang et al. (2018) obtiveram sistemas álcali-ativados com menor retração e maior volume de poros pequenos, demonstrando que a análise do processo de retração não pode ser limitado apenas a auto dessecação da matriz, evidenciando por fim, que os mecanismos de reorganização e rearranjo do gel aluminossilicatos seriam possíveis causadores da retração; e conforme os mesmos, a retração autógena verificada nas primeiras 24 horas seria 70% devido à retração química do material, decorrente das reações do processo de hidratação, esta mesma teoria já havia sido levantada por Cartwright et al. (2015).

2.3.2.2 Influência do material precursor

Xie e Ozbakkaloglu (2015) relacionaram o teor de grão anidro presente na estrutura da matriz com a retração por secagem apresentada pelo material, uma vez que, conforme os mesmos, a água presente no grão anidro possuiria maior facilidade de evaporação, fator que não ocorreria com água quimicamente combinada. Os autores mencionados também evidenciaram que o tamanho da partícula do material precursor, sua porosidade e a textura de sua superfície interfeririam diretamente no mecanismo de retração, pois ao apresentar facilidade de absorção de água apresentaria, conseqüentemente, maior perda de humidade, fator também defendido por Yuan et al. (2017).

2.3.2.3 Influência do ativador alcalino

Analisando a influência do ativador, Ma e Ye (2015) demonstraram a diferença existente entre os mecanismos de retração autógena em materiais álcali-ativados e o de auto dessecação em materiais baseados em cimento Portland, resultando na confirmação de que altas concentrações de Na_2O e SiO_2 ocasionariam maior variação volumétrica, seja por retração

autógena ou por secagem. Além disso, Ye et al. (2017) ressaltam que a mudança do ativador ou do teor empregado afetam diretamente a estrutura de poros, bem como as propriedades mecânicas apresentadas pelo material, interferindo diretamente no fenômeno de retração observados. São verificados um maior refinamento de poros com consequente aumento de forças capilares quando utilizado silicato de sódio e, ainda, pela elevação do teor de ativador há o aumento da retração observada, pois dosagens com alto teor de Na_2O e elevado módulo de sílica proporcionaria maior quantidade de material precursor reagindo, elevando a tensão superficial dos poros (YE et al., 2017; HOJATI; RADLINSKA, 2017; KUMARAPPA et al., 2018). Kumarappa et al. (2018) evidenciam que esse aumento da tensão superficial dos poros é resultante da elevação da quantidade de íons de sódio e/ou potássio livres que originariam água adsorvida quando combinados com a água livre presente na mistura, ocasionando a diminuição da umidade relativa interna, resultando em maior estresse capilar e gerando maiores retrações.

2.4 Mitigação da retração em sistemas álcali-ativados

Diversos são os estudos que buscaram um meio de compensar as retrações em concretos de escória álcali-ativada, podemos citar Melo Neto (2008) que utilizou aditivos redutores e compensadores de retração, Yuan et al. (2014) que fez uso de misturas expansivas compostas de cal hidratada e anidrita, Ye e Radlinska (2017) estudaram meios de se reduzir a retração através de cura térmica e incorporação de produtos expansivos e Song et al. (2016) buscaram mitigar o fenômeno de retração pela incorporação de polímeros superabsorventes a cimentos de escória álcali-ativada, propiciando o fenômeno de cura interna. O citado autor conseguiu reduzir a retração autógena apresentada pelo ligante, porém a resistência mecânica das amostras foi prejudicada.

A incorporação de polímeros ou materiais superabsorventes como meio de se mitigar a retração por auto dessecação tem se mostrado como solução viável conforme explicitado por Ma et al., (2019). Conforme os citados autores, quando a umidade relativa interna dos materiais começa a diminuir, devido ao processo de hidratação do ligante, os materiais superabsorventes tendem a liberar água em espaços criados pela retração química, favorecendo o processo de hidratação, pois atua como depósitos de água no interior da matriz e diminuem a retração do material como um todo (BENTZ; SNYDER, 1999; VARGAS et al., 2015; BALAPOUR et al., 2020) – fenômeno conhecido como cura interna.

O conceito de cura interna foi apresentado em 1991 e pode ser empregado por meio da utilização de polímeros superabsorventes ou por meio do emprego de agregados leves como

pedras-pomes, xistos, perlita expandida ou vermiculita sendo este último o material de estudo empregado nesta pesquisa (MA et al., 2019; BALAPOUR et al., 2020).

Visando a utilização da vermiculita como agente de cura interna, são fatores primordiais para o desempenho a estrutura de poros e o tamanho das partículas, pois interferem diretamente no processo de absorção de água e dessorção (HENKENSIEFKEN, 2008; CASTRO et al., 2011).

2.5 Vermiculita como agente de cura interna

Segundo Koksall et al. (2015) e Rehman et al. (2023), a vermiculita expandida possui propriedades incombustíveis, isolantes (térmicas e acústicas), possui resistência estável, sendo bio-estável à ação de ácidos, apresentando favorável resistência à deformação, e ao ser utilizado na forma foleada (expandida) apresenta ainda, baixo valor de massa específica aparente, baixa densidade, alta absorção de líquidos, elevada área superficial, é um material não abrasivo, de pH neutro e inerte (UGARTE et al., 2005; PERALTA, 2009).

Conforme Ma et al., (2019), por tratar-se de agregado leve, extremamente poroso, de baixa densidade e alta absorção de água, a vermiculita é tida como agente de cura interna, sendo aplicada em ligantes de alto desempenho. Pode ser adicionado a mistura na forma seca ou após pré-saturação, substituindo parcialmente o agregado.

Tratando-se da verificação dos efeitos da cura interna proporcionada pela vermiculita Schackow et al. (2014), Mo et al. (2018) e Yang et al. (2022) verificaram um aumento de resistência mecânica em argamassas contendo vermiculita e atribuíram este fator ao efeito de cura interna proporcionado pela mesma, uma vez que a liberação lenta de água no interior da matriz favoreceria o processo de hidratação e geração de compostos hidratados, mitigando a saída da água presente na matriz. Yang et al. (2022) evidenciou ainda, para os agregados leves, o aumento dos poros capilares, a diminuição da porosidade total, devido ao aumento do grau de hidratação, a redução da retração autógena das argamassas e o aumento da resistência.

2.5.1 Absorção e dessorção de água

A absorção de água dos agregados leves, em específico, a vermiculita – material utilizado no presente estudo – está diretamente relacionada ao teor e distribuição de poros na sua estrutura. Poros maiores do que 1 µm são rapidamente saturados, porém apresentam menor capacidade de retenção de água, enquanto que poros com menor dimensão demonstram maior dificuldade na absorção de água (MA et al., 2019). Quando o agregado leve é incorporado a mistura na sua forma seca, ele começa absorver água da pasta até o início do processo de pega, vindo a absorver a água livre presente na mistura e, em aglomerantes com baixa relação água-

ligante, pode vir a absorver parte da água necessária a hidratação dos compostos, evidenciando a necessidade de pré-umedecimento do mesmo (CASTRO et al., 2011). Conforme Ma, Liu e Shi et al. (2019), com o aumento da quantidade do agregado leve, há o aumento da água absorvida e, conseqüentemente, o efeito de cura interna torna-se mais evidente.

Entretanto, a eficácia da cura interna depende, diretamente, da capacidade de dessorção da água pelo agregado leve, fator determinado pela estrutura de poros do mesmo (HENKENSIEFKEN, 2009; TRTIK et al., 2011; MA et al., 2019). Henkensiefken (2009) menciona que normalmente, os agregados leves superabsorventes possuem poros maiores do que os apresentados pela pasta mesmo em idades iniciais de hidratação, sendo a água do maior poro liberada para suplementar a água capilar utilizada no processo de hidratação.

2.5.2 Efeitos da vermiculita nas propriedades das argamassas

Diversos são os efeitos causados pela substituição parcial do agregado miúdo pela vermiculita. No estado fresco, Koksall et al. (2015), Mo et al. (2018), Barros (2018), Sinharelli (2019) e Liu et al. (2022) ressaltam a diminuição da consistência e aumento da coesão da mistura e evidenciam uma diminuição do peso específico do produto final – uma vez que esta possui estrutura porosa mais leve e com pouca ausência de finos em sua curva granulométrica. Sinharelli (2019), Xu et al. (2015), Cintra (2013) e Silva et al. (2010) demonstram ainda, a necessidade do aumento da relação água-ligante para a manutenção da trabalhabilidade da argamassa conforme o teor de vermiculita incorporada e ressaltam o aumento do teor de ar incorporado nas argamassas à medida que se aumenta o teor de vermiculita,

No estado endurecido, é possível verificar uma diminuição na densidade aparente da argamassas (SILVA et al., 2010; CINTRA, 2013; XU et al., 2015; SINHORELLI, 2019; LIU et al., 2022), com relação a resistência à compressão e à tração na flexão, é possível verificar uma redução à medida que se eleva o teor de vermiculita expandida na argamassa, sendo essa característica atribuída à estrutura deformável, porosa, com vazios acentuados entre lamelas e, conseqüentemente, de menor resistência mecânica (SCHACKOW et al., 2014; SHOUKRY et al., 2016; MO et al., 2018; SINHORELLI, 2019; Liu et al., 2022).

Referindo-se a absorção de água no estado endurecido, traços que incorporaram vermiculita em sua composição apresentaram, comumente, valores maiores, sendo este fator atribuído a natureza porosa da vermiculita expandida, e ainda, a menor taxa de empacotamento verificada para estas argamassas e conseqüentemente maior probabilidade de poros conectados (KHONSARI et al., 2010, KOKSALL et al., 2015; LI et al., 2017; 2010; MO et al., 2018; SINHORELLI, 2019). Também foram verificadas maior interferência nos resultados de

resistência à compressão do que nos de resistência a tração (SINHORELLI, 2019; LIU et al., 2022). Tratando-se da interferência da vermiculita no processo de retração, diversos autores evidenciaram um aumento da retração, como por exemplo Cintra (2013), enquanto que outros estudos mencionaram uma diminuição da retração sofrida pelo material, como Barros (2018). A Tabela 2 fornece o resumo de alguns efeitos observados nas argamassas devido a utilização da vermiculita.

Tabela 2 – Resumo de efeitos da incorporação de vermiculita em argamassas

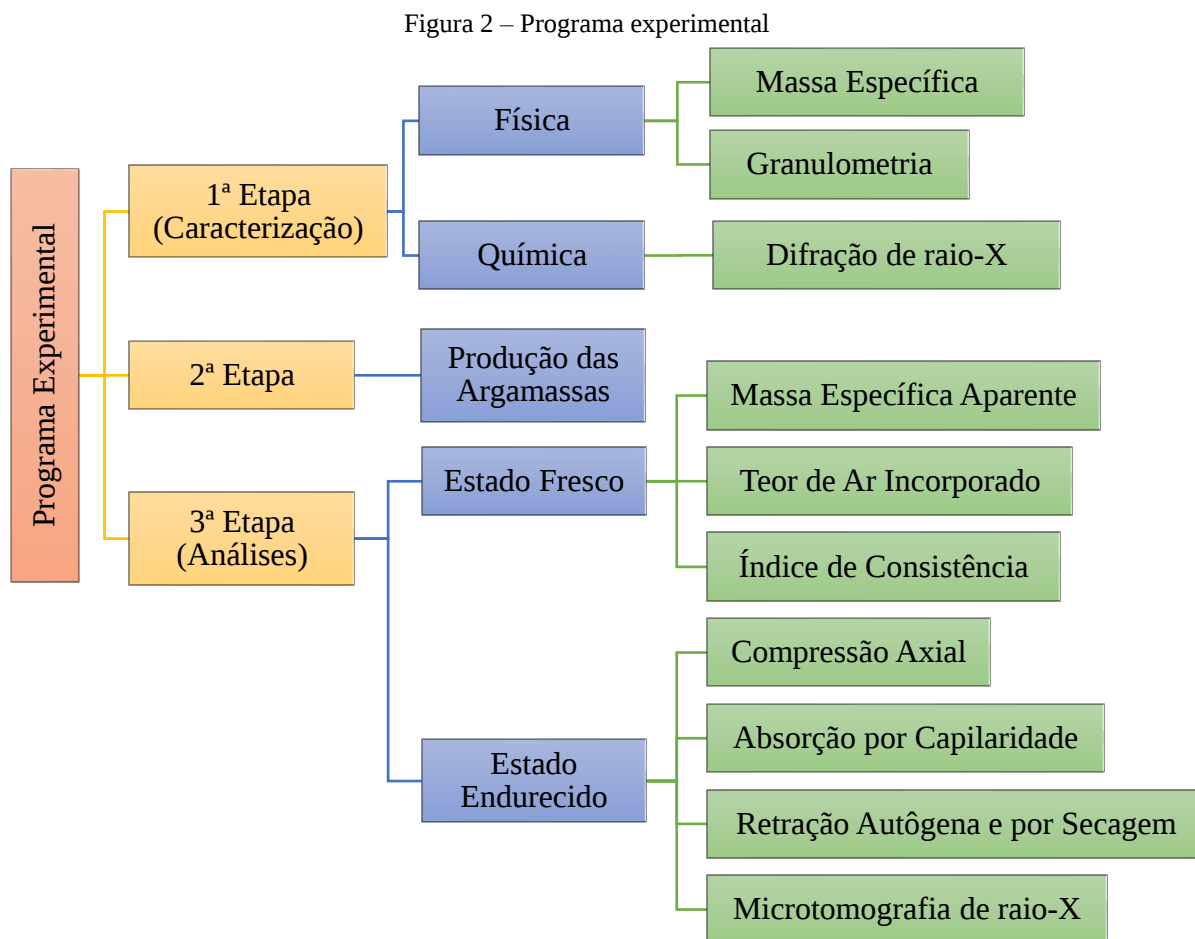
Propriedade	Efeito	Estudo
Consistência	Diminui	Silva et al. (2010); Cintra (2013); Koksall et al. (2015); Xu et al. (2015); Mo et al. (2018); Barros (2018); Sinhorelli (2019).
Densidade de massa no estado fresco	Diminui	Silva et al. (2010); Cintra (2013); Palamar, Barluenga e Puentes (2015) Koksall et al. (2015); Xu et al. (2015); Aguiar (2017); Barros (2018); Sinhorelli (2019).
Teor de ar incorporado	Aumenta	Silva et al. (2010); Cintra (2013).
Retenção de água	Aumenta	Cintra (2013); Barros (2018).
Densidade de massa no estado endurecido	Diminui	Silva et al. (2010); Koksall et al. (2015); Cintra (2013); Xu et al. (2015); Shoukry et al. (2016); Mo et al. (2018); Karatas et al. (2019); Barros (2018); Benli et al. (2020), Liu et al. (2022), Çelik (2023).
Porosidade	Aumenta	Silva et al. (2010); Koksall et al. (2015); Shoukry et al. (2016); Barros (2018); Karatas et al. (2019); Sinhorelli (2019); Benli et al. (2020); Liu et al. (2022), Çelik (2023).
Absorção de água por capilaridade	Aumenta	Koksall et al. (2015); Cintra (2013); Shoukry et al. (2016); Barros (2018); Mo et al. (2018); Karatas et al. (2019); Benli et al. (2020).
Condutividade térmica	Diminui	Cintra (2013); Koksall et al. (2015); Xu et al. (2015); Shoukry et al. (2016); Barros (2018), Liu et al. (2022), Çelik (2023).
Resistência mecânica	Diminui	Silva et al. (2010); Cintra (2013); Koksall et al. (2015); Xu et al. (2015); Shoukry et al. (2016); Barros (2018); Mo et al. (2018); Karatas et al. (2019); Benli et al. (2020); Liu et al. (2022).
Retração	Aumenta	Silva et al. (2010); Cintra (2013)
	Diminui	Klyusov, Fattakhov e Klyusov (2005), Barros (2018), Yang et al. (2022)

Fonte: A autora (2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Programa Experimental

O programa experimental empregado no presente estudo foi desenvolvido em três etapas, como ilustrado na Figura 2.



Fonte: A autora (2023).

A primeira etapa consistiu na descrição e caracterização física e química dos materiais empregados na confecção das argamassas. A segunda etapa referiu-se ao processo de execução dos traços pré-estabelecidos seguindo os procedimentos descritos nas normas existentes para método de mistura, processos de moldagem e cura. A terceira etapa foram analisadas as propriedades das argamassas produzidas nos estados fresco e endurecido, verificando a influência da vermiculita no produto final.

Os ensaios de caracterização dos materiais, a confecção das argamassas, o processo de cura, os ensaios no estado fresco, compressão axial, absorção por capilaridade, e retração autôgena e por secagem foram realizadas no Laboratório de Materiais e Estruturas (LABME) e

no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LABTAG) da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. A microtomografia de raios-X foi executada no Laboratório de Física dos Solos, localizado no Departamento de Energia Nuclear (DEN – UFPE). Os detalhes da metodologia empregada são apresentados nas seções subsequentes.

3.2 Materiais

Os materiais empregados neste estudo foram os seguintes:

- Escória de alto-forno

A escória de alto-forno, utilizada no estudo, foi fornecida pela empresa Cimento Mizu S/A, sendo devidamente estocada em local seco, coberto e fechado de modo a conservar suas propriedades. O material apresentava-se na forma moída (Figura 3) e suas características físicas e químicas foram fornecidas pela empresa e constam na Tabela 3.

Figura 3 – Escória de alto-forno moída



Fonte: A autora (2023).

Tabela 3 – Caracterização físico-química da escória de alto forno

Óxidos	Média (%)	Massa Específica (g/cm ³)
CaO	42,33	2,89
SiO ₂	38,46	Superfície Específica - Blaine (cm³/g)
Al ₂ O ₃	10,50	4,647
Fe ₂ O ₃	0,40	Índice de Finura - #200 (%)
MgO	6,96	0,07
K ₂ O	0,10	Resíduo na peneira #325 (%)
Na ₂ O	0,10	1,33

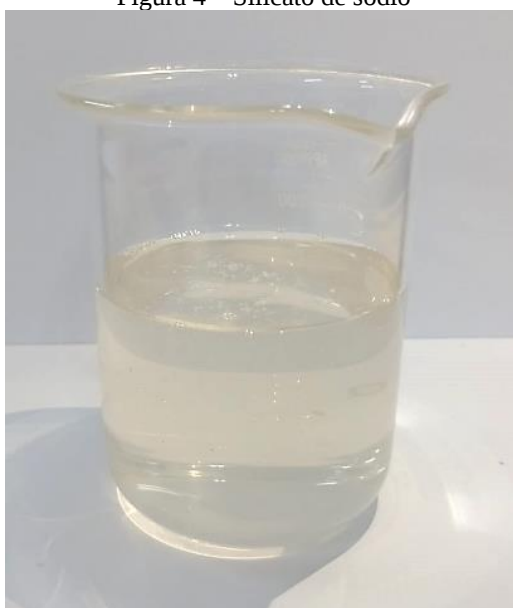
Fonte: Cimento Mizu (2018).

- Silicato de sódio

O silicato de sódio trata-se um material líquido em temperatura ambiente, viscoso e amarelado (Figura 4). O material foi proporcionado pela Pernambuco Química S/A e suas especificações técnicas, fornecidas pela empresa, estão listadas na Tabela 4.

Este ativador foi escolhido por ser um dos mais indicados na literatura e apresentar bons resultados na ativação alcalina de escórias, conforme os estudos de Melo Neto (2002; 2008), Pacheco-Torgal (2014), Provis e Deventer (2014), Martins (2016), Mastali et al. (2018), Sahin, Erdogan e Bayer (2018) e Araújo Júnior (2019).

Figura 4 – Silicato de sódio



Fonte: A autora (2023).

Tabela 4 – Especificações técnicas do silicato de sódio

Determinação	Resultado
Estado Físico (25°C)	Líquido
Coloração	Amarelado
Alcalinidade – Na ₂ O (%)	15,51
Sílica – SiO ₂	33,95
Módulo de Sílica	2,19
Densidade	1,63

Fonte: Pernambuco Química (2021).

- Hidróxido de sódio

Para a realização do controle do módulo de sílica, foi utilizado o hidróxido de sódio P.A., com teor mínimo de 97%, fornecido pela empresa Química Moderna, e possuindo formato de pérolas.

- Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia quartzosa proveniente da cidade de Recife – PE (Figura 5).

Figura 5 – Agregado miúdo



Fonte: A autora (2023).

- Vermiculita

A vermiculita empregada (Figura 6) foi fornecida pela empresa Portal da Acústica, sendo classificada como superfina e apresentando teor de umidade de 7%.

Figura 6 – Vermiculita expandida



Fonte: A autora (2023).

- Desmoldante

Utilizou-se como desmoldante o Ortolan Basic 718, fornecido pela MC-Bauchemie Brasil. Trata-se de emulsão aquosa à base de óleos minerais, adequada ao uso em formas metálicas. As características do desmoldante, fornecidas pelo fabricante, estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações técnicas do desmoldante

Determinação	Resultado
Cor	Branco
Massa Específica (g/cm ³)	0,96
Consumo (ml/m ²)	10 a 15
Estado	Líquido

Fonte: MC-Bauchemie Brasil (2021).

3.3 Métodos

3.3.1 Caracterização dos materiais

A seguir serão apresentados os processos utilizados na caracterização dos materiais empregados.

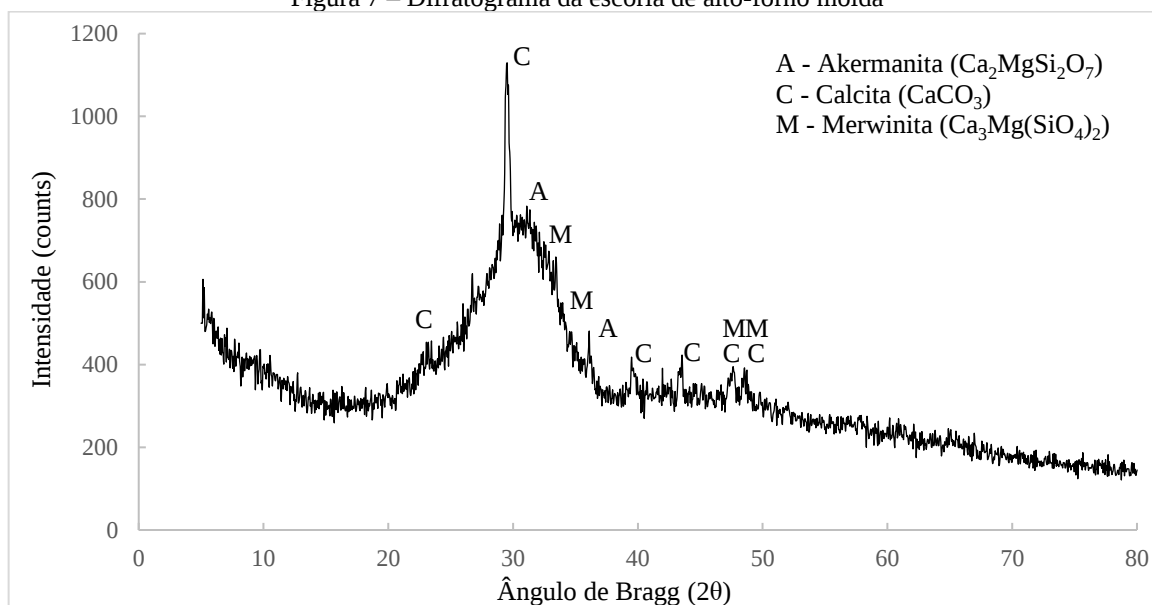
3.3.1.1 Escória de alto-forno

O primeiro ponto a ser analisado no material precursor foi quanto a seu tipo. Ao analisar os dados de caracterização físico-química da escória (expressos na Tabela 3.2), e conforme Pacheco-Torgal (2014), pode-se classificar a escória como sendo do tipo básica, uma vez que sua relação $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ é igual a 1,28.

Foi realizada a caracterização do material por meio de difração de raios-X (DRX), de modo a obter a mineralogia do material e analisar sua reatividade. O resultado está expresso na Figura 7. O aparelho utilizado tratou-se de um difratômetro da marca Bruker, modelo D2-Phaser, com radiação $\text{Cu } \alpha$, possuindo comprimento de onda 1,54 Å. As configurações utilizadas nos ensaios foram: passo angular de 0,05°, velocidade de varredura de 5,2°/min, faixa angular de 5–80° (2 θ), velocidade de rotação do goniômetro de 15 rpm, feixe convergente de 1 mm, *air-scatter* de 3 mm, e filtro de Ni de 0,5 mm. O *air scatter* e o filtro de Ni foram utilizados para diminuir os efeitos da fluorescência do Fe.

No difratograma obtido (Figura 7), é possível verificar a presença de um halo amorfo com centro localizado, aproximadamente, no ângulo 2 θ de 30°, bem como a presença de picos cristalinos correspondentes às espécies químicas akermanita, calcita e merwinita, evidenciando a alta reatividade do material. O ensaio de DRX foi realizado no LABTAG, da UFPE.

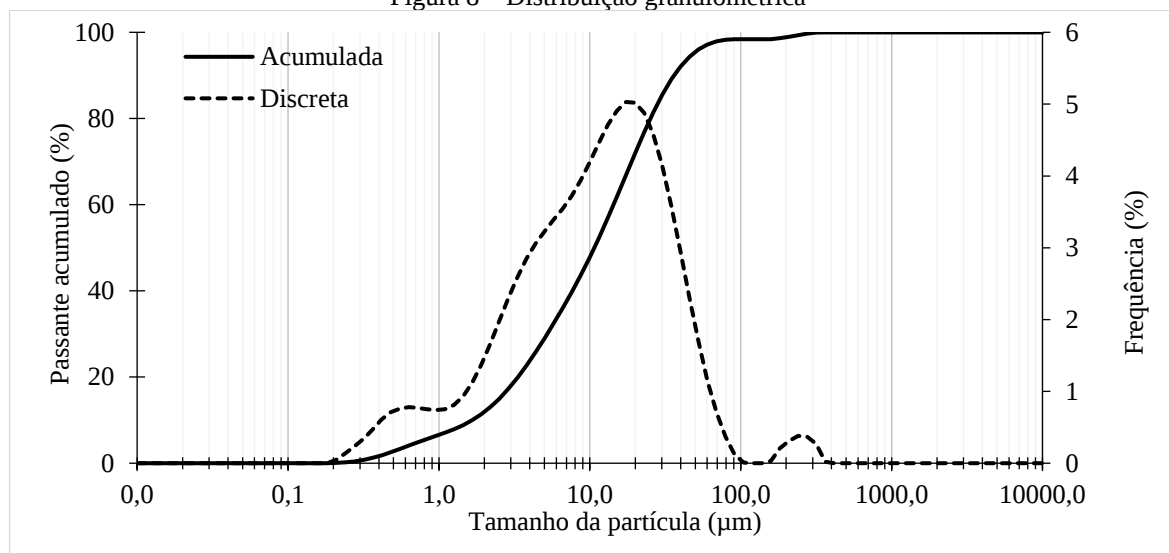
Figura 7 – Difratoograma da escória de alto-forno moída



Fonte: A autora (2023).

A Figura 8 ilustra a distribuição granulométrica das partículas obtida por granulometria a laser, no Laboratório de Tecnologia Mineral – LTM da UFPE.

Figura 8 – Distribuição granulométrica



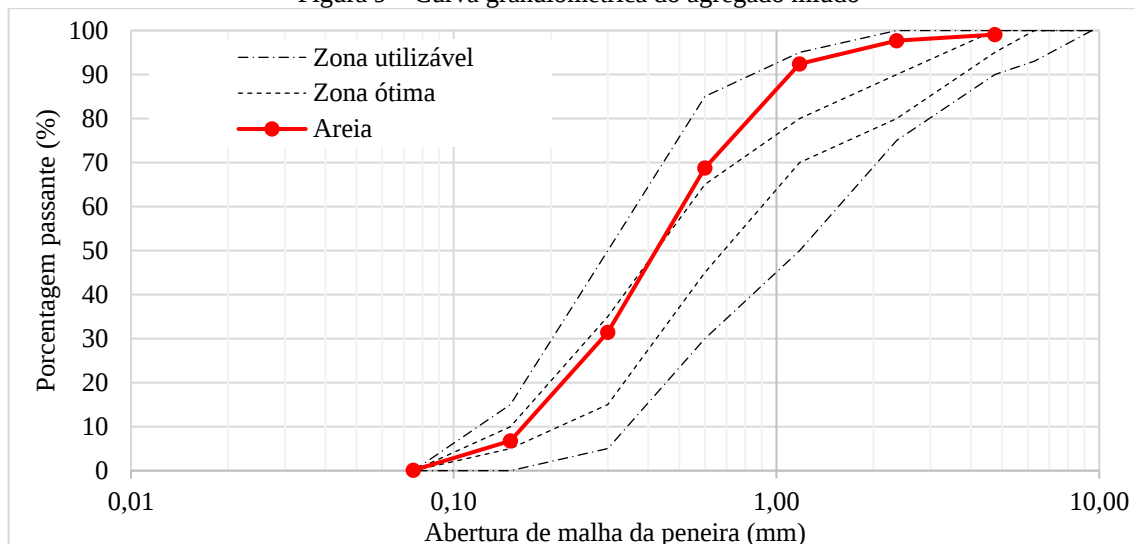
Fonte: A autora (2023).

3.3.1.2 Areia

A distribuição granulométrica da areia utilizada está ilustrada na Figura 9 e suas características físicas e metodologias empregadas são apresentadas na Tabela 6. Para um maior controle de qualidade, a areia foi previamente lavada, seca em estufa por 48 h a $105 \pm 5^\circ \text{C}$, posteriormente seca à temperatura ambiente por 24 h, peneirada para remoção de partículas

com dimensão superior a 4,8 mm e quarteada para a obtenção de uma quantidade de material suficiente para a realização de cada ensaio e mistura.

Figura 9 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: A autora (2023).

Tabela 6 – Características físicas do agregado miúdo

Tabela 3 – Características físicas do agregado miúdo				
Determinação		Metodologia	Resultado	
Massa específica (g/cm³)		ABNT NBR NM 52:2009	2,64	
Massa unitária (g/cm³)		ABNT NBR NM 45:2006	1,75	
Dimensão máxima (mm)		ABNT NBR NM 248:2003	2,36	
Módulo de finura		ABNT NBR NM 248:2003	2,04	
d ₁₀		0,17	d ₆₀	0,53
d ₃₀		0,29	d ₉₀	1,14
Coeficiente de uniformidade (Cu)			3,12	
Coeficiente de curvatura (Cc)			0,94	

Fonte: A autora (2023).

As zonas ótima e utilizável apresentadas na Figura 3.6 referem-se à recomendação de distribuição granulométrica apresentada na NBR 7211 (ABNT, 2022) para agregados miúdos para concreto e que podem ser estendidas às argamassas. Pelo formato da curva, é possível verificar sua continuidade e boa graduação. A posição da curva entre as zonas ótima e utilizável evidencia a variação dos tamanhos dos grãos.

3.3.1.3 Vermiculita

A Tabela 7 apresenta o resumo das características da vermiculita expandida utilizada nesta pesquisa e as metodologias empregadas para obtenção dos resultados. Dos dados

mencionados, apesar de o teor de umidade ter sido disponibilizado pela empresa fornecedora, uma nova análise foi realizada para confirmar o valor.

As Figuras 10 e 11 apresentam a curva granulométrica e difratograma da vermiculita expandida, respectivamente. O difratograma evidencia a característica inerte do material (ausência do halo amorfo), bem como a presença de picos cristalinos correspondentes às espécies químicas de vermiculita tipos “a” e “b” e montimorilonita, confirmando a composição química fornecida pelo fabricante. Para a DRX da vermiculita utilizou-se o mesmo equipamento e configurações mencionados na Seção 3.2.1.1 deste trabalho.

A microscopia eletrônica de varredura da vermiculita foi realizada de modo a verificar sua morfologia. As micrografias, obtidas com um microscópio Mira 3 TESCAN da Oxford Instruments utilizando elétrons secundários, evidenciaram a estrutura folheada (Figura 12) desse material.

Tabela 7 – Características físicas da vermiculita expandida

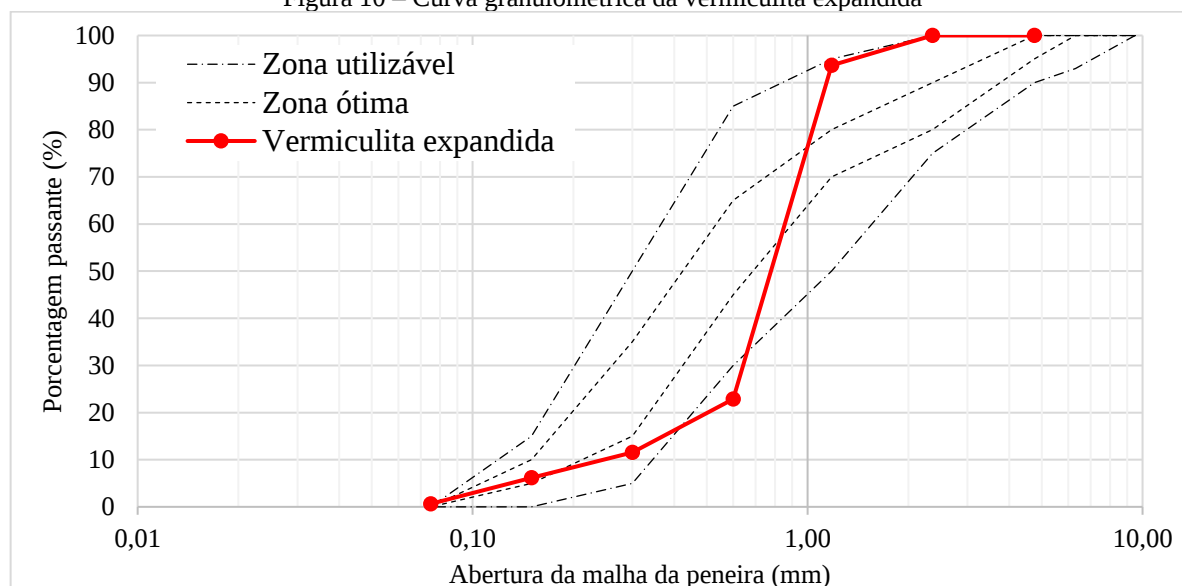
Determinação	Metodologia	Resultado
Dimensão máxima característica do agregado (mm)	NBR 11355:2015 e NBR NM 248:2003	2,36
Módulo de finura	NBR NM 248:2003	2,66
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52:2009	0,875
Massa unitária (g/cm ³)*	NBR NM 45:2006	0,14
Umidade (%)**	NBR 10406:2011	7,00
Absorção de água (%)	NBR NM 30:2001	40,00

*Massa unitária da vermiculita seca e no estado solto

**Fornecido pelo Portal da Acústica

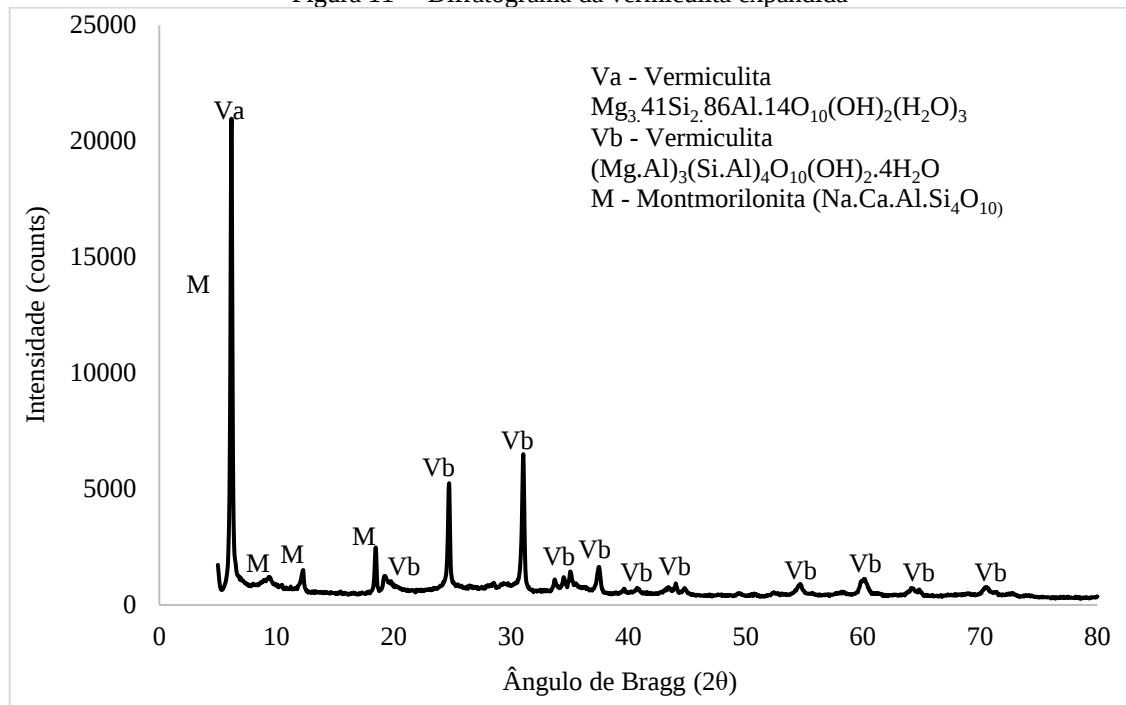
Fonte: A autora (2023).

Figura 10 – Curva granulométrica da vermiculita expandida



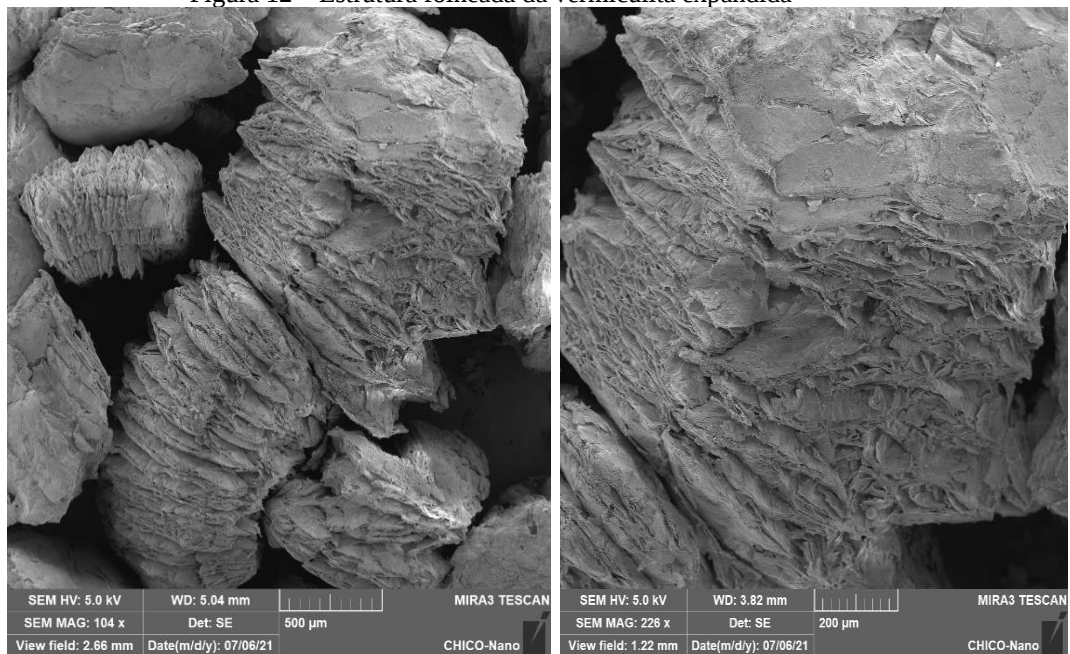
Fonte: A autora (2023).

Figura 11 – Difratograma da vermiculita expandida



Fonte: A autora (2023).

Figura 12 – Estrutura folheada da vermiculita expandida



Fonte: A autora (2023).

3.3.1.4 Água

A água utilizada para a confecção das argamassas foi aquela proveniente de abastecimento local do município de Recife-PE, fornecida pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).

3.3.2 Argamassas

3.3.2.1 Misturas

Inicialmente, foram realizados estudos exploratórios para determinar os parâmetros iniciais para a dosagem das argamassas para a análise da influência da incorporação de vermiculita em argamassas álcali-ativadas. Os parâmetros adotados estão listados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de dosagem adotados

Variáveis	Valor adotado	Justificativa
Relação ligante-agregado	1:2	Adequada às condições de moldagem; Não foi observada exsudação.
Relação água/ligante	0,48	Conforme estudos de Melo Neto (2008), Mo et al. (2018) e Karatas et al. (2019)
Teores de substituição do agregado por vermiculita	5%, 10% e 15%	Para teores mais elevados, a moldagem não foi possível, a mistura apresentou-se pouco coesa e com reduzida trabalhabilidade devido à elevada absorção da água livre pela vermiculita. Informações obtidas nos estudos de Benli et al. (2020), Karatas et al. (2019), El-Gamal et al. (2012) e Silva et al. (2010) também foram consideradas
Teores de saturação da vermiculita	0%, 100% e 200%	Conforme proposto por Ma, Liu e Shi (2019).
Módulo de sílica do ativador alcalino	1,73	Conforme estudos de Melo Neto (2002; 2008).
Teor de Na ₂ O	7%	Adequada à resistência à compressão almejada.

Fonte: A autora (2023).

Optou-se pela adoção da relação ligante/agregado de 1:2, por não resultar em exsudação e por ser utilizada em diversos estudos, como o de Melo Neto (2008). A relação água/ligante foi adotada baseando-se nos trabalhos de Melo Neto (2008), Mo et al. (2018) e Karatas et al. (2019). A vermiculita foi inserida na mistura como substituinte parcial da areia, sendo adotadas as proporções de 5%, 10% e 15%. Esta adoção baseou-se nos ensaios exploratórios iniciais e nos estudos de Benli et al. (2020), Karatas et al. (2019), El-Gamal et al. (2012) e Silva et al. (2010). Nos ensaios exploratórios, verificou-se que teores maiores de substituição do agregado resultariam em reduzida trabalhabilidade devido à elevada absorção da água livre pela vermiculita, como ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Argamassa produzida com substituição de areia por vermiculita.



Fonte: A autora (2023).

A partir dos ensaios estipulados pela NBR NM 30 (ABNT, 2001), determinou-se que a vermiculita poderia absorver valores de água de até 40% de sua massa na situação saturada seca e até 200% na situação seca. Desta forma, optou-se pela utilização da vermiculita nas seguintes situações:

- a) Seca: como fornecido pela fábrica, com teor de umidade de 7%;
- b) 100% de saturação: pré-umedecida com água equivalente a 100% de sua massa;
- c) 200% de saturação: pré-umedecida com água equivalente a 200% de sua massa.

Tendo em vista esses parâmetros e a possibilidade do pré-umedecimento favorecer o fenômeno de cura interna, conforme mencionado por Castro et al. (2011), dois condicionantes foram adotados:

- a) A vermiculita seria pré-umedecida com parte da água da mistura, de acordo com o teor de saturação adotado (100% ou 200%), mantendo a relação $a/l = 0,48$;
- b) A vermiculita seria pré-umedecida com água excedente, elevando a relação a/l da mistura. Para esta condição, a relação a/l seria variável conforme o teor de substituição e o teor de saturação da vermiculita.

Em seguida, as argamassas foram produzidas de acordo com os traços indicados na Tabela 9.

Tabela 9 – Misturas

Nomenclatura	Relação proporcional				Teor de substituição do agregado (%)	Teor de pré-saturação da vermiculita (%)
	I/A	a/I Inicial	a/I Final*	I/V		
V0	1:2	0,48	0,48	1:0	0	0
V5S0	1:2	0,48	0,48	1:0,1	5	0
V10S0	1:2	0,48	0,48	1:0,2	10	0
V15S0	1:2	0,48	0,48	1:0,3	15	0
V5S100 CR	1:2	0,48	0,48	1:0,1	5	100
V10S100 CR	1:2	0,48	0,48	1:0,2	10	100
V15S100 CR	1:2	0,48	0,48	1:0,3	15	100
V5S200 CR	1:2	0,48	0,48	1:0,1	5	200
V10S200 CR	1:2	0,48	0,48	1:0,2	10	200
V15S200 CR	1:2	0,48	0,48	1:0,3	15	200
V5S100 NC	1:2	0,48	0,51	1:0,1	5	100
V10S100 NC	1:2	0,48	0,55	1:0,2	10	100
V15S100 NC	1:2	0,48	0,58	1:0,3	15	100
V5S200 NC	1:2	0,48	0,55	1:0,1	5	200
V10S200 NC	1:2	0,48	0,61	1:0,2	10	200
V15S200 NC	1:2	0,48	0,68	1:0,3	15	200

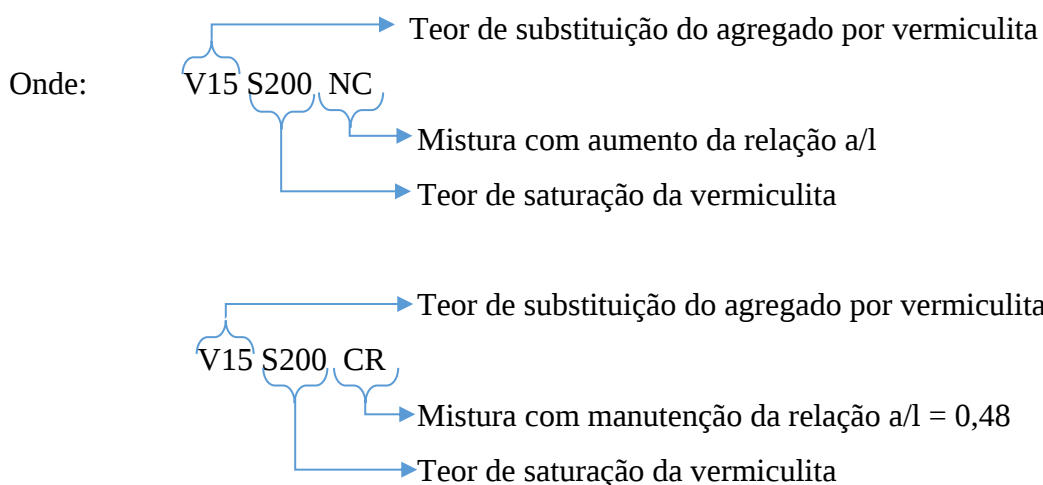
I/A – Relação ligante/agregado

a/I – Relação água/ligante

I/V – Relação ligante/vermiculita

*Misturas com denominação “NC” incorporam vermiculita pré-umedecida com elevação da relação a/I.

Fonte: A autora (2023).



A Tabela 10 apresenta a composição química inicial e final (após redução do módulo de sílica) do silicato de sódio. O processo utilizado para o preparo da solução do ativador seguiu os parâmetros expressos por Melo Neto (2002).

Tabela 10 – Composição química do silicato antes e após a redução do módulo de sílica

Componentes	Silicato de sódio inicial	Silicato de sódio final
Na₂O	15,51 %	16,12 %
SiO₂	33,95 %	27,89 %
H₂O	50,54%	55,99 %
Módulo de Sílica	2,189	1,73

Fonte: A autora (2023).

Salienta-se que o ligante é constituído pela junção do material precursor (escória de alto-forno) e pela parte sólida do ativador alcalino em questão (silicato de sódio) após a redução do módulo de sílica deste. Dada a determinação do teor de 7% de Na₂O para o ligante, sua constituição química correspondeu a 81,1% de escória de alto-forno e a 18,9% da parte sólida do ativador alcalino, sendo o teor de água presente na composição do ativador considerado parte integrante da água total da mistura.

3.3.3 Preparo das Misturas

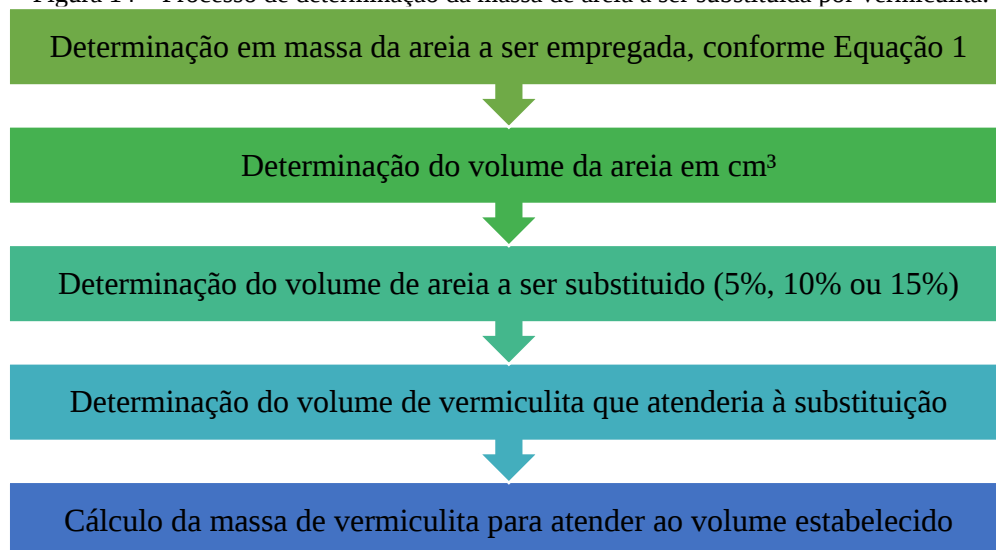
Para o preparo das misturas, inicialmente foi realizada a determinação da massa dos materiais para obter o volume necessário para moldar os corpo-de-prova desejados segundo as proporções de mistura estabelecidas anteriormente, de acordo com a Equação 1.

$$V_{mistura} = \frac{m_{es}}{\gamma_{es}} + \frac{m_{ar}}{\gamma_{ar}} + \frac{m_{ag}}{\gamma_{ag}} + \frac{m_{sil}}{\gamma_{sil}} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde $V_{mistura}$ é o volume absoluto dos materiais sólidos (cm³); m_{es} , m_{ar} , m_{ag} e m_{sil} são as massas da escória, da areia, da água e do silicato de sódio final (g); γ_{es} , γ_{ar} , γ_{ag} e γ_{sil} são as massas específicas da escória, da areia, da água e do silicato de sódio final (g/cm³), respectivamente.

Após determinar os quantitativos de cada material em massa, realizou-se o cálculo das substituições da areia por vermiculita, conforme os teores já mencionados. A substituição ocorreu de modo que o volume de areia substituído correspondesse ao volume de vermiculita empregado, tomando para isso os valores de massa específica dos respectivos materiais, como indicado na Figura 14.

Figura 14 – Processo de determinação da massa de areia a ser substituída por vermiculita.



Fonte: A autora (2023).

O preparo das argamassas de vermiculita expandida ocorreu em laboratório com temperatura de $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e seguiu o procedimento exposto a seguir, adaptado a partir das indicações da NBR 16541 (ABNT, 2016) e com tempo de mistura de 10 min.

- Iniciou-se com a pesagem dos materiais sólidos e líquidos, bem como os necessários para a obtenção do ativador alcalino proposto;
- O ativador alcalino foi preparado misturando-se na proporção necessária o silicato de sódio com módulo de sílica de 2,18, água e hidróxido de sódio, de modo a obter um ativador com módulo de sílica igual a 1,73. O processo de mistura iniciou-se com a dissolução do hidróxido em água, sendo misturado por 3 min; em seguida, o silicato foi adicionado a esta solução, que foi misturada por mais 3 min;
- Para as argamassas com incorporação de vermiculita saturada, a vermiculita foi pré-umedecida pela mistura do material seco com a água por 5 min, conforme o teor de saturação;
- Foram adicionados à cuba do misturador a escória de alto-forno, a vermiculita (a depender da mistura realizada) e 50% da areia;
- Realizou-se a pré-homogeneização manual dos sólidos com o auxílio de espátula por 30 s;
- Colocou-se a cuba no misturador;
- Acionou-se o misturador em velocidade baixa e os materiais foram misturados por 30 s;
- Adicionou-se 75% da água da mistura à argamassa por mais 2 min;
- Interrompeu-se a mistura para raspagem de toda a superfície interna da cuba – atividade realizada em até 90 s conforme NBR 16541 (ABNT, 2016);

- j) Acionou-se novamente o misturador em velocidade baixa, acrescentou-se o ativador alcalino e os 25% de água restantes, usados para lavar o recipiente que continha o ativador, de modo a adicionar todo o material à mistura (25% de água + ativador aderido às paredes do recipiente), prosseguindo por mais 3 min;
- k) Adicionou-se os 50% de areia restantes, misturando por mais 2 min;
- l) Misturou-se por mais 1 min em velocidade alta.

3.3.4 Processo de cura

O processo de cura ocorreu conforme o tipo de propriedade a ser analisada, possuindo similaridade apenas nas primeiras 24 h após moldagem, nas quais todos os corpos de prova foram colocados sobre uma superfície horizontal, rígida, livre de vibrações e de quaisquer ações do meio, sendo cobertos por plástico filme – material não reativo e não absorvente, para mitigar a saída da água. Após este período, houve a desmoldagem. A partir deste ponto, os processos de cura foram diferentes de acordo com a metodologia de ensaio adotada. A Tabela 11 resume essas condições.

Tabela 11 – Condições de cura aplicadas.

Ensaio	Tipo de Cura	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Idade dos corpos de prova
Compressão axial	Submersa	24 ± 2	100	3, 7, 28
Coefficiente de capilaridade e Absorção por capilaridade	Seca	24 ± 2	50 ± 5	28
Retração	Seca	21 ± 2	50 ± 5	1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 14, 21, 28, 56
Microtomografia	Submersa	24 ± 2	100	

Fonte: A autora (2023).

3.4 Caracterização no estado fresco

Os ensaios e métodos realizados para caracterização de argamassas no estado fresco, conforme indicações da NBR 13281 (ABNT, 2005) são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Caracterizações e metodologias empregadas no estado fresco

Determinação	Metodologia
Índice de consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)
Densidade de massa	NBR 13280 (ABNT, 2005)
Teor de ar incorporado	NBR 13278 (ABNT, 2005)

Fonte: A autora (2023).

3.5 Caracterização no estado endurecido

Os ensaios para caracterização no estado endurecido seguiram as metodologias prescritas nas normalizações vigentes, expressas na Tabela 13. As demais informações pertinentes aos ensaios de compressão, análise de retração e microtomografia de raio-X encontram-se descritos nos tópicos subsequentes. A quantidade de corpos de prova confeccionados para os ensaios no estado endurecido e suas respectivas dimensões encontram-se expressos na Tabela 14. Os corpos de prova colocados em cura submersa foram retirados da solução uma hora antes do ensaio, secos com o uso de pano absorvente e deixados ao ar até a execução do ensaio.

Tabela 13 – Ensaios e metodologias empregadas no estado endurecido

Determinação	Metodologia
Coeficiente de capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005)
Absorção por capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005)
Variação dimensional (Retração linear)	NBR 15261 (ABNT, 2005)
	ASTM C 490 (1997)
Resistência à compressão	NBR 13279 (ABNT, 2005)
	NBR 7215 (ABNT, 2019)
Microtomografia de Raio-x	-

Fonte: A autora (2023).

Tabela 14 – Relação de corpos de prova empregados

Ensaio	Formato	Dimensões (cm)	Quantidade (unidades)
Compressão axial	Cúbico	$4 \times 4 \times 4$	384
Absorção e Coeficiente de Capilaridade	Prismático	$4 \times 4 \times 16$	96
Microtomografia de raios-X	Cilíndrico	$\emptyset 5 \times 5$	16
Retração (por secagem e autógena)	Prismático	$2,5 \times 2,5 \times 28,5$	192

Fonte: A autora (2023).

3.5.1 Compressão axial

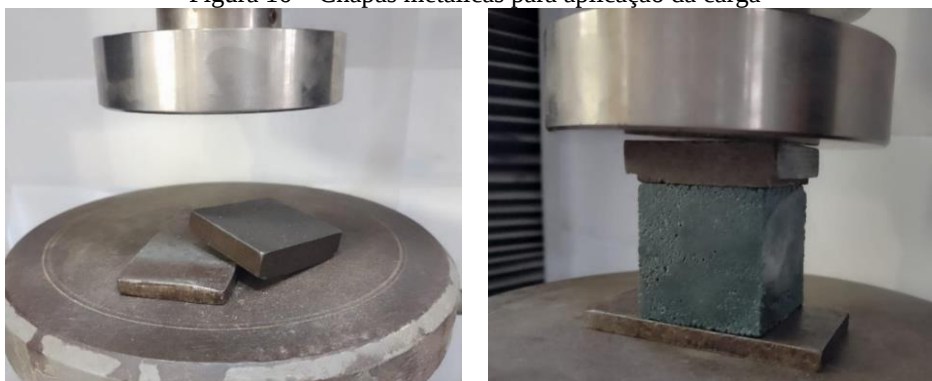
Para o ensaio de compressão axial, foram utilizados corpos de prova cúbicos de $(4 \times 4 \times 4)$ cm (Figura 15) nas idades de 3, 7 e 28 dias, sendo seis corpos de prova para cada idade. Utilizou-se uma máquina servo controlada da marca Shimadzu AGS_X de 300 kN (Figura 17) com a utilização de pequenas chapas metálicas para aplicação da carga (Figuras 16) e foram adotados os parâmetros de ensaio expressos na norma NBR 7215 (ABNT, 2019), conforme recomendação da NBR 13279 (ABNT, 2005).

Figura 15 – Corpos de prova para ensaios de compressão axial



Fonte: A autora (2023).

Figura 16 – Chapas metálicas para aplicação da carga



Fonte: A autora (2023).

Figura 17 – Prensa



Fonte: A autora (2023).

3.5.2 Retração autógena e por secagem

As normas ASTM C 490 (1997) e NBR 15261 (ABNT, 2005) foram utilizadas como referências para a análise da retração. Na tabela 15 são apresentadas as condições de ensaio

para cada norma, bem como as verificadas durante a confecção das argamassas e execução do ensaio – câmara seca.

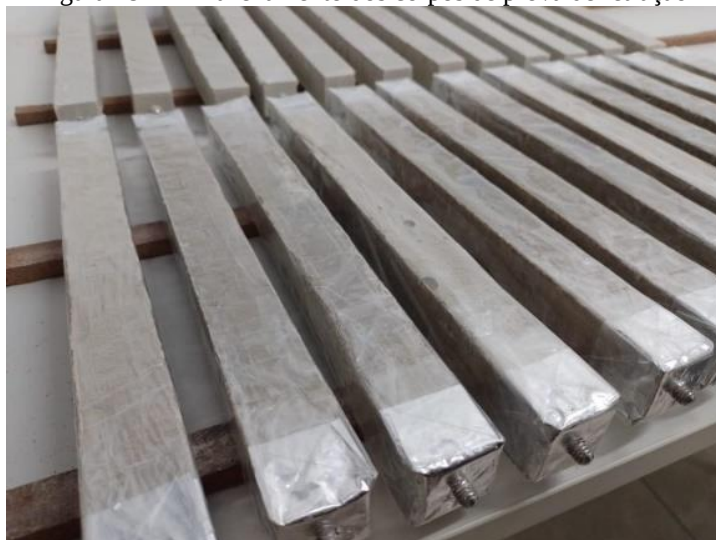
Tabela 15 – Condições de ensaio

Especificação	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)
ASTM C 490 (1997)	20–27,5	Acima de 50
NBR 15261 (2005)	21–25	45–55
Verificada em laboratório	20–24	45–55

Fonte: A autora (2023).

A variação de massa foi medida em balança de precisão de 0,01 g antes de cada leitura de retração. Foram moldados 12 corpos de prova para cada mistura analisada devido à grande variabilidade de resultados inerente ao ensaio e fragilidade dos corpos de prova. Dos 12 corpos-de-prova moldados, 6 foram destinados aos estudos da retração por secagem e 6 foram analisados sob a ótica da retração autógena. Todos foram armazenados em superfície plana, livre de vibrações, e apoiados em suportes de madeira para propiciar a interação de todas as superfícies com o ar, conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Armazenamento dos corpos de prova de retração



Fonte: A autora (2023).

Tratando-se da determinação da retração autógena, devido ao número limitado de referências normativas, utilizou-se o mesmo método de ensaio mencionado anteriormente. Contudo, os corpos de prova foram envelopados para evitar a perda de umidade (Figura 19) usando plástico adesivo (tipo Contact), fita de alumínio com revestimento plástico e fita plástica, de modo a proporcionar vedação ao sistema com resistência ao manuseio, sem interferir no encaixe dos pinos.

Figura 19 – Envelopamento de corpos de prova de retração por secagem (a); Pinos (b)



Fonte: A autora (2023).

A perda de massa dos autógenos foi verificada e considerada insignificante, uma vez que não atingiu valor acima de 0,2% aos 56 dias.

3.5.3 Microtomografia

Para a análise da matriz de poros, foi realizada microtomografia em amostras cilíndricas com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, moldadas conforme a norma NBR 7215 (ABNT, 2019) com modificações (Figura 20). A norma indica a moldagem em quatro camadas com 30 golpes em cada para uma altura de 10 cm. Como os corpos de prova produzidos tinham 5 cm de altura, foram moldados em apenas duas camadas. Os demais procedimentos seguiram conforme normalização específica.

Figura 20 – Corpos de prova para microtomografia



Fonte: A autora (2023).

Após a moldagem, as formas foram cobertas com plástico filme para evitar a saída de água, assim permanecendo por 24 h até a desmoldagem. Após o processo de desmolde, os corpos de prova foram retificados para garantir a altura pretendida e curados em solução saturada de hidróxido de cálcio até completar 28 dias. Em seguida, as amostras foram retiradas da solução, secas com pano absorvente e congeladas por 48 h a uma temperatura de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Com o congelamento das amostras e consequente parada do processo de hidratação, prosseguiu-se à liofilização do material por 48 h para a remoção da água por meio de sublimação (passagem da água do estado sólido para o gasoso em baixa pressão). O liofilizador utilizado foi o da marca Liotop, modelo L101 (Figura 21). Após a liofilização, as amostras foram armazenadas em dessecador e embaladas em saco plástico contendo sílica gel e hidróxido de bário para evitar o contato com a umidade do ar até o momento do experimento (Figura 22).

Figura 21 – Liofilizador Liotop, modelo L101



Fonte: A autora (2023).

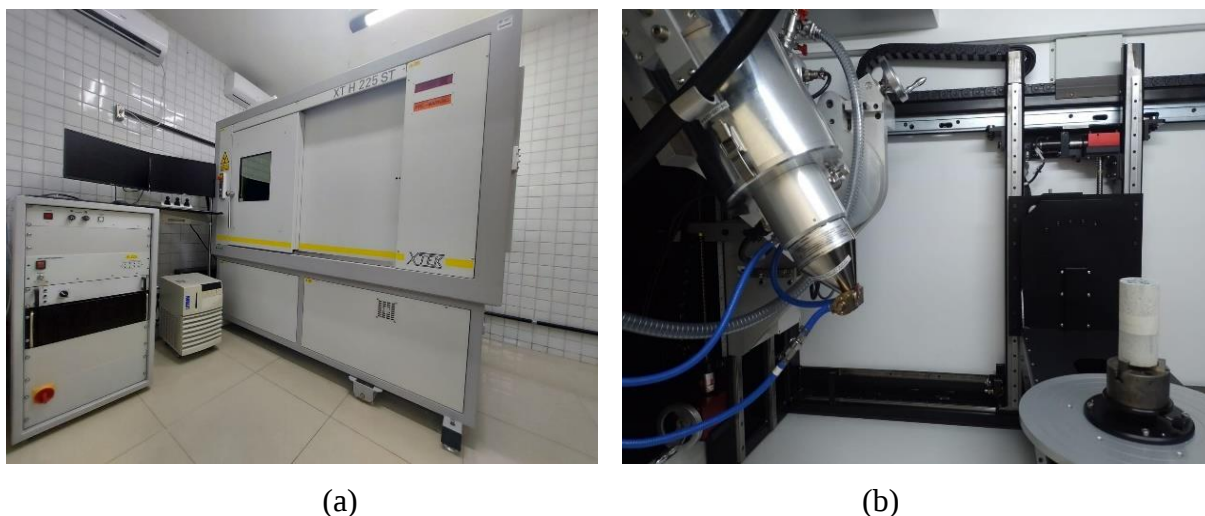
Figura 22 – Amostras identificadas e acondicionadas em saco plástico, com sílica gel e hidróxido de bário



Fonte: A autora (2023).

A aquisição das imagens tomográficas foi realizada por meio do microtomógrafo de raios-X de terceira geração, modelo NIKON XT H 225 ST (Figura 23), pertencente ao Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X do Departamento de Energia Nuclear (DEN) da UFPE e em todo o processo de obtenção das imagens, segmentação e análise de poros foi utilizado o cluster do mesmo laboratório.

Figura 23 – Microtomógrafo: (a) parte externa; (b) parte interna



Fonte: A autora (2023).

Foram utilizados os seguintes parâmetros no processo de aquisição da amostra: tensão de 150 kV, corrente de 125 μ A, tempo de exposição de 500 ms, tamanho de pixel efetivo de 50 μ m, com utilização de filtro de cobre de 0,5 mm de espessura (Figura 24) para minimizar os fótons de baixa intensidade, ou seja, artefatos do tipo endurecimento do feixe (*beam hardening*).

Figura 24 – Filtro utilizado: cobre de 0,5 mm



Fonte: A autora (2023).

Devido à limitação de resolução do equipamento utilizado, com voxels das imagens de $0,05 \times 0,05 \times 0,05 \text{ mm}^3$, volumes de vazios inferiores ao volume do voxel, ou seja, vazios menores do que $1,25 \times 10^{-5}$ não são passíveis de análise. De acordo com a classificação da

IUPAC², vazios com essas dimensões são enquadrados como microporos e mesoporos. Desta forma, apenas os macroporos foram analisados. Devido a essa limitação técnica, a porosidade encontrada pela microtomografia de raios-X não pode ser considerada como sendo a porosidade total da amostra.

O subvolume tridimensional (3D) foi reconstruído utilizando o CTpro 3D XT 3.0.3 (Nikon Metrology NV). No VGStudio MAX 3.4.4 (*Volume graphics*, Heidelberg, Alemanha), as imagens foram convertidas para a escala de Hounsfield e foi utilizado o filtro de Gauss para a minimização de ruídos. O processamento das imagens foi realizado no ImageJ 1.50e (Rasband 1997-2015) sendo utilizado o Microsoft Office Excel 2013 para execução das etapas e armazenamento de resultados. A segmentação (separação da região de interesse) foi realizada no *CT Segmentation* e o histograma gerado foi utilizado para a identificação das distribuições de radiodensidade para cada fase, gerando uma imagem segmentada de vazios. O *CT Segmentation* gerou imagens binárias de 8 bits com voxels de valores 1 ou 2, sendo os vazios representados pelo valor 1 e os não-vazios pelo valor 2. A porosidade foi calculada por meio da relação entre a soma dos volumes dos vazios e o volume do subvolume reconstruído da amostra.

² Classificação de poros conforme IUPAC de acordo com o diâmetro (θ): microporos: $\theta < 2$ nm; mesoporos: $2 \text{ nm} < \theta < 50$ nm; macroporos: $\theta > 50$ nm (IUPAC, 1997).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

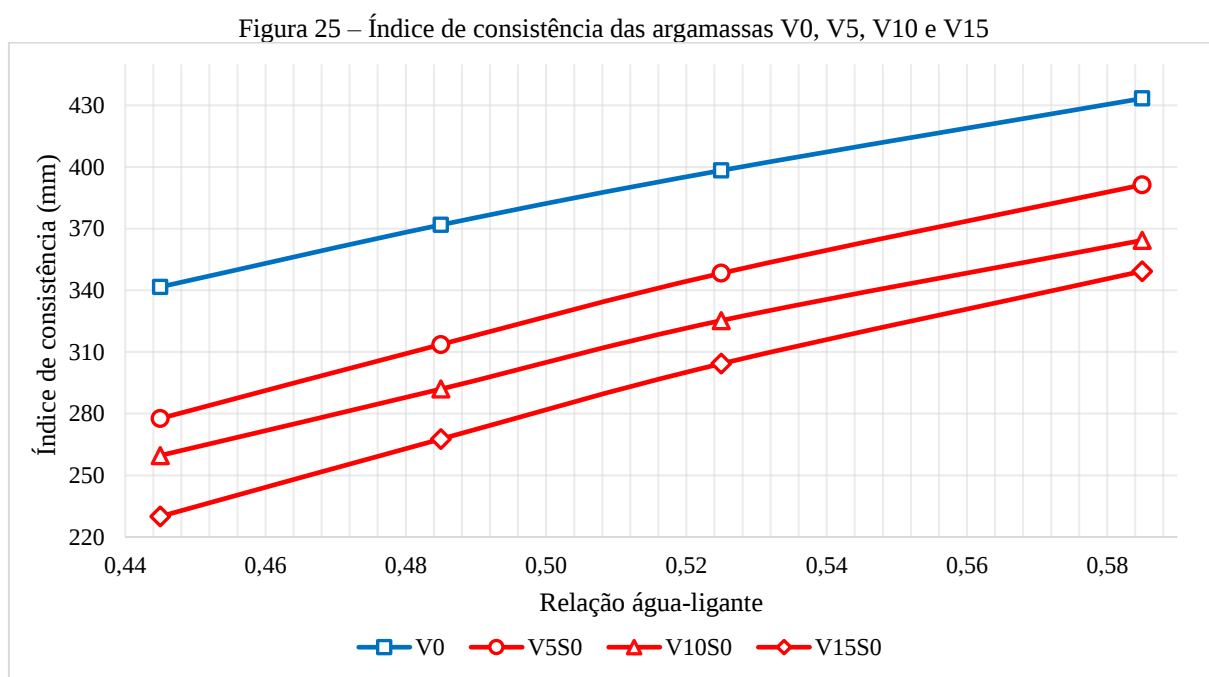
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para cada uma das propriedades verificadas e suas análises, de modo a caracterizar a influência do efeito da incorporação de vermiculita em argamassas de escória álcali-ativada.

4.1 Propriedades no estado fresco

4.1.1 Índice de consistência

O índice de consistência das argamassas está diretamente relacionado à quantidade de água de amassamento presente na mistura. A Figura 25 apresenta o índice de consistência para as argamassas com teores de vermiculita seca igual a 0%, 5%, 10% e 15%. Nesta é possível verificar a enorme diminuição do índice de consistência ocasionado pelo alto poder de absorção da vermiculita, fator mencionado por Silva et al. (2010), Cintra (2013), Koksai et al. (2015), Xu et al. (2015), Mo et al. (2018), Barros (2018) e Sinharelli (2019).

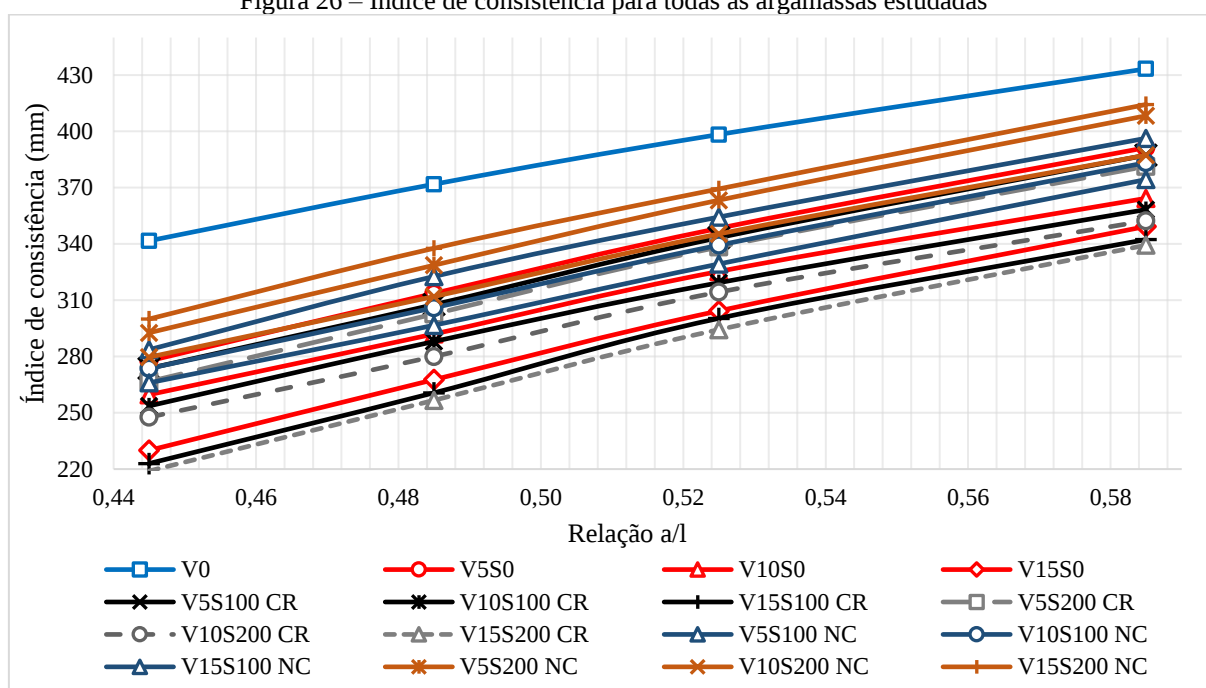
A Figura 25 evidencia ainda, a relação inversamente proporcional existente entre o teor de substituição empregado e o índice de consistência verificado, demonstrando que para a manutenção da consistência padrão de (260 ± 5) mm é necessário corrigir o teor a/l conforme o teor de vermiculita empregado nas misturas, como estipulado pela NBR 13276 (ABNT, 2016) e indicado por Sinharelli (2019), Xu et al. (2015), Cintra (2013) e Silva et al. (2010).



Fonte: A autora (2023).

Analisando a Figura 26, observa-se que o maior índice de consistência foi obtido para a argamassa de referência (V0), seguida da argamassa V15S200 NC. Como indicado por Xu et al. (2015), Mo et al. (2018), Barros (2018) e Sinhorelli (2019), a vermiculita tende a aumentar a coesão da mistura devido à elevada absorção de água e consequente diminuição da água livre. Desta forma, a mistura torna-se menos fluida, sendo necessária a adoção de um maior teor de água para manutenção do índice de consistência, fato demonstrado pelo aumento do índice de consistência para as misturas que possuíram maior teor de relação a/l, como por exemplo, a mistura V15S200 NC, que apresenta relação a/l = 0,68.

Figura 26 – Índice de consistência para todas as argamassas estudadas

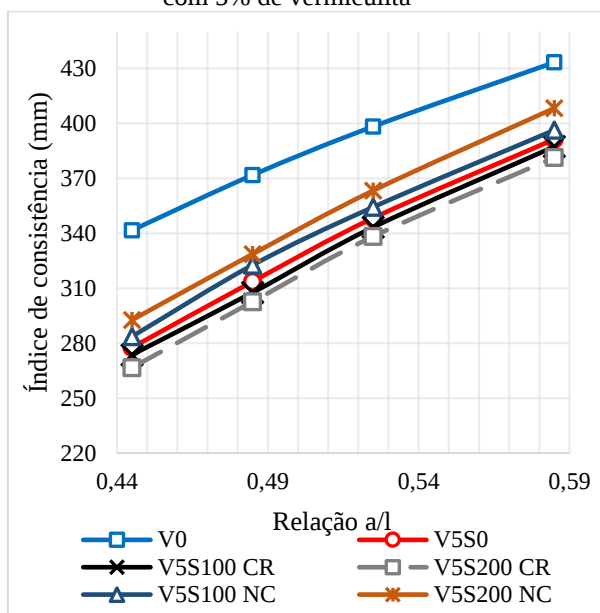


Fonte: A autora (2023).

Apesar de a argamassa V15S200 NC possuir a maior relação a/l dentre as misturas estudadas, sua consistência é menos fluida se comparada à da argamassa de referência (V0), ressaltando o elevado poder de absorção de água devido à estrutura folheada da vermiculita (KOKSAL et al., 2015; MO et al., 2018; BARROS, 2018; SINHORELLI, 2019).

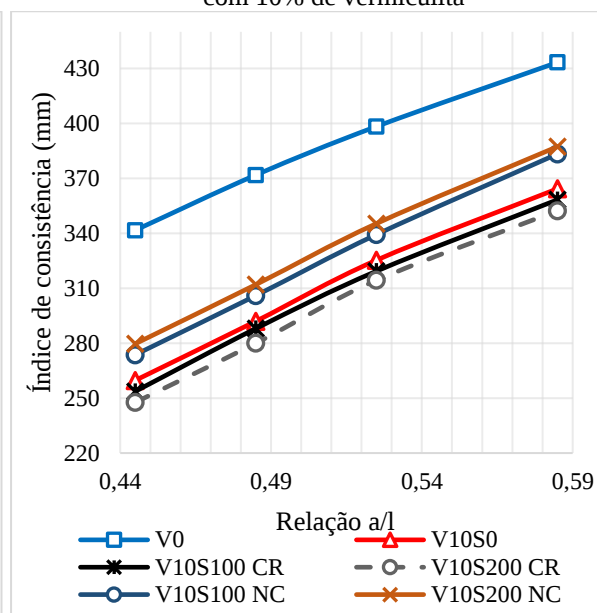
Salienta-se ainda, a interferência do pré-umedecimento da vermiculita para as misturas cuja relação a/l foi mantida (argamassas CR – a/l = 0,48). As argamassas com maior teor de saturação (S200%) e manutenção da relação a/l (CR) apresentaram menor índice de consistência como resultado da elevada capacidade de absorção de água e lenta dessorção da vermiculita (CASTRO et al. 2011). As Figuras 27, 28 e 29 apresentam, separadamente, os índices de consistência para cada teor de substituição de vermiculita, para melhor detalhamento.

Figura 27 – Índice de consistência das argamassas com 5% de vermiculita



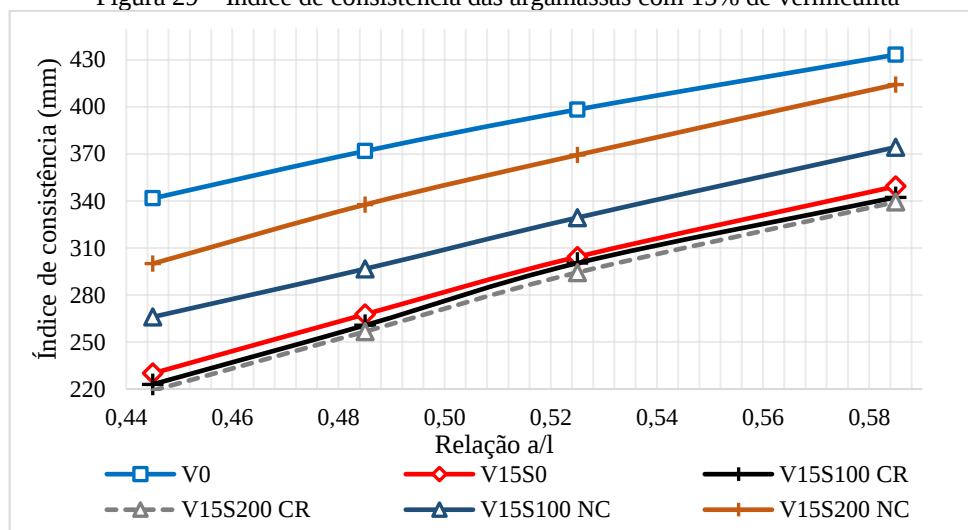
Fonte: A autora (2023).

Figura 28 – Índice de consistência das argamassas com 10% de vermiculita



Fonte: A autora (2023).

Figura 29 – Índice de consistência das argamassas com 15% de vermiculita



Fonte: A autora (2023).

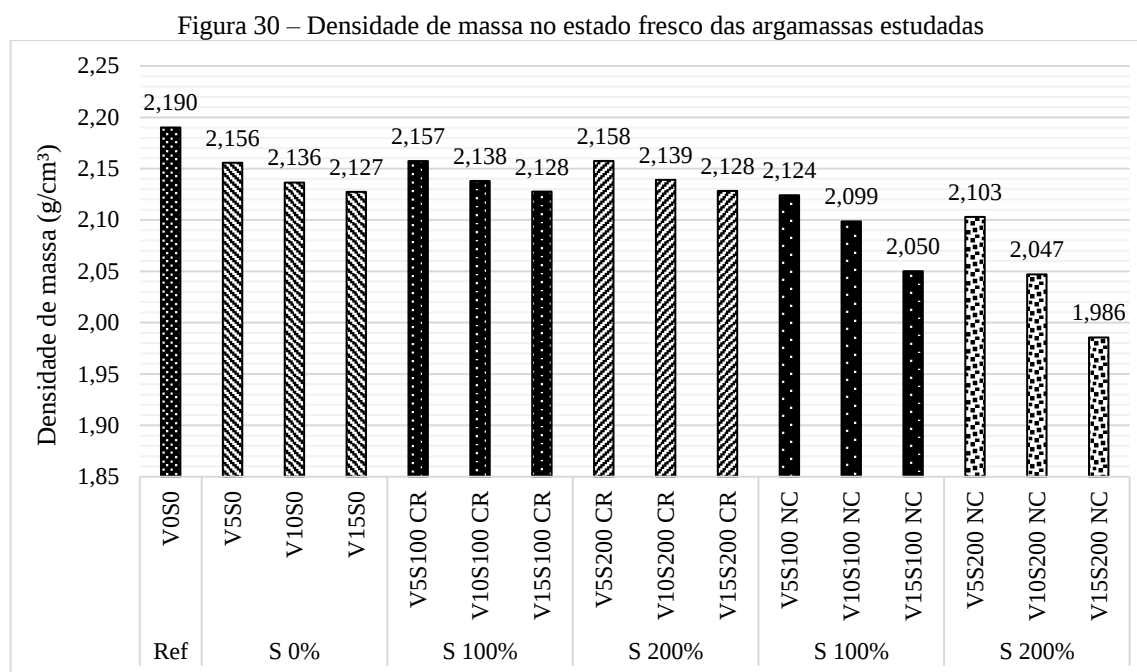
Resumidamente, foram observados os fenômenos a seguir:

- O elevado impacto da incorporação de vermiculita na consistência do produto final;
- A relação inversamente proporcional existente entre o índice de consistência e o teor de vermiculita empregado, resultante da elevada absorção proporcionada pela estrutura folheada desse material;
- A necessidade da correção da relação a/l para manutenção do índice de consistência – (260 ± 5) mm conforme NBR 13276 (ABNT, 2016);

- A influência do pré-umedecimento no índice de consistência da mistura devido ao rápido processo de absorção e o lento processo de dessorção da vermiculita.

4.1.2 Densidade de massa no estado fresco

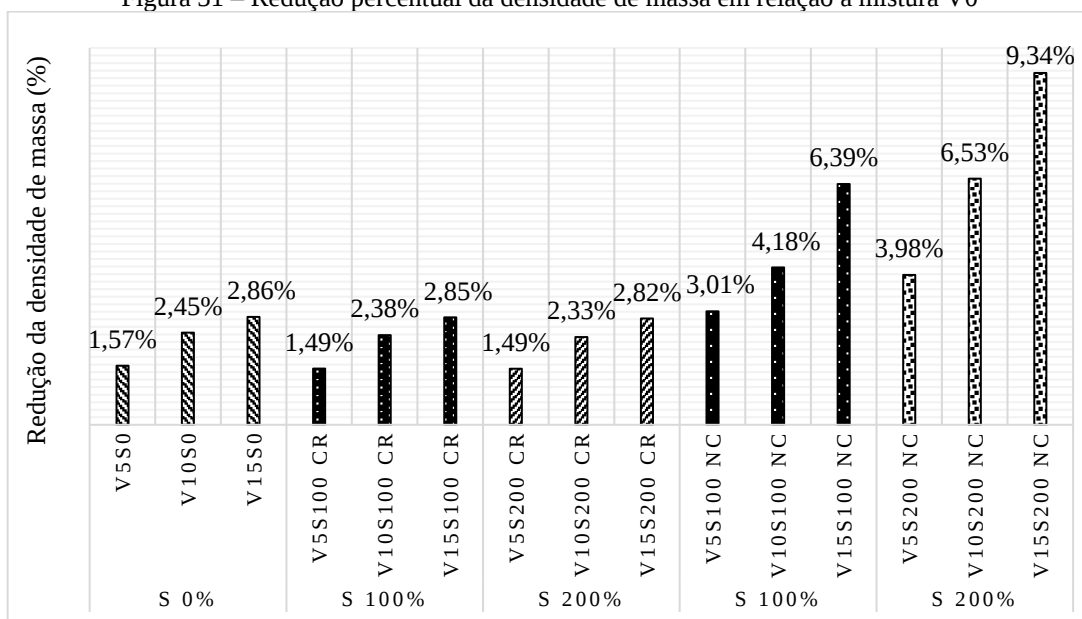
A Figura 30 apresenta as densidades de massa verificadas para o estado fresco das argamassas estudadas. É possível observar a diminuição da densidade com o aumento do teor de vermiculita, devido à menor massa específica deste material (66,667% inferior à da areia utilizada neste estudo), o que também foi observado por Silva et al. (2010), Cintra (2013), Koksall et al. (2015), Palamar, Barluenga e Puentes (2015), Xu et al. (2015), Aguiar (2017), Barros (2018), Sinhorelli (2019), Liu et al. (2022) e Çelik (2023).



Fonte: A autora (2023).

Na Figura 31 ressalta-se a diminuição da densidade de massa das misturas com vermiculita em comparação à da argamassa de referência (V0). Para o mesmo teor de substituição de vermiculita e mesma relação água-ligante ($a/l = 0,48$, misturas de nomenclatura CR), as argamassas que utilizaram a vermiculita pré-umedecida apresentaram maior densidade de massa. Considerando as misturas com 5% de substituição (V5), a redução da densidade de massa para as misturas V5S0 e V5S100 foi de 1,57% e 1,49%, respectivamente. Entre as misturas com água-ligante igual a 0,48 e utilização de vermiculita pré-umedecida (S100 CR e S200 CR), para os mesmos teores de substituição da vermiculita, não houve variação considerável da densidade de massa.

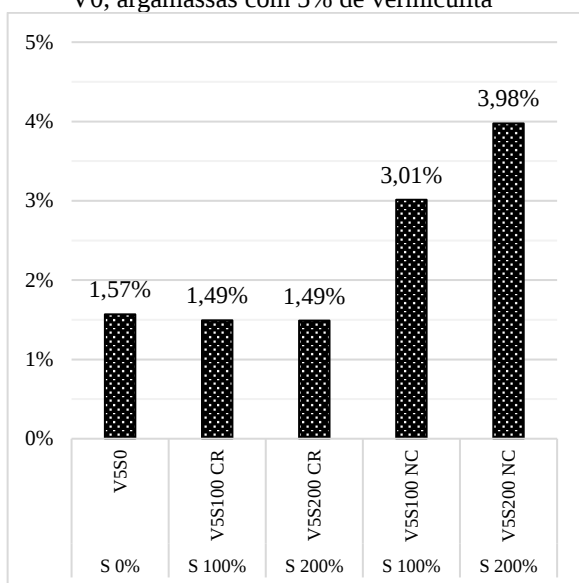
Figura 31 – Redução percentual da densidade de massa em relação à mistura V0



Fonte: A autora (2023).

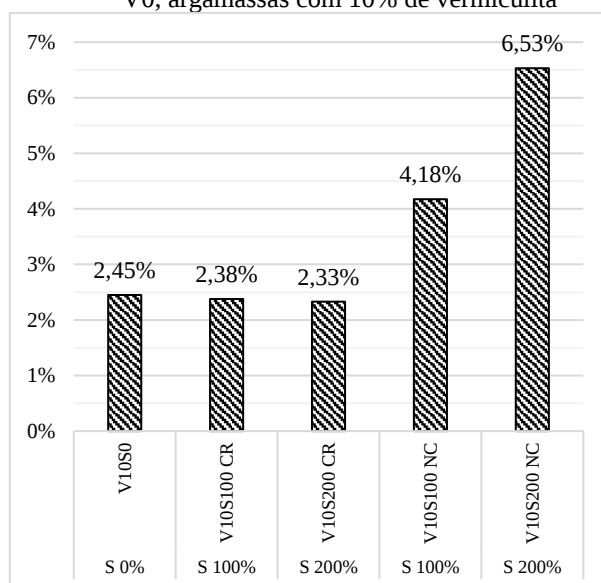
Este comportamento é explicado pelo tempo entre o processo de pré-umedecimento da vermiculita e sua utilização, necessário para propiciar uma melhor absorção da água pela estrutura foleada da vermiculita, impedindo o preenchimento da estrutura por materiais mais densos (escória de alto-forno e silicato de sódio), conforme evidenciado por Castro et al. (2011). Ao realizar comparações de misturas dentre os mesmos teores de vermiculita, como demonstrado nas Figuras 32, 33 e 34, é possível observar que, com o aumento do teor de saturação da vermiculita, a diminuição da densidade de massa no estado fresco é reduzida.

Figura 32 – Diminuição percentual em relação a V0, argamassas com 5% de vermiculita



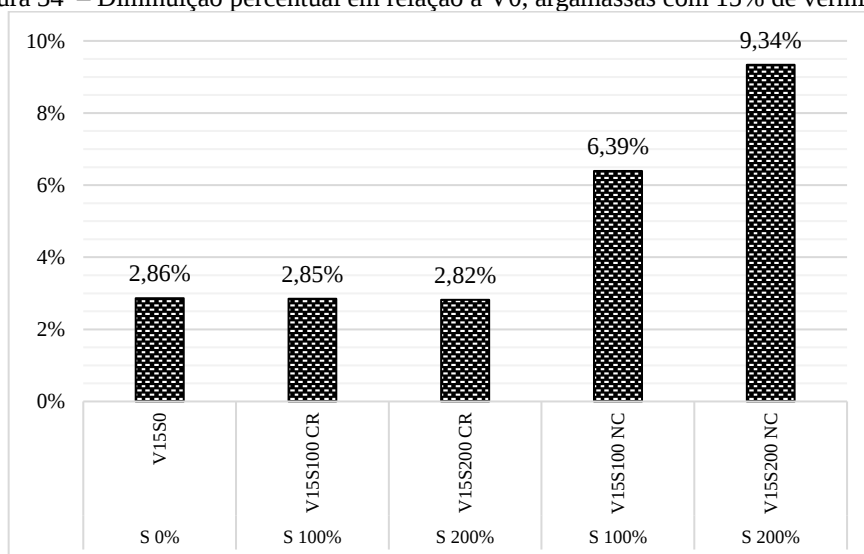
Fonte: A autora (2023).

Figura 33 – Diminuição percentual em relação a V0, argamassas com 10% de vermiculita



Fonte: A autora (2023).

Figura 34 – Diminuição percentual em relação a V0, argamassas com 15% de vermiculita



Fonte: A autora (2023).

Verifica-se que para as misturas com teores de a/l não corrigidos ($0,51 < a/l < 0,68$) há uma diminuição considerável da densidade de massa, chegando a 9,34%, resultante da elevada relação a/l e da diminuição da relação água-materiais sólidos. A NBR 13281 (ABNT, 2005) classifica as argamassas baseando-se em alguns requisitos, um dos quais refere-se à densidade de massa no estado fresco, apresentado na Tabela 16. Desse modo, é possível classificar as misturas estudadas como sendo argamassas do tipo D5.

Tabela 16 – Classificação de argamassas de acordo com a NBR 13281

Classe	Densidade de massa no estado fresco (kg/m³)
D1	≤ 1400
D2	1200 a 1600
D3	1400 a 1800
D4	1600 a 2000
D5	1800 a 2200
D6	> 2000

Fonte: Adaptado de NBR 13281 (ABNT, 2005)

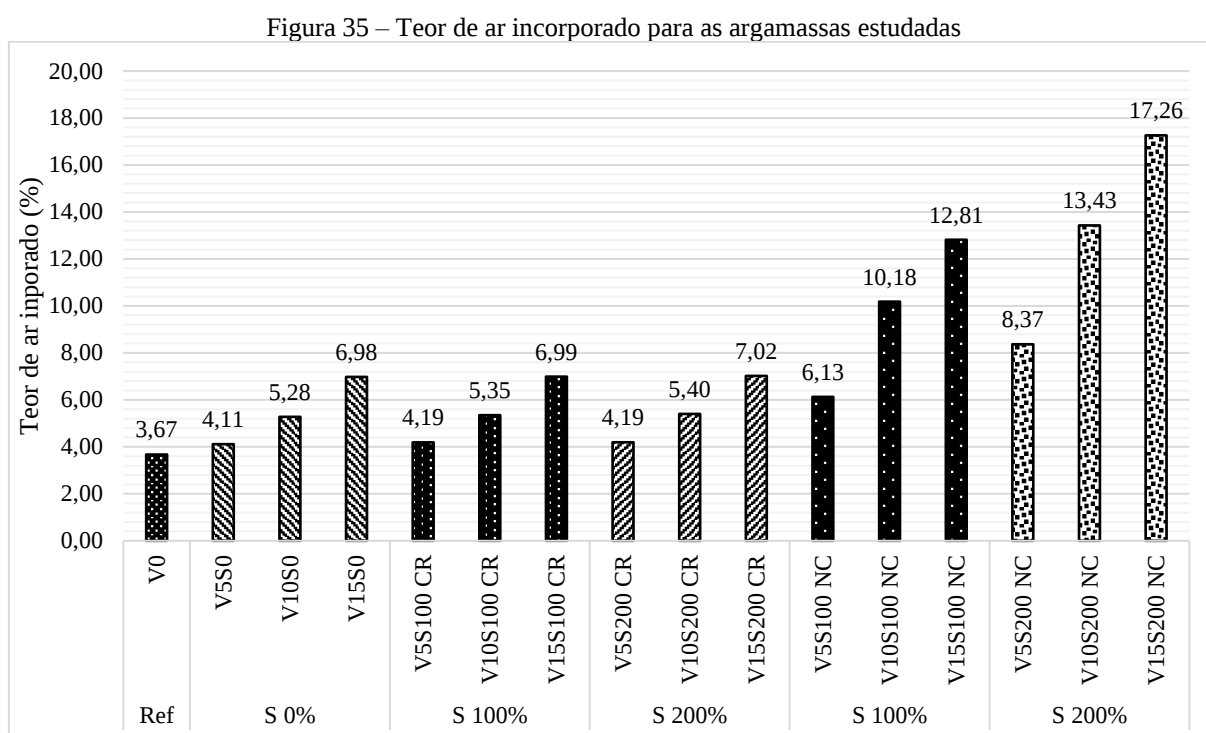
Carasek (2010) enquadra argamassas com densidade entre 14000 kg/m³ e 2300 kg/m³ como normais, evidenciando a possibilidade de utilização em revestimentos. Por meio dessas análises, evidencia-se que:

- A substituição parcial da areia por vermiculita resultou na diminuição da densidade de massa da mistura devido à diferença entre os valores de massa específica para os materiais empregados;

- A adoção da vermiculita pré-umedecida ocasiona uma discreta diminuição da densidade para misturas com manutenção da relação a/l ($a/l = 0,48$);
- O aumento da relação a/l para as misturas NC proporcionou menor densidade de massa.

4.1.3 Teor de ar incorporado

A Figura 35 ilustra o teor de ar incorporado para as argamassas analisadas, onde é demonstrado o aumento do teor de ar incorporado para maiores teores de vermiculita.



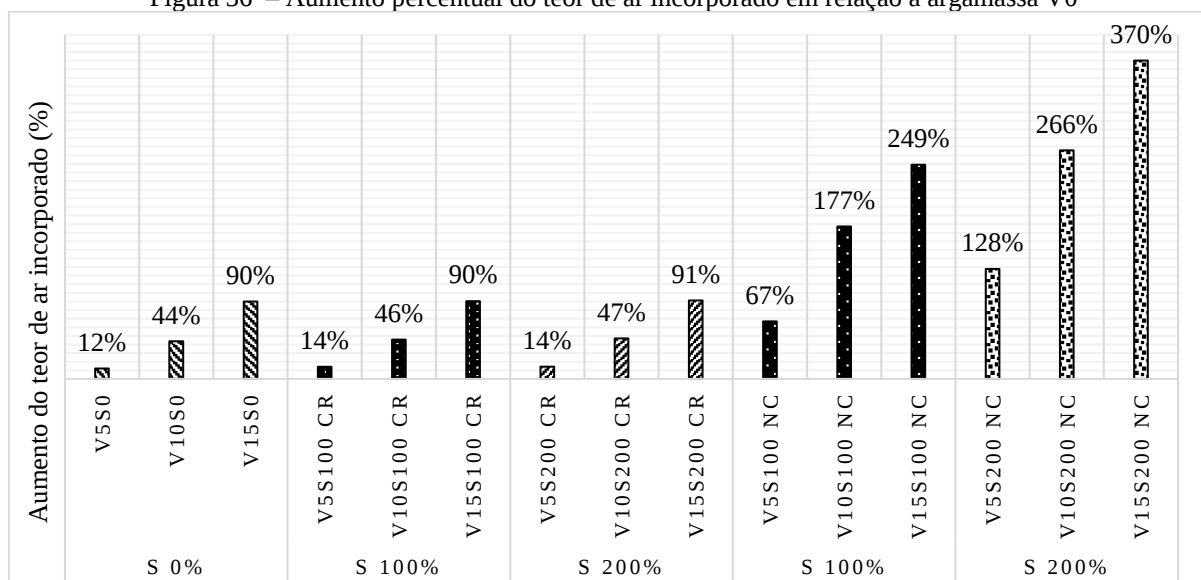
Fonte: A autora (2023).

De acordo com Shinhoreli (2019), este aumento do teor de ar incorporado deve-se à morfologia da vermiculita expandida, com vazios entre as lamelas, possibilitando maior incorporação de ar à mistura e favorecendo a trabalhabilidade do material. Silva et al (2010) indicaram o efeito do emprego de materiais lamelares em argamassas no aumento do teor de ar incorporado.

Na Figura 36, é possível observar o aumento percentual do teor de ar incorporado para as misturas estudadas com o aumento do teor de ar pela vermiculita (mesmo mantendo a mesma relação $a/l = 0,48$ – misturas S0, S100 CR e S200 CR); além disso, observa-se um aumento discreto do teor de ar incorporado quando a vermiculita é inserida úmida à mistura, de 2% para as misturas V5, de até 3% para as misturas V10 e de 1% para as misturas V15.

Para as misturas com teores de água mais elevados – relação a/l entre 0,51 e 0,68 (misturas NC), há o aumento significativo do teor de ar incorporado, seja pela incorporação da vermiculita, seja pelo aumento da relação a/l, evidenciando a contribuição desses fatores nos resultados obtidos.

Figura 36 – Aumento percentual do teor de ar incorporado em relação à argamassa V0



Fonte: A autora (2023).

Dessas observações, pode-se evidenciar:

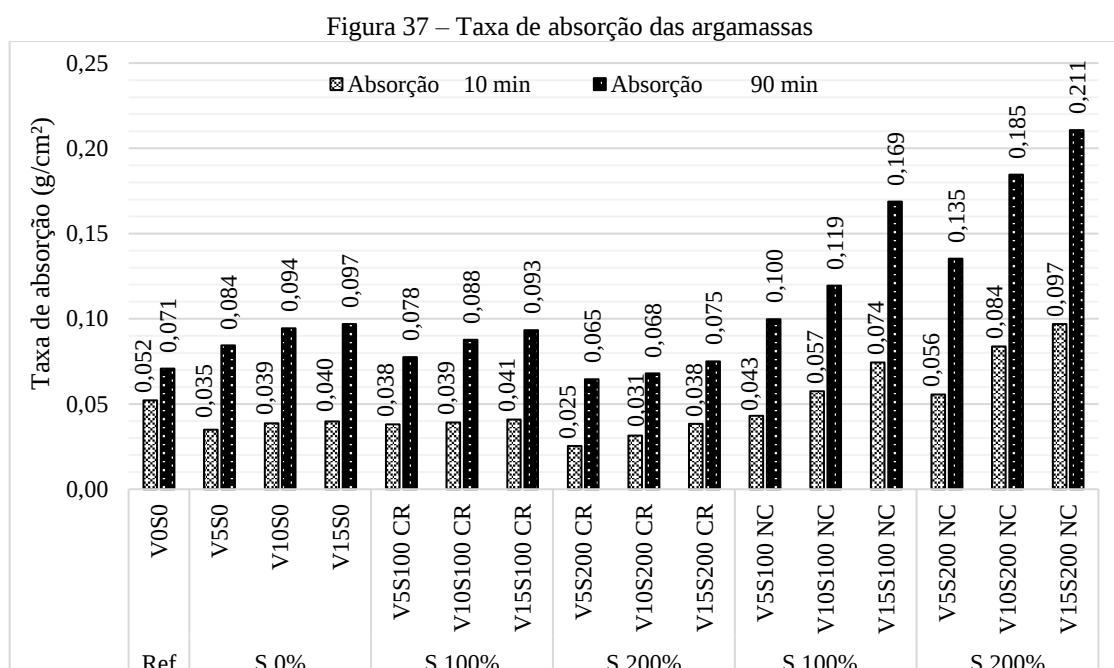
- O aumento notável do teor de ar incorporado devido à incorporação da vermiculita à mistura, consequência de sua estrutura lamelar;
- A utilização da vermiculita pré-umedecida proporciona um discreto aumento no teor de ar incorporado em relação a misturas com o emprego da vermiculita seca;
- A adoção de maior relação a/l (misturas NC) eleva significativamente o teor de ar da mistura.

4.2 Propriedades no estado endurecido

4.2.1 Absorção por capilaridade

A Figura 37 apresenta as taxas de absorção de água pelas argamassas. É possível notar o aumento da capilaridade ocasionado pela incorporação da vermiculita, havendo relação direta entre a o teor de vermiculita e a capacidade de absorção de água pelas misturas. Este comportamento era esperado e já havia sido evidenciado por Cintra (2013), Koksai et al. (2015), Shoukry et al. (2016), Barros (2018), Mo et al. (2018), Karatas et al. (2019), Sinhoreli (2019) e Benli et al. (2020).

O aumento da capilaridade deve-se à quantidade de vazios proveniente da vermiculita, e quanto maior o teor de vazios, maior será a probabilidade de haver poros conectados, favorecendo o fenômeno de capilaridade (SHINHORELI, 2019). Poros descontínuos ou pouco eficazes no transporte ascendente do fluido afetam o índice de capilaridade, mesmo que a argamassa possua um alto índice de poros (NAKAKURA, 2003). Deste modo, é possível concluir que a adição de vermiculita resultou no desenvolvimento de poros conectados.

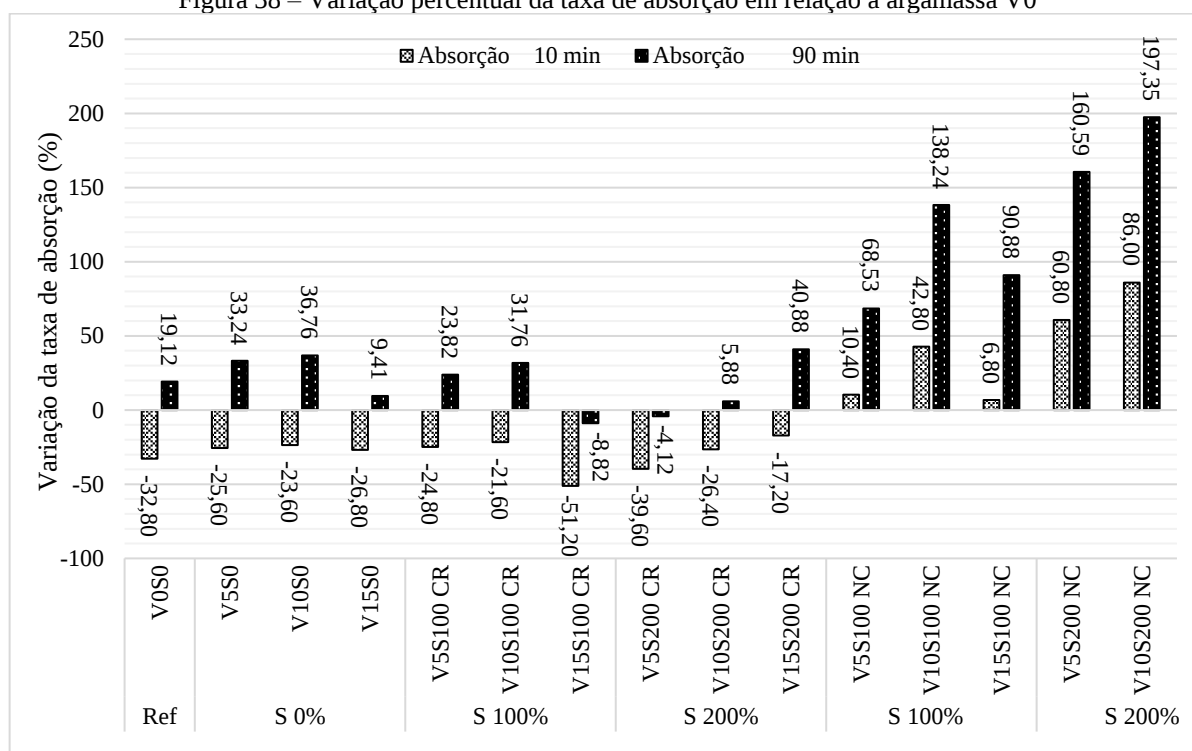


Fonte: A autora (2023).

Na Figura 38, é possível verificar a variação percentual da taxa de absorção para as argamassas estudadas, em que fica evidente o aumento considerável da taxa de absorção nas argamassas com relação a/l superior a 0,48 (argamassas NC). Isto ocorre devido ao excesso de água nas misturas, fator preponderante para a ocorrência de poros na matriz após a evaporação da água, sendo verificado um acréscimo médio de 149,6% e 82,5% aos 90 min para as argamassas com teor de saturação da vermiculita igual a 200% NC e 100% NC, respectivamente.

Na Figura 38, verifica-se ainda o efeito do pré-umedecimento da vermiculita na capilaridade do material, uma vez que, aos 90 min, houve um decréscimo médio de 2,35% na taxa de absorção das argamassas com vermiculita a 200% de saturação e relação a/l igual a 0,48 (misturas S200 CR) quando comparada à da argamassa de referencia V0; em contrapartida, as misturas S100 CR e com vermiculita seca (S0) apresentaram um aumento médio na taxa de absorção de 21,67% e 29,71%, respectivamente.

Figura 38 – Variação percentual da taxa de absorção em relação à argamassa V0



Fonte: A autora (2023).

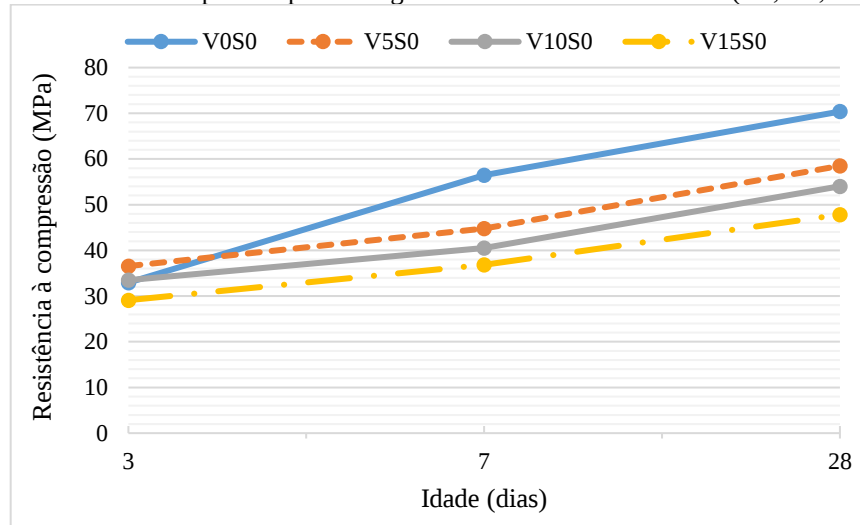
Por meio dessas informações é possível ressaltar:

- A capacidade da vermiculita de introduzir à mistura um maior teor de poros;
- A relação direta existente entre a taxa de absorção de água e o teor de vermiculita;
- A influência do pré-umedecimento da vermiculita no controle da taxa de absorção e consequente diminuição de poros conectados;
- O aumento significativo da taxa de absorção quando da adoção de vermiculita pré-umedecida em misturas com relação $a/l > 0,48$.

4.2.2 Resistência à compressão

A Figura 39 apresenta as resistências obtidas para a argamassa de referência e as argamassas com substituição parcial da areia por vermiculita seca (V0, V5S0, V10S0 e V15S0). É possível verificar a influência do teor de vermiculita na resistência à compressão, sendo observada uma dependência inversamente proporcional à resistência, o que também foi obtido por Silva et al. (2010), Cintra (2013), Koksall et al. (2015), Xu et al. (2015), Shoukry et al. (2016), Barros (2018), Mo et al. (2018), Karatas et al. (2019), Shinhoreli (2019), Benli et al. (2020) e Liu et al. (2022), e esperado para esta pesquisa. Ademais, é evidente o aumento da resistência inicial das argamassas com 5% aos 3 dias em comparação à resistência da argamassa de referência (V0S0).

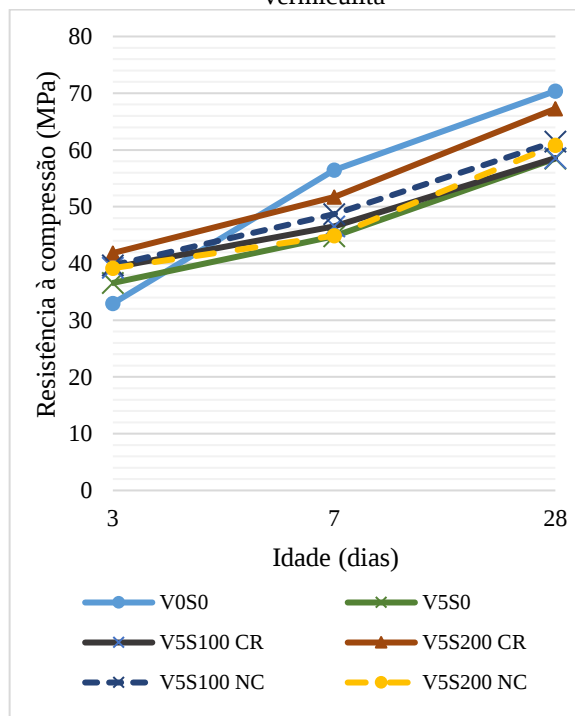
Figura 39 – Resistência à compressão para as argamassas com vermiculita seca (V0, V5, V10 e V15)



Fonte: A autora (2023).

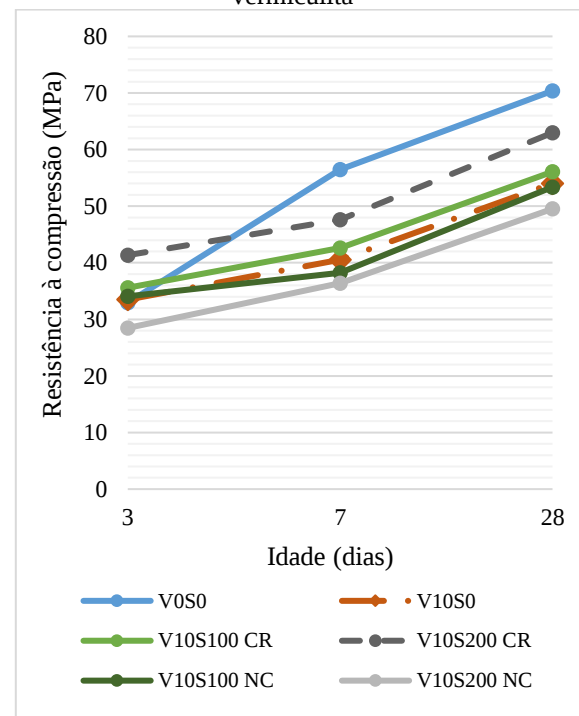
Considerando todas as argamassas analisadas, como exposto nas Figuras 40, 41 e 42, verifica-se a mesma tendência, sendo observado uma maior resistência à compressão aos 3 dias para as argamassas com 5% de vermiculita e relação $a/l = 0,48$ e menor resistência para argamassas com 15% de vermiculita e elevada relação a/l ($a/l > 0,48$) em comparação à argamassa de referência.

Figura 40 – Resistência à compressão das argamassas de referência (V0) e com 5% de vermiculita



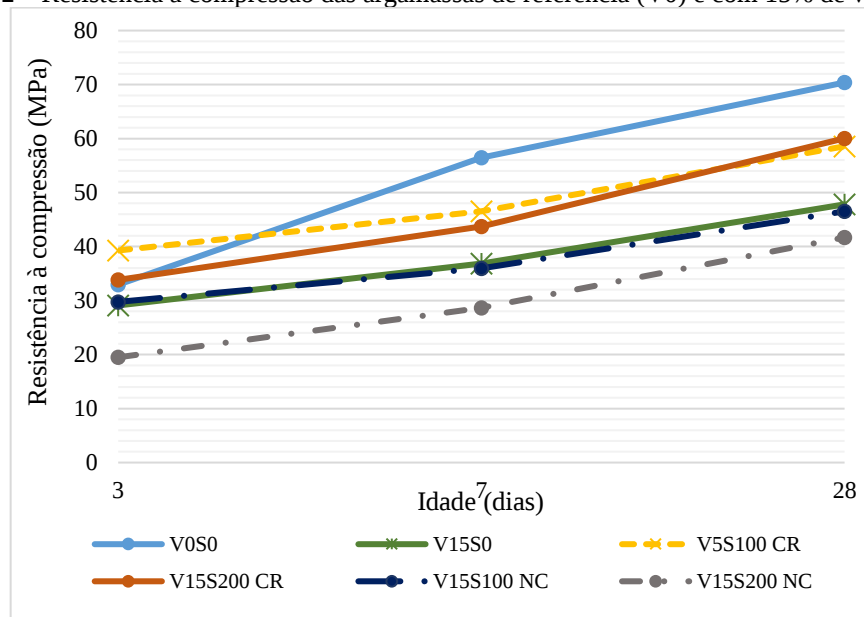
Fonte: A autora (2023).

Figura 41 – Resistência à compressão das argamassas de referência (V0) e com 10% de vermiculita



Fonte: A autora (2023).

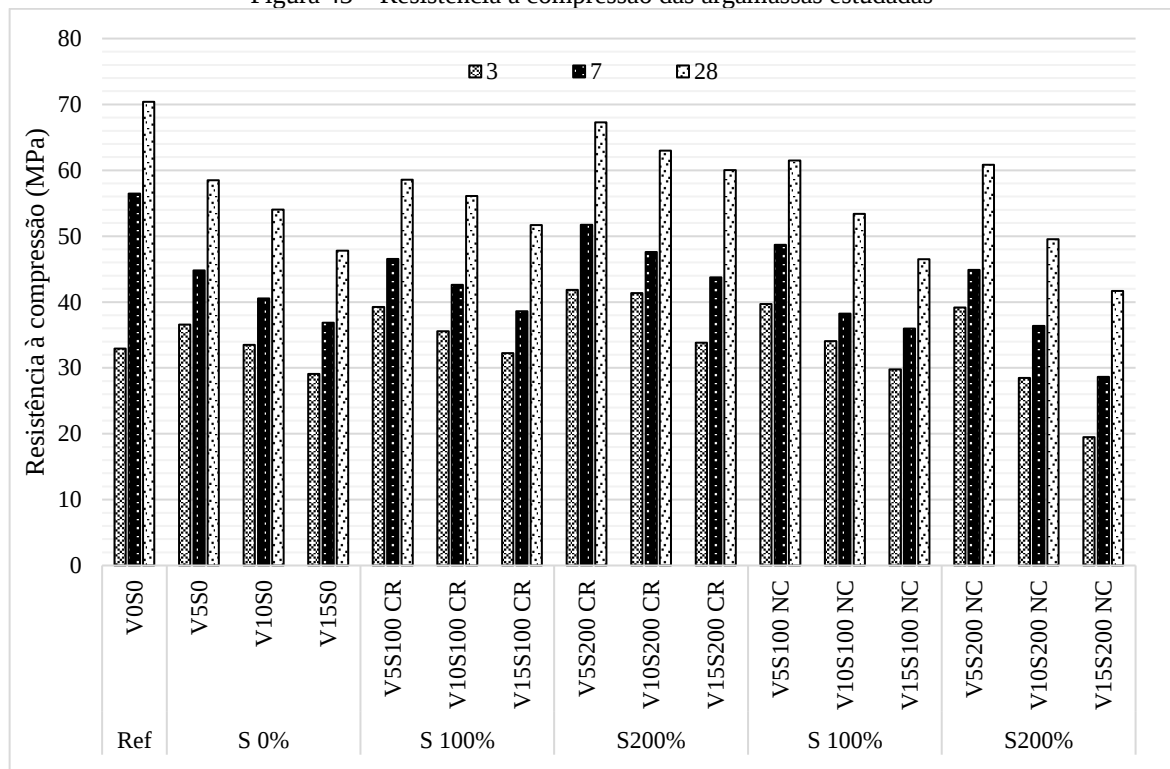
Figura 42 – Resistência à compressão das argamassas de referência (V0) e com 15% de vermiculita



Fonte: A autora (2023).

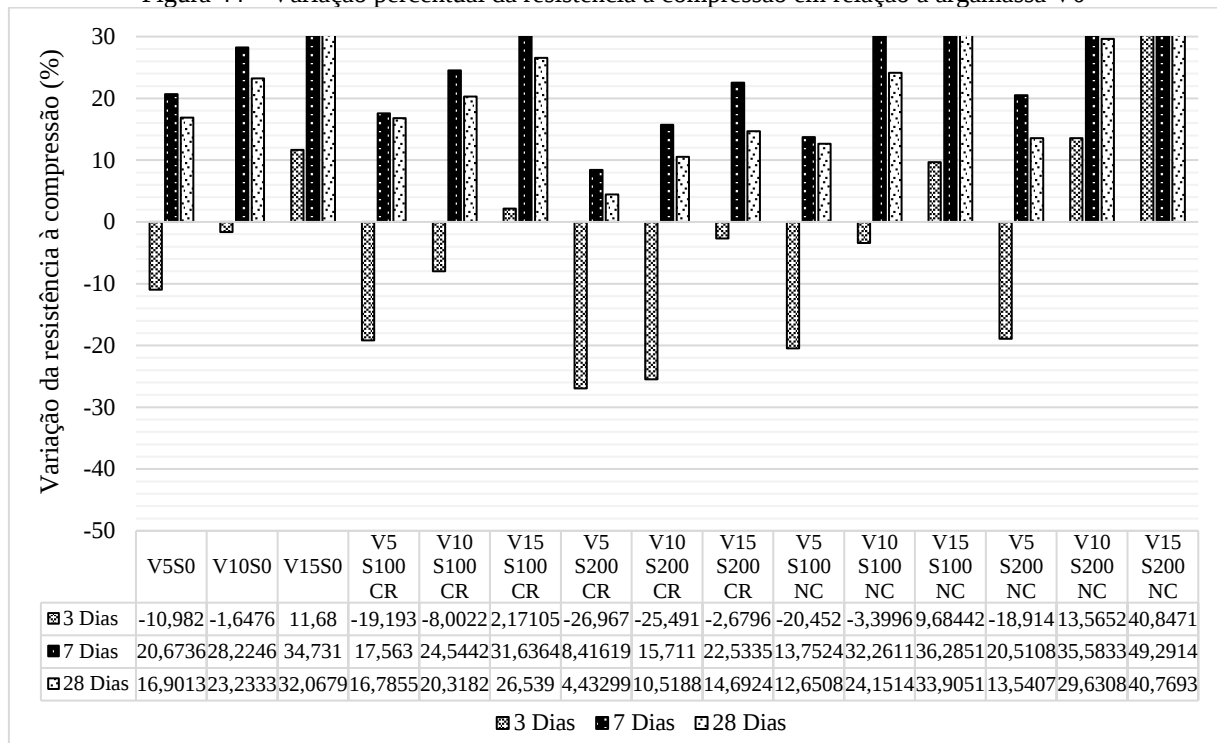
A Figura 43 demonstra as resistências médias verificadas para as misturas estudadas, enquanto que a Figura 44 retrata a variação percentual da resistência à compressão tomando como referência a argamassa V0.

Figura 43 – Resistência à compressão das argamassas estudadas



Fonte: A autora (2023).

Figura 44 – Variação percentual da resistência à compressão em relação à argamassa V0



Fonte: A autora (2023).

É notável o aumento da resistência aos 3 dias para as misturas com teor de substituição de vermiculita de 5% quando comparado à argamassa de referência (V0S0), com um aumento médio da resistência de 19,30%. Este comportamento também foi observado para as argamassas com relação a/l acima de 0,48 (misturas NC).

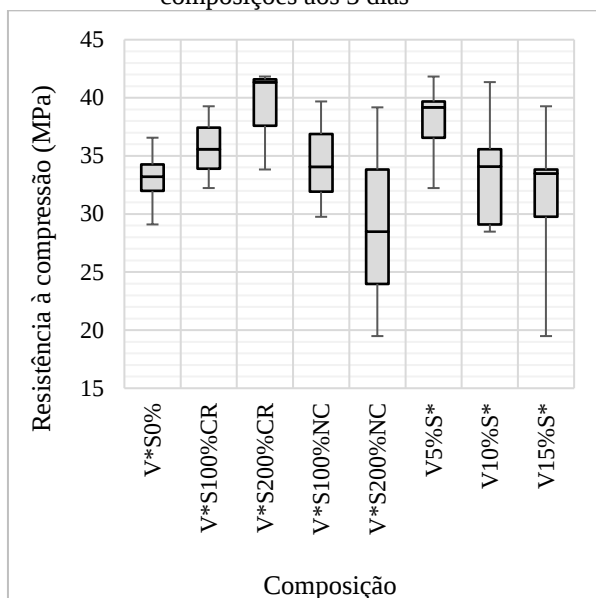
Aos 3 dias, as misturas V10% apresentaram um discreto aumento médio da resistência à compressão de 4,16%, enquanto as misturas V15% apresentaram uma diminuição média de resistência de 12,34%. Aos 7 dias, observou-se um desenvolvimento lento da resistência, com uma redução média da resistência à compressão de 26,11% em relação à argamassa de referência. Aos 28 dias, a redução média da resistência à compressão foi de 21,34%.

Para as misturas com vermiculita pré-umedecida, foi verificada uma diminuição média da resistência da ordem de 9,88%, 21,21% e de 24,07% para as misturas S200 CR, S100 CR e S0, respectivamente, demonstrando a ocorrência do fenômeno de cura interna propiciado pelo grau de saturação da vermiculita, e, conseqüentemente, aumento da resistência à compressão, conforme explicitado por Ma, Liu e Shi (2019).

Para melhor compreender os fenômenos inicialmente verificados, buscou-se analisar os resultados obtidos por meio de composições, fixando o teor de vermiculita e alterando o teor de saturação e vice-versa, conforme demonstrado nas Figuras 45, 46 e 47 para as idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente. Nessas figuras, da esquerda para a direita, as primeiras cinco

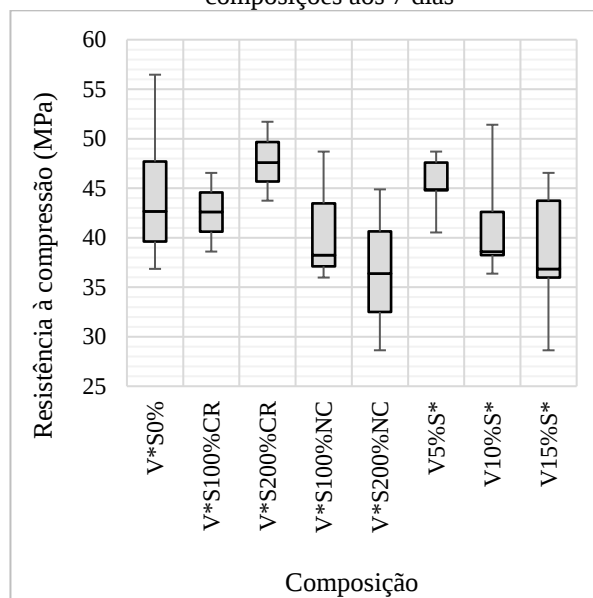
composições correspondem à análise da influência do teor de saturação da vermiculita na resistência à compressão e as três últimas referem-se à influência do teor de vermiculita.

Figura 45 – Resistência à compressão das composições aos 3 dias



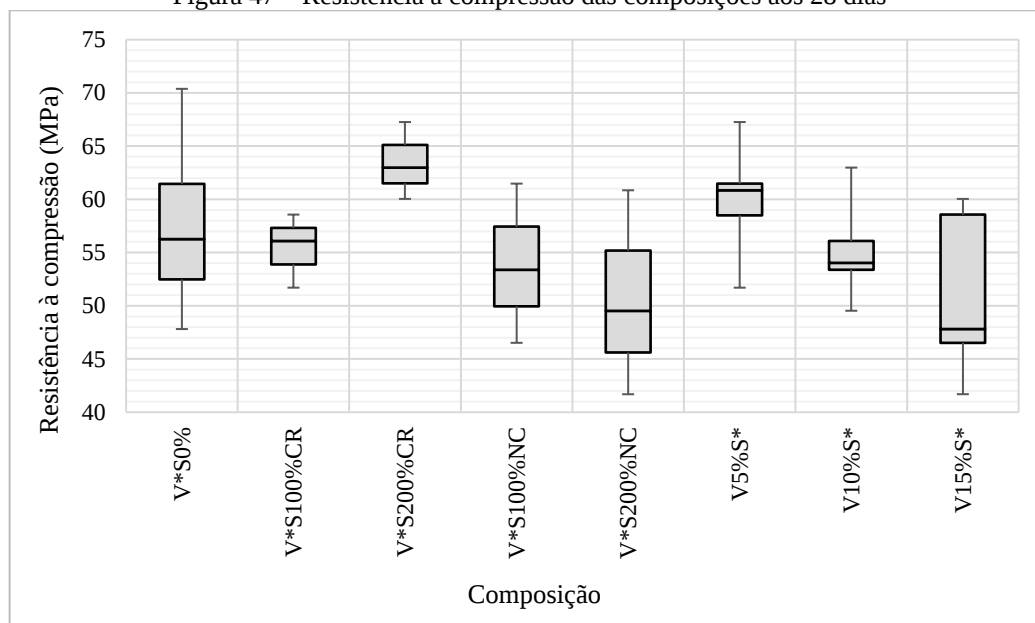
Fonte: A autora (2023).

Figura 46 – Resistência à compressão das composições aos 7 dias



Fonte: A autora (2023).

Figura 47 – Resistência à compressão das composições aos 28 dias



Fonte: A autora (2023).

Baseando-se nas Figuras 45, 46 e 47, dentre as misturas de argamassa com vermiculita, a manutenção da relação a/l e o emprego do pré-umedecimento demonstraram-se eficientes para o aumento da resistência da matriz, e o teor de 5% mostrou-se o mais efetivo. Salienta-se que

não foram obtidos valores discrepantes (*outliers*) em nenhuma composição analisada. Conforme as figuras anteriores é possível evidenciar os seguintes aspectos:

- Nota-se certa tendência de diminuição da resistência com o aumento do teor de vermiculita na composição das argamassas, com menor valor de resistência obtido para a argamassa com maior teor de vermiculita (V15), principalmente nos teores de umidade S100% e S200% não corrigidos (NC). Este comportamento era esperado, tendo sido observado nos estudos de Silva et al. (2010), Cintra (2013), Koksai et al. (2015), Xu et al. (2015), Shoukry et al. (2016), Barros (2018), Mo et al. (2018), Karatas et al. (2019) e Benli et al. (2020). Shinhoreli (2019) indica que a diminuição da resistência à compressão, ocasionada pela incorporação crescente da vermiculita e pelo aumento do teor a/l (aplicado às misturas com $a/l > 0,48$), ocorre devido aos vazios existentes entre as lamelas do material e à elevada demanda de água. O excesso de água, que não é utilizado no processo de hidratação, é perdido para o meio, ocasionando poros e comprometendo a resistência;
- Evidencia-se o efeito do pré-umedecimento nas argamassas com teor a/l igual a 0,48 (a/l corrigida), sendo verificados acréscimos consideráveis de resistência para as misturas S100 CR e S200 CR, resultantes da absorção inicial de parte da água da mistura (pré-umedecimento), da lenta dessorção de água pela vermiculita e do efeito da cura interna, o que também foi obtido por Castro et al. (2011) e Ma, Liu e Shi (2019).

4.3 Variação dimensional (retração autógena e por secagem)

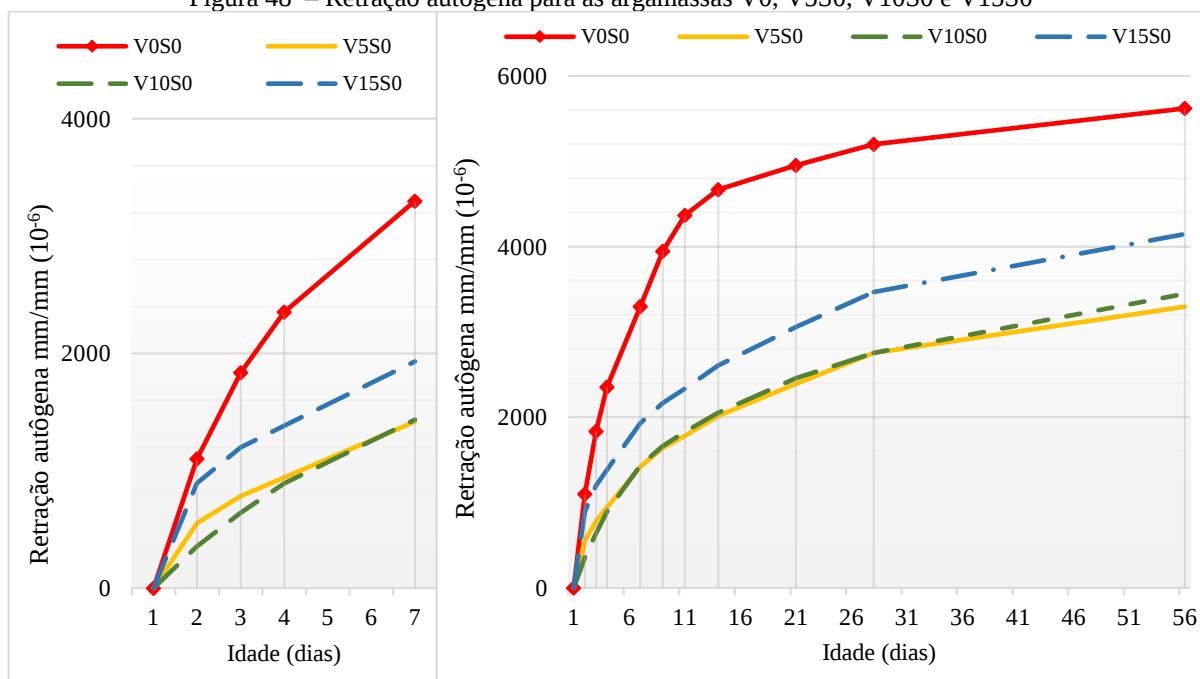
Os resultados obtidos nas análises de retração por secagem e autógena, estão expressos nos tópicos que se seguem. As leituras foram realizadas com 1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 14, 21, 28 e 56 dias após o processo de mistura. Os valores apresentados em gráficos de retração correspondem a média verificada para os 6 corpos-de-prova de cada mistura realizada. Além dos gráficos que retratam a retração verificada ao longo dos dias, há ainda gráficos de retração acumulada, que correspondem a relação existente entre a retração medida e o tempo decorrido para a respectiva leitura.

4.3.1 Retração Autógena

4.3.1.1 Influência do teor de vermiculita

A Figura 48 apresenta a retração obtida para as misturas com teores de substituição do agregado por vermiculita seca (S0) de 5%, 10% e 15%. Verifica-se a alta retração da argamassa de referência nos primeiros dias (dias 1 a 7), e menor retração para as argamassas com vermiculita.

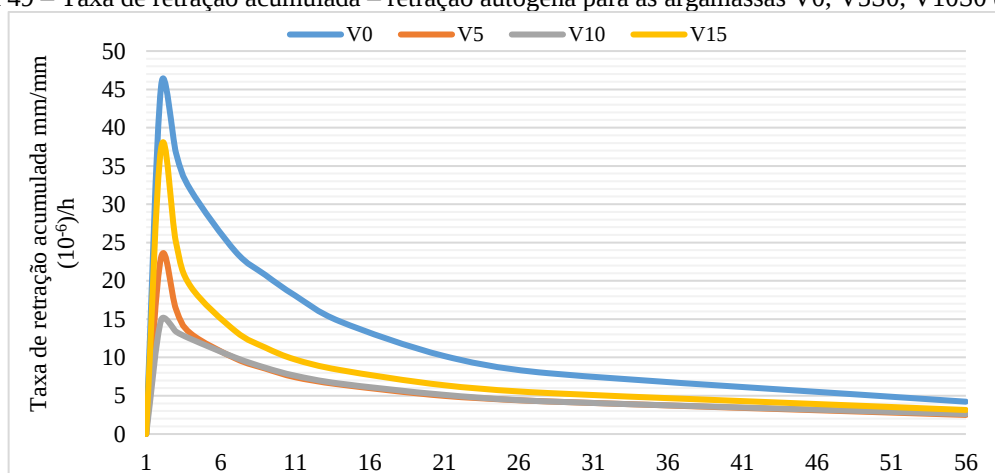
Figura 48 – Retração autógena para as argamassas V0, V5S0, V10S0 e V15S0



Fonte: A autora (2023).

A Figura 49 expõe a taxa de retração acumulada para as argamassas V0, V5S0, V10S0 e V15S0 para melhor visualização do fenômeno de retração nas primeiras idades. Observa-se um pico de elevada amplitude para a argamassa de referência (V0) nos primeiros três dias, e retração acumulada inferior para as argamassas com vermiculita, em especial a V10S0, que apresentou taxa de retração acumulada no dia 2 significativamente inferior a todas as outras. Nas últimas idades analisadas, é possível verificar a redução da declividade da curva da taxa de retração acumulada das respectivas misturas, indicando uma estabilização do fenômeno de retração das argamassas.

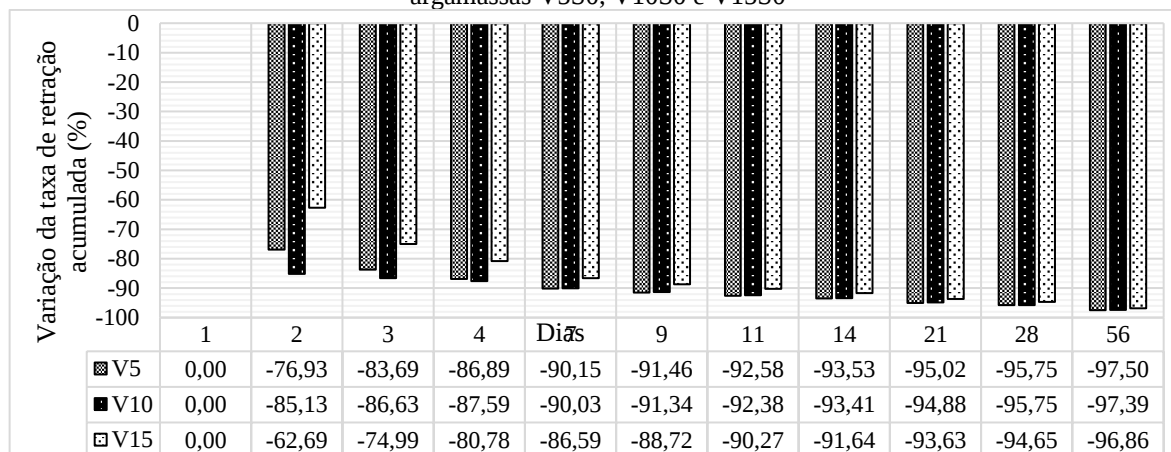
Figura 49 – Taxa de retração acumulada – retração autógena para as argamassas V0, V5S0, V10S0 e V15S0



Fonte: A autora (2023).

A Figura 50 apresenta a variação percentual média da retração obtida para as argamassas V5S0, V10S0 e V15S0 em comparação com a de referência (V0) para todos as idades.

Figura 50 – Variação percentual da taxa de retração acumulada para todos os dias – retração autógena para as argamassas V5S0, V10S0 e V15S0



Fonte: A autora (2023).

A partir dos dados, é evidente o desempenho da vermiculita na diminuição da retração autógena, em especial no teor de 5% de substituição, com uma redução de 40,88% da retração total em comparação à retração da argamassa de referência. As misturas com 10% e 15% de vermiculita apresentaram reduções de 38,16% e 25,60%, respectivamente.

Resumidamente:

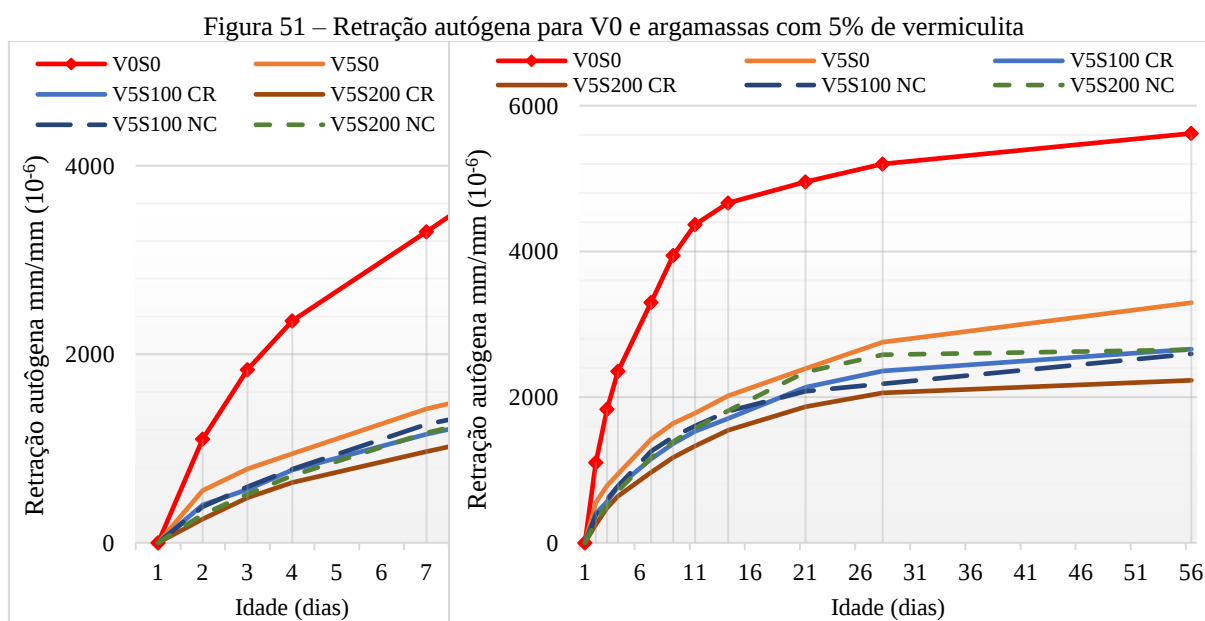
- O emprego da vermiculita, em teores controlados resulta numa considerável diminuição da retração autógena em argamassas, como também observado por Klyusov, Fattakhov e Klyusov (2005), Barros (2018) e Yang et al. (2022);
- A utilização de teores elevados de vermiculita tende ao aumento da retração, como evidenciado por Silva et al. (2010) e Cintra (2013);
- O teor de 5% de substituição do agregado miúdo por vermiculita resultou na maior diminuição da retração autógena.

4.3.1.2 Influência do teor de saturação da vermiculita

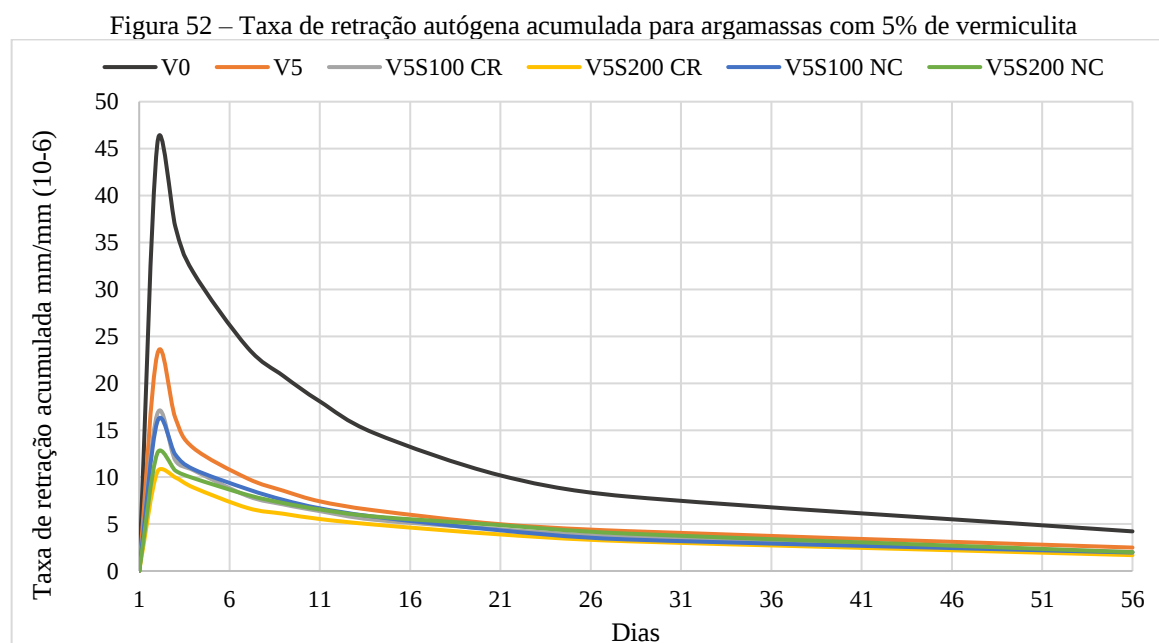
As Figuras 51, 53, 55 e 57 apresentam a retração verificada para as misturas S100 CR, S200 CR, S100 NC e S200 NC respectivamente, enquanto que as figuras 52, 54, 56 e 58 apresentam a taxa de retração autógena acumulada – S100 CR, S200 CR, S100 NC e S200 NC respectivamente.

Analisando o teor de saturação da vermiculita (misturas S100 CR, S200 CR, S100 NC e S200 NC), como observado nas Figuras 51, 53, 55 e 57, é possível notar a elevada retração

da argamassa de referência (V0), e menores retrações para todas as misturas com diferentes teores de vermiculita. Na Figura 51 evidencia-se que a mistura V5S200 CR apresentou menor retração autógena total, apresentando uma redução de 59,99% em comparação à da argamassa de referência (V0). Analisando as taxas de retração autógena acumulada para as mesmas argamassas – teor de vermiculita igual a 5% (Figura 52) – verifica-se, também que a menor taxa pertence a mistura V5S200 CR.



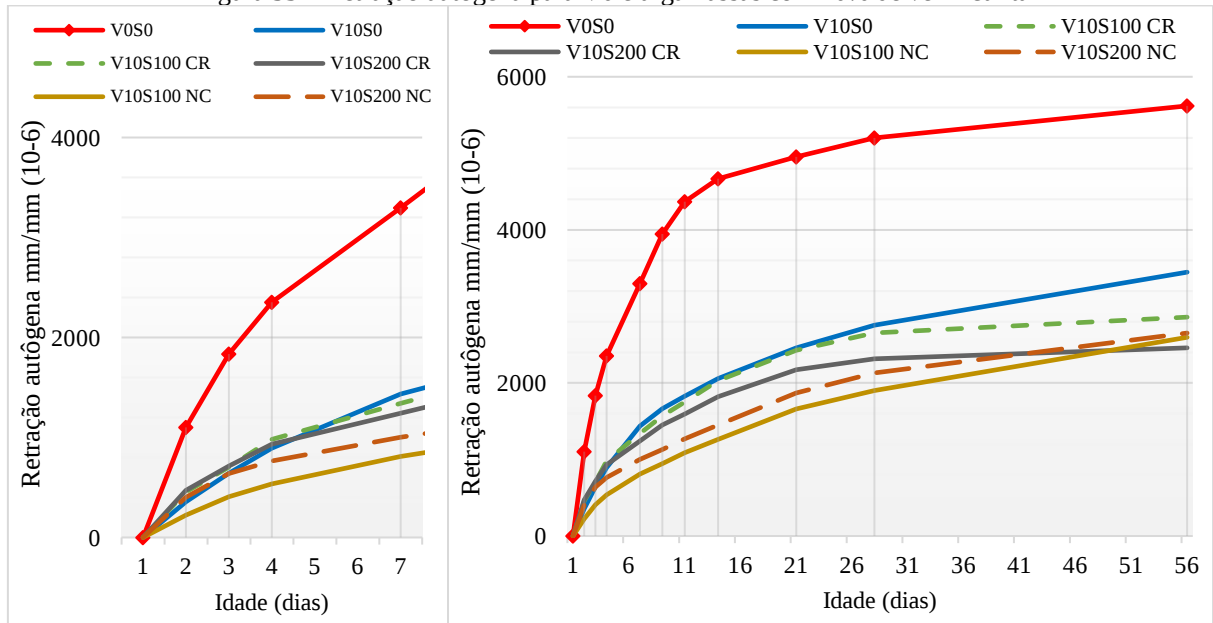
Fonte: A autora (2023).



Fonte: A autora (2023).

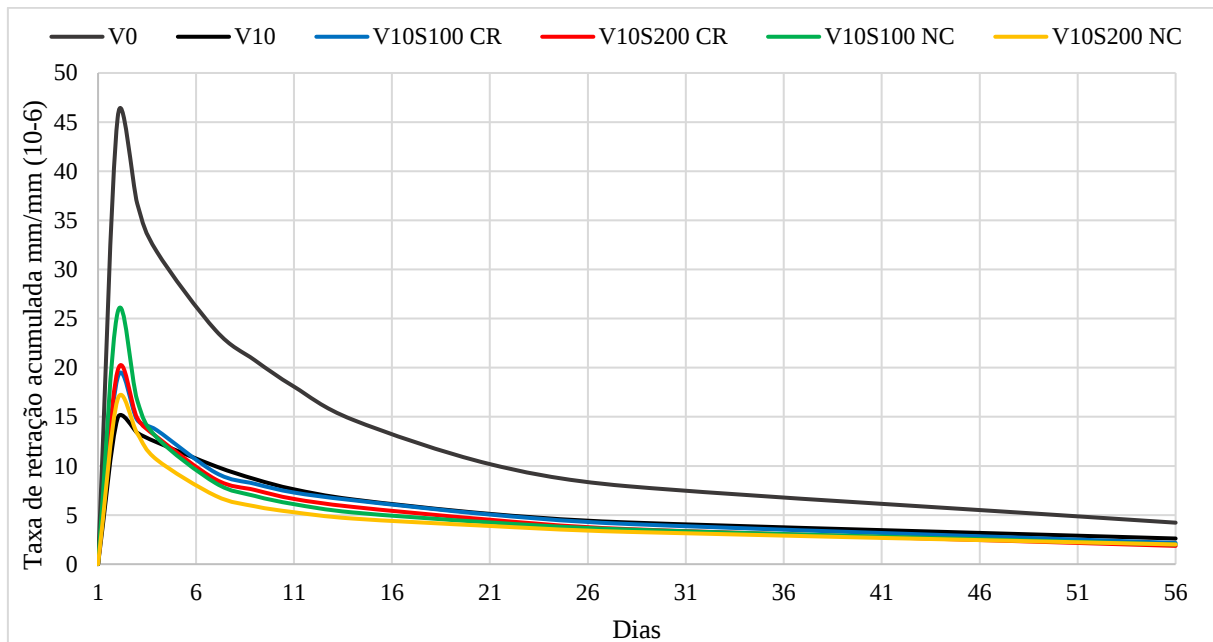
Em relação às argamassas com 10% de vermiculita (Figuras 53 e 54), observa-se uma menor retração final para a argamassa V10S200 CR, com redução de 55,90% em relação à retração da argamassa de referência.

Figura 53 – Retração autógena para V0 e argamassas com 10% de vermiculita



Fonte: A autora (2023).

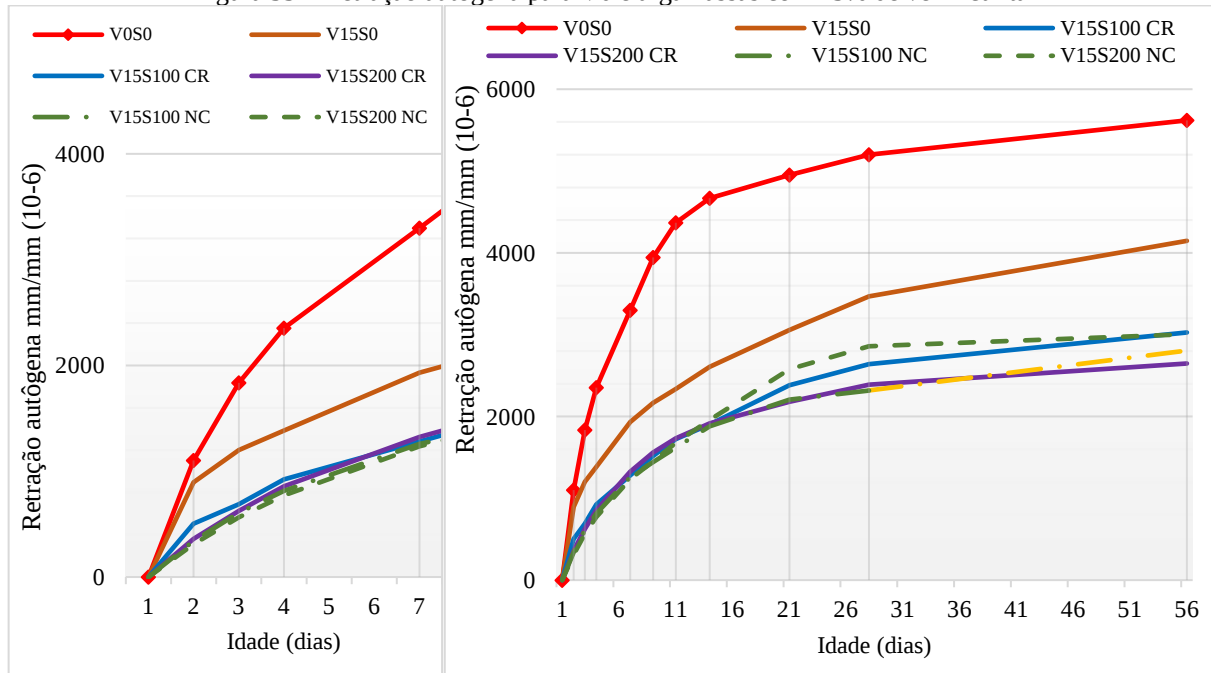
Figura 54 – Taxa de retração autógena acumulada para argamassas com 10% de vermiculita



Fonte: A autora (2023).

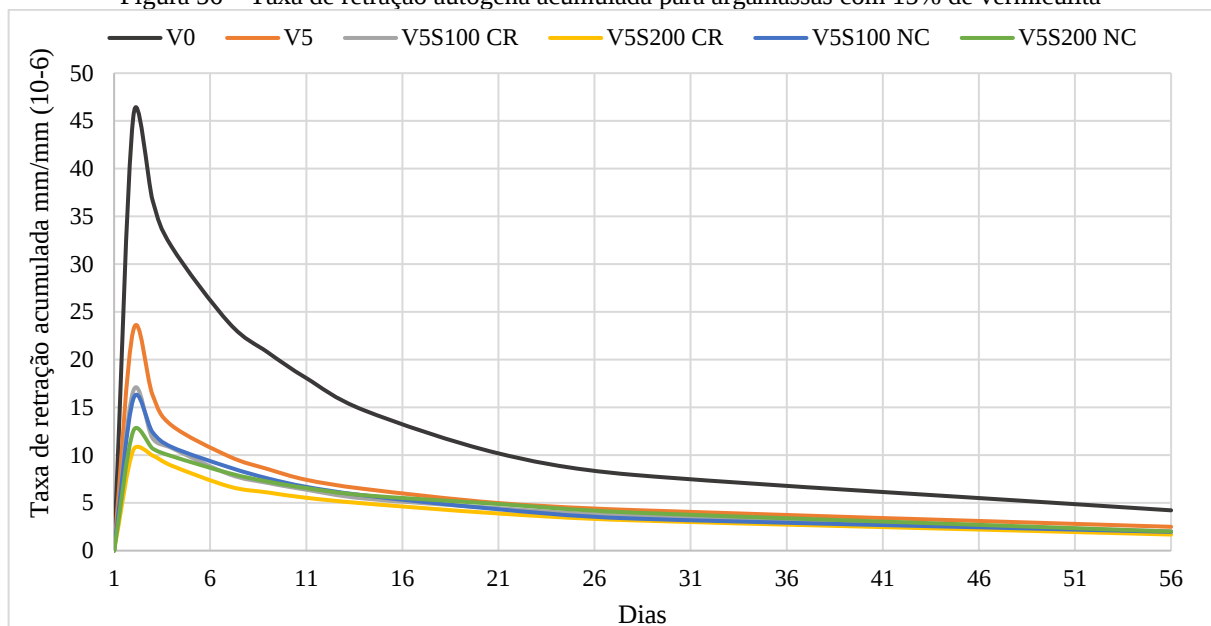
Dentre as misturas com 15% de vermiculita (Figuras 55 e 56), a mistura V15S200 CR apresentou menor retração final e menor taxa de retração acumulada, com uma diminuição da retração total de 52,20% em relação à retração da argamassa de referência.

Figura 55 – Retração autógena para V0 e argamassas com 15% de vermiculita



Fonte: A autora (2023).

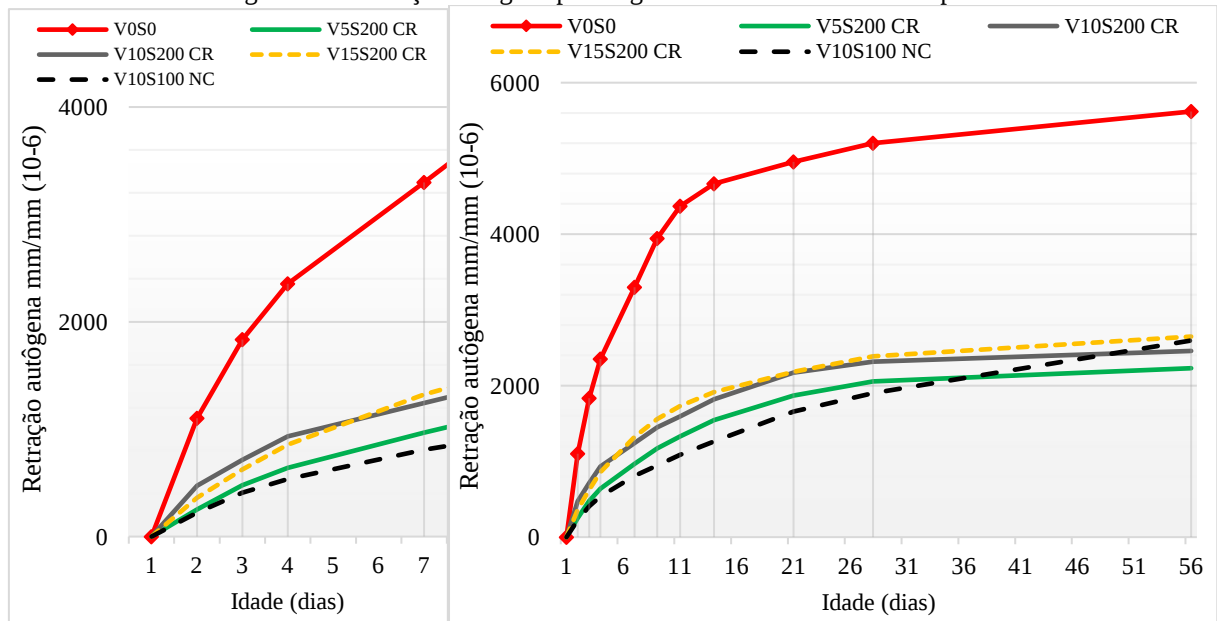
Figura 56 – Taxa de retração autógena acumulada para argamassas com 15% de vermiculita



Fonte: A autora (2023).

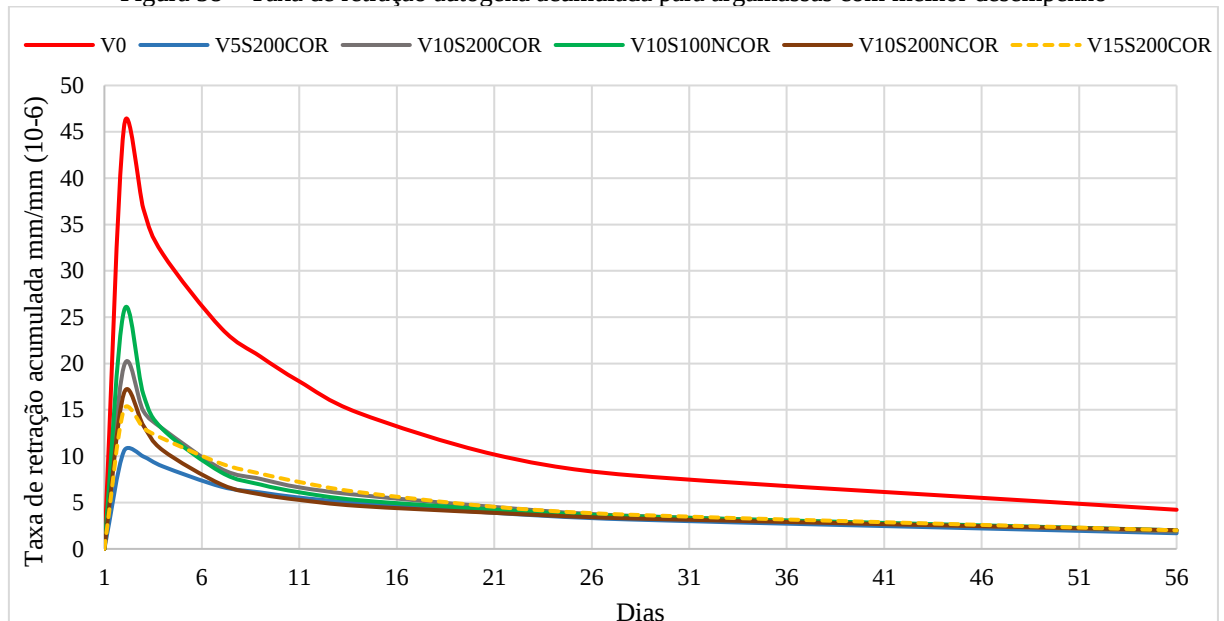
As Figuras 57 e 58 apresentam as retrações para as argamassas V5S200 CR, V10S200 CR, V10S100 NC e V15S200 CR, que apresentaram os melhores desempenhos considerando o fenômeno de retração. Como observado, a mistura V5S200 CR apresentou retração consideravelmente inferior em relação às demais argamassas, com redução de 59,99% da retração total, enquanto que este valor foi de 55,90% e 52,20% para as misturas V10S200 CR e V15S200 CR em relação à V0.

Figura 57 – Retração autógena para argamassas com melhor desempenho



Fonte: A autora (2023).

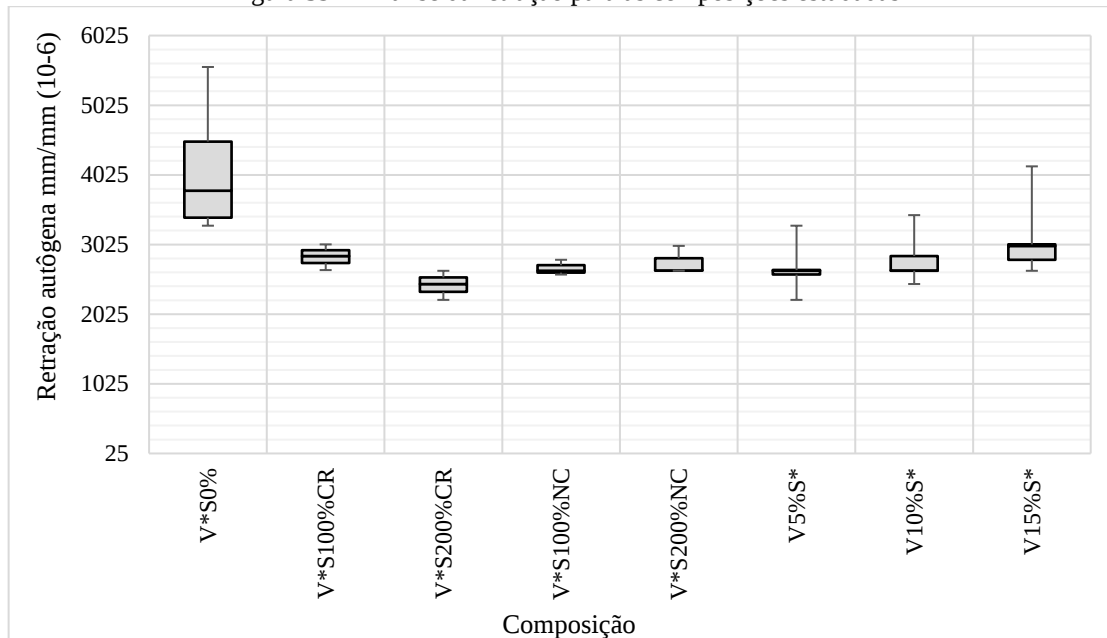
Figura 58 – Taxa de retração autógena acumulada para argamassas com melhor desempenho



Fonte: A autora (2023).

Analizando o desempenho geral das argamassas aos 56 dias, temos a Figura 59 que relaciona as variações dos teores de saturação e de vermiculita com a retração autógena.

Figura 59 – Análise da retração para as composições estudadas



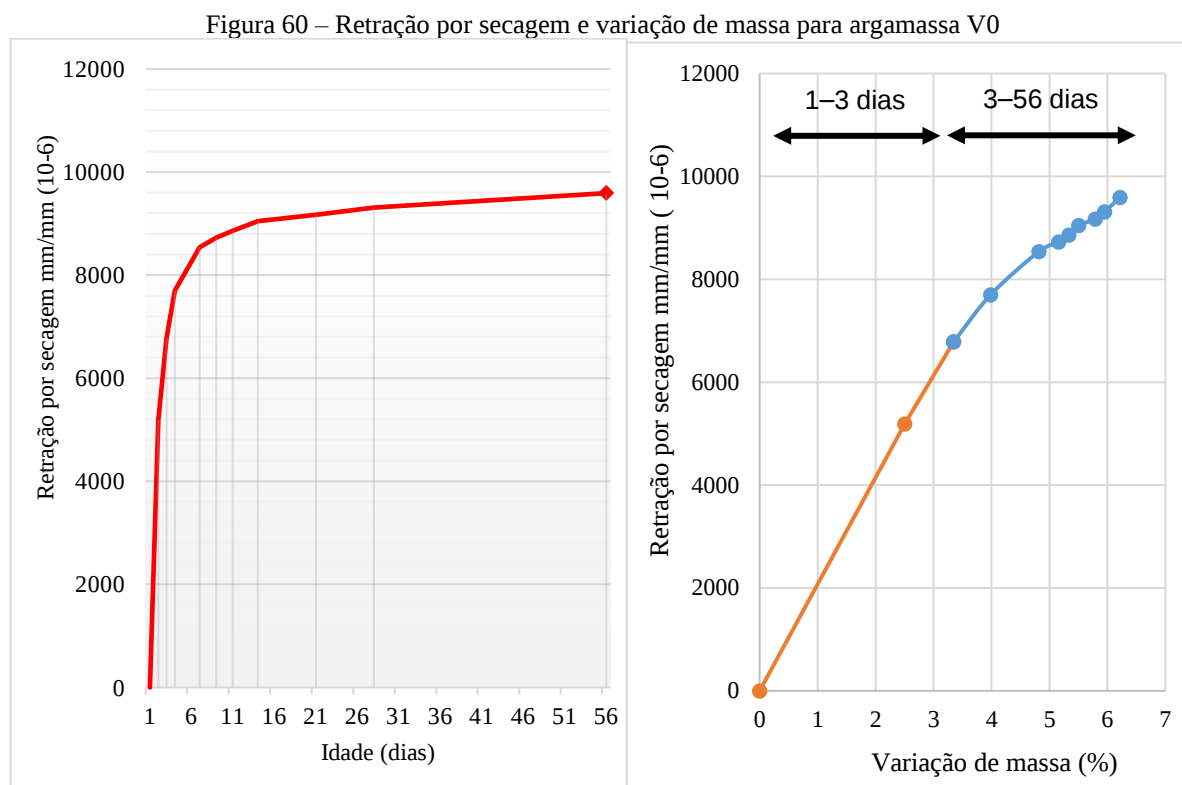
Fonte: A autora (2023).

Com base nas composições adotadas (Figura 59), é possível evidenciar os seguintes aspectos:

- A composição V15%S* apresentou a maior variação dos dados; em contrapartida, a composição V10%S* apresentou menor dispersão, com dados concentrados em torno da média.
- A composição V*S0% obteve a maior retração, o que já era esperado tendo em vista os resultados obtidos por Silva et al. (2010) e Cintra (2013).
- Apesar da dispersão assimétrica dos dados, a composição V*200%CR obteve o melhor resultado, como esperado, com menor retração em comparação às demais composições.

4.3.2 Retração por Secagem

Inicialmente, como observado na Figura 60, nos quatro primeiros dias iniciais, a argamassa de referência (V0) apresentou maior retração, em comparação com a retração observada para os dias finais do experimento, evidenciando a estabilização da retração a partir do sétimo dia até o dia 56. Esse comportamento também foi evidenciado pela perda de massa no período, com uma maior perda de água nos dias iniciais, ocasionando maior retração e, conseqüentemente, maior perda de massa nesse período.



Fonte: A autora (2023).

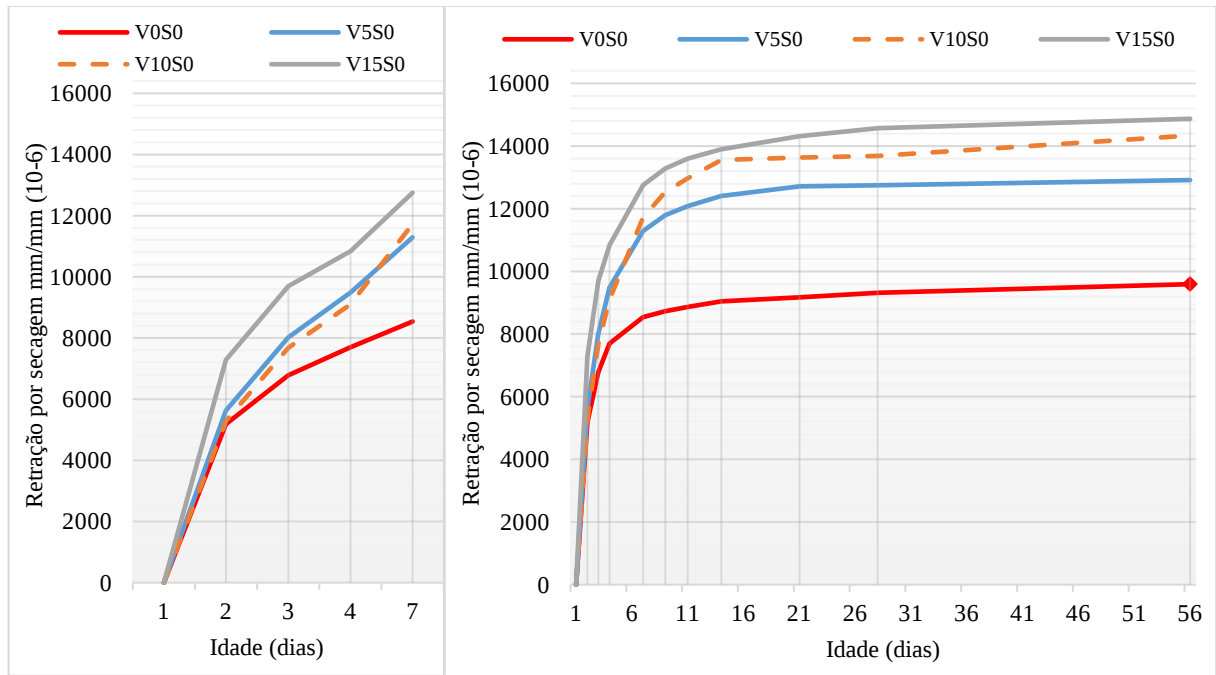
4.3.2.1 Influência do teor de vermiculita

A figura 61 evidencia os resultados de retração obtidos para as argamassas V5, V10 e V15 com uso de vermiculita seca, que apresentaram aumento de 34,65%, 49,46% e 55,03% na retração, respectivamente, em comparação à argamassa de referência V0. Nota-se a elevada retração por secagem das argamassas com vermiculita, resultado diferente do obtido para a retração autógena.

O aumento da retração por secagem em argamassas com vermiculita foi evidenciado por Silva et al. (2010) e Cintra (2013) e é ocasionado pela diminuição rápida da água de amassamento da mistura pelo efeito conjunto da evaporação – perda da água para o meio ambiente - e da elevada absorção de água pela vermiculita, ocasionando alta tensão capilar conforme indicado por Lee et al. (2014).

É possível notar, ainda, a relação diretamente proporcional entre o teor de vermiculita e a retração obtida, ou seja, quanto maior o teor de vermiculita seca, maior a retração verificada.

Figura 61 – Retração por secagem para V0, V5S0, V10S0 e V15S0

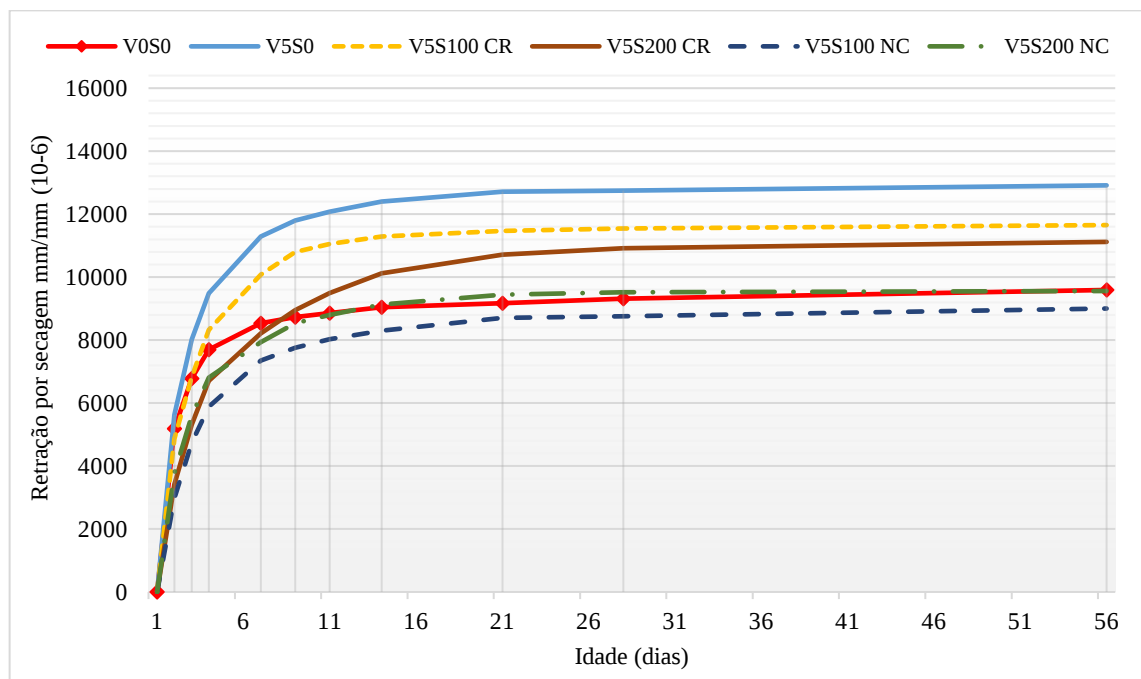


Fonte: A autora (2023).

4.3.2.2 Influência do teor de saturação da vermiculita

Analisando os teores de saturação (Figuras 62, 63 e 64) verifica-se a diminuição da retração obtida para a mistura V5S100 NC, dentre as argamassas com 5% de vermiculita, sendo 6,15% inferior a referência (V0).

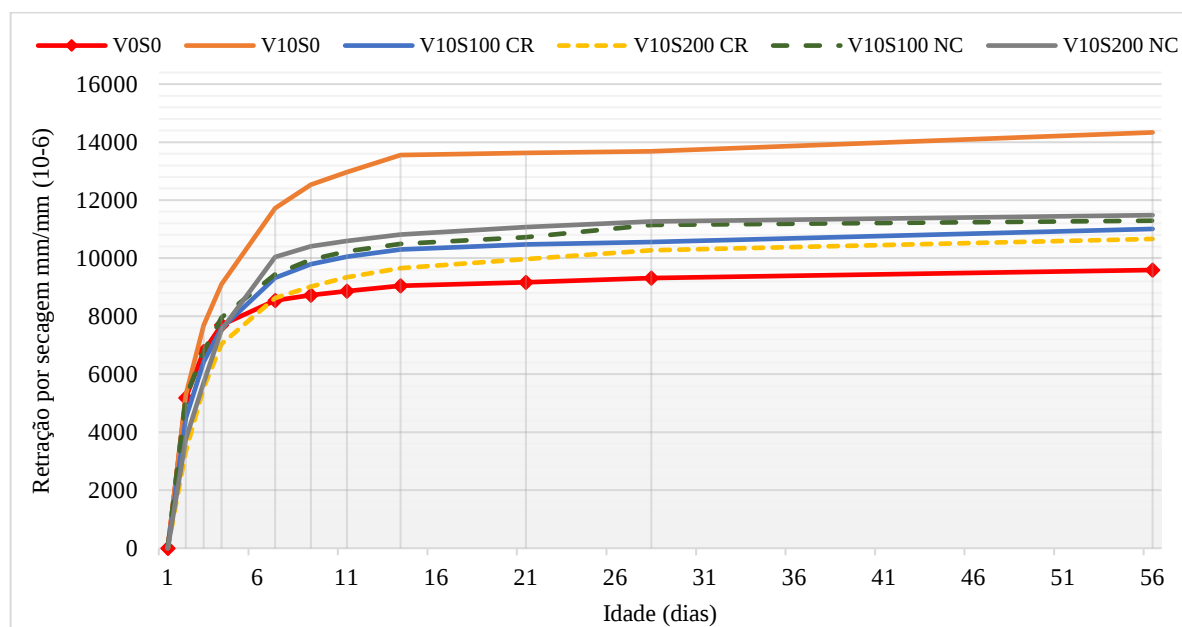
Figura 62 – Retração por secagem para V0 e argamassas com 5% de vermiculita



Fonte: A autora (2023).

Observando a Figura 63, em que são apresentadas as retrações das argamassas com 10% de vermiculita, a mistura V10S200 CR apresentou o menor aumento de retração, sendo de 11,18%, em comparação às demais argamassas.

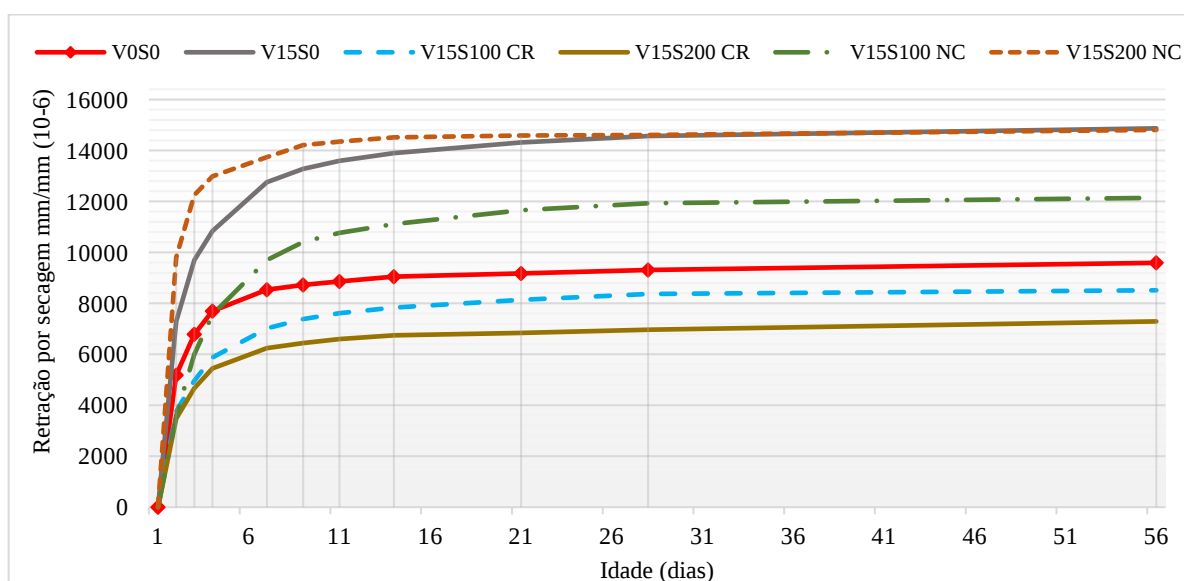
Figura 63 – Retração por secagem para V0 e argamassas com 10% de vermiculita



Fonte: A autora (2023).

Para o teor de 15% de vermiculita (Figura 64), a argamassa V15S200 CR apresentou a menor retração, com um valor 23,97% menor, em relação àquela da argamassa de referência (V0).

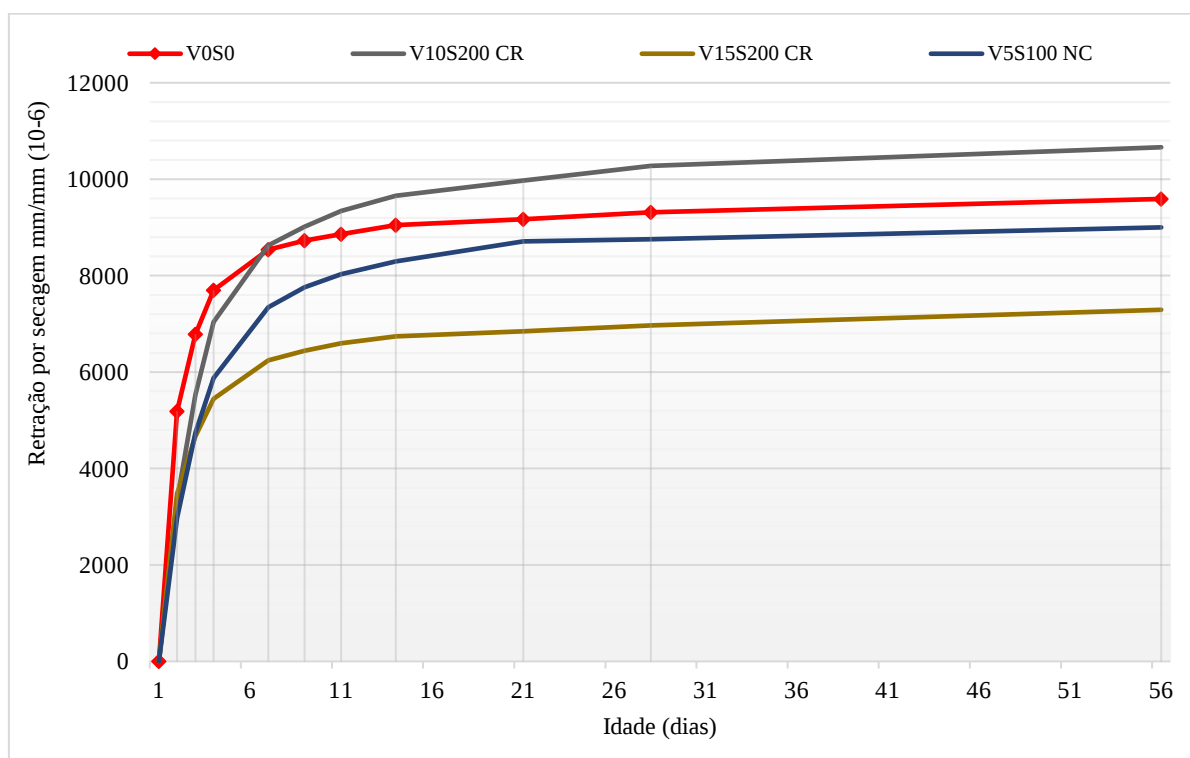
Figura 64 – Retração por secagem para V0 e argamassas com 15% de vermiculita



Fonte: A autora (2023).

A Figura 65 apresenta a retração obtida para as argamassas V10S200 CR, V15S200 CR e V5S100 NC, que obtiveram melhor desempenho dentre os conjuntos com 5%, 10% e 15% de substituição por vermiculita. Dentre estas, a V15S200 CR apresentou melhor desempenho global, com retração 23,97% inferior à da argamassa de referência V0.

Figura 65 – Retração por secagem para argamassas com melhor desempenho

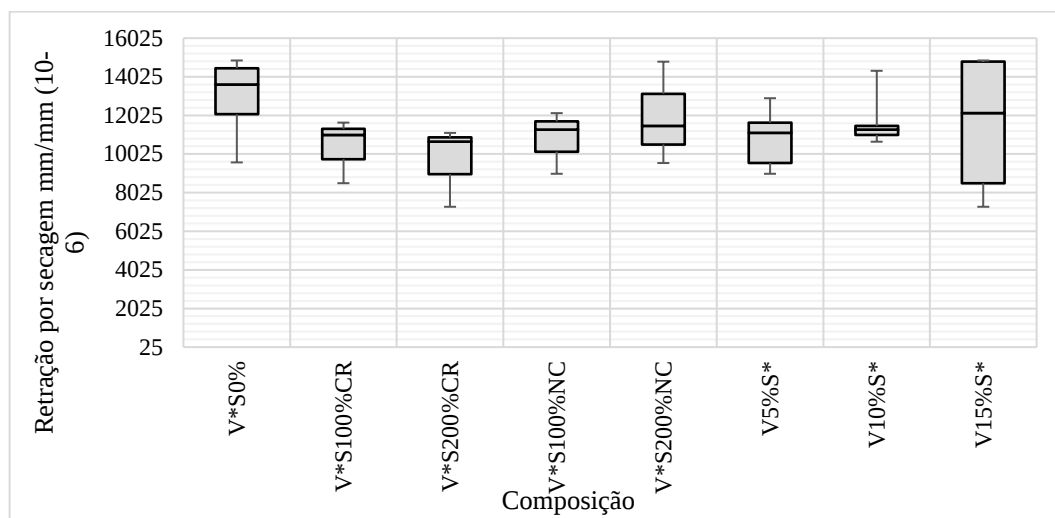


Fonte: A autora (2023).

Analisando o desempenho geral das argamassas aos 56 dias (Figura 66) com base nas composições adotadas, destacam-se os seguintes pontos:

- A composição V*S0% apresentou maior variação dos dados; em contrapartida, a composição V*S100%NC apresentou menor dispersão, com dados concentrados em torno da média;
- A composição V*S0% obteve a maior retração, o que já era esperado tendo em vista os resultados obtidos por Silva et al. (2010) e Cintra (2013);
- A composição V*S200%CR obteve o melhor resultado de retração em comparação com as demais composições, evidenciando a influência do pré-umedecimento da vermiculita frente a retração.

Figura 66 – Análise da retração para as composições estudadas

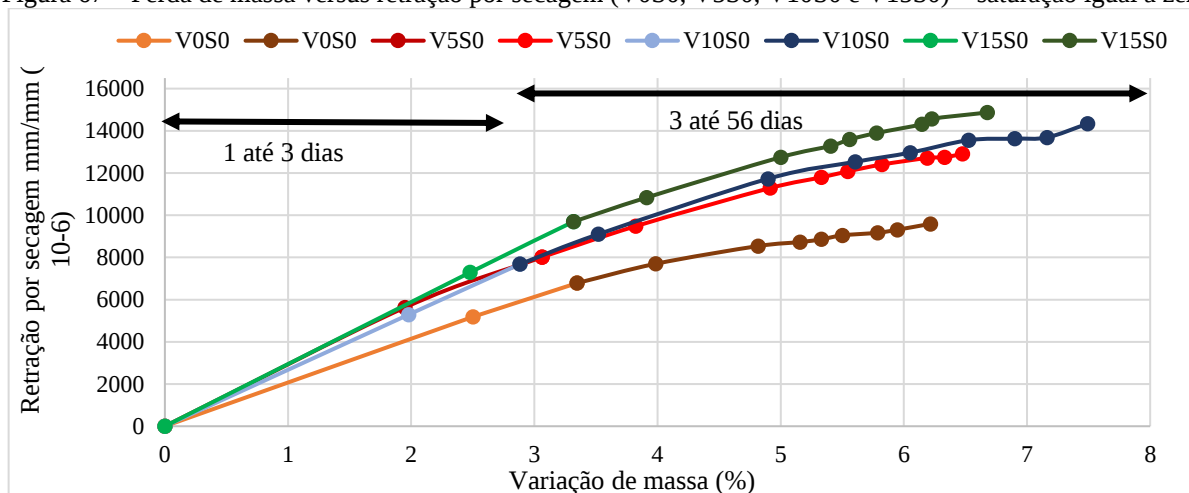


Fonte: A autora (2023).

4.3.2.3 Retração por secagem versus perda de massa

A Figura 67 relaciona a variação de massa verificada e a retração medida para as misturas V0, V5, V10 e V15 para o teor de saturação igual a zero (vermiculita seca). Nessa é notável a menor variação de massa para a mistura V10S0 e maior retração para o teor de 15% de substituição de vermiculita ao longo do ensaio, enquanto que as misturas V0 apresentaram menor variação de massa e menor retração por secagem, deixando evidente o efeito danoso à argamassa pela utilização da vermiculita seca.

Figura 67 – Perda de massa versus retração por secagem (V0S0, V5S0, V10S0 e V15S0) – saturação igual a zero

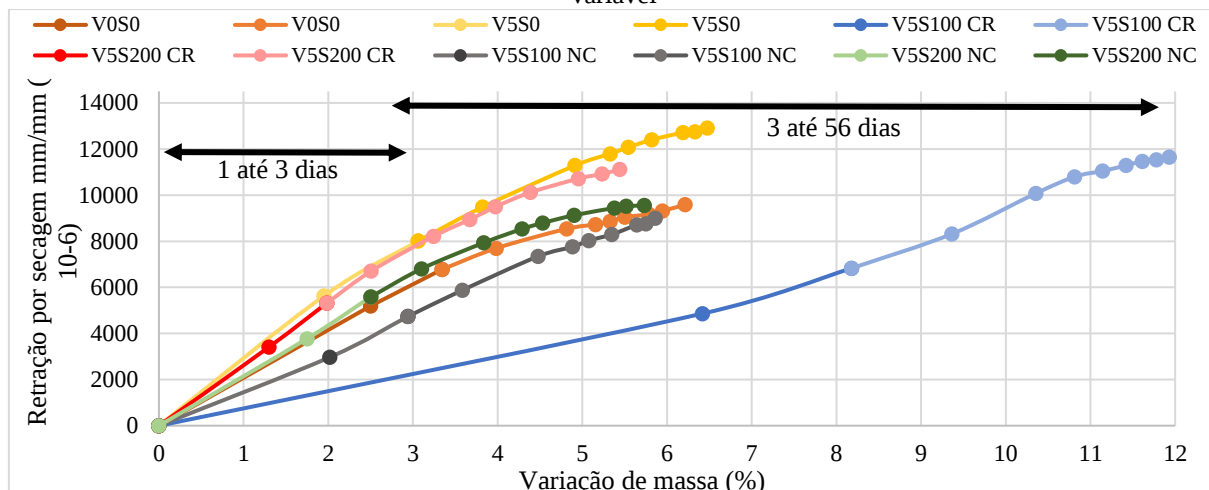


Fonte: A autora (2023).

Na Figura 68 estão expressas as variações de massa e retração para as misturas de referencia (V0) e com 5% de substituição de vermiculita, sendo verificado maior retração para

a mistura V5S0 (teor de saturação da vermiculita igual a zero), menor retração para a mistura V5S100 NC, demonstrando menor retração nas misturas com maior teor de saturação da vermiculita.

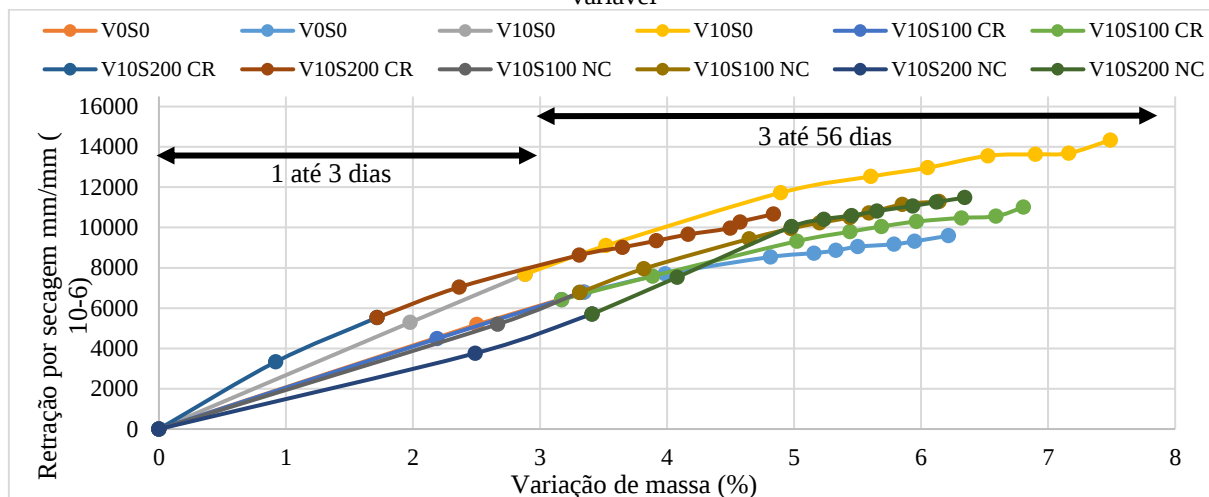
Figura 68 – Perda de massa versus retração por secagem (V0 e misturas com 5% de vermiculita) – saturação variável



Fonte: A autora (2023).

A Figura 69 relaciona a perda de massa e a retração por secagem obtidas para a argamassa de referência (V0) e as com 10% de substituição do agregado por vermiculita. A mistura V10S0 apresentou os maiores valores de retração total e variação de massa, enquanto que a V10S100 CR apresentou menor retração e menor perda de massa, sendo verificado mais uma vez a influência do teor de saturação da vermiculita no fenômeno de retração.

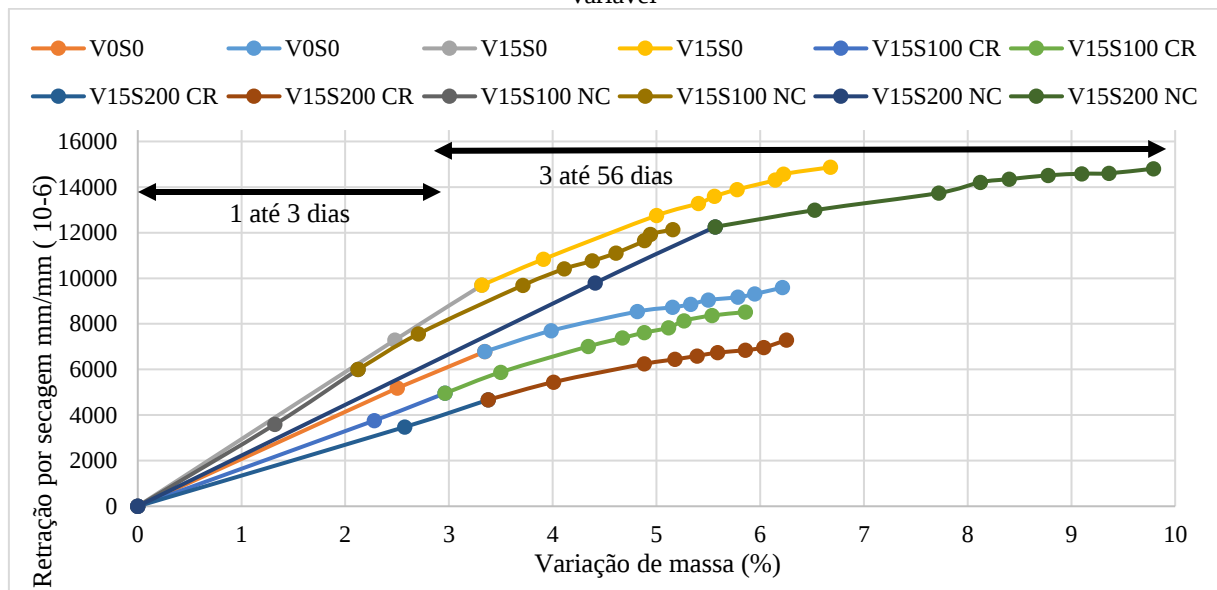
Figura 69 – Perda de massa versus retração por secagem (V0 e misturas com 10% de vermiculita) – saturação variável



Fonte: A autora (2023).

Na Figura 70 estão expressas as perdas de massa e retração apresentadas pela mistura de referência e relacionadas com as argamassas com 15% de vermiculita na sua composição. A maior retração total verificada referiu-se a mistura V15S0, enquanto que a menor retração foi obtida para a argamassa V15S200 CR. A maior perda de massa refere-se a mistura V15S200 NC, devido ao excesso de água apresentado pela mistura, e a menor perda corresponde à mistura V15S100 CR.

Figura 70 – Perda de massa versus retração por secagem (V0 e misturas com 15% de vermiculita) – saturação variável

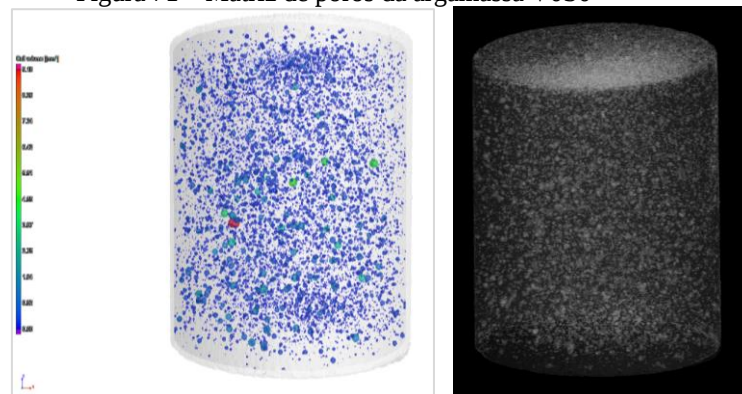


Fonte: A autora (2023).

4.3.3 Microtomografia de raio-X (porosidade)

Devido à limitação técnica do equipamento, apenas a incidência de macroporos foi analisada. A Figura 71 ilustra a matriz de macroporos existente na amostra V0S0.

Figura 71 – Matriz de poros da argamassa V0S0

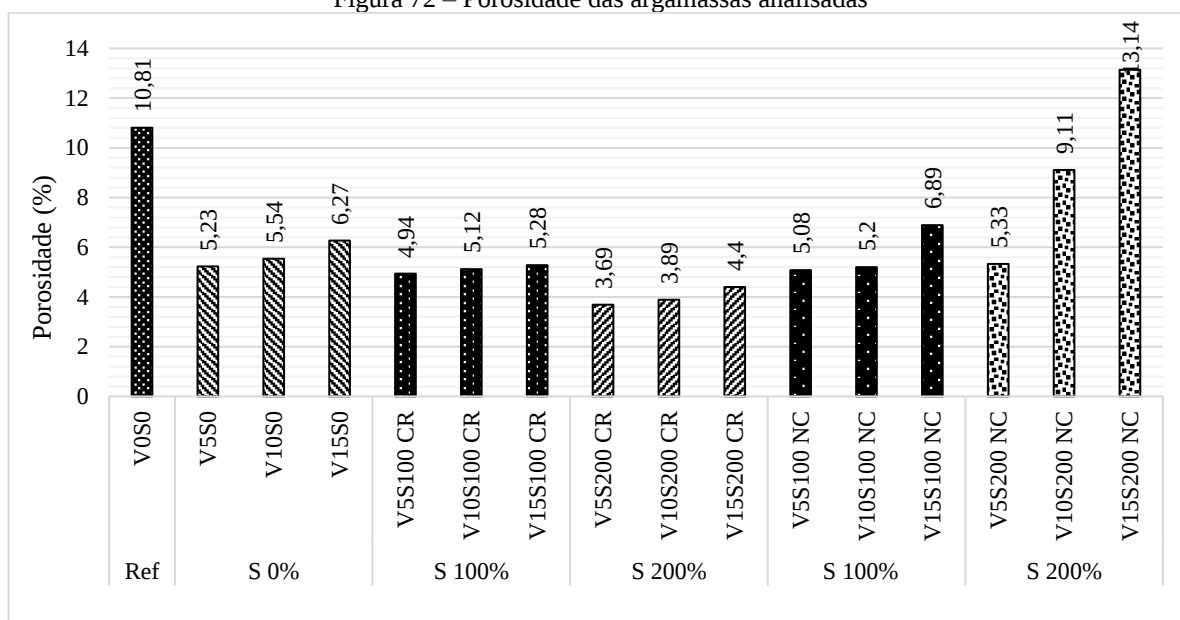


Fonte: A autora (2022).

A Figura 72 demonstra os teores de macroporos verificado em cada uma das misturas. Verifica-se a influência da inserção da vermiculita e de seu pré-umedecimento nas características finais da argamassa.

A vermiculita proporcionou uma diminuição de macroporos na mistura, exceto na V15S200 NC, que apresentou porosidade igual a 13,14%, possivelmente devido à elevada relação a/l da mistura. A respeito do pré-umedecimento, a porosidade média de misturas com vermiculita seca (S0) foi de 5,68%, de 5,11% para misturas com teor de saturação da vermiculita igual a 100% e relação a/l de 0,48 (S100 CR) e de 3,99% para misturas com teor de saturação de 200% e relação a/l de 0,48.

Figura 72 – Porosidade das argamassas analisadas



Fonte: A autora (2022).

Considerando a Figura 72, é possível evidenciar os seguintes aspectos:

- Verificou-se a diminuição da porosidade pela adição da vermiculita;
- A porosidade sofreu maior diminuição para misturas com vermiculita pré-umedecida, destacando-se as misturas com teor de saturação igual a 200% e relação a/l igual a 0,48 (S200 CR);
- A maior parte das misturas com relação a/l acima de 0,48 também apresentou diminuição da porosidade, exceto a mistura V15S200 NC, resultado do excesso de água na mistura, que resultou em vazios na matriz após o processo de cura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir, serão abordadas as considerações finais do presente trabalho, conforme as análises realizadas dos resultados, bem como sugestão para novas pesquisas.

5.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos, é possível delinear as seguintes considerações:

No estado fresco, a inserção da vermiculita em argamassas impactou diretamente na consistência das misturas, verificando-se uma diminuição do índice de consistência, o que foi decorrente da alta absorção de água por meio da estrutura foleada da vermiculita. Assim, é necessária a correção do teor água/ligante da mistura para obtenção da consistência adequada para aplicação do material em alvenarias.

A densidade de massa no estado fresco também foi impactada, uma vez que a massa específica da vermiculita é inferior à do agregado miúdo utilizado. A elevada relação água-ligante das misturas NC ($a/l > 0,48$) contribuiu para a diminuição da densidade no estado fresco. No entanto, para misturas com mesma relação a/l , não foi verificada influência significativa do teor de saturação da vermiculita nesta propriedade.

O teor de ar incorporado sofreu variações devido ao acréscimo de vermiculita à mistura, fator ocasionado pela morfologia foleada deste agregado. Para misturas com maior relação a/l , o aumento do teor de ar foi maior.

Assim, baseando-se nos resultados obtidos para o estado fresco, nota-se que o maior impacto resultante do uso vermiculita em argamassas de escória foi observado no índice de consistência, que interfere diretamente na possibilidade de aplicação em alvenarias, sendo necessária a correção do teor a/l para o teor de vermiculita empregado.

No estado endurecido, a vermiculita elevou a absorção por capilaridade das misturas, sendo este aumento mais acentuado para as misturas com $a/l > 0,48$, fator esperado, uma vez que a maior relação a/l favorece a presença de poros conectados, elevando a absorção.

A análise tomográfica das misturas evidenciou que, para misturas com $a/l = 0,48$, a presença de vermiculita resultou na diminuição do teor de macroporos para todas as misturas, exceto para a que apresentava elevada relação água-ligante (V15S200 NC).

A diminuição de macroporos da matriz atrelada ao aumento do índice de capilaridade indica que a vermiculita pode ter interferido no teor de micro e mesoporos da mistura com consequente incidência de poros conectados. Este fator poderia diminuir a vida útil de revestimentos, uma vez argamassas com maiores índices de poros podem favorecer a entrada de agentes agressivos, sendo necessário, quando visado a utilização como argamassa de

revestimento, a aplicação de uma camada de argamassa tradicional de cerca de 1 a 2 cm, de modo a impedir a entrada de agentes agressivos.

Para misturas com relação a/l constante ($a/l = 0,48$) e vermiculita saturada previamente ao processo de mistura, verificou-se menores taxas de absorção por capilaridade, indicando que o processo de pré-umedecimento do material pode resultar em melhor desempenho de revestimentos argamassados com utilização de vermiculita.

A resistência à compressão foi diretamente impactada pelo emprego da vermiculita, uma vez que todas as argamassas apresentaram valores de resistência inferiores ao da argamassa de referência (V0). No entanto, essa diminuição não inviabiliza a utilização da vermiculita em argamassas com escória, pois este aglomerante pode atingir elevada resistência mecânica. Mesmo para misturas com $a/l > 0,48$, que apresentaram a menor resistência mecânica neste estudo, os valores obtidos indicam a viabilidade destas argamassas.

Comparando os resultados de resistência à compressão para misturas com mesma relação $a/l = 0,48$, o efeito do pré-umedecimento da vermiculita foi evidente, pois estas misturas apresentaram valores de resistência superiores aos obtidos para as misturas com vermiculita seca ou com teor de saturação inferior.

Tratando-se das variações dimensionais observadas, verificou-se a diminuição das retrações autógenas para todos os casos, sendo verificada menor retração para as misturas com maior teor de saturação, relação $a/l = 0,48$ e teor de substituição do agregado miúdo natural por vermiculita de 5%.

Nos resultados de retrações por secagem, as misturas com vermiculita na sua forma seca (S0) apresentaram maior perda de massa e, conseqüentemente, maior grau de retração, sendo este aumento diretamente proporcional ao teor de substituição empregado.

Para os casos em que a vermiculita foi utilizada na forma saturada, notou-se menor retração média para as misturas que utilizaram vermiculita com maior teor de saturação e relação água/ligante fixada a 0,48. Conclui-se que a utilização da vermiculita *in natura* (seca) considerando a retração por secagem não é satisfatória; no entanto, a sua utilização pré-saturada demonstrou-se ser uma alternativa viável para o controle da retração por secagem, em especial a mistura com V5S200 CR, que apresentou maior controle da retração e menor redução da resistência a compressão.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como propostas de trabalhos futuros, pode-se sugerir:

- a) Avaliar a durabilidade das argamassas fabricadas com escória de alto forno e vermiculita;
- b) Analisar a microestrutura de argamassas de escória com vermiculita para verificação da distribuição e tamanho de poros;
- c) Estudar a matriz de poros de argamassas de escória com o uso vermiculita e como esse fator interfere no fenômeno de retração;
- d) Investigar as propriedades das argamassas de escória álcali-ativada com adoção de vermiculita em situações de incêndio.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30:** Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:** Agregados — Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados Para Concretos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR: 10406:** Vermiculita expandida – Determinação de umidade. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11355:** Vermiculita expandida — Análise granulométrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278:** Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard practice for use of apparatus for determination of length change of hardened cement past, mortar and concrete (**C490**). Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1997.

AGUIAR, A. L. D. D. **Estudo das propriedades tecnológicas da argamassa de revestimento com incorporação da vermiculita expandida**. UFRN. Natal, p. 20. 2017.

ALONSO, S. PALOMO, A. Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide - metakaolin solid mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 31, 25-30 p., 2001a.

ALONSO, S.; PALOMO, A. Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. **Materials Letters**, v. 47, 55–62 p., 2001b.

AMER, I., KOHAIL, M., EL-FEKY, M. S., RASHAD, A., KHALAF, M. A. (2021). A review on alkali-activated slag concrete. In **Ain Shams Engineering Journal** (Vol. 12, Issue 2, pp. 1475–1499). Ain Shams University. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.12.003>

ARAÚJO, R. C. A. **Concreto de alta resistência à base de escória álcali-ativada em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

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

BROUGH, A.R., ATKINSON, A. Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure, **Cem. Concr. Res.** 32 (2002) 865–879.

AZEVEDO, A.R.G., MARVILA, M.T., OLIVEIRA, L.B.W., FERREIRA, H.M., COLORADO, TEIXEIRA, S. R., VIEIRA, C. M. F. Circular economy and durability in geopolymers ceramics pieces obtained from glass polishing waste, **Int. J. Appl. Ceram. Technol.** (2021) 13780, <https://doi.org/10.1111/ijac.13780>.

AZEVEDO, A.R.G., MARVILA, M.T., ROCHA, H.A., CRUZ, L.R., VIEIRA, C.M.F. Use of glass polishing waste in the development of ecological ceramic roof tiles by the geopolymerization process, **Int. J. Appl. Ceram. Technol.** (2020), <https://doi.org/10.1111/ijac.13585>. [15] P. Shoaee, H.R. Musaei, F. Mirlohi, S. Narimani zamanabadi, F. Ameri, N. Bahrami, Waste ceramic powder-based

BALAPOUR, M., ZHAO, W., GARBOCZI, E. J., OO, N. Y., SPATARI, S., HSUAN, Y. G., BILLEN, P., & FARNAM, Y. (2020). Potential use of lightweight aggregate (LWA) produced from bottom coal ash for internal curing of concrete systems. **Cement and Concrete Composites**, 105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103428>

BARROS, I. M. S. **Análise térmica e mecânica de argamassas de revestimento com adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2018.

BEN HABA, M.; LE SAOUT, G.; WINNEFELD, F.; LOTHENBACH, B. Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 301-310. 2012.

BENLI, A.; KARATAS, M.; TOPRAK, H. A. Mechanical characteristics of self-compacting mortars with raw and expanded vermiculite as partial cement replacement at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 239 (2020).

BENTZ, D. P., SNYDER, K. A. (1999). Protected paste volume in concrete Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate. In **Cement and Concrete Research** (Vol. 29).

BERNAL, S.; RODRÍGUEZ, E.; GUTIÉRREZ, R.; PROVIS, J.; DELVASTO, S. Activation of Metakaolin/Slag Blends Using Alkaline Solutions Based on Chemically Modified Silica Fume and Rice Husk Ash. **Waste Biomass Valor**, v. 3, p. 99-108. 2011.

CAETANO, P. H. C. **Análise do comportamento no estado fresco e endurecido de pastas alcalí ativadas à base de cinzas de combustão de carvão mineral e de escória de aciaria.** Monografia - Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Ceará, 2021.

CARASEK, H. Argamassas. Capítulo 26. In: ISAIA, Geraldo (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2 ed. IBRACON, 2010. v.1 & v.2. p. 863-891.

CARTWRIGHT, C.; RAJABIPOUR, F.; RADLIŃSKA, A. Measuring the Chemical Shrinkage of Alkali-Activated Slag Cements - Using the Buoyancy Method. **Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete**, 2013.

CARTWRIGHT, C.; RAJABIPOUR, F.; RADLIŃSKA, A. **Shrinkage Characteristics of Alkali-Activated Slag Cements**. J. Mater. Civ. Eng., v. 27, 2015.

CASTRO, J., KEISER, L., GOLIAS, M., & WEISS, J. (2011). Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures. **Cement and Concrete Composites**, 33(10), 1001–1008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.07.006>

CHEN, W.; BROUWERS, H. J. H. The hydration of slag, part 1: Reaction models for alkaliactivated slag. **Journal of Materials Science**, v. 42, p.428-443, 2007.

CINCOTTO, M. A.; BATTAGIN, A.; AGOPYAN, V. **Características da escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado.** São Paulo: IPT, 1992. (Boletim, 65).

CINTRA, C. L. D. **Argamassa para revestimento com propriedades termoacústicas, produzida a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, 2013.

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1401-1406. 2000.

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Early age strength and workability of slag pastes activated by sodium silicates. **Magazine of Concrete Research**, v. 53, n. 5, p.321-326, 2001.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. cap.12, v.1, p.345-379.

ÇELİK, Z. (2023). Investigation of the use of ground raw vermiculite as a supplementary cement materials in self-compacting mortars: Comparison with class C fly ash. **Journal of Building Engineering**, 65. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105745>

EL-GAMAL, S.M.A., HASHEM, F.S., AMIN, M.S. **Thermal resistance of hardened cement pastes containing vermiculite and expanded vermiculite**, J. Therm. Anal. Calorim. 109 (1) (2012) 217–226.

FANG, G.; BAHRAMI, H.; ZHANG, M. Mechanisms of autogenous shrinkage of alkali-activated fly ash-slag pastes cured at ambient temperature within 24 h. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 377-387. 2018.

FRANCO DE CARVALHO, J. M.; MELO, T. V.; FONTES, W. C.; BATISTA, J. O. S.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 206, p. 397–409, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.054. Acesso em: 21 jun. 2021.

GUPTA, S.; CHAUDHARY, S. State of the art review on Supplementary Cementitious Materials in India – I: An overview of legal perspective, governing organizations, and development patterns. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 261, p. 121203, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121203. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121203>.

HENKENSIEFKEN, R., BENTZ, D., NANTUNG, T., WEISS, J. (2009). Volume change and cracking in internally cured mixtures made with saturated lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions. **Cement and Concrete Composites**, 31(7), 427–437. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009a.04.003>

HENKENSIEFKEN, R., CASTRO, J., BENTZ, D., NANTUNG, T., WEISS, J. (2009). Water absorption in internally cured mortar made with water-filled lightweight aggregate. **Cement and Concrete Research**, 39(10), 883–892. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009b.06.009>.

HOJATI, M.; RADLIŃSKA, A. Shrinkage and strength development of alkali-activated fly ash-slag binary cements. **Constructions and Building Materials**, v. 150, p. 808-816. 2017.

JAYADURGALAKSHMI, M., KANDASAMY, S. (2022). A comparative study on the various alternative materials for fine aggregate in concrete. **Materials Today: Proceedings**. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.670>

JIAO, Z.; WANG, Y.; ZHENG, W.; HUANG, W. Effect of Dosage of Alkaline Activator on the Properties of Alkali-Activated Slag Pastes. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, p.1-12, 2018.

JOHN, M. V. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 199f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

JUENGER, M. C. G.; WINNEFELD, F.; PROVIS, J. L.; IDEKER, J. H. Advances in alternative cementitious binders. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 1232-1243. 2011.

JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 122, n. May, p. 257–273, 2019. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.05.008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>.

KARATAS, M., BENLI, A., TOPRAK, H. A. (2019). Effect of incorporation of raw vermiculite as partial sand replacement on the properties of self-compacting mortars at elevated temperature. **Construction and Building Materials**, 221, 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.077>

KHONSARI, V.; ESLAMI, E.; ANVARI, A. **Effects of expanded perlite aggregate (EPA) on the mechanical behavior of lightweight concrete**, in: B.H. Oh (Ed.), *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures – high Performance, Fiber Reinforced Concrete, Special Loadings and Structural Applications*, Korea Concrete Institute, 2010, pp. 1354–1361.

KLYUSOV, A. A.; FATTAKHOV, Z. M.; KLYUSOV, V. A. **Compressible cement compositions improve isolation**. Gulf, World oil A., 2005.

KOKSAL, F., GENÇEL, O. KAYA, M. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, 2015.

KUMARAPPA, D. B.; PEETHAMPARAN, S.; NGAMI, M. Autogenous shrinkage of alkali activated slag mortars: Basic mechanisms and mitigation methods. **Cement and Concrete Research**, v. 109, p. 1-9. 2018.

LANGARO, E. A. **Cimento álcali ativado a partir da valorização da escória de alto forno a carvão vegetal**. 2016. 140 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

LEE, N. K.; JANG, J. G.; LEE, H. K. Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages. **Cement & Concrete Composites**, v. 53, p. 239-248. 2014.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. **Cement and Concrete Research**, v. 40, ed. 9, 1341–1349 p., 2010.

L. LI; X. ZHOU; Y. LI; C. GONG; L. LU; X. FU; W. TAO. Water absorption and water/fertilizer retention performance of vermiculite modified sulphoaluminate cementitious materials, **Constr. Build. Mater.** 137 (2017) 224–233.

LIANG, G.; LIU, T.; LI, H.; WU, K. (2022). Shrinkage mitigation, strength enhancement and microstructure improvement of alkali-activated slag/fly ash binders by ultrafine waste concrete powder. **Composites Part B: Engineering**, 231. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109570>

LIU, J., ZHUGE, Y., MA, X., LIU, M., LIU, Y., WU, X., & XU, H. (2022). Physical and mechanical properties of expanded vermiculite (EV) embedded foam concrete subjected to elevated temperatures. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01038>

LOTENBACH, Barbara; SCRIVENER, Karen; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.12.001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>.

MA, Y.; YE, G. The shrinkage of alkali activated fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 68, p. 75-82. 2015.

MA, X., LIU, J., SHI, C. (2019). A review on the use of LWA as an internal curing agent of high performance cement-based materials. In **Construction and Building Materials** (Vol. 218, pp. 385–393). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.126>

MARTINS, N. P. **Microestrutura e propriedades mecânicas de argamassas contendo escória de alto forno in natura**. Monografia. Centro de Tecnologia. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2016.

MASTALI, M.; KINNUNEN, P.; DALVAND, A.; FIROUZ, R. M.; ILLIKAINEN, M. Drying shrinkage in alkali-activated binders – A critical review. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 533-550. 2018.

MELO NETO, A. A. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada**. 2002. 161 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MELO NETO, A. A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada**. 2008. 253 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEHTA, P. K. **Concrete in marine environment**. New York: Elsevier Science Publishers, 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 2nd ed. Berkeley: University of California, 2001.

MITHUN, B. M.; NARASIMHAN, M. C. SELF-Cured Alkali Activated Slag Concrete Mixes - An Experimental Study. **World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil and Environmental Engineering**, v. 8, n. 4, p.477-482, 2014.

MO, K.H. et al. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. **Construction and Building Materials** 179 (2018) 302–306.

MORAES, M. C. **Estudo da retração em sistemas álcali-ativados híbridos produzidos a partir dos resíduos industriais CZP e CCA**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

NAKAKURA, E. H. **Análise e classificação das argamassas industrializadas segundo a NBR 13281 e a Meruc**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), USP, São Paulo, 2003

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto**; tradução: Ruy Alberto Cremmonini. – 2. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2013.

PALACIOS, M.; PUERTAS, F.. Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 37, n. 5, p.691-702, maio 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.021>.

PALAMAR, I., BARLUENGA, G., PUENTES, J., (2015) Lime–cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance. **Construction and Building Materials** 2015:75: 306-314

PALOMO, A.; GRUTZHECK, M. W.; BLANCOA, M. T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. **Cement and Concrete Research**, v. 29, ed. 8, 1323-1329 p., 1999.

PALOMO, A.; KRIVENKO, P.; GARCIA-LODEIRO, I.; KAVALEROVA, E.; MALTSEVA, O.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. A review on alkaline activation: new analytical perspectives. **Materiales de Construcción**, v. 64, p. 315. 2014.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. **Construction and Building Materials**, v. 22, p.1305-1314, 2008.

PACHECO-TORGAL, F. **Eco-Efficient Construction And Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling And Case Studies**, No. 1985, Woodhead Publishing Limited, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104303>

PERALTA, M.M.C. **Tratamento químico de uma vermiculita visando seu uso em compósitos de polipropileno**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Dissertação), São Paulo, 2009.

PINTO, T. A. Novos Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina (Geopolimerização). **Construção Magazine**, 2004.

PROVIS, J.L.; BERNAL, S.A. Geopolymers and related alkali-activated materials, **Annu. Rev. Mater. Res.** 44 (2014) 299–327, <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>.

PROVIS, J.; DEVENTER, J. V, Geopolymerisation kinetics. 2. Reaction kinetic modelling, **Chem. Eng. Sci.** 62 (2007) 2318–2329, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.01.028>.

PROVIS, J.; DEVENTER, J. V. **Alkali activated materials: State-of-the-Art Report**, RILEM TC 224-AAM. v. 13. Springer Netherlands, 2014. ISBN: 978-94-007-7671-5.

PROVIS, J. L.; PALOMO, A.; SHI, C. Advances in understanding alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, V. 78, P. 110-125. 2015.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p.40-48, 2018

PUERTAS, F. Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas de futuro. **Materiales de Construcción**, v. 45, n. 239, p.53-64, 1995.

PUERTAS, F.; PALACIOS, M.; MANZANO, H.; DOLADO, J. S.; RICO, A.; RODRÍGUEZ, J. A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, p. 2043-2056. 2011.

PUERTAS, F., GONZÁLEZ-FONTEBOA, B., GONZÁLEZ-TABOADA, I., ALONSO, M. M., TORRES-CARRASCO, M., ROJO, G., & MARTÍNEZ-ABELLA, F. (2018). Alkali-activated slag concrete: Fresh and hardened behaviour. **Cement and Concrete Composites**, 85, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.003>

PULIDO-ARCAS, J. A., FLORES-ALÉS, V., PÉREZ-FARGALLO, A. (2022). Coating mortars with improved physical properties, economic cost, and carbon footprint. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01095>

RAMÍREZ, A. D. E., GUTIÉRREZ, M. R., PUERTAS, F. (2017). Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration. **Construction and Building Materials**, 140, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.092>

RASHAD, A.M. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer. **Construction and Building Materials** 125 (2016) 53–62.

REHMAN, W. U., REHMAN, A. U., SHARIF, Q. M., YAMIN, A. (2023). Exfoliation characteristics of Swat vermiculite clay and its application in the preparation of lightweight composite panels. **Construction and Building Materials**, 366. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130200>

RICHARDSON, I. G.; BROUGH, A. R.; GROVES, G. W.; DOBSON, C. M. The characterization of hardened alkali-activated blast-furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (C-S-H) phase. **Cement and Concrete Research**, v. 24, ed. 5, 813-829 p., 1994.

RICHARDSON, L. G.; CABRERA, J. G. The nature of C-S-H in model slag-cements. **Cemente and Concrete Composites**, v. 22, n. 4, p. 259-266, 2000.

SAHIN, M.; ERDOĞAN, S.T.; BAYER, O. Production of lightweight aerated alkali-activated slag pastes using hydrogen peroxide. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 106-118, 2018.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. 1998. 163p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

SCHACKOW, A. et al. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agente. **Construction and Building Materials** 57 (2014) 190–197.

SHI, C.; DAY, R. L.; A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements, **Cement and Concrete Research**, v. 25, ed. 6, 1333–1346 p., 1995.

SHI, C.; FERNÁNDEZ JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v.41, p. 750-763. 2011.

SHOUKRY, H.; KOTKATA, M.F.; ABO-EL-ENEIN, S.A.; Morsy, M.S.; Shebl, S.S.; Enhanced physical, mechanical and microstructural properties of lightweight vermiculite cement composites modified with nano metakaolin, **Construct. Build. Mater.** 112 (2016) 276–283.

SILVA, L. M., RIBEIRO, R. A., LABRINCHA, J. A., FERREIRA, V. M. (2010). Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar. **Cement and Concrete Composites** 32(1): 19-24.

SINHORELLI, K. S. **Estudo das propriedades reológicas e térmicas de argamassas de revestimento contendo adições minerais e vermiculita**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, 2019.

SONG, C. CHOI, Y. C.; CHOI, S. Effect of internal curing by superabsorbent polymers – Internal relative humidity and autogenous shrinkage of alkali-activated slag mortars. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 198-206. 2016.

SOUSA, L. N. **Material álcali-ativado em sistema ternário com o uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar como precursor**. Dissertação (Mestrado). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

SUN, Y., GHORBANI, S., DAI, X., YE, G., SCHUTTER, G. (2022). Evaluation of rheology and strength development of alkali-activated slag with different silicates sources. **Cement and Concrete Composites**, 128. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022a.104415>

SUN, B., YE, G., DE SCHUTTER, G. (2022). A review: Reaction mechanism and strength of slag and fly ash-based alkali-activated materials. In **Construction and Building Materials** (Vol. 326). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022b.126843>

TALLING, B., BRANDSTETR, J. **Present state and future of alkali-activated slag concretes**, J. Am. Concr. Inst. 114 (1989) 1519–1546.

TAYLOR, H. F. W. **Cemente Chemistry**. 2^a. ed. Londres: Thomas Telford Publisshing, 1997.

TRTIK, P., MÜNCH, B., JASON WEISS, W., et al., **Release of internal curing water from lightweight aggregates in cement paste investigated by neutron and X-ray tomography**, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 651 (2011) 244–249.

UGARTE, J. F. D. O.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Vermiculita. In: LUZ, A. B. D.; LINS, F. A. F. **Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005.

VARGAS, A. S.; SCHNEIDER, E. L.; SCHMITZ, G.; DE AQUIM, P. M. Argamassas geopolimárias à base de cinzas volantes álcali-ativadas contendo areia de fundição. **Cerâmica**, v. 61, n. 359, p. 317–322, 2015.

WANG, S. D.; SCRIVENER, K. L. Hydration products of alkali activated slag cement, **Cement and Concrete Research**, v. 25, ed. 3, 561–571 p., 1995.

WANG, S. D.; PU, X. C.; SCRIVENER, K. L.; PRATT; P. L. Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. **Advances in Cement Research**, v. 7, n. 27, p.93-102, 1995.

WANG, H. Y., WANG, W. C., WANG, J. C., CHEN, Y. W. (2021). Evaluation of the engineering properties and durability of mortar produced using ground granulated blast-furnace slag and stainless steel reduced slag. **Construction and Building Materials**, 280. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122498>

XIE, T.; OZBAKKALOGLU, T. Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature. **Ceramics International**, v. 41, p. 5945-5958. 2015.

YANG, L., MA, X., HU, X., LIU, J., WU, Z., & SHI, C. (2022). Production of lightweight aggregates from bauxite tailings for the internal curing of high-strength mortars. **Construction and Building Materials**, 341, 127800. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127800>

YANG, L., MA, X., LIU, J., HU, X., WU, Z., & SHI, C. (2022). Improving the effectiveness of internal curing through engineering the pore structure of lightweight aggregates. **Cement and Concrete Composites**, 134. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104773>

YE, H.; RADLIŃSKA, A. Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag. **Cement and Concrete Research**, v. 88, p. 126-135. 2016.

YE, H.; RADLIŃSKA, A. Shrinkage mitigation strategies in alkali-activated slag. **Cement and Concrete Research**, v. 101, p. 131-143. 2017.

YE, H.; CARTWRIGHT, C.; RAJABIPOUR, F.; RADLIŃSKA, A. Understanding the drying shrinkage performance of alkali-activated slag mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 76, p. 13-24. 2017.

YOUNG, J. F. **Physical mechanisms and their mathematical descriptions**. In: Z. P. Bazant (Ed.), *Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete*, Wiley, Chichester, 1988, p. 63-98.

YUAN, X. H. CHEN, W. LU, Z.A.; CHEN, H. Shrinkage compensation of alkali-activated slag concrete and microstructural analysis. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 422-428. 2014.

YUAN, B.; YU, Q. L.; BROUWERS, H.J.H. Autogenous and drying shrinkage of sodium carbonate activated slag altered by limestone powder incorporation. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 459-468. 2017.

XU, B. et al. **Paraffin/expanded vermiculite composite phase change material as aggregate for developing lightweight thermal energy**. *Applied Energy* 160 (2015) 358–367 storage cement-based composites.

XU, R., WANG, H., ZHA, Q., & LIN, J. (2023). Improving the carbonation resistance of alkali-activated slag mortars with different additives: experimental evaluations. **Construction and Building Materials**, 366. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130197>

ZHANG, P.; ZHENG, Y.; WANG, K.; ZHANG, J. A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. **Composites Part B: Engineering**, v. 152, n. June, p. 79–95, 2018.