

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RUBENS SILVEIRA MEICHTRY

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA AO CISALHAMENTO DE
PRISMAS DE TIJOLOS CERÂMICOS MACIÇOS MOLDADOS COM ARGAMASSA
“ECO-FRIENDLY” COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO**

**Alegrete
2023**

RUBENS SILVEIRA MEICHTRY

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA AO CISALHAMENTO DE
PRISMAS DE TIJOLOS CERÂMICOS MACIÇOS MOLDADOS COM ARGAMASSA
“ECO-FRIENDLY” COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ederli Marangon

Coorientador: Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld

**Alegrete
2023**

RUBENS SILVEIRA MEICHTRY

AValiação DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA AO CISALHAMENTO DE PRISMAS DE TIJOLOS CERÂMICOS MACIÇOS MOLDADOS COM ARGAMASSA "ECO-FRIENDLY" COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27 de fevereiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. DSc.. EDERLI MARANGON- UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. TELMO EGMAR CAMILO DEIFELD - UNIPAMPA - Coorientador

Prof. Me. KEVIN JHONEOR REBOLLEDO LA TORRE - UNIPAMPA

Eng. GULHERME DURIGON COCCO - Examinador Externo



Assinado eletronicamente por **EDERLI MARANGON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/02/2023, às 16:32, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **TELMO EGMAR CAMILO DEIFELD, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/02/2023, às 16:33, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Kevin Jhoneor Rebolledo La Torre, Usuário Externo**, em 28/02/2023, às 17:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Guilherme Durigon Cocco, Usuário Externo**, em 28/02/2023, às 19:07, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1066772** e o código CRC **58CA1851**.

Dedico este trabalho as minhas afilhadas,
Cecília e Constância e ao meu querido
padrinho Paulo Artêmio (*in memoriam*).

AGRADECIMENTO

Primeiramente, a minha família, pelo amor incondicional, carinho, paciência, incentivo incessante e apoio em todas fases da minha vida, sem vocês nada disso seria possível.

Ao meu amigo e professor Dr. Ederli Marangon, pela orientação neste trabalho e pelos três anos de parceria e aprendizados na iniciação científica, és um exemplo de profissional, minha eterna gratidão.

Ao professor Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld, pela coorientação neste trabalho e pela disponibilidade das fibras de polipropileno.

A minha família universitária “GANGUE DO CHIMARRÃO”: Ingrid Teixeira, João Manoel Marçal, Juliano Pase Neto e Leticia Lima, pelo convívio, amizade, incansáveis horas de estudos, com certeza vocês tornaram a vida universitária menos difícil.

Aos amigos e colegas de iniciação científica: Ian Motta, Leonardo Mendonça, Luan Garcia e Vitor Gabriel Avila, pelo suporte e ajuda na concretização deste trabalho.

Ao meu amigo e engenheiro civil do Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção – LEMAC Me. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira, pelo auxílio na realização dos ensaios.

Ao professor Dr. Alisson Simonetti Milani e ao Eng. Guilherme Durigon Cocco, pelos ensinamentos e colaborações neste trabalho.

Aos meus queridos amigos e companheiros de vida: Alisson Soares, Amanda Lima, Carissom Kletke, Carla Cardoso, Carla Dellamora, Danúbia Trindade, Eduardo Flain, Eduardo Saner, Felipe Machado, Fernanda de Almeida, Fernanda Dellamora, Ilana Popoviche, Jéssica Oliveira, Lauren Vieira, Letícia de Oliveira, Leticia Licker, Linda Beatriz Moreira, Luis Felipe Dutra, Luiza Casarotto, Maria Eduarda Curti, Maitê Vanzela, Marina Couto, Millena Piegas, Paula Dellamora, Radija Caitano, Rafaella Paiva, Raquel Haag, Raul Pedrotti, Ravana Cargnelutti, Roger Bastos, Ronald Assunção, Samuel Walter, Tamires Paiva, Tayara Guerim, Victor Lima, Vinicius Moura e Wilson Mendes, eu amo muito vocês!

“Não há saber mais ou saber menos: há saberes diferentes”.

Paulo Freire

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a resistência de aderência através do ensaio de cisalhamento com pré-compressão de acordo com a norma BS EN 1052-3 (2002) e o processo de fissuração e ruptura da interface argamassa/tijolo, mediante à correlação de imagens no software GOM Correlate® em prismas de tijolos cerâmicos maciços produzidos com argamassas com 0 e 5% de substituição parcial em massa do cimento Portland pela sílica da casca de arroz adicionadas de 0,3 e 0,5% de fibras de polipropileno em volume de argamassa quando aplicadas em diferentes intervalos de tempo (15, 60 e 120 min). Nestas misturas, também foram avaliados a resistência à tração na flexão em três pontos e a resistência à compressão axial de acordo com a ABNT NBR 13279 (2003). Nos resultados encontrados para os comportamentos mecânicos, a mistura de argamassa com 0% de substituição parcial e incorporação de 0,3% de fibras de polipropileno foi a mistura que apresentou as maiores médias de tensão máxima. Sendo de 3,28 MPa para a resistência à tração na flexão em três pontos, não apresentando diferença significativa somente em relação a mistura com 5% de substituição parcial do cimento Portland pela sílica da casca de arroz e incorporação de 0,5% de fibras de polipropileno. E de 10,90 MPa para a resistência à compressão axial, apontando diferença significativa com todas as misturas analisadas. Com relação aos ensaios de cisalhamento com pré-compressão dos prismas de tijolos maciços, o desempenho das misturas de argamassas na maioria das vezes não apresentaram diferenças significativas. Quanto a aplicação das misturas de argamassas, apenas a mistura adicionada de 0,5% de fibras de polipropileno não foi recomendada ser aplicada em todos os intervalos de tempo estudados. No entanto, ao avaliar o modo de fissuração e ruptura da interface argamassa/tijolo, foi possível observar que as misturas contendo fibras de polipropileno e substituição parcial do cimento Portland pela sílica da casca de arroz apresentaram melhora no seu desempenho, promovendo os deslocamentos das juntas de assentamento iguais na maioria do tempo dos ensaios e o comportamento de maneira equivalentes e uniformes na distribuição das tensões em relação a mistura de referência.

Palavras-Chave: Argamassas; Resistência de aderência; Resistência ao cisalhamento de prismas; Microfibras de polipropileno; Substituição parcial do cimento Portland.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the bond strength through shear testing with pre-compression according to BS EN 1052-3 (2002) and the cracking and breaking process of the mortar/brick interface, by image correlation in GOM Correlate® software on prisms of solid ceramic bricks produced with mortars with 0 and 5% partial replacement by mass of Portland cement by silica fume from rice husk added to 0.3 and 0.5% polypropylene fibers by volume of mortar when applied at different time intervals (15, 60 and 120 min). These mixtures were also evaluated for three-point bending tensile strength and axial compressive strength according to ABNT NBR 13279 (2003). In the results found for the mechanical behavior, the mortar mixture with 0% partial replacement and incorporation of 0.3% polypropylene fibers was the mixture that presented the highest average maximum stress. It was 3.28 MPa for tensile strength in bending at three points, presenting no significant difference only in relation to the mixture with 5% partial replacement of Portland cement by rice husk silica and incorporation of 0.5% polypropylene fibers. And 10.90 MPa for axial compressive strength, pointing out significant difference with all analyzed mixtures. Regarding the shear tests with pre-compression of solid brick prisms, the performance of mortar mixtures in most cases did not show significant differences. Regarding the application of mortar mixtures, only the mixture added with 0.5% polypropylene fibers was not recommended to be applied in all time intervals studied. However, when evaluating the mode of cracking and rupture of the mortar/brick interface, it was possible to observe that the mixtures containing polypropylene fibers and partial replacement of Portland cement by rice husk silica showed improvement in their performance, promoting the displacements of the laying joints equal in most of the time of the tests and the behavior in an equivalent and uniform manner in the distribution of stresses in relation to the reference mixture.

Keywords: Mortars; Adhesion strength; Shear strength of prisms; Polypropylene microfibers; Partial replacement of Portland cement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esboço do ensaio de cisalhamento realizado em prisma de blocos de alvenaria adotado pela norma BS EN 1052-3:2002	26
Figura 2 – Esboço do ensaio de cisalhamento	26
Figura 3 – Materiais utilizados nas fabricações das misturas e dos prismas: (a) AF; (b) AM; (c) AG; (d) FI; (e) CAL; (f) CIM; (g) SCA; (h) MFP e; (i) tijolo cerâmico maciço	27
Figura 4 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos e dos materiais finos.....	28
Figura 5 – Dimensões efetivas: (a) Representação dos pontos de largura (L), altura (H) e comprimento (C) no tijolo e; (b) Determinação das dimensões do tijolo	30
Figura 6 – Desvio em relação ao esquadro.....	31
Figura 7 – Planeza das faces	31
Figura 8 – Processo de determinações da m_s e m_u dos tijolos cerâmicos maciços: (a) Tijolos submetidos à secagem em estufa; (b) Pesagem e determinação da m_s do tijolo; (c) Tijolos submersos durante 24 h; (d) Tijolos dispostos na bancada para escoamento do excesso de água e; (e) Pesagem e determinação da m_u do tijolo ...	32
Figura 9 – Processo de determinação da resistência à compressão dos tijolos: (a) Capeamento do tijolo e; (b) Realização do ensaio na face destinada ao assentamento.....	33
Figura 10 – Dimensões efetivas do tijolo maciço	34
Figura 11 – Fluxograma do procedimento experimental: (a) Para os prismas de argamassas e; (b) Para os prismas de tijolos cerâmicos maciços	35
Figura 12 – Produção dos prismas de argamassa: (a) Molde prismático de argamassa e aplicação da primeira porção de argamassa nos compartimentos e; (b) Molde prismático sobre a mesa de adensamento após a aplicação dos últimos 30 golpes.....	38
Figura 13 – Disposição dos tijolos na produção do prisma	38
Figura 14 – Prismas de argamassas e de tijolos cerâmicos maciços acondicionados na câmara úmida.....	39
Figura 15 – Execução dos ensaios de resistências à: (a) tração na flexão em três pontos e; (b) compressão axial	41
Figura 16 – Ensaio de resistência ao cisalhamento	43
Figura 17 – Processo de ruptura dos prismas à tração na flexão em três pontos.....	45

Figura 18 – Comportamento dos prismas moldados com as misturas argamassadas quando nos intervalos de tempo de 15, 60 e 120 min.....	48
Figura 19 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REF aos 15 min.....	50
Figura 20 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REF aos 15 min.....	50
Figura 21 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REF aos 60 min.....	51
Figura 22 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REF aos 60 min.....	51
Figura 23 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REF aos 120 min.....	52
Figura 24 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REF aos 120 min.....	52
Figura 25 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP03 aos 15 min	53
Figura 26 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP03 aos 15 min	53
Figura 27 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP03 aos 60 min	54
Figura 28 - Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP03 aos 60 min	54
Figura 29 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP03 aos 120 min	55
Figura 30 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP03 aos 120 min	55
Figura 31 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP05 aos 15 min	56
Figura 32 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP05 aos 15 min	56
Figura 33 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP05 aos 60 min	57

Figura 34 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP05 aos 60 min	57
Figura 35 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP05 aos 120 min	58
Figura 36 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP05 aos 120 min	58
Figura 37 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP03 aos 15 min.....	59
Figura 38 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP03 aos 15 min	59
Figura 39 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP03 aos 60 min.....	60
Figura 40 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP03 aos 60 min.....	60
Figura 41 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP03 aos 120 min.....	61
Figura 42 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP03 aos 120 min.....	61
Figura 43 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP05 aos 15 min.....	62
Figura 44 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP05 aos 15 min.....	62
Figura 45 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP05 aos 60 min.....	63
Figura 46 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP05 aos 60 min.....	63
Figura 47 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP05 aos 120 min.....	64
Figura 48 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP05 aos 120 min.....	64
Figura 49 – Processo de fissuração e ruptura dos prismas submetidos ao ensaio de cisalhamento da mistura REF aos 60 min. (a) início do processo; (b) e (c) meio do processo e; (d) final do processo	66

Figura 50 – Processo de fissuração e ruptura dos prismas submetidos ao ensaio de cisalhamento da mistura REFMFP03 aos 60 min. (a) início do processo; (b) e (c) meio do processo e; (d) final do processo.....	67
Figura 51 – Processo de fissuração e ruptura dos prismas submetidos ao ensaio de cisalhamento da mistura REFMFP05 aos 60 min. (a) início do processo; (b) e (c) meio do processo e; (d) final do processo.....	68
Figura 52 – Processo de fissuração e ruptura dos prismas submetidos ao ensaio de cisalhamento da mistura SCA5MFP03 aos 60 min. (a) início do processo; (b) e (c) meio do processo e; (d) final do processo.....	69
Figura 53 – Processo de fissuração e ruptura dos prismas submetidos ao ensaio de cisalhamento da mistura SCA5MFP05 aos 60 min. (a) início do processo (b) e (c) meio do processo e; (d) final do processo.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização dos agregados miúdos e dos materiais finos	29
Tabela 2 – Características técnicas das MFP fornecidas pelo fabricante	29
Tabela 3 – Traço unitário em massa dos materiais para cada argamassa (kg)	36
Tabela 4 – Quantitativo dos prismas de argamassas produzidos para os ensaios de resistências à tração na flexão e à compressão.....	38
Tabela 5 – Quantitativo dos prismas de tijolos cerâmicos maciços moldados para os ensaios de resistências à compressão e ao cisalhamento.....	39
Tabela 6 – Resultado de resistência à compressão dos prismas.....	44
Tabela 7 – Resultados de resistência à tração na flexão das argamassas	45
Tabela 8 – Resultados de resistência à compressão das misturas.....	46
Tabela 9 – Resultados de resistência ao cisalhamento dos prismas	48
Tabela 10 – Teste de Tukey ao nível de 95% de significância para o ensaio de resistência à tração na flexão das misturas argamassadas.	80
Tabela 11 – Teste de Tukey ao nível de 95% de significância para o ensaio de resistência à compressão axial das misturas argamassadas.....	80
Tabela 12 – Teste de Tukey ao nível de 95% de significância para o ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento dos prismas de tijolos cerâmicos maciços moldados com misturas argamassadas aplicadas nos tempos de 15, 60 e 120 min	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AA – Índice de absorção d'água
- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AF – Areia fina
- AG – Areia grossa
- AM – Areia média
- C – Comprimento
- CAL – Cal hidráulica
- CBCS – Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
- CIM – Cimento Portland CP II-F-32
- CP – Corpo de prova
- CPs – Corpos de prova
- D – Esquadro
- EVA – Etileno acetato de vinila
- F – Faces
- FI – Filler calcário
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- LEMAC – Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção
- LVDT's – Transdutores de deslocamento variável linear
- MAEC – Materiais Aplicados à Engenharia Civil
- MFP – Microfibra sintética de polipropileno
- m_s – Massa seca
- m_u – Massa úmida
- NBR – Norma Brasileira
- NM – Norma Mercosul
- RS – Rio Grande do Sul
- SCA – Sílica da casca de arroz Silcca Nobre SBI
- UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivo geral	19
1.2 Objetivos específicos.....	19
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 Argamassa	20
2.2 Importância da sílica da casca de arroz como substituto parcial do cimento Portland.....	21
2.3 Fibras de polipropileno.....	22
2.4 Materiais compósitos.....	23
2.4.1 Compósitos cimentícios reforçados com fibras	23
2.5 Resistência de aderência ao cisalhamento em blocos de alvenaria	25
3 METODOLOGIA	27
3.1 Local de execução	27
3.2 Materiais.....	27
3.3 Caracterização dos materiais.....	28
3.3.1 Caracterização dos agregados miúdos e dos materiais finos	28
3.3.2 Características técnicas das microfibras sintéticas de polipropileno.....	29
3.3.3 Caracterização dos tijolos cerâmicos maciços	29
3.3.3.1 Determinações das medidas das faces – Dimensões efetivas, do desvio em relação ao esquadro (D) e da planeza das faces (F)	30
3.3.3.2 Determinações da massa seca (m_s), da massa úmida (m_u) e do índice de absorção d'água (AA)	31
3.3.3.3 Determinação da resistência à compressão.....	33
3.4 Procedimento experimental	34
3.4.1 Composição de materiais.....	35
3.4.2 Mistura das argamassas.....	36
3.4.3 Produção dos prismas de argamassas e de tijolos cerâmicos maciços ..	36
3.4.4 Tempo de cura dos prismas de tijolos maciços.....	39
3.4.5 Determinação das resistências à tração na flexão e à compressão das misturas	40
3.4.6 Determinação da resistência à compressão dos prismas.....	41
3.4.7 Determinação da resistência ao cisalhamento dos prismas.....	42

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
4.1 Resistência à compressão dos prismas de tijolos maciços	44
4.2 Resistência à tração na flexão dos prismas de argamassas	45
4.3 Resistência à compressão dos prismas de argamassas.....	46
4.4 Resistência de aderência ao cisalhamento dos prismas de tijolos maciços e modo de fissuração e ruptura da interface argamassa/tijolo.....	47
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
REFERÊNCIAS.....	75
ANEXOS	80

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, uma série de pesquisas científicas e inovações tecnológicas vem sendo implantada nos processos de desenvolvimento/aprimoramento de produtos dos diversos setores industriais, com a finalidade de promover o uso racional dos recursos naturais, a recuperação do meio ambiente e o desenvolvimento econômico sustentável.

Dentre estes setores, destaca-se o da construção civil, embora ainda seja considerado primitivo ao panorama ambiental contemporâneo, em consequência da exploração de 40 a 75% da matéria prima no planeta e de até 33% dos recursos naturais extraídos no Brasil, do elevado impacto causado pelos sistemas construtivos e de fabricações de materiais e, geração de resíduos da construção e demolição (CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL – CBCS, 2007; AGOPYAN; JOHN, 2011). A maior parcela dessa degradação ambiental está associada à fabricação de cimento Portland.

O cimento Portland é o material mais comum e fundamental para a construção civil, sua fabricação é responsável por cerca de 7% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), também conhecido como gás carbônico, um dos principais gases causadores do aquecimento global devido a intensificação do efeito estufa. As principais fontes da emissão de gás carbônico na cadeia produtiva do cimento Portland são decorrentes dos processos de calcinação do calcário e da queima de combustíveis fósseis para a produção do clínquer (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP, 2021; WORRELL *et al.*, 2001).

A partir desta premissa, faz-se necessário a intensificação e avaliação de metodologias sustentáveis e viáveis que ofereçam mudanças neste cenário, sejam através da substituição parcial do cimento Portland por resíduos gerados a partir de outros setores industriais ou agroindustriais, como também na incorporação de aditivos, que visem manter ou melhorar as propriedades das misturas a base de cimento Portland, respectivamente.

Com relação a sustentabilidade de materiais cimentícios de uso da construção civil e a demanda por produtos ecologicamente corretos, surge o termo “*Eco-friendly*”, em tradução livre do inglês “ecologicamente amigável” ou “amigo da natureza”. Esse termo é referenciado a qualquer processo ou produto que promova a diminuição nos impactos e danos socioambientais em comparação ao processo ou

produto equivalente convencional. Diante disso, a sílica da casca de arroz (SCA), um subproduto proveniente do processo de queima da casca de arroz, torna-se um material apropriado como substituto parcial do cimento Portland na elaboração de argamassas e concretos, devido em sua composição química conter elevadas concentrações de sílica reativa ou amorfa (teor superior à 90%). Logo, é uma alternativa ecologicamente adequada de finalidade ambientalmente correta para o subproduto. (TASHIMA, 2006; SOBROSA *et al.*, 2017; PINHEIRO *et al.*, 2018).

Associado ao desenvolvimento de novos produtos, os compósitos cimentícios reforçados com fibras, e particularmente as de polipropileno, um polímero de baixo custo e fácil disponibilidade, vem ganhando maior importância nos últimos anos. Sua aplicação está intimamente relacionada com as propriedades mecânicas e físicas dos compósitos, visto que, quando adicionadas em argamassas, atuam no controle e na redução da fissuração por retração plástica, na diminuição da evaporação e da exsudação de água, no aumento da capacidade de deformação, no aumento da tenacidade e na resistência ao impacto (estruturas mais estáveis) (OLIVEIRA, 2001; SILVA; BARROS, 2007). No entanto, faz-se necessário a avaliação da influência da adição e do teor incorporado de fibras nas propriedades das argamassas de assentamento e principalmente a sua interação a prismas de tijolos cerâmicos ou blocos de concreto.

Embora tenham muitas pesquisas científicas relacionadas a determinação da resistência de aderência ao cisalhamento de alvenarias, não existem normas padronizadas no Brasil e, por isso, não estão completamente definidos os fatores que influenciam os mecanismos de ruptura. Considera-se que as formas de ruptura são influenciadas por diversos parâmetros, dentre eles, têm-se o tijolo ou tipo de bloco, a argamassa e a tensão de pré-compressão aplicada nas juntas. A exemplo, o propósito de um dos principais ensaios com essa finalidade, o ensaio de prisma, está relacionado em determinar a resistência ao cisalhamento de um conjunto de materiais diferentes, tais como tijolo cerâmico maciço e as diversas formulações e composições de argamassa de assentamento (GHAZALI; RIDDINGTON, 1988; OLIVEIRA *et al.*, 2002).

Diante dessa perspectiva, nesse trabalho serão avaliados a resistência de aderência, e seus mecanismos de ruptura na interface argamassa/tijolo, mediante à ensaio de cisalhamento com pré-compressão de prismas moldados com tijolos

maciços e misturas de argamassas convencional e “*Eco-friendly*” com diferentes frações volumétricas de fibras de polipropileno.

1.1 Objetivo geral

Avaliar a resistência de aderência e o processo de fissuração, através do ensaio de cisalhamento e da correlação de imagens em prismas de tijolos cerâmicos maciços produzidos com misturas argamassadas com e sem substituição parcial do cimento Portland por SCA, adições de microfibras sintéticas de polipropileno (MFP) e em diferentes tempos de moldagem dos prismas.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento mecânico das misturas argamassadas submetidas aos ensaios de tração à flexão e à compressão de acordo com a ABNT NBR 13279:2005;
- Determinar a resistência de aderência através do ensaio de cisalhamento de acordo com a norma BS EN 1052-3:2002 em prismas de tijolos cerâmicos maciços produzidos com argamassas com 0 e 5% de substituição parcial em massa do cimento Portland pela SCA adicionadas de 0,3 e 0,5% de MFP em volume da argamassa;
- Avaliar a resistência ao cisalhamento dos prismas quando moldados com argamassas nos tempos de 15, 60 e 120 min após o fim da mistura das mesmas;
- Analisar o processo de fissuração e ruptura da interface argamassa/tijolo por meio de correlação digital de imagens.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Argamassa

A utilização da argamassa nos revestimentos e assentamentos de alvenarias não é algo recente. Ao longo de muitos anos, o homem buscou por um ligante eficiente e econômico para ligar rochas e madeiras, o qual utilizava para fabricar suas construções rudimentares. As misturas adequadas para a união destes materiais foram denominadas de argamassa (GUIMARÃES, 1997).

De acordo com a ABNT NBR 13281 (2005), a argamassa é definida como a mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

A fundamental aplicabilidade da argamassa de assentamento é de unir as unidades de alvenaria de modo a construir um elemento monolítico, colaborando na resistência aos esforços laterais, assim como também é encarregada em distribuir uniformemente as tensões atuantes na parede ao longo da seção das unidades. Para estes casos, a argamassa deve apresentar algumas propriedades essenciais, que buscam certificar o desempenho apropriado destas funções. No estado fresco, a trabalhabilidade e a capacidade de retenção de água são fundamentais, logo no estado endurecido as principais propriedades são a resistência mecânica, capacidade de absorver deformações, aderência, retração na secagem e durabilidade (ISAIA, 2007).

Diferentemente das unidades de alvenaria, a funcionalidade da argamassa está diretamente relacionada às variáveis externas, provenientes do procedimento de execução da alvenaria. A má realização da junta de assentamento pode dificultar o desenvolvimento da interface ou propiciar condições de enfraquecimento ao longo da seção. A trabalhabilidade é a propriedade que está relacionada a facilidade de misturar, transportar e manusear a argamassa, em uma condição homogênea. Sendo assim, uma argamassa com boa trabalhabilidade é fundamental para assegurar a capacidade estrutural requerida (SILVA *et al.*, 2013).

A retenção de água é a capacidade da argamassa, após a aplicação sobre uma fiada de blocos ou tijolos, de prevenir a rápida perda de água pela sucção dos componentes de alvenaria e pela evaporação. Com relação a aderência, pode ser

classificada como uma das propriedades principais para o apropriado desempenho da alvenaria. Esta tem de proporcionar a estanqueidade das juntas, além de fornecer resistência aos esforços de cisalhamento e de tração. A aderência entre a argamassa e o bloco geralmente é atribuída ao intertravamento gerado pelo produto da hidratação do cimento no interior dos poros da superfície da unidade. Desta maneira, a adequada aderência é consequência de um conjunto de fatores, associada as propriedades do estado fresco da argamassa, ao modo de execução da alvenaria e as particularidades do substrato (FIORITO, 1994).

2.2 Importância da sílica da casca de arroz como substituto parcial do cimento Portland

O setor agroindustrial orizícola é considerado um dos cultivos alimentares de maior importância no Brasil. No ano de 2021 sua produção foi estimada em 11,530 milhões de toneladas, sendo o estado do Rio Grande do Sul, responsável por 82% da oferta nacional (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2021).

De acordo com Lorenzetti *et al.* (2012), entre os resíduos de baixa densidade e de elevado volume gerados durante o processo de beneficiamento do arroz, destaca-se a casca de arroz, que corresponde aproximadamente 22% do peso do grão. Este resíduo sólido, quando lançado a céu aberto ou em aterros sanitários pode desencadear inúmeros danos ambientais, como a poluição e degradação do solo, das águas e do ar, devido apresentar em sua composição altas concentrações de carbono residual e óxidos alcalinizantes (CaO, MgO, K₂O, Na₂O), além de seu tempo de decomposição ser de cinco anos e fonte de emissão de gases de efeito estufa (gás metano (CH₄)) para a atmosfera. (MAYER *et al.*, 2006; ZUCCO, 2007).

A casca de arroz apresenta elevado potencial para produção de bioenergia, sendo utilizada na alimentação de fornalhas, secadores e autoclaves à temperatura de até 1000°C na própria indústria e quando submetida ao processo de queima controlada, aproximadamente 20% da casca é convertida em cinza. Este subproduto é denominado como sílica da casca de arroz (SCA) e apresenta atividade pozolânica, devido sua composição química conter elevadas concentrações de sílica reativa ou amorfa (teor superior à 90%) (TASHIMA, 2006; SOBROSA *et al.*, 2017).

A incorporação de SCA em matrizes cimentícias atua de dois modos: por processo químico, através da reação pozolânica, reagindo com o hidróxido de cálcio liberado nas reações de hidratação do cimento, assim, formando compostos estáveis com capacidade aglomerante (silicatos e aluminatos de cálcio) e contribuindo com o aumento da resistência da matriz. E por processo físico, mediante do efeito de fíller inerte, em que a sílica preenche os vazios, produzindo um efeito de empacotamento das partículas, tornando a matriz menos vulnerável a ação de agentes agressivos. Ademais, ocorre a refinação da estrutura de poros da matriz, elevando a disponibilidade de regiões para nucleação dos compostos do cimento hidratado. Conseqüentemente, faz-se viável a utilização da SCA na confecção de pastas, argamassas e concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994; JOHN *et al.*, 2003; RODRIGUES, 2004).

2.3 Fibras de polipropileno

As fibras poliméricas são fabricadas a partir da resina de polipropileno do tipo homopolímero obtida através do craquelamento do petróleo pela síntese de elementos orgânicos, em diversos tamanhos e formas, e com diferentes propriedades. As fibras de polipropileno são caracterizadas por apresentarem alto ponto de fusão (165°C), baixo custo, fácil disponibilidade, baixo módulo de elasticidade (entre 1 a 8 GPa), ductilidade variável e moderada resistência à tração, baixa resistência ao fogo, sensibilidade à luz do sol e oxigênio e fraca aderência com a matriz cimentícia (TAYLOR, 1994). Apesar das inúmeras desvantagens apresentadas, quando utilizadas na matriz cimentícia, a mesma proporciona uma espécie de capa protetora as fibras, reduzindo a baixa resistência ao fogo, assim como, o baixo módulo de elasticidade e a fraca aderência com a matriz podem ser espontaneamente otimizados (BENTUR; MINDESS, 2007).

Segundo Figueiredo (2011), com relação a geometria das fibras, podem ser classificadas em microfibras e macrofibras. Sendo as microfibras de diâmetro equivalente micrômetro e esbeltez similar a unidade, usadas para auxiliar na redução de fissuras por retração plástica e controle de exsudação, no entanto, não apresentam utilidade estrutural.

As fibras de polipropileno incorporadas como reforço na matriz cimentícia, podem apresentar três formas: monofilamentos, multifilamentosas (filme fibrilado) e

fita extrusada, as três formas são utilizadas e confirmam o reforço em argamassas e concretos. Embora, as fibras monofilamentosas e fibriladas demonstrem resistência e módulo de elasticidade semelhantes, para reduzir a fissuração são recomendadas as fibras monofilamentosas, que são mais adequadas do que as fibras fibriladas (BENTUR; MINDESS, 2007).

2.4 Materiais compósitos

Em meados do século XX, o termo “material compósito” introduziu-se na área da engenharia como uma promissora classe de materiais. De acordo com Isaia (2007), compósito pode ser definido como a mistura ou combinação (em escala macroscópica) não solúvel de dois ou mais materiais, com composições, estruturas e propriedades distintas, que conservam individualmente as suas características mesmo após à união, com obtenção de uma interface bem definida.

De modo geral, o material compósito pode ser classificado em duas fases: um material base, denominado matriz (fase contínua), sendo a matriz que proporciona estrutura ao material compósito, ocupando os espaços vazios que encontram-se entre os reforços, assim, mantendo-os em suas estruturas relativas e, o elemento de reforço (fase descontínua), designado em melhorar a resistência mecânica e/ou rigidez em relação a sua massa ao material compósito como um todo (CALLISTER JR, 2002; LAMEIRAS, 2007).

A combinação dos materiais origina-se a partir da finalidade do material compósito e dos seguintes parâmetros: resistência à corrosão, rigidez, peso, resistência à fadiga, expansão térmica, propriedades eletromagnéticas, condutividade térmica, comportamento acústico e aspecto. Os materiais capazes de compor um compósito podem ser classificados em dois tipos: materiais compósitos particulados e fibrosos. Os compósitos particulados são materiais incorporados a matriz em forma de partícula e os compósitos fibrosos em forma de fibras (HIGGINS, 1994).

2.4.1 Compósitos cimentícios reforçados com fibras

De acordo com Araújo (2005), os materiais compósitos oriundos a partir da combinação de material à base de cimento Portland e polímeros são os mais

importantes na área da engenharia de materiais e demonstram características de resistência mecânica, módulo de elasticidade, ductilidade, tenacidade e comportamento pós-fissuração mais adequados as inúmeras aplicações, quando associados às propriedades de seus componentes separadamente. Os materiais à base de cimento Portland são classificados como materiais cerâmicos por apresentarem propriedades específicas a este grupo de materiais, tais como: alta rigidez, fragilidade, baixa resistência à tração e tendência a fissuração por secagem. Enquanto os polímeros são caracterizados por apresentarem propriedades mecânicas, como: ductilidade variável, moderada resistência à tração e baixo módulo de elasticidade.

Segundo os autores Mehta e Monteiro (2014), a incorporação das fibras, sejam elas de polipropileno ou outro material, à uma matriz cimentícia, no caso da argamassa, possibilita duas ações fundamentais, sendo elas: assegurar o reforço a matriz sobre todas as formas de carregamento que atuam as tensões de tração, ou seja, à tração indireta, flexão e cisalhamento e garantir o aumento da ductilidade e da tenacidade a matriz frágil. Compete ressaltar que a interação fibra/matriz e a trabalhabilidade da mistura está intimamente relacionada com o diâmetro, comprimento, volume, orientação e dispersão das fibras incorporadas à mistura.

Conforme Taylor (1994), os compósitos cimentícios reforçados com fibras apresentam seu maior potencial no estado pós-fissuração, em que as fibras participam de forma mais eficiente na resistência do compósito, intensificando a capacidade de absorção de energia do mesmo. Considera-se que as fibras preservam as interfaces das suas fissuras ligadas, aumentando a ductilidade destes compósitos. Isto é constatado devido que a deformação necessária para provocar fissuras no compósito cimentício é muito inferior a alongação das fibras. Normalmente, as fibras poliméricas contêm módulo de elasticidade inferior ao do compósito e, deste modo, não considera-se um aumento na tensão de fissuração. Do mesmo modo que, para suceder um aumento na resistência pré-fissuração do compósito, faz-se necessário a utilização de fibras mais resistentes que o compósito, assim como, a aderência do reforço com a matriz tem de ser eficiente para evitar os deslocamentos relativos entre os materiais.

As fibras que retêm as fissuras colaboram no aumento da resistência, da deformação de ruptura e tenacidade dos compósitos cimentícios. A incorporação das

fibras não inibe o surgimento das fissuras nos compósitos, todavia são eficientes para limitar a propagação, assegurando assim o aumento na resistência à tração do material.

Em compósitos cimentícios sem fibras, o surgimento da primeira fissura e sua abertura progressiva causa o colapso do material. Logo em compósitos reforçados com fibras, a fratura é um desenvolvimento progressivo, em que as pontes de transferência apresentadas pelas fibras, realizam a múltipla fissuração. Nestes compósitos a fratura é resultante do processo heterogêneo de progressivo deslocamento e arrancamento das fibras e, não pela ruptura delas (BENTUR E MINDESS, 2007).

2.5 Resistência de aderência ao cisalhamento em blocos de alvenaria

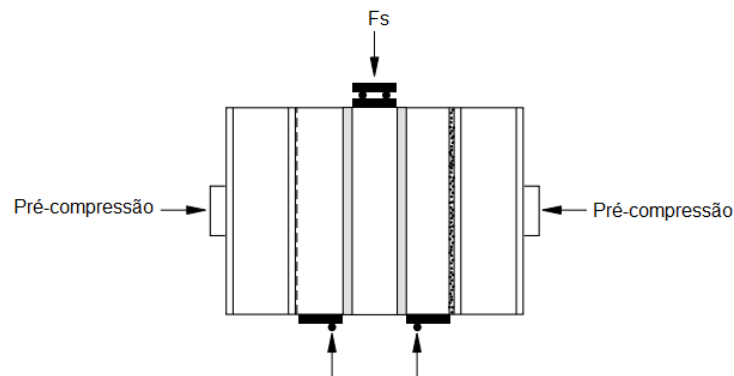
De acordo com Araujo (2002), a determinação da resistência de aderência ao cisalhamento em blocos de alvenaria é considerada como a característica fundamental de uma adequada argamassa, pois esta deve absorver as tensões tangenciais à superfície da interface bloco/argamassa.

A resistência ao cisalhamento nas juntas de alvenaria é o parâmetro mais determinante no desempenho da alvenaria estrutural quando submetida as tensões horizontais no seu plano (MATA, 2011). Segundo o mesmo autor, o critério de Coloumb representa um modo expressivo do comportamento das juntas.

Os ensaios de cisalhamento são capazes de apresentar diversas conformações, desde o arranjo mais simples, com dois blocos até o mais sofisticado, com paredes. Conforme Popal (2013), as principais diferenças e dificuldades entre os métodos produzidos, estão associadas com o arranjo experimental, o tipo de amostra e a distribuição uniforme das tensões nas juntas. Oliveira (2011) evidencia que um mecanismo de carregamento deve ser fabricado para fornecer uma distribuição uniforme de tensões de cisalhamento e tensões normais na junta, de maneira que a ruptura seja originada coincidentemente nos pontos ao longo da interface.

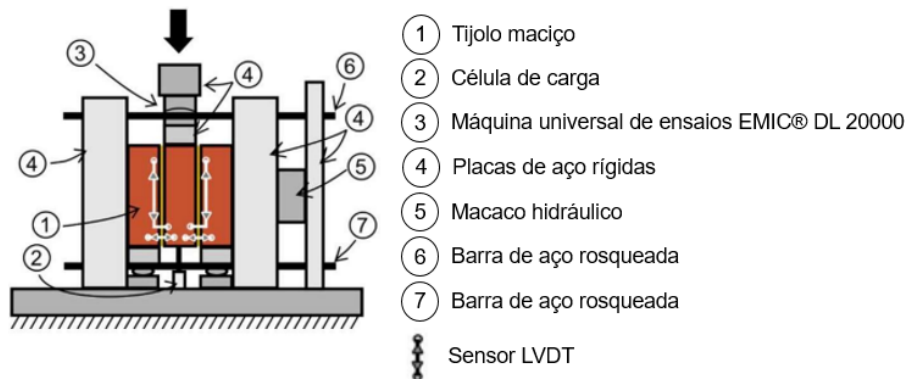
Nas Figuras 1 e 2 são visualizadas o arranjo experimental adotado pela norma europeia BS EN 1052-3:2002 e Bompa e Ylglazouli (2020), em que consiste nas tensões sendo aplicadas de forma localizada, impossibilitando a ação da flexão.

Figura 1 – Esboço do ensaio de cisalhamento realizado em prisma de blocos de alvenaria adotado pela norma BS EN 1052-3:2002



Fonte: Adaptada da norma BS EN 1052-3 (2002).

Figura 2 – Esboço do ensaio de cisalhamento



Fonte: Adaptada de Bompa e Ylghazouli (2020).

O ensaio resumidamente compreende em submeter o prisma à níveis de pré-compressão, e a partir dos resultados obtidos da ruptura em cada um dos estágios é admissível traçar a envoltória de ruptura do elemento.

3 METODOLOGIA

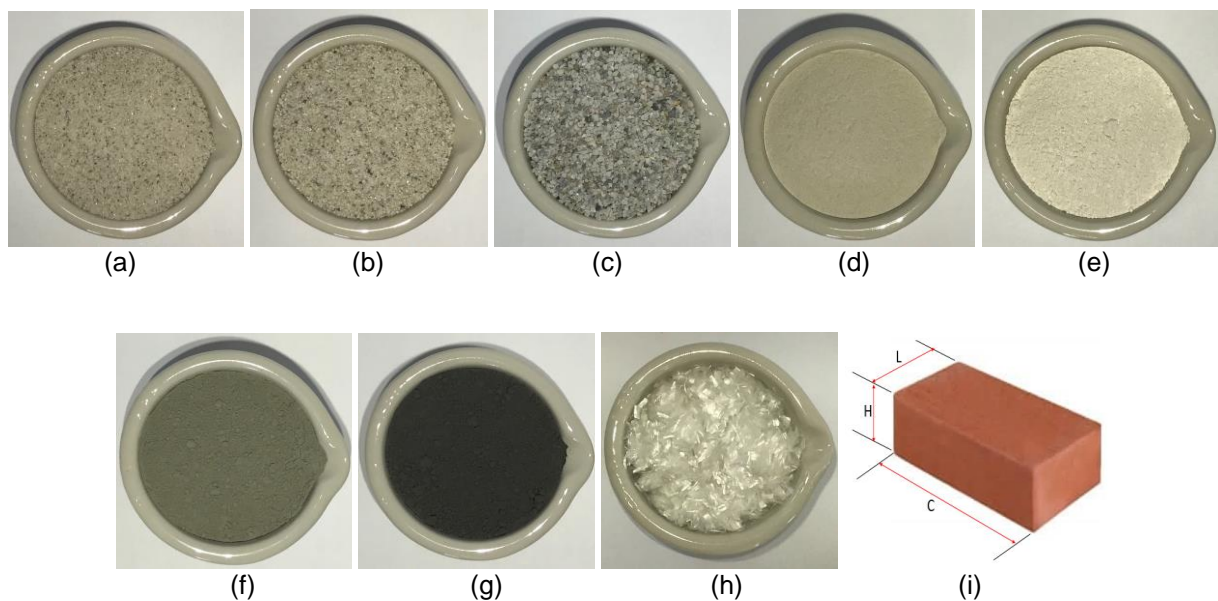
3.1 Local de execução

O trabalho foi realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção – LEMAC do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) Campus Alegrete-RS.

3.2 Materiais

Para a elaboração das argamassas e dos prismas foram utilizados: areia fina (AF), areia média (AM), areia grossa (AG), filler calcário (FI), todas de origem mineralógica calcária e cal hidráulica (CAL) provenientes da empresa FIDA® do município de Caçapava do Sul-RS, cimento Portland CP II-F-32 (CIM) da marca CSN® adquirido no comércio varejista da cidade de Santa Maria-RS, sílica da casca de arroz Silcca Nobre SBI (SCA) da empresa SVA – Sílica Verde do Arroz® de Alegrete-RS, microfibras sintéticas de polipropileno (MFP) fabricada pela Neomatex®, tijolo cerâmico maciço comercializado em Alegrete-RS e água. Os materiais supracitados são ilustrados na Figura 3.

Figura 3 – Materiais utilizados nas fabricações das misturas e dos prismas: (a) AF; (b) AM; (c) AG; (d) FI; (e) CAL; (f) CIM; (g) SCA; (h) MFP e; (i) tijolo cerâmico maciço



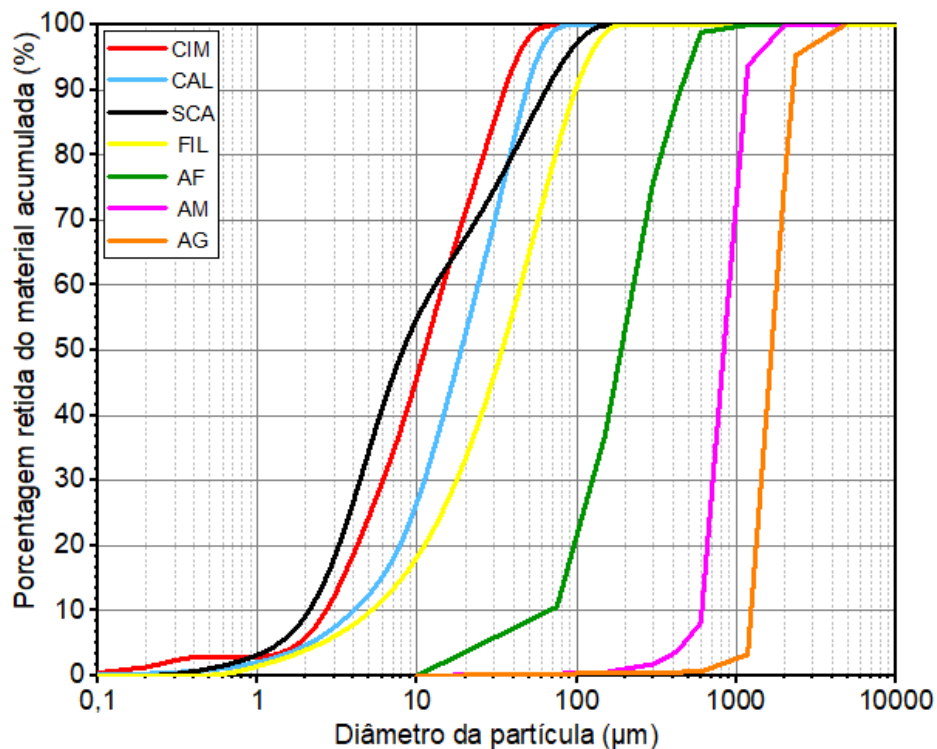
Fonte: Elaboração própria.

3.3 Caracterização dos materiais

3.3.1 Caracterização dos agregados miúdos e dos materiais finos

As determinações das composições granulométricas e das massas específicas das AF, AM e AG foram obtidas de acordo com a ABNT NBR NM 248 (2003) e a ABNT NBR NM 52 (2009), respectivamente. Para a caracterização dos materiais finos como FI, CAL, CIM e SCA, foi realizada a análise granulométrica por difração a laser, a determinação da massa específica conforme a ABNT NBR 16605 (2017), a determinação da área específica segundo a ABNT NBR 7224 (1996) e a determinação de perda ao fogo em conformidade com a ABNT NBR NM 18 (2012). Os respectivos resultados são explanados na Figura 4 e na Tabela 1.

Figura 4 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos e dos materiais finos



Fonte: Propriedade do Grupo de Pesquisa Materiais Aplicados à Engenharia Civil (MAEC).

Tabela 1 – Caracterização dos agregados miúdos e dos materiais finos

Material	Massa específica (g/cm ³)	Densidade de empacotamento	Área específica de superfície (m ² /kg)	Perda ao fogo (%)
CIM	2,97	0,575	0,38	5,34
CAL	2,53	0,545	1,18	25,92
SCA	2,09	0,460	21,142	3,50
FIL	2,87	0,577	0,55	-
AF	2,82	0,620	-	-
AM	2,78	0,630	-	-
AG	2,80	0,600	-	-

Fonte: Elaboração própria.

3.3.2 Características técnicas das microfibras sintéticas de polipropileno

De acordo com a empresa Neomatex® (2017) as microfibras que foram utilizadas no estudo, são filamentos de polipropileno extremamente finos obtidos através do processo de extrusão. Após os tratamentos superficiais, normalmente de natureza oxidativa, tais como: oxidação química, tratamento com plasma e reações orgânicas clássicas, que auxiliam sua dispersão nos compósitos cimentícios, os filamentos são segmentados dando origem as MFP. (PENN; WANG, 1994; KILL *et al.*, 1996). Suas características estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características técnicas das MFP fornecidas pelo fabricante

Composição	100% polipropileno
Comprimento (mm)	6
Diâmetro (µm)	12
Frequência (milhões de fibras/kg)	1620
Área superficial específica (m ² /kg)	366
Densidade relativa	0,91
Deformação na ruptura (%)	25
Ponto de fusão (°C)	160
Ponto de ignição (°C)	365

Fonte: Empresa Neomatex® (2017).

3.3.3 Caracterização dos tijolos cerâmicos maciços

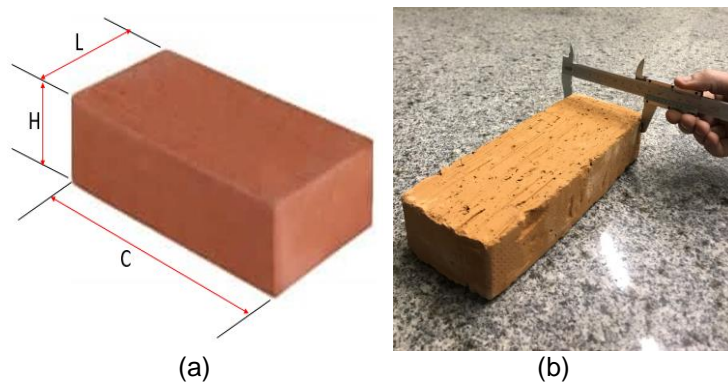
Os tijolos maciços foram recebidos, identificados, limpos, retiradas as rebarbas e acondicionados em ambiente protegido para que mantivessem suas características originais. Cada corpo de prova (CP) é constituído por um tijolo íntegro conforme a ABNT NBR 15270-1 (2017). Adotou-se a amostragem simples na execução da inspeção por ensaios e para a caracterização dos corpos de prova

(CPs) foi utilizada os Anexos A.4.2, A.4.4, A.4.5, B.4.2, B.4.3, B.4.4 e C da ABNT NBR 15270-2 (2017) e os procedimentos executados estão descritos a seguir.

3.3.3.1 Determinações das medidas das faces – Dimensões efetivas, do desvio em relação ao esquadro (D) e da planeza das faces (F)

Para a determinação das características geométricas dos tijolos cerâmicos maciços foram analisados 13 CPs. Inicialmente os CPs foram colocados sobre uma superfície plana e indeformável. Com o auxílio do paquímetro com sensibilidade mínima de 0,05 mm determinou-se os valores da largura (L), altura (H) e comprimento (C), como indicados na Figura 5 (a) e (b). Posteriormente mediu-se o desvio em relação ao esquadro entre uma das faces destinadas ao assentamento e maior face destinada ao revestimento do tijolo, conforme a Figura 6, empregando-se o esquadro metálico de $(90 \pm 0,5)^\circ$ e o paquímetro. Logo após, realizou-se a planeza de uma das faces designadas ao revestimento através da flecha formada na diagonal, de acordo com a Figura 7, onde utilizou-se o esquadro metálico e o paquímetro.

Figura 5 – Dimensões efetivas: (a) Representação dos pontos de largura (L), altura (H) e comprimento (C) no tijolo e; (b) Determinação das dimensões do tijolo



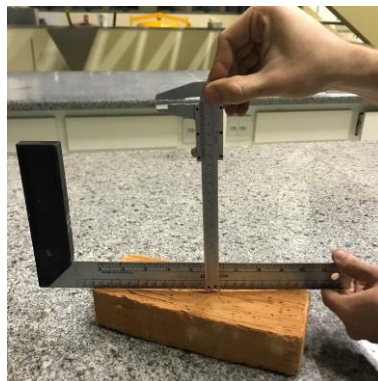
Fonte: Elaboração própria.

Figura 6 – Desvio em relação ao esquadro



Fonte: Elaboração própria.

Figura 7 – Planeza das faces



Fonte: Elaboração própria.

3.3.3.2 Determinações da massa seca (m_s), da massa úmida (m_u) e do índice de absorção d'água (AA)

Com relação a determinação das características físicas, a amostragem foi constituída de seis tijolos cerâmicos maciços. Para a quantificação da m_s , retirou-se dos CPs o pó e outras partículas soltas, logo foram submetidos à secagem em estufa de secagem e esterilização digital de alta precisão MOD.: S600SD N.: 4060 Biopar® a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, por 24 h. Em seguida determinou-se na balança de precisão LD1050 LÍDER® com capacidade máxima de 3 kg e erro máximo permitido (e) de 0,5 g, a m_s de cada tijolo em gramas. Posteriormente a determinação da m_s , os CPs foram armazenados em um recipiente, preenchido com água à temperatura ambiente, em volume suficiente para mantê-los totalmente imersos durante 24 h. Transcorrido o tempo necessário, os CPs foram retirados e dispostos em uma bancada para que fosse escoado o excesso de água. A água remanescente foi removida com ajuda de um pano limpo e úmido, considerou-se que o tempo

decorrido entre a remoção do excesso de água na superfície e as pesagens não excedesse a 15 min. Os procedimentos acima descritos podem ser visualizados na Figura 8. A m_u foi expressa em gramas e estimada pela pesagem de cada tijolo maciço saturado. O AA de cada CP foi determinado pela Equação 1.

$$AA = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

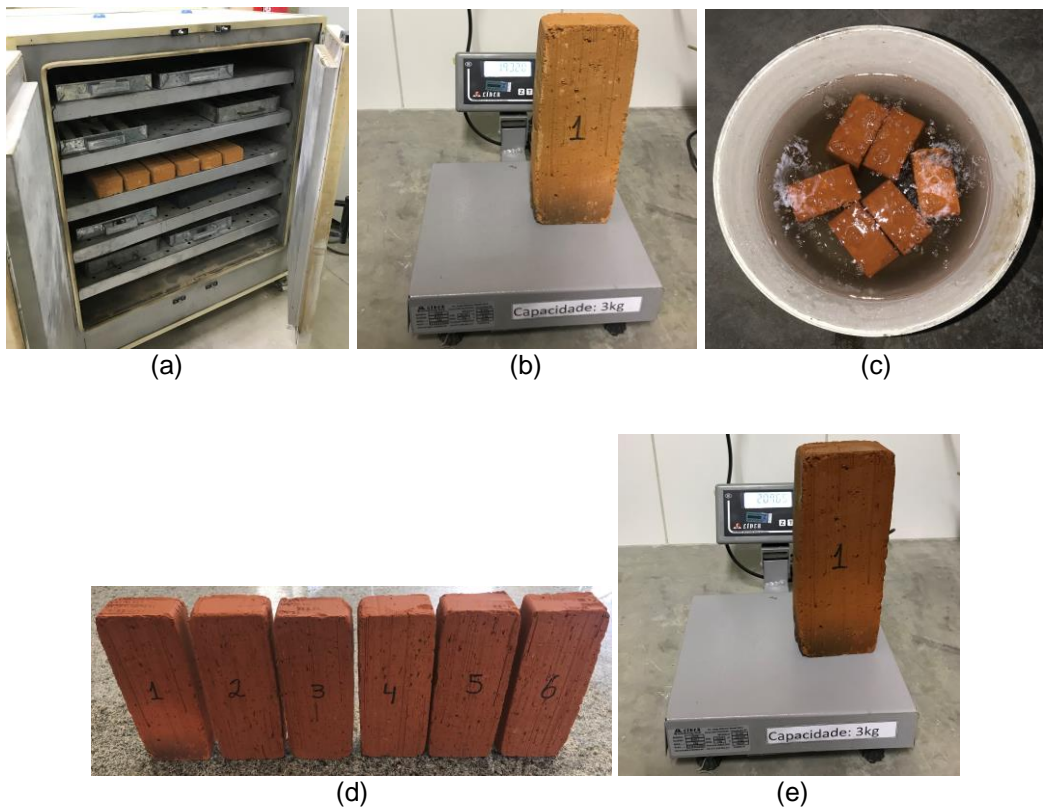
Sendo:

AA = índice de absorção (%);

m_u = massa úmida (g);

m_s = massa seca (g).

Figura 8 – Processo de determinações da m_s e m_u dos tijolos cerâmicos maciços: (a) Tijolos submetidos à secagem em estufa; (b) Pesagem e determinação da m_s do tijolo; (c) Tijolos submersos durante 24 h; (d) Tijolos dispostos na bancada para escoamento do excesso de água e; (e) Pesagem e determinação da m_u do tijolo

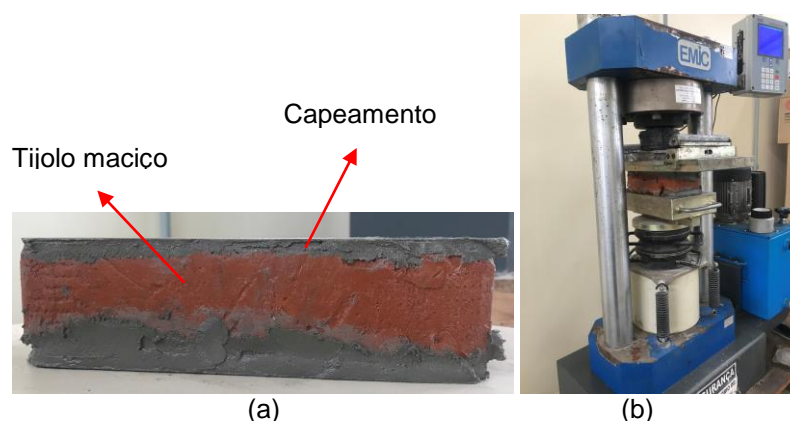


Fonte: Elaboração própria.

3.3.3.3 Determinação da resistência à compressão

Quanto a determinação da característica mecânica dos tijolos maciços, o ensaio foi realizado em 13 CPs. Primeiramente sucedeu-se o capeamento conforme as seguintes especificações: a regularização das faces dos CPs em contato com as faces placas da prensa foram realizadas com uma argamassa com resistência superior à 70% da resistência dos tijolos na área líquida; a superfície em que o capeamento foi executado não se afastou do plano mais que 0,08 mm para cada 400 mm e; a espessura média do capeamento não excedeu 3 mm (Figura 9 – (a)). Logo após o endurecimento das camadas de capeamento, imergiu-se os CPs em água durante 24 h. Para a execução do ensaio, foi utilizada a máquina universal de ensaios EMIC® DL 1500 e procedeu-se de acordo com as seguintes instruções: os CPs foram ensaiados na condição saturada e de forma que a carga estivesse aplicada na direção do esforço em que o tijolo necessitasse suportar durante o seu emprego, sempre perpendicular ao comprimento e na face destinada ao assentamento. Posicionou-se o CP na prensa de maneira que o seu centro de gravidade estivesse no eixo de carga dos pratos da prensa, posteriormente procedeu-se o ensaio, regulando-se o comando da prensa (Figura 9 – (b)).

Figura 9 – Processo de determinação da resistência à compressão dos tijolos: (a) Capeamento do tijolo e; (b) Realização do ensaio na face destinada ao assentamento

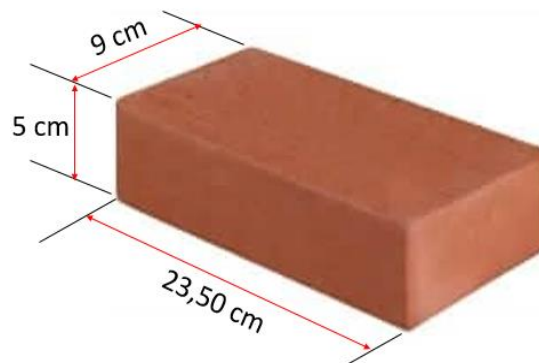


(a) Fonte: Elaboração própria.

As determinações das características geométricas, físicas e mecânica obtidas para os tijolos cerâmicos maciços apresentaram-se em conformidade com os requisitos definidos na ABNT NBR 15270-1 (2017). As dimensões efetivas estão

evidenciadas na Figura 10, os resultados encontrados para os desvios em relação ao esquadro (0) e a planeza das faces (3 mm), demonstraram-se aceitáveis, visto que a norma estabelece desvios de no máximo 3 mm. Em relação ao índice de absorção d'água, observou-se que o valor determinado (13,29%), manteve-se entre os limites de 8 e 25% como preconizado pela norma e, a resistência à compressão dos tijolos maciços foi de 18,46 MPa.

Figura 10 – Dimensões efetivas do tijolo maciço

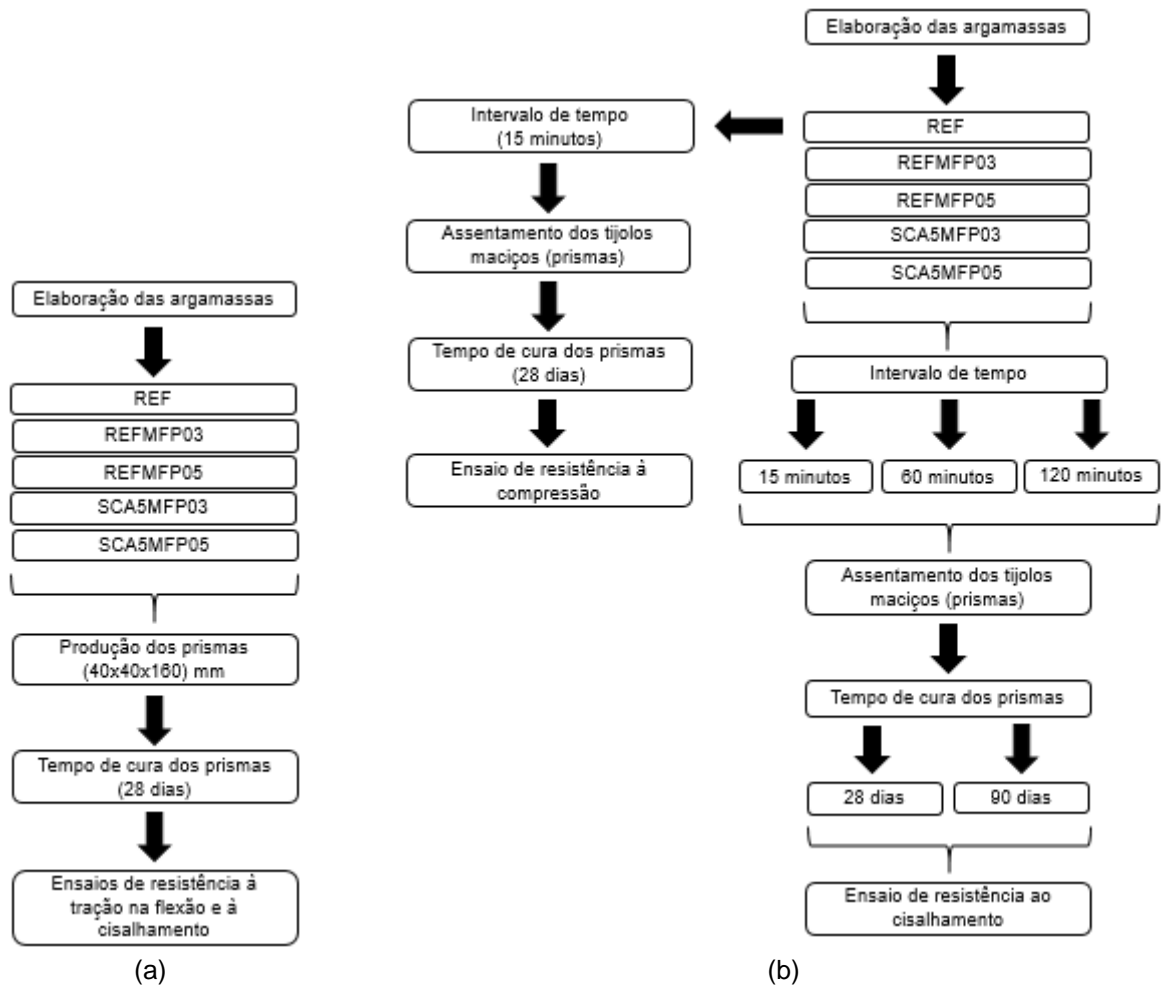


Fonte: Elaboração própria.

3.4 Procedimento experimental

Na Figura 11 está estruturado o procedimento experimental que foi adotado para a realização do trabalho. Foram preparadas cinco misturas argamassadas, quinze prismas de argamassas e sessenta e quatro prismas de tijolos cerâmicos maciços. Sendo três prismas de argamassa elaborados com cada mistura após o fim da preparação das mesmas para a determinação das resistências à tração na flexão em três pontos e à compressão axial e, quatro prismas de tijolos maciços desenvolvidos com a mistura REF no tempo de 15 minutos para a determinação da resistência à compressão e posteriormente a definição da tensão de pré-compressão, quatro prismas de tijolos maciços produzidos com cada argamassa e em três tempos de moldagem para a determinação da resistência ao cisalhamento.

Figura 11 – Fluxograma do procedimento experimental: (a) Para os prismas de argamassas e; (b) Para os prismas de tijolos cerâmicos maciços



Fonte: Elaboração própria.

3.4.1 Composição de materiais

A elaboração das argamassas foi produzida conforme as misturas da Tabela 3, metodologia adaptada de Marangon *et al.* (2021). A partir de uma argamassa de referência com resistência à compressão de 8 MPa, realizou-se a adição de 0,30% (REFMFP03) e 0,50% (REFMFP05) de MFP em relação ao volume total da argamassa, assim como a substituição parcial do cimento Portland pela SCA no teor de 5% com incorporação de 0,30% (SCA5MFP03) e 0,50% (SCA5MFP05) de MFP em relação ao volume total da argamassa, preservando o fator água/cimento em 0,71 para todas as misturas.

Tabela 3 – Traço unitário em massa dos materiais para cada argamassa (kg)

Mistura	CIM	CAL	SCA	FI	AF	AM	AG	H2O	MFP
REF	1,000	1,200	-	0,917	2,833	1,583	1,000	0,71	-
REFFP03	1,000	1,200	-	0,917	2,833	1,583	1,000	0,71	0,028
REFFP05	1,000	1,200	-	0,917	2,833	1,583	1,000	0,71	0,046
SCA5FP03	0,950	1,200	0,050	0,917	2,833	1,583	1,000	0,71	0,028
SCA5FP05	0,950	1,200	0,050	0,917	2,833	1,583	1,000	0,71	0,046

Fonte: Elaboração própria.

3.4.2 Mistura das argamassas

A preparação das argamassas foi realizada conforme a ABNT NBR 7215 (2019) com algumas adaptações. A mistura mecânica e a pesagem dos materiais ocorreram com auxílio de uma betoneira monofásico Motomil® MB-150 litros e de duas balanças de plataforma comercial digital Amira® com capacidade máxima de 100 kg e de precisão WLC 10/A2 RADWAG® com capacidade máxima de 10 kg. Inicialmente foi adicionado na betoneira toda a quantidade de água e os materiais finos, imediatamente a betoneira e o cronômetro foram acionados simultaneamente. A mistura destes materiais foi realizada durante 90 s. Após este tempo, a betoneira foi desligada e realizada a raspagem nas paredes internas do tambor por 30 s e deixada em repouso por mais 30 s, cobrindo-se a abertura do tambor por um pano úmido. Transcorrido este tempo, a betoneira foi ligada e acrescentou-se os agregados miúdos (previamente misturados), durante o tempo de 30 s. Após este intervalo, a mistura dos materiais foi realizada por mais 120 s, posteriormente a betoneira foi desligada e executada a raspagem nas paredes internas do tambor durante 30 s, paralelamente adicionou-se a porcentagem de MFP estabelecida para cada mistura e novamente a betoneira foi acionada por mais 90 s.

3.4.3 Produção dos prismas de argamassas e de tijolos cerâmicos maciços

De acordo com a ABNT NBR 13279 (2005) consecutivamente a elaboração das misturas foram produzidos os prismas de argamassas. Com o molde prismático previamente disposto sobre a mesa de adensamento, aplicou-se uma fina camada de óleo mineral nas faces internas do molde e incorporada diretamente em cada compartimento do molde, uma porção de argamassa (Figura 12). Mediante ao lado maior do nivelador de camadas, foi realizado o espalhamento da argamassa em cada compartimento, formando-se uma camada uniforme. Após, foi aplicada 30

quedas na mesa de adensamento e introduzida a segunda camada de argamassa em cada compartimento do molde através do lado menor do nivelador de camadas, procedeu-se ao espalhamento uniforme da argamassa e foi aplicado novamente 30 quedas através da mesa de adensamento. Posteriormente os CPs foram rasados com ajuda de uma régua metálica e conservados no molde por (48 ± 24) h na câmara úmida. Transcorrido este tempo, os CPs foram desmoldados e mantidos também na câmara úmida até a ruptura.

Simultaneamente produziram-se os prismas de tijolos cerâmicos maciços nos intervalos de tempo de 15, 60 e 120 min após o fim de mistura da argamassa. O assentamento dos tijolos foi executado pelo mesmo colaborador para todas as misturas, a fim de minimizar possíveis erros operacionais, tais como: quantidade, posição de lançamento e força de aplicação da argamassa sobre os tijolos. Assim como, todos os tijolos foram molhados com água minutos antes do assentamento para facilitar a aderência pela eliminação da camada de pó envolta deles. Em uma superfície plana e indeformável foi colocado o primeiro tijolo e aplicada a primeira camada de argamassa (espessura de aproximadamente 1,50 cm), após posicionou-se o segundo tijolo sobre a junta de assentamento e mediu-se o nível e o prumo.

O mesmo procedimento foi realizado com o segundo tijolo, aplicou-se mais uma camada de argamassa (espessura de aproximadamente 1,50 cm), posto o terceiro tijolo, medido o nível e o prumo, dando origem ao prisma. Os tijolos cerâmicos maciços foram numerados em 1, 2 e 3, sendo: 1 = primeiro tijolo onde foi aplicada a argamassa na face superior do tijolo; 2 = segundo tijolo em que se aplicou a argamassa na face superior e estava entre as duas juntas de assentamento e; 3 = terceiro tijolo no qual foi posicionado sobre a segunda junta de assentamento e ficou em contato com a argamassa apenas a face inferior (Figura 13).

Figura 12 – Produção dos prismas de argamassa: (a) Molde prismático de argamassa e aplicação da primeira porção de argamassa nos compartimentos e; (b) Molde prismático sobre a mesa de adensamento após a aplicação dos últimos 30 golpes



Fonte: MENDONÇA (2022).

Figura 13 – Disposição dos tijolos na produção do prisma



Fonte: Elaboração própria.

Nas tabelas 4 e 5 são apresentados os quantitativos dos prismas de argamassas e de tijolos cerâmicos maciços submetidos aos ensaios de resistências, respectivamente.

Tabela 4 – Quantitativo dos prismas de argamassas produzidos para os ensaios de resistências à tração na flexão e à compressão

Ensaio de resistência	Traço				
	REF	REFMFP03	REFMFP05	SCA5MFP03	SCA5MFP05
À tração na flexão	3	3	3	3	3
À compressão	6	6	6	6	6
Total de prismas			15		

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5 – Quantitativo dos prismas de tijolos cerâmicos maciços moldados para os ensaios de resistências à compressão e ao cisalhamento

Tempo (minutos)	Traço				
	REF	REFMFP03	REFMFP05	SCA5MFP03	SCA5MFP05
15	8*	4	4	4	4
60	4	4	4	4	4
120	4	4	4	4	4
Total de prismas			64		

* Quatro prismas do traço REF foram moldados para o ensaio de resistência à compressão.
Fonte: Elaboração própria.

3.4.4 Tempo de cura dos prismas de tijolos maciços

Após o processo de assentamento dos tijolos, os prismas foram acondicionados sobre uma superfície elevada (paletes de madeira) e envoltos por um sistema de irrigação constituído por 10 aspersores de água, lona plástica e aquecedor termoventilador elétrico Ventisol® na velocidade 1, de acordo com a Figura 14. Ambos permaneceram acionados durante o tempo de cura (28 dias).

Figura 14 – Prismas de argamassas e de tijolos cerâmicos maciços acondicionados na câmara úmida



Fonte: Elaboração própria.

3.4.5 Determinação das resistências à tração na flexão e à compressão das misturas

As resistências das argamassas foram determinadas de acordo com a metodologia descrita pela ABNT NBR 13279 (2005). A amostragem foi composta por três prismas (40x40x160) mm para cada mistura argamassada e a ruptura realizada na idade de 28 dias. Primeiramente realizou-se o ensaio de resistência à tração na flexão, posicionou-se o CP nos dispositivos de apoio da máquina universal de ensaios EMIC® DL 20000 de maneira que a face rasada não estivesse em contato com os dispositivos de apoio nem com o dispositivo de carga. Empregou-se a carga até a ruptura do CP. A resistência à tração na flexão foi calculada conforme a Equação 2.

$$R_f = \frac{1,5 * F_f * L}{40^3} \quad (2)$$

Sendo:

R_f = resistência à tração na flexão (MPa);

F_f = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L = distância entre os suportes (mm).

Para o ensaio de resistência à compressão axial foram aproveitados as metades dos três CPs do ensaio de resistência à tração na flexão, colocou-se a metade do CP no dispositivo de apoio da máquina universal de ensaios, de modo que a face rasada não tivesse contato com o dispositivo de apoio nem com o dispositivo de carga. Aplicou-se a carga até a ruptura do CP. A resistência à compressão foi determinada segundo a Equação 3.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3)$$

Sendo:

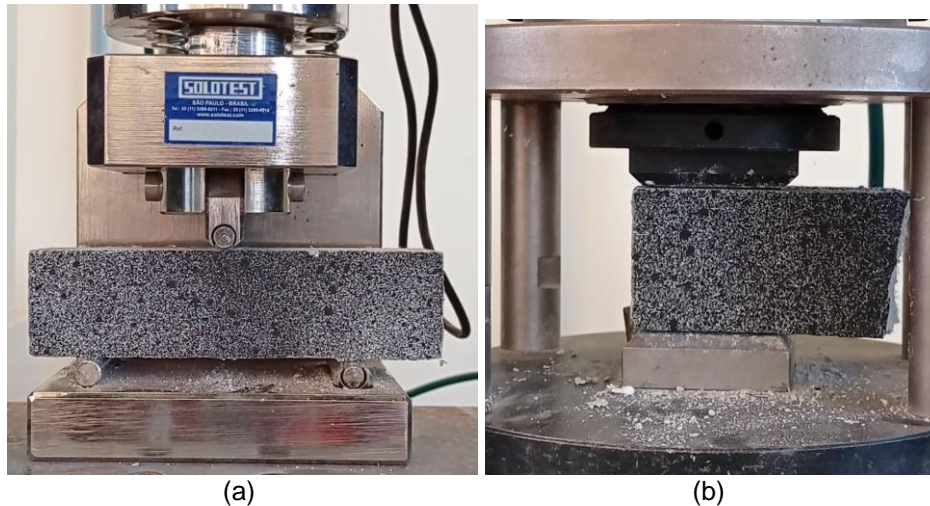
R_c = resistência à compressão (MPa);

F_c = carga máxima aplicada (N);

1600 = área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga (40x40) mm (mm²).

A realização dos ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão podem ser observados na Figura 15.

Figura 15 – Execução dos ensaios de resistências à: (a) tração na flexão em três pontos e; (b) compressão axial



Fonte: Elaboração própria.

3.4.6 Determinação da resistência à compressão dos prismas

A determinação da resistência à compressão dos prismas de tijolos cerâmicos maciços foi realizada conforme a ABNT NBR 15270-2 (2017) com certas modificações, foram analisados quatro CPs. Posteriormente a produção dos prismas com a mistura REF no intervalo de tempo de 15 min e o tempo de cura de 28 dias na câmara úmida, ocorreu-se o capeamento de acordo com as seguintes orientações: a regularização das faces dos prismas em contato com as placas da prensa foram executadas com uma argamassa com resistência superior à 70% da resistência dos tijolos na área líquida; a superfície em que o capeamento foi realizado não se distanciou do plano mais que 0,08 mm para cada 400 mm e; a espessura média do capeamento não excedeu 3 mm. Após o endurecimento das camadas de capeamento, os CPs foram acondicionados em água durante 24 h. O ensaio foi executado na máquina universal de ensaios EMIC® DL 1500 e procedeu-se de acordo com as seguintes instruções: os CPs foram ensaiados na condição saturada e de forma que a carga estivesse aplicada na direção do esforço em que o prisma necessitava suportar durante o seu emprego. Posicionou-se o CP na prensa de

maneira que o seu centro de gravidade estivesse no eixo de carga dos pratos da prensa, posteriormente procedeu-se o ensaio, ajustando o comando da prensa.

3.4.7 Determinação da resistência ao cisalhamento dos prismas

O ensaio para a avaliação mecânica foi realizado de acordo com os procedimentos da norma BS EN 1052-3 (2002) na máquina universal de ensaios EMIC® DL 20000. Os prismas foram retirados três dias antes do ensaio da câmara úmida e submetidos as seguintes etapas: raspagem dos excessos de argamassas; retificação na face posicionada nos pontos de apoio; pintura estocástica e; fixação dos suportes dos sensores LVDTs com campo de medição de ± 10 mm.

Após o ensaio de resistência à compressão dos prismas, foi definida a tensão de pré-compressão promovida por um sistema lateral desenvolvido durante o trabalho. O sistema foi constituído por macaco hidráulico manual veicular tipo garrafa 2 toneladas Bremer® 2217, placas de aço rígidas, célula de carga tipo S de alta precisão 20 kN e barras de aço rosqueadas. Entre as placas de aço e o prisma posicionaram-se placas de EVA, com a finalidade de impedir concentrações de tensões e uniformizar o carregamento. A velocidade de deslocamento do travessão da máquina para o ensaio foi de 0,10 mm/min e o critério de interrupção foi quando o descolamento do tijolo 2 (central) fosse de 4,5 mm em relação aos tijolos 1 e 3 (laterais).

O ensaio de cisalhamento foi monitorado por gravação de vídeo com câmara traseira de aparelho celular com resolução de vídeo de 12 MP, abertura f/1.8 com estabilização óptica e gravação em 4K a 60 frames/s e posteriormente analisada no Software GOM Correlate®.

A tensão de cisalhamento máxima para cada mistura foi calculada através da Equação 4.

$$\tau_{\text{máx.}} = \frac{F_{\text{máx.}}}{2 \times A} \quad (4)$$

Sendo:

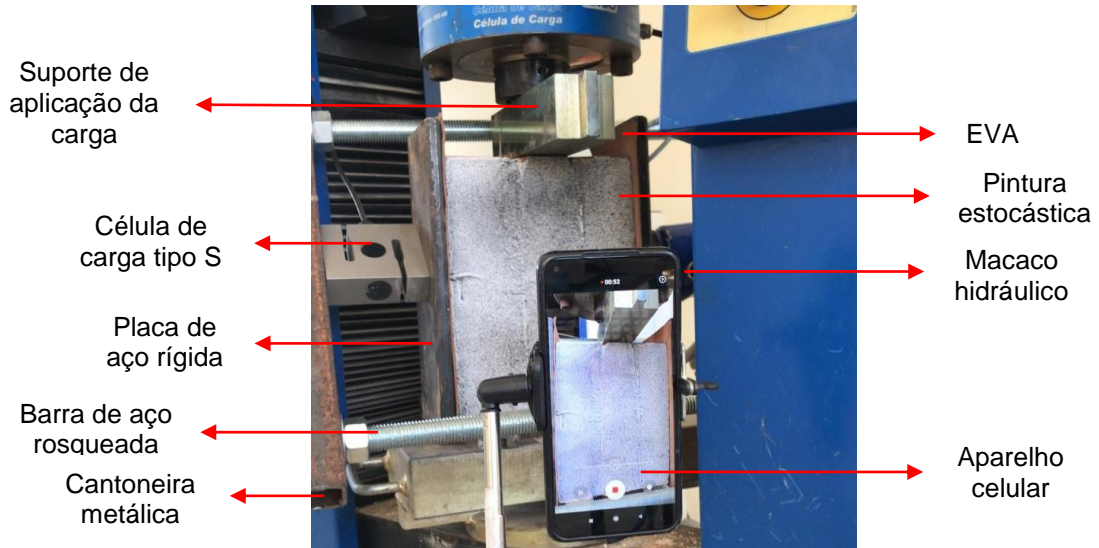
$\tau_{\text{máx.}}$ = tensão de cisalhamento máxima (MPa);

$F_{\text{máx.}}$ = força máxima aplicada sobre o tijolo central (kN);

A = área de contato entre o tijolo e a argamassa (cm²).

Na figura 16 é possível visualizar o sistema lateral desenvolvido para os ensaios dos prismas de tijolos cerâmicos maciços com pré-compressão.

Figura 16 – Ensaio de resistência ao cisalhamento



4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do procedimento experimental proposto na metodologia para as determinações da resistência à tração na flexão e resistência à compressão dos prismas de argamassas para as diferentes misturas propostas. Em relação aos prismas de tijolos cerâmicos maciços, foram realizados ensaios de resistência à compressão para determinar a tensão de pré-compressão a ser aplicada pelo sistema lateral, a resistência ao cisalhamento, para determinação da tensão máxima de cisalhamento e o processo de fissuração e de ruptura na interface argamassa/tijolo destas misturas quando aplicadas nos tempos de 15, 60 e 120 min. Todos os resultados mecânicos foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e as diferenças entre as médias comparadas através do teste de Tukey, ao nível de 95% de significância.

4.1 Resistência à compressão dos prismas de tijolos maciços

Na tabela 6 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos prismas de tijolos cerâmicos maciços moldados com a mistura de referência.

Tabela 6 – Resultado de resistência à compressão dos prismas

Mistura	Média $\sigma_{m\acute{a}x.}$ (MPa)	DP* (MPa)	CV** (%)
REF	7,42	0,42	5,66

* DP = desvio padrão; ** CV = coeficiente de variação.

Fonte: Elaboração própria

Como pode ser observado na Tabela 6 a média de tensão de compressão dos prismas foi de 7,42 MPa. Conforme a norma BS EN 1052-3 (2002), a mesma indica que para tijolos cerâmicos com resistência à compressão inferior a 10 MPa, recomenda-se o uso de cargas de pré-compressão de aproximadamente 0,1, 0,3 e 0,5 MPa. Portanto, a tensão de pré-compressão utilizada para os ensaios de resistência ao cisalhamento dos prismas de tijolos cerâmicos maciços foi de 0,5 MPa.

4.2 Resistência à tração na flexão dos prismas de argamassas

Os valores de tensão média, desvio padrão e coeficiente de variação dos ensaios de resistência à tração na flexão de argamassas estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados de resistência à tração na flexão das argamassas

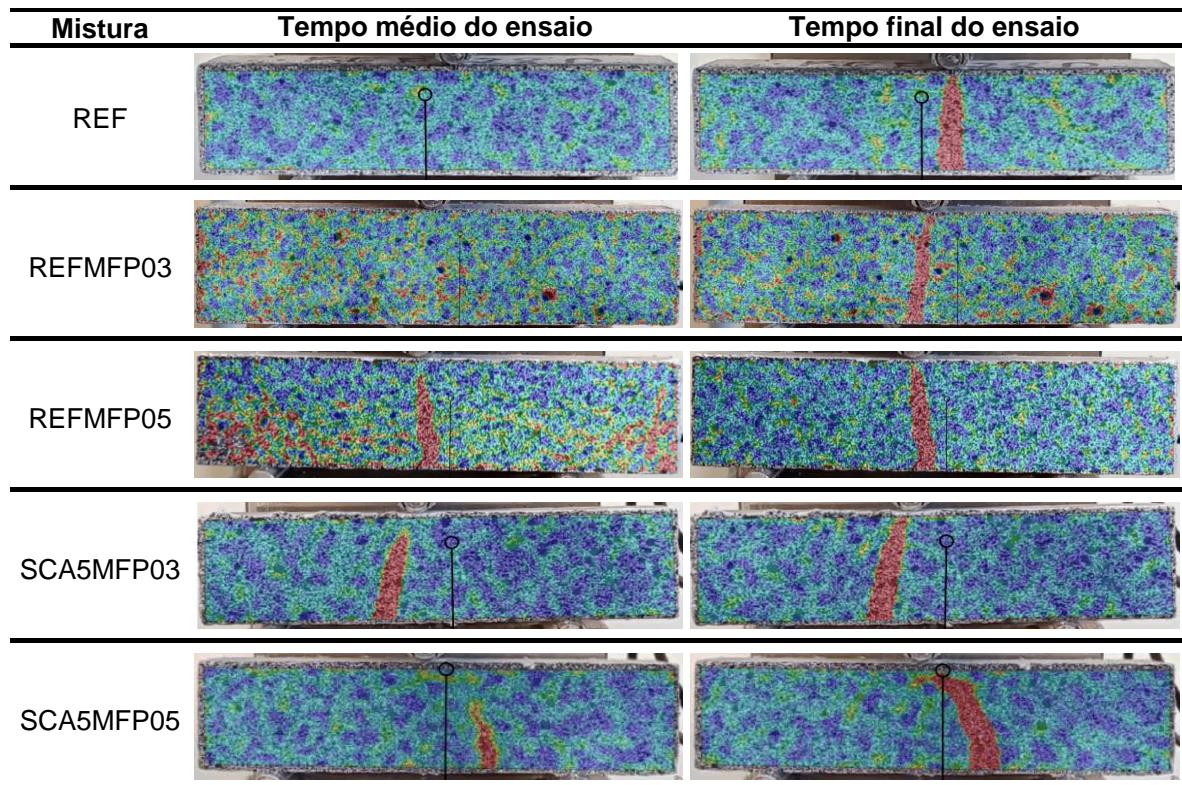
Mistura	Média $\sigma_{máx.}$ (MPa)	DP* (MPa)	CV** (%)
REF	1,69	0,02	1,21
REFMFP03	3,28	0,47	14,23
REFMFP05	2,06	0,09	4,34
SCA5MFP03	2,18	0,21	9,85
SCA5MFP05	2,63	0,16	6,12

* DP = desvio padrão; ** CV = coeficiente de variação.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 17 são mostradas as imagens obtidas a partir da correlação de imagens analisadas no software GOM Correlate®.

Figura 17 – Processo de ruptura dos prismas à tração na flexão em três pontos



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 7, verificou-se que as misturas contendo ambos materiais resultaram em tensões máximas superiores em relação a mistura REF. A mistura REFMFP03 foi a que apresentou o melhor resultado, sendo seu desempenho de 48,48%, 37,20%, 33,54% e 19,82% superior aos resultados encontrados para as misturas REF, REFMFP05, SCA5MFP03 e SCA5MFP05 respectivamente. Após as análises estatísticas, o desempenho da mistura REFMFP03 não apontou diferença significativa somente em relação a SCA5MFP05, sendo estatisticamente diferentes de todas as demais. Quanto as misturas contendo SCA, a mistura SCA5MFP05 foi a que demonstrou melhor desempenho em relação a mistura REF, apresentando diferença significativa.

Com relação ao processo de ruptura, nota-se que as misturas argamassadas contendo MFP demonstraram comportamento mecânico distintos em relação a mistura REF, visto que nos tempos analisados é possível visualizar uma maior incidência de tons de amarelo-vermelho, demonstrando assim que houve uma maior distribuição das tensões em toda a área do elemento.

4.3 Resistência à compressão dos prismas de argamassas

Na tabela 8 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial dos prismas de argamassas.

Tabela 8 – Resultados de resistência à compressão das misturas

Mistura	Média omáx. (MPa)	DP* (MPa)	CV** (%)
REF	4,62	0,22	4,92
REFMFP03	10,90	0,38	3,58
REFMFP05	6,05	0,53	9,05
SCA5MFP03	9,09	0,80	9,12
SCA5MFP05	9,17	1,60	16,36

* DP = desvio padrão; ** CV = coeficiente de variação.

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados indicam que a presença de MFP e a substituição parcial do CIM pela SCA elevaram as médias de resistência à compressão axial das misturas em relação a mistura de referência REF. As misturas contendo somente MFP apresentaram desempenho superior de 136% (REFMFP03) e 31% (REFMFP05) em

relação a mistura de referência (REF). No que tange as misturas contendo SCA e MFP também apresentaram desempenho superior de 97% (SCA5MFP03) e 98% (SCA5MFP05) em relação a mistura de referência (REF). Apesar disso, de acordo com o teste de Tukey ao nível de 95% de significância, apenas a mistura REFMFP05 não demonstrou diferença significativa no seu comportamento em relação a mistura REF.

A REFMFP03 foi a mistura que atingiu a maior tensão máxima entre as misturas de argamassas analisadas, apresentando diferença significativa com todas as misturas.

As misturas contendo SCA, não apresentaram efeito significativo entre si. Ao compará-las com a mistura REFMFP03, estas, apresentaram perda em seu desempenho de aproximadamente 16%. Provavelmente este valor pode ter sido devido a substituição do cimento Portland pela sílica da casca de arroz, sendo que aos 28 dias não deve ter ocorrido a reação pozolânica suficiente para que houvesse a manutenção da mesma resistência da mistura REFMFP03. Também deve ser levar em consideração a porcentagem de fibras de polipropileno adicionadas nestas misturas. Possivelmente nos ensaios com idades mais avançadas, como aos 90 dias, poderá ser avaliado se a SCA conseguirá apresentar desempenho igual ou superior as demais misturas de argamassas estudadas.

4.4 Resistência de aderência ao cisalhamento dos prismas de tijolos maciços e modo de fissuração e ruptura da interface argamassa/tijolo

Os valores médios de tensão máxima de cisalhamento, desvio padrão e coeficiente de variação dos prismas de tijolos cerâmicos maciços moldados com as misturas estudadas nos tempos de 15, 60 e 120 min são apresentados na Tabela 9.

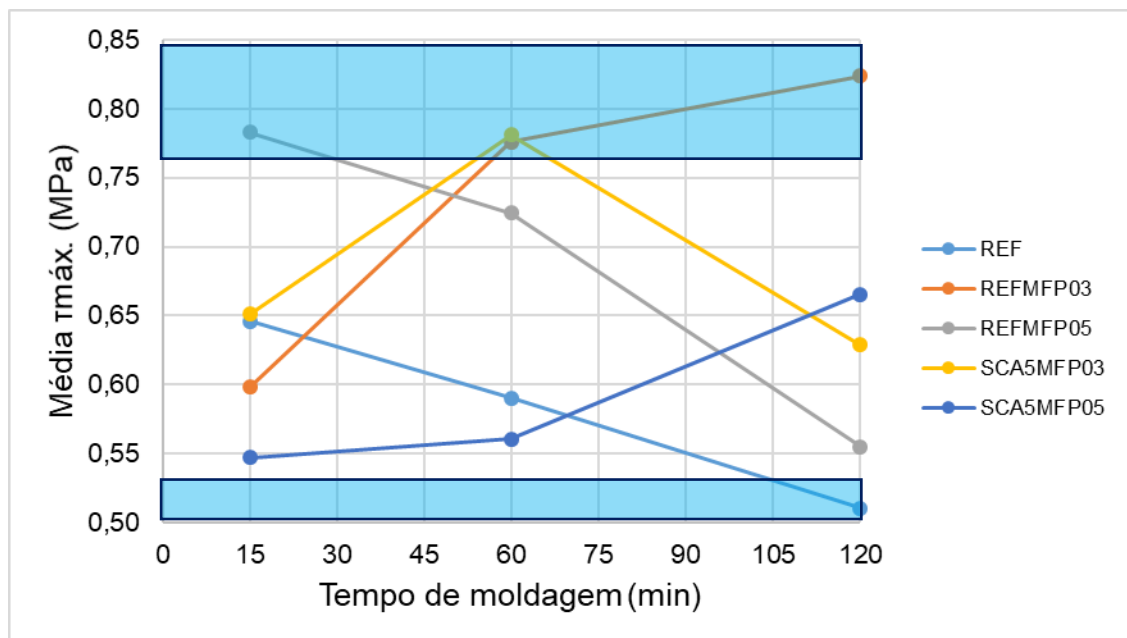
Tabela 9 – Resultados de resistência ao cisalhamento dos prismas

Mistura	Tempo (minutos)	Média $\tau_{\text{máx.}}$ (MPa)	DP* (MPa)	CV** (%)
REF	15	0,65	0,04	5,91
	60	0,59	0,11	18,02
	120	0,51	0,05	10,37
REFMFP03	15	0,60	0,12	19,80
	60	0,78	0,10	12,79
	120	0,82	0,11	13,46
REFMFP05	15	0,78	0,11	13,59
	60	0,72	0,07	9,75
	120	0,56	0,07	12,09
SCA5MFP03	15	0,65	0,08	12,18
	60	0,78	0,04	5,67
	120	0,63	0,11	18,10
SCA5MFP05	15	0,55	0,11	20,61
	60	0,56	0,04	6,48
	120	0,67	0,09	12,83

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 18 está apresentada o gráfico da média de tensão máxima ao cisalhamento (MPa) x tempo de moldagem (min) dos prismas moldados com as misturas argamassadas nos tempos de 15, 60 e 120 min.

Figura 18 – Comportamento dos prismas moldados com as misturas argamassadas quando nos intervalos de tempo de 15, 60 e 120 min



Fonte: Elaboração própria.

Conforme pode ser observado nos resultados apresentados na Tabela 9 e na Figura 18, as misturas REF e REFMFP05 apresentaram uma diminuição das médias de resistência ao cisalhamento com passar do tempo de aplicação das misturas.

Diferentemente, os valores de tensões máximas encontradas para as misturas REFMFP03 e SCA5MFP05 demonstraram um aumento conforme o decorrer do tempo de aplicação na construção dos prismas.

Em relação a mistura SCA5MFP03 pode-se verificar que houve um aumento de 16,67% nos intervalos de 15 para 60 min, mas logo após houve uma redução de 19,23% nos tempos de 60 para 120 min.

No que se refere as misturas de argamassas contendo MFP, é possível analisar que a mistura REFMFP05 foi a que desenvolveu a maior resistência ao cisalhamento no tempo de 15 min, seguida pelas misturas SCA5MFP03, REFMFP03 e SCA5MFP05. Com relação ao intervalo de tempo de 60 min, às misturas REFMFP03 e SCA5MFP03 foram as que demonstraram as melhores médias de tensão máxima (0,78 MPa), apresentando desempenho de 28,21% e 7,69% superior em relação as misturas SCA5MFP05 e REFMFP05, respectivamente. Para o tempo de 120 min, a maior média de resistência ao cisalhamento foi a mistura REFMFP03 com 0,82 MPa, por conseguinte as misturas SCAMFP05 com 0,67 MPa, SCA5MFP03 com 0,63 MPa e REFMFP05 com 0,56 MPa.

Apesar de haver essas variações positivas e por vezes negativas, quando realizado a análise estatística dos resultados de resistência ao cisalhamento entre as misturas estudadas e nos diferentes tempos de moldagem dos prismas, pode-se constatar que em sua grande maioria não há diferença significativa. A exceção pode ser observada na análise da mistura REF aos 120 min que apresentou perdas no desempenho de 34,62% em relação as misturas REFMFP05 aos 15 min, REFMFP03 aos 60 min e SCA5MFP05 aos 60 min. Como também, em relação a mistura REFMFP03 aos 120 min, que demonstrou uma perda de 37,80%.

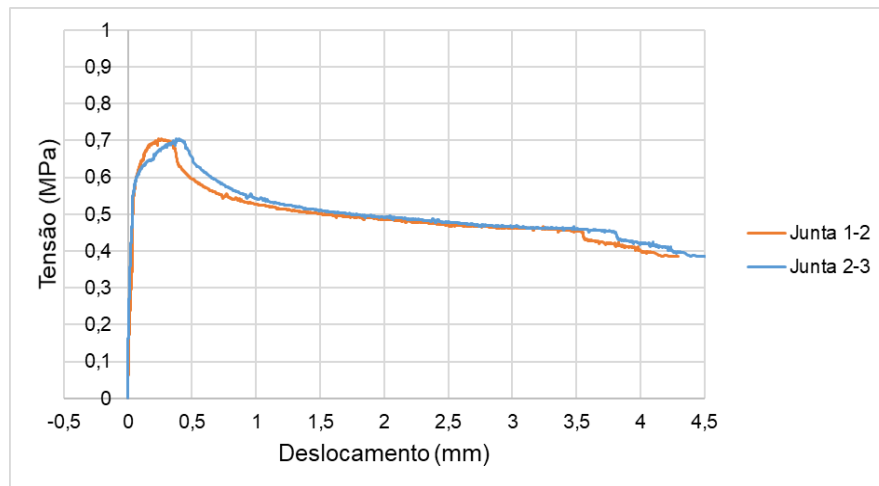
Com relação aos tempos de aplicação das misturas argamassadas, recomenda-se que para as misturas REF e REFMFP05 sejam aplicadas em tempos de até 60 min, enquanto que para as misturas REFMFP03, SCA5MFP03 e SCA5MFP05 possam ser lançadas em quaisquer intervalos de tempo.

Com os valores de deslocamento obtidos pelos sensores LVDTs durante a realização dos ensaios de resistência ao cisalhamento, foram plotadas as curvas

características das argamassas quando aplicadas nos diferentes tempos. Com a finalidade de analisar a compatibilidade do deslocamento das juntas de assentamento 1-2 e 2-3 e, a aderência entre a argamassa e o substrato.

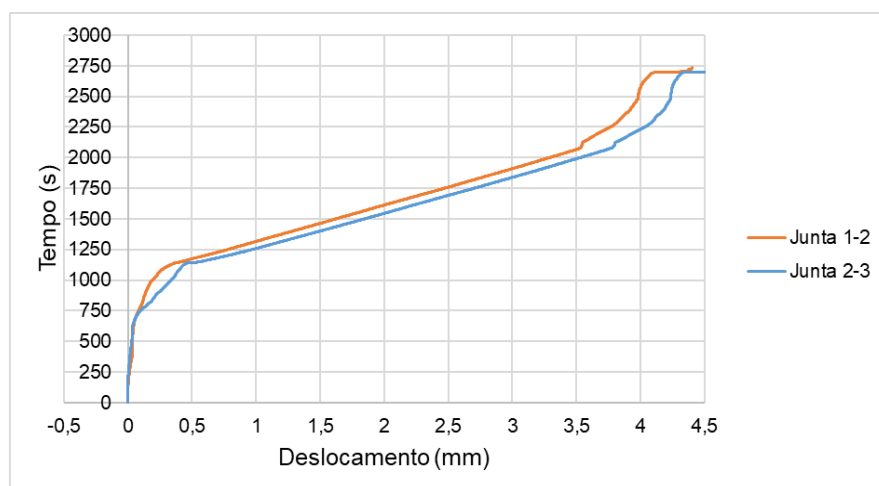
Nas Figuras 19, 21 e 23 estão apresentadas as curvas características de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) dos prismas moldados com a mistura REF nos tempos de 15, 60 e 120 min, respectivamente. Enquanto, nas Figuras 20, 22 e 24 estão demonstradas as curvas características de tempo (s) x deslocamento (mm) das juntas de assentamento 1-2 e 2-3 durante os ensaios de cisalhamento nos três tempos de aplicação.

Figura 19 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REF aos 15 min



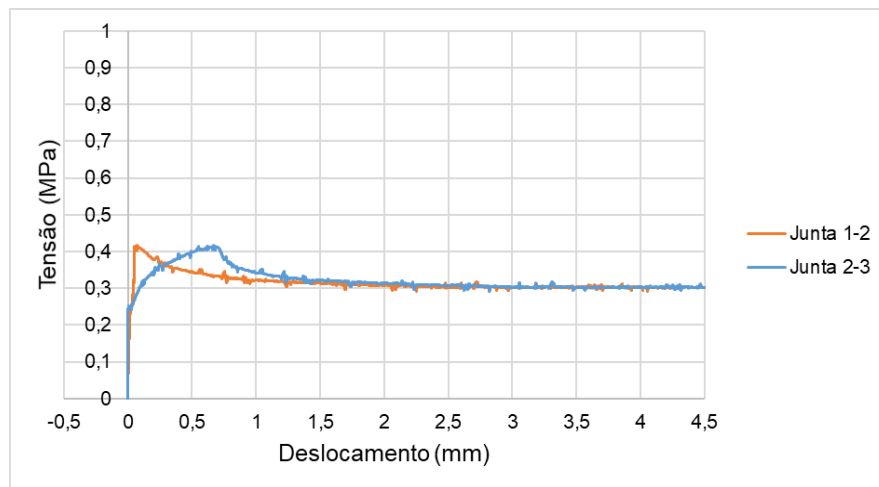
Fonte: Elaboração própria.

Figura 20 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REF aos 15 min



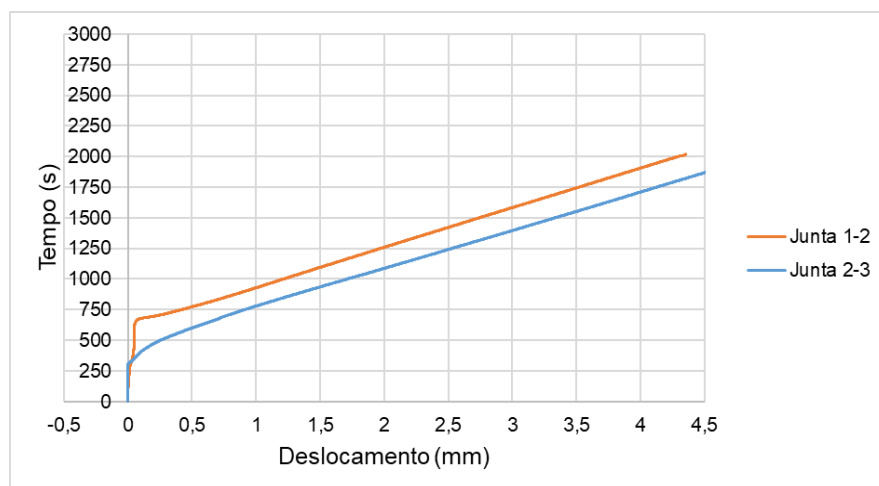
Fonte: Elaboração própria.

Figura 21 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REF aos 60 min



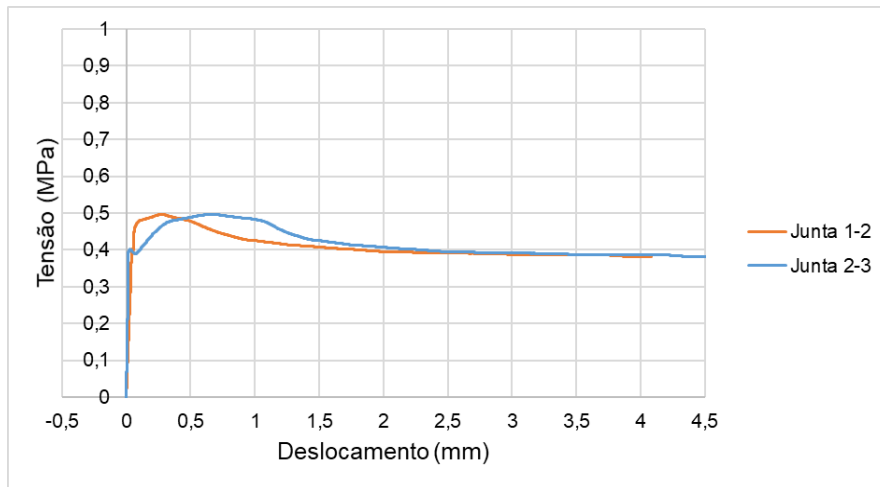
Fonte: Elaboração própria.

Figura 22 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REF aos 60 min



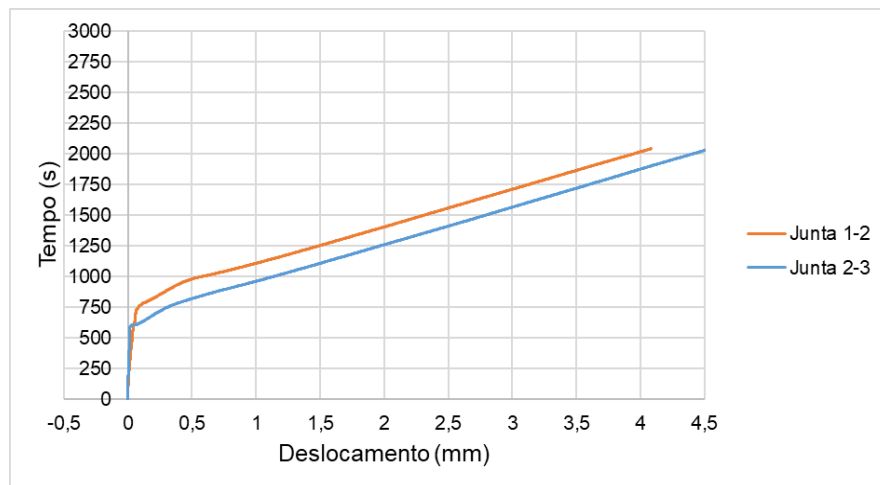
Fonte: Elaboração própria.

Figura 23 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REF aos 120 min



Fonte: Elaboração própria.

Figura 24 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REF aos 120 min



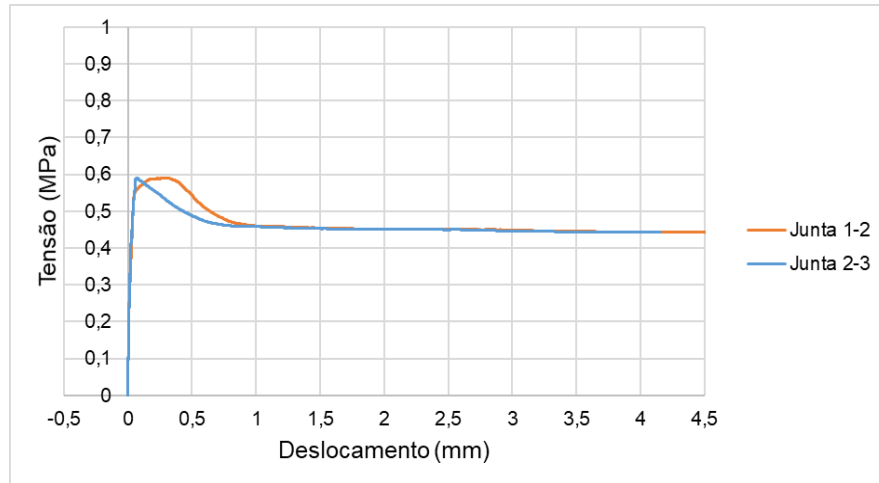
Fonte: Elaboração própria.

De acordo com as curvas características da mistura REF, é possível observar que o deslocamento das juntas de assentamento nos tempos de 15, 60 e 120 min, comportaram-se de modo distintos, uma vez que a junta 2-3 deslocou-se sempre primeiro em relação a junta 1-2. Isso pode ser observado em qualquer tempo de aplicação da mistura nos ensaios de cisalhamento.

Nas Figuras 25, 27 e 29 são mostradas as curvas características de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) dos prismas com a mistura REFMP03 assentados nos intervalos de tempo analisados. Também podem ser visualizadas nas Figuras 26, 28 e 30 as curvas características de tempo (s) x

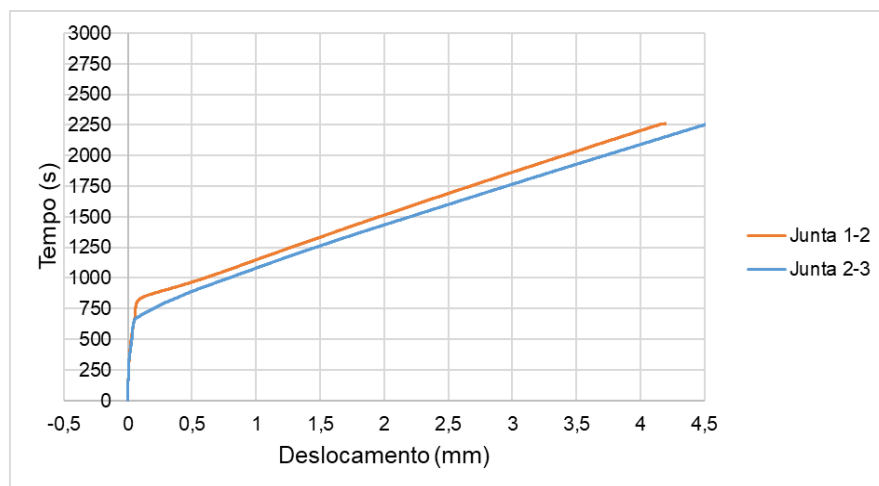
deslocamento (mm) das juntas de assentamento no decorrer dos ensaios nestes tempos.

Figura 25 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP03 aos 15 min



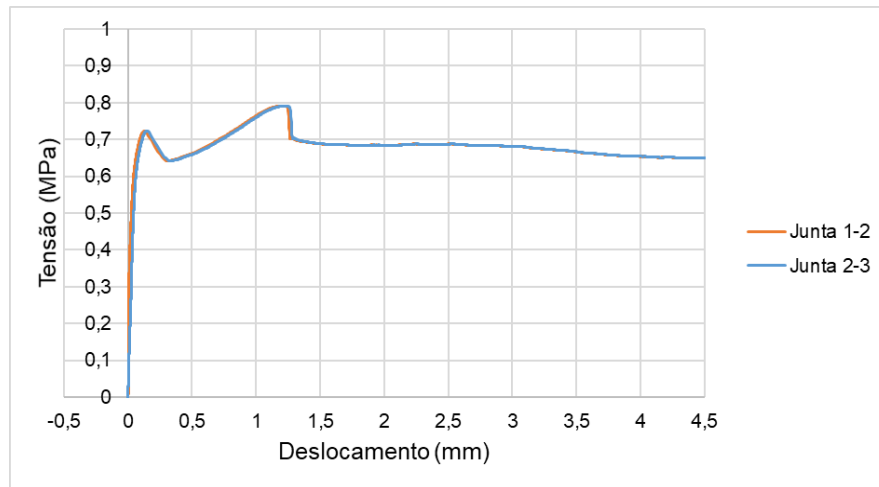
Fonte: Elaboração própria.

Figura 26 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP03 aos 15 min



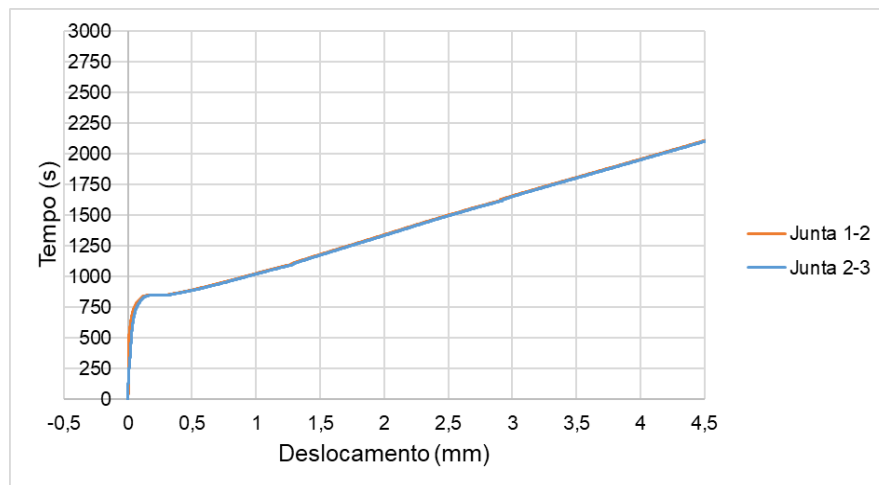
Fonte: Elaboração própria.

Figura 27 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP03 aos 60 min



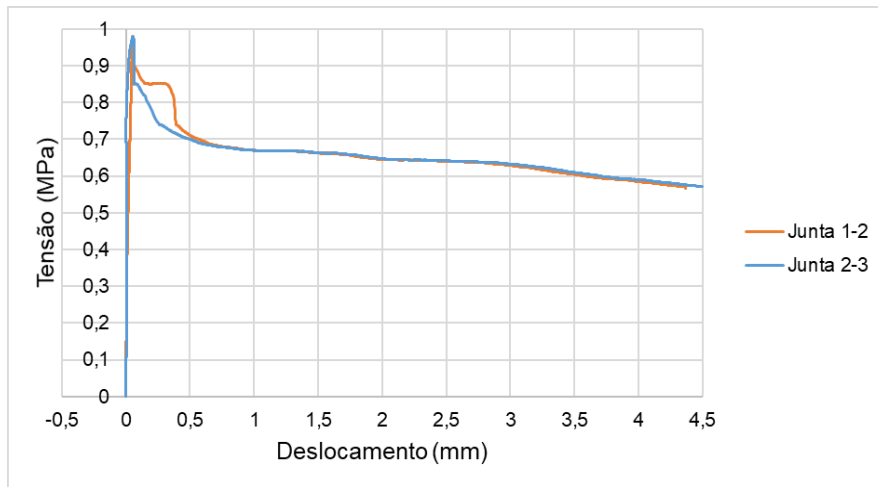
Fonte: Elaboração própria.

Figura 28 - Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP03 aos 60 min



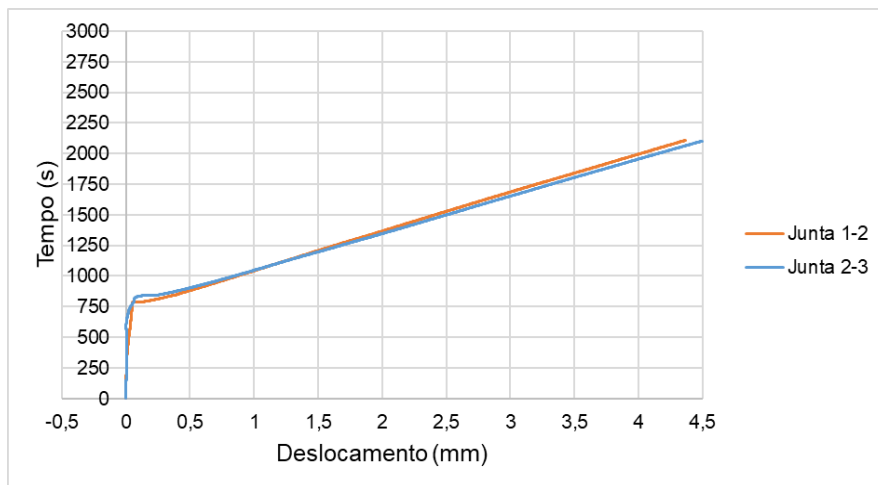
Fonte: Elaboração própria.

Figura 29 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REFMP03 aos 120 min



Fonte: Elaboração própria.

Figura 30 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REFMP03 aos 120 min

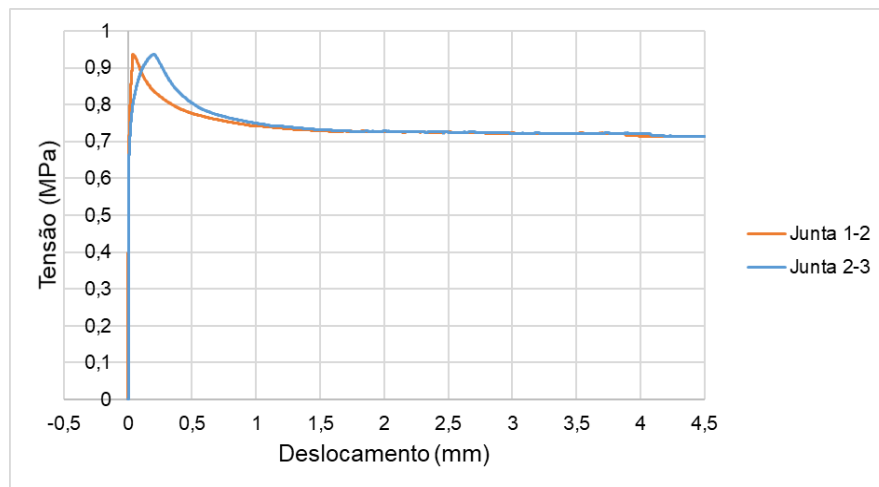


Fonte: Elaboração própria.

Com relação a mistura REFMP03 aos 15 min, as juntas apresentaram comportamento ligeiramente diferentes, embora bem próximas, em relação aos tempos de 60 e 120 min, em que o deslocamento das juntas foi igual e trabalharam de maneira equivalentes e uniformes no decorrer dos ensaios.

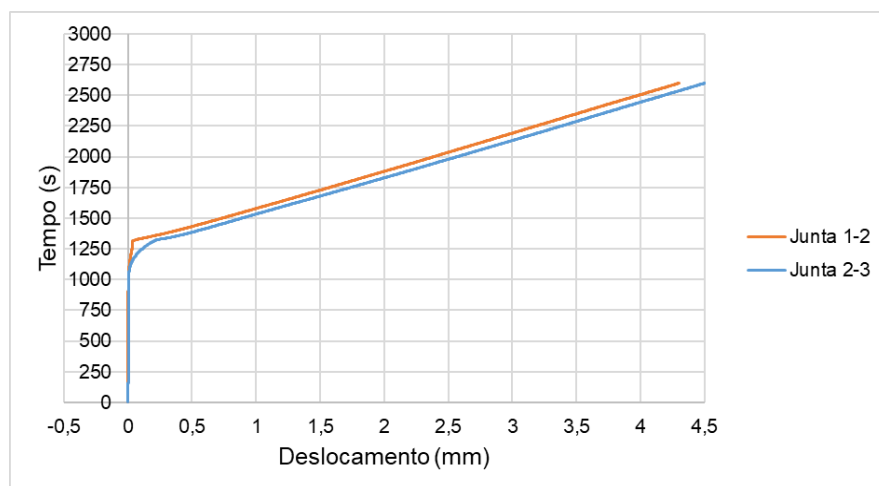
Nas Figuras 31, 33 e 35 são mostradas as curvas características de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) dos prismas com a mistura REFMP05 aplicada nos tempos de 15, 60 e 120 min. Enquanto, nas Figuras 32, 34 e 36 são mostradas as curvas características de tempo (s) x deslocamento (mm) das juntas de assentamento 1-2 e 2-3 obtidas durante os ensaios de cisalhamento.

Figura 31 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP05 aos 15 min



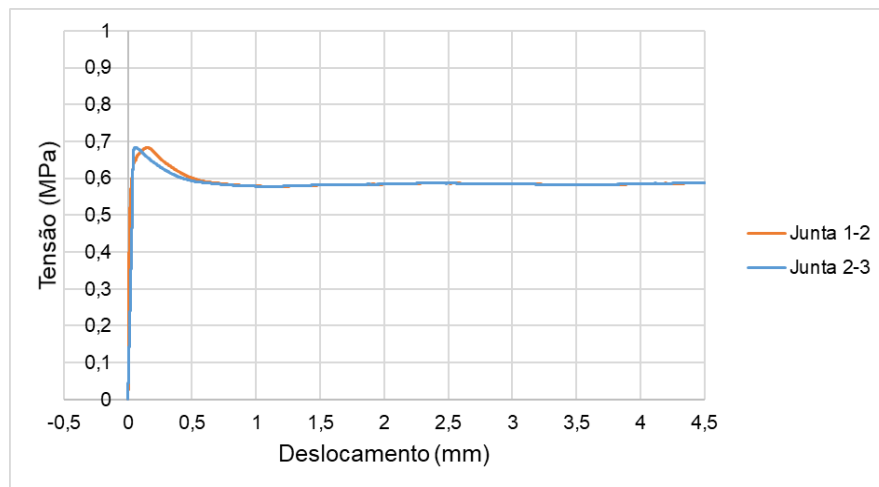
Fonte: Elaboração própria.

Figura 32 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP05 aos 15 min



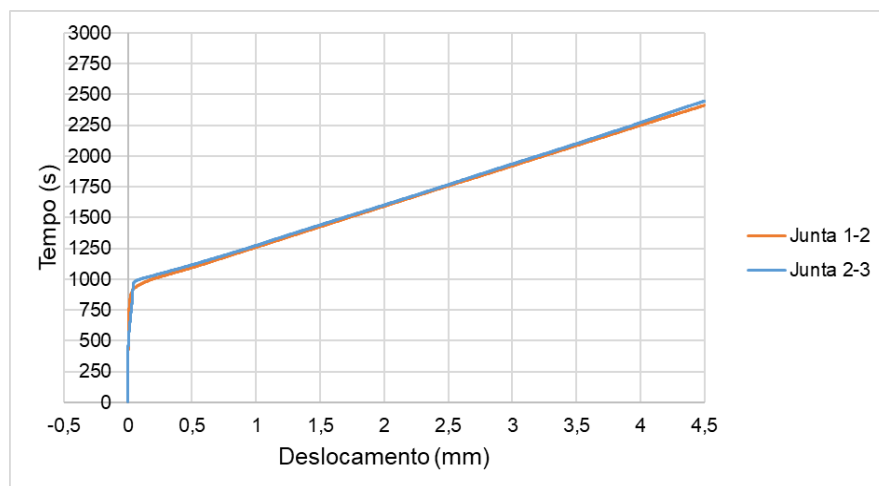
Fonte: Elaboração própria.

Figura 33 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP05 aos 60 min



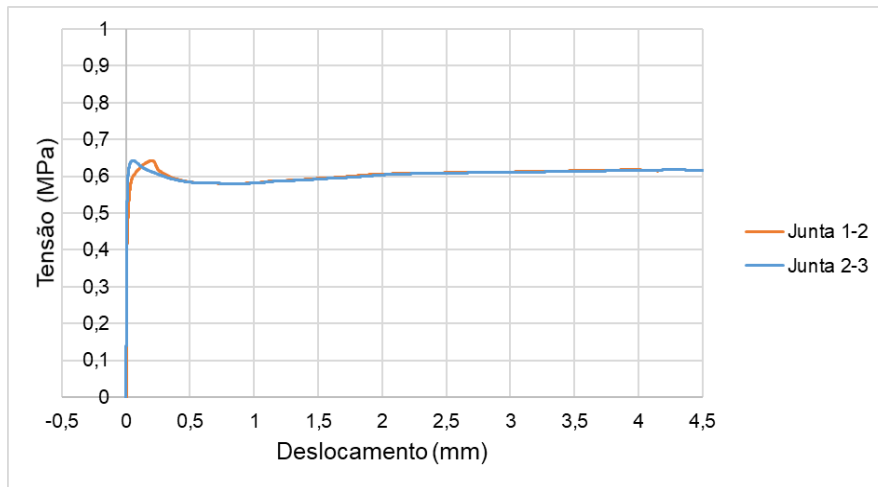
Fonte: Elaboração própria.

Figura 34 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP05 aos 60 min



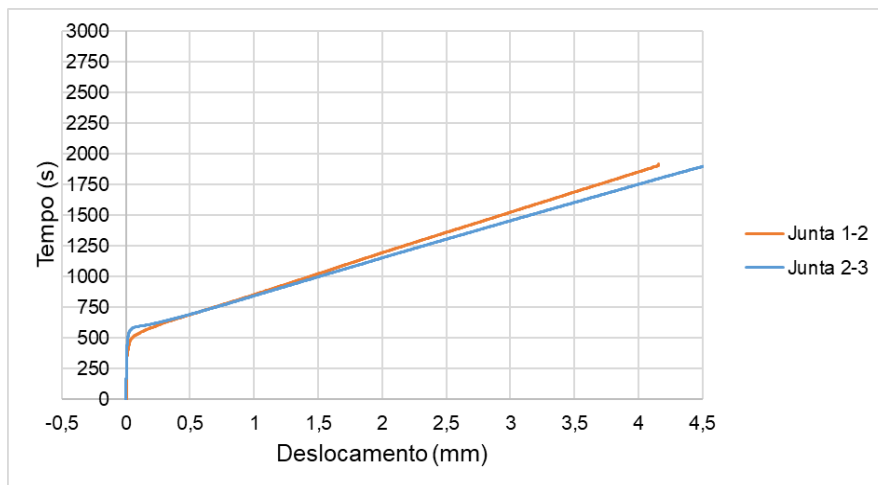
Fonte: Elaboração própria.

Figura 35 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP05 aos 120 min



Fonte: Elaboração própria.

Figura 36 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura REFMFP05 aos 120 min



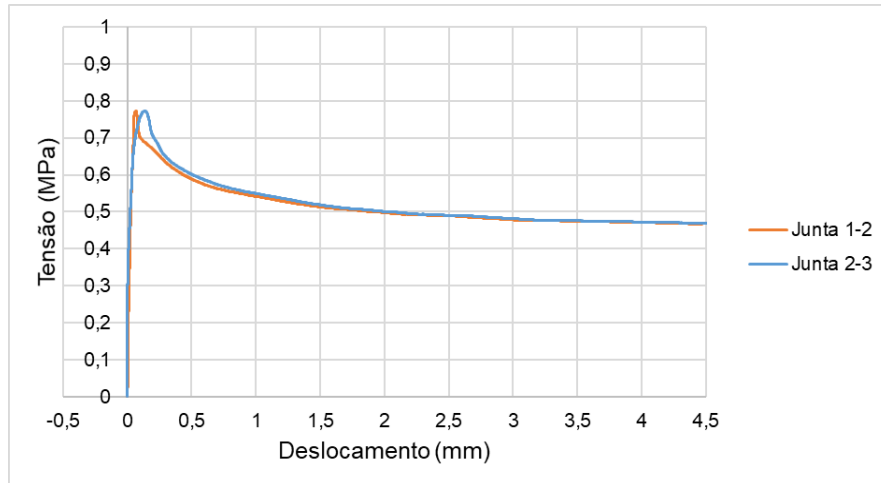
Fonte: Elaboração própria.

Com relação a mistura REFMFP05 aos 15 e 120 min, é possível observar que as juntas apresentaram comportamento ligeiramente diferentes, embora bem próximas, em relação aos tempos de 60 min, em que o deslocamento das juntas foi igual e trabalharam de maneira equivalentes e uniformes no decorrer dos ensaios.

Nas Figuras 37, 39 e 41 são mostradas as curvas características de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) dos prismas moldados com a mistura SCA5MFP03 assentada nos intervalos de tempo de estudados. Também são mostradas nas Figuras 38, 40 e 42 as curvas características de tempo (s) x

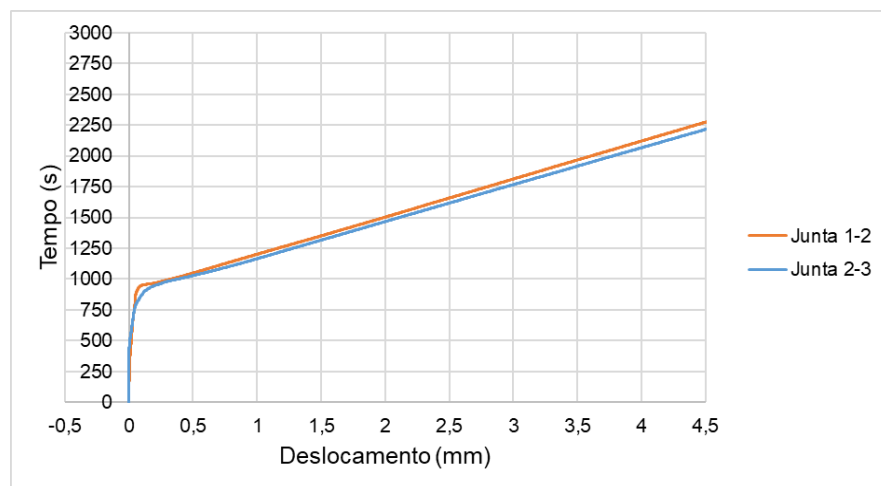
deslocamento (mm) das juntas de assentamento no decorrer dos ensaios de cisalhamento nestes tempos.

Figura 37 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP03 aos 15 min



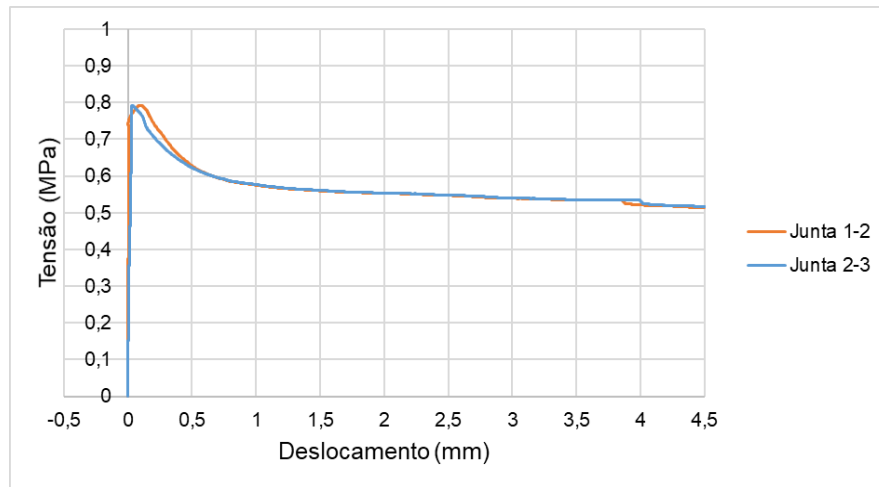
Fonte: Elaboração própria.

Figura 38 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP03 aos 15 min



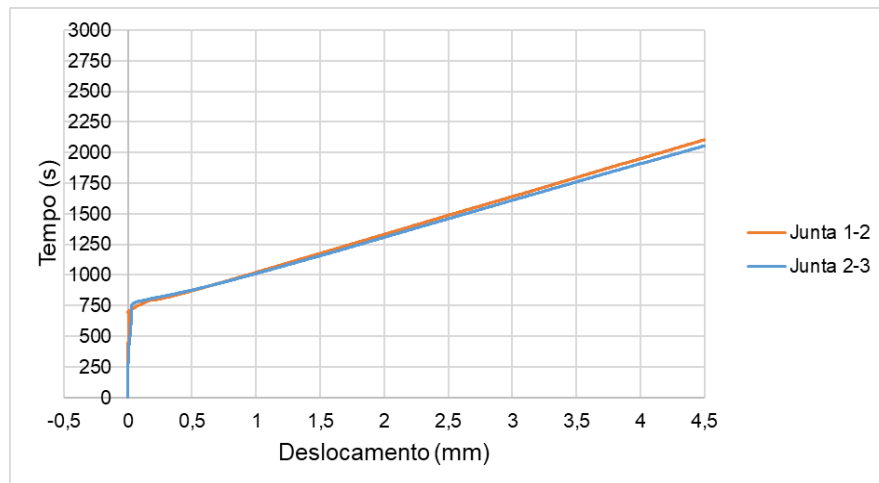
Fonte: Elaboração própria.

Figura 39 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP03 aos 60 min



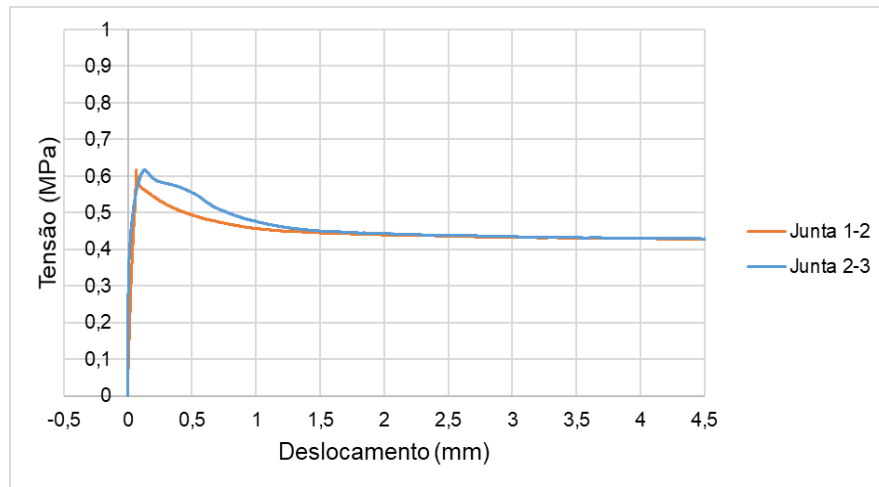
Fonte: Elaboração própria.

Figura 40 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP03 aos 60 min



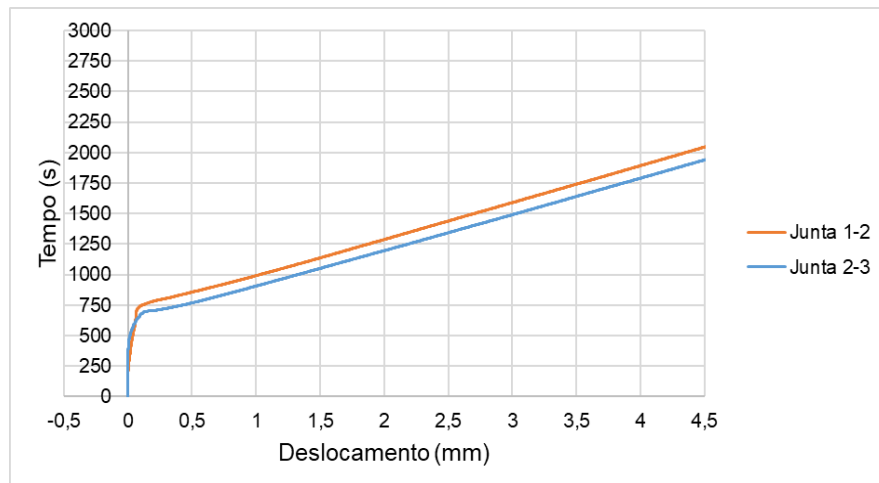
Fonte: Elaboração própria.

Figura 41 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP03 aos 120 min



Fonte: Elaboração própria.

Figura 42 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP03 aos 120 min



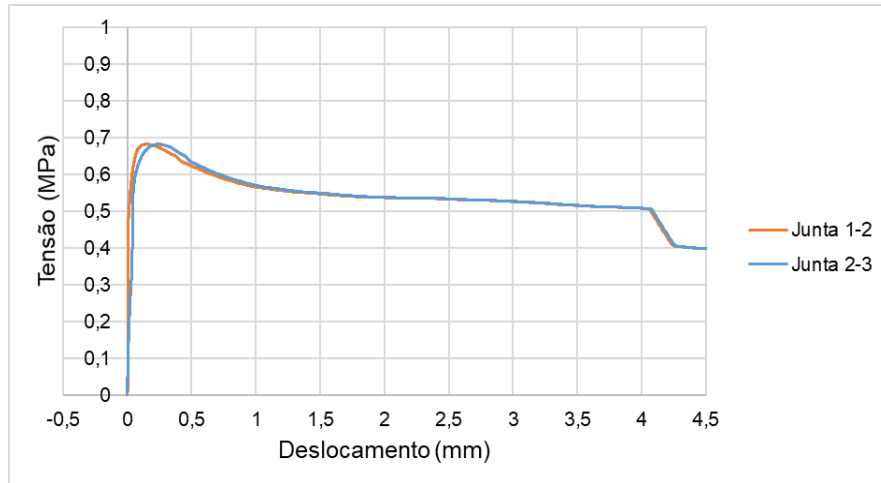
Fonte: Elaboração própria.

As curvas características obtidas para a mistura SCA5MFP03, pode-se verificar que as juntas de assentamento 1-2 e 2-3 deslocaram-se uniformemente aos tempos de 15 e 60 min desde o início do ensaio, apresentando uma leve diferença aos 120 min.

Nas Figuras 43, 45 e 47 estão mostradas as curvas características de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) dos prismas moldados com a mistura SCA5MFP05 lançada nos tempos de 15, 60 e 120 min. Enquanto, nas Figuras 44, 46 e 48 são mostradas as curvas características de tempo (s) x deslocamento (mm)

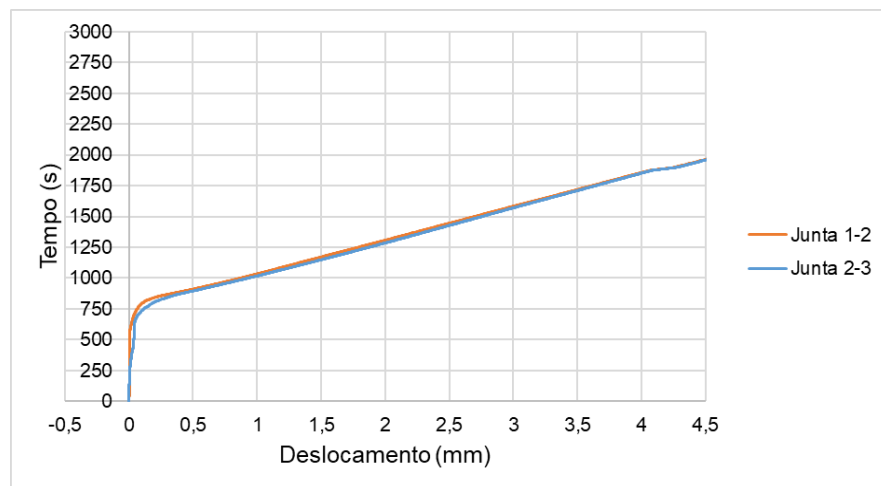
das juntas de assentamento 1-2 e 2-3 durante os ensaios nestes tempos de aplicação.

Figura 43 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP05 aos 15 min



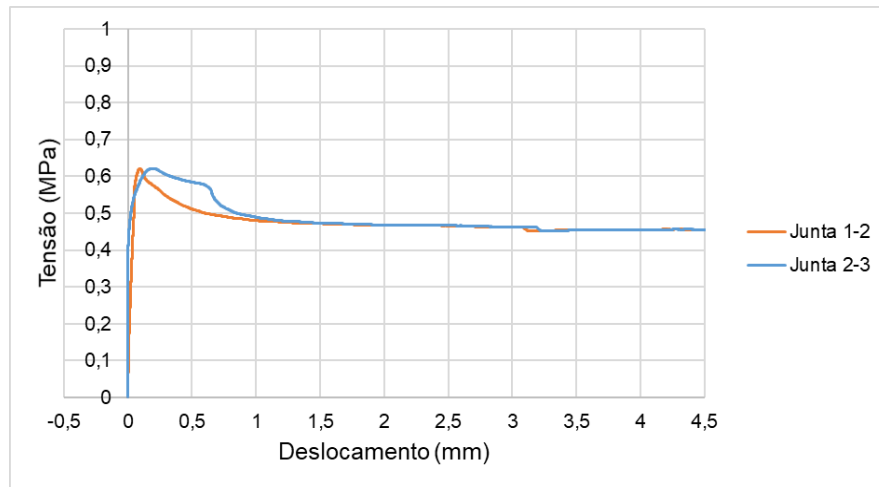
Fonte: Elaboração própria.

Figura 44 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP05 aos 15 min



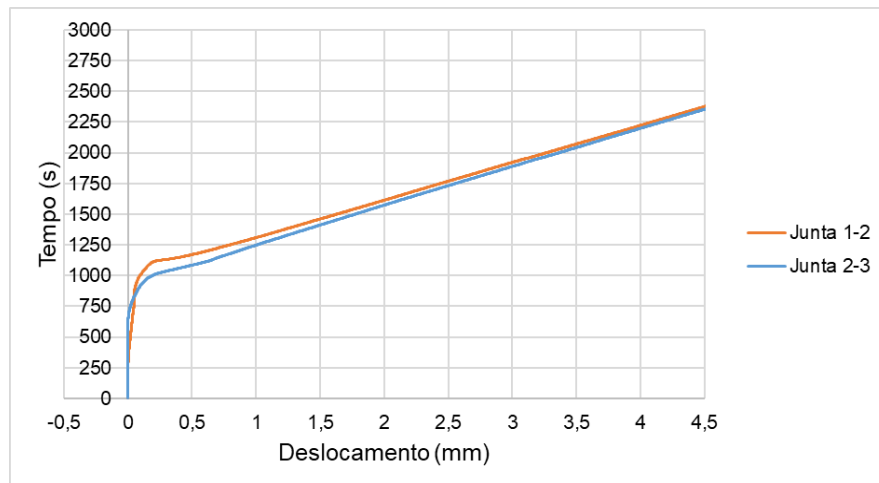
Fonte: Elaboração própria.

Figura 45 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP05 aos 60 min



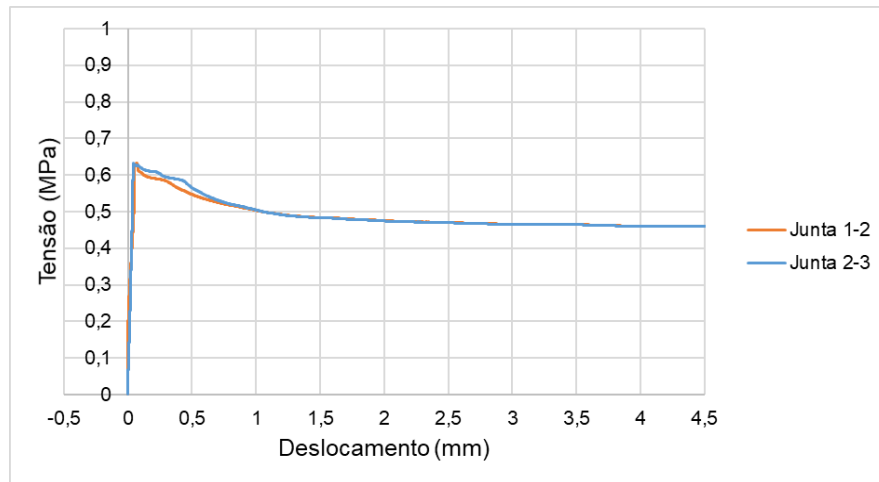
Fonte: Elaboração própria.

Figura 46 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP05 aos 60 min



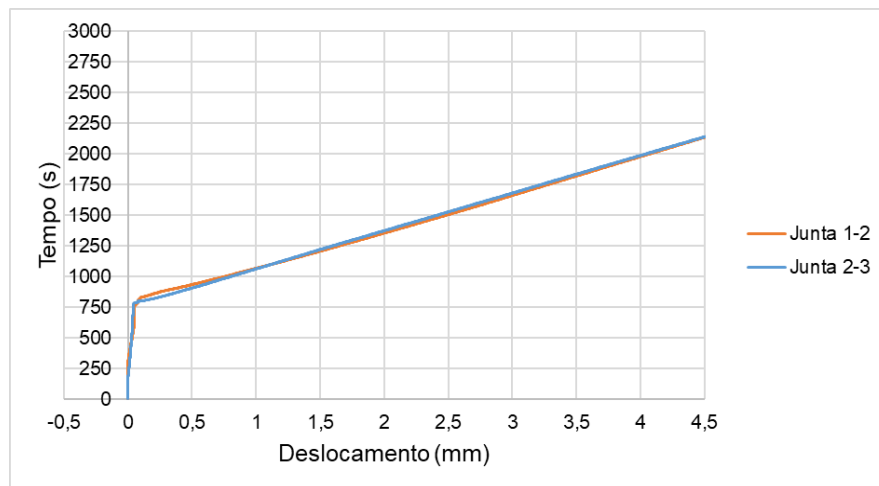
Fonte: Elaboração própria.

Figura 47 – Curva característica de tensão de cisalhamento (MPa) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP05 aos 120 min



Fonte: Elaboração própria.

Figura 48 – Curva característica de tempo (s) x deslocamento (mm) da mistura SCA5MFP05 aos 120 min



Fonte: Elaboração própria.

Logo para a mistura SCA5MFP05, nota-se que as juntas trabalharam de forma similar nos três intervalos de tempo, indicando que as juntas absorveram as tensões uniformemente durante a aplicação da força de cisalhamento.

De maneira geral, apesar das médias de resistência ao cisalhamento não serem significativamente diferentes, as misturas com adições de MFP e a substituição parcial do CIM pela SCA, proporcionaram uma melhor aderência entre a argamassa e o substrato em relação a mistura de referência, uma vez que o deslocamento das juntas de assentamento 1-2 e 2-3 foram muito próximas e/ou na maioria das vezes iguais para os três intervalos de tempo durante todos os ensaios

de cisalhamento. Isso indica que quanto mais próximo for o deslocamento de uma junta em relação a outra uma maior interação entre os tijolos cerâmicos e a argamassa foi obtida, isto é, mais eficiente elas serão.

Ao analisar o comportamento global de uma alvenaria estrutural, fica evidente que a utilização de argamassa contendo MFP em relação a argamassa de referência REF pode proporcionar uma melhora significativa em seu desempenho e segurança.

Estes comportamentos também podem ser comprovados a partir da correlação de imagens do processo de fissuração e ruptura dos prismas de tijolos maciços moldados com as diferentes argamassas aos 60 min analisados no GOM Correlate® e, podem ser visualizados nas figuras que seguem. O tempo de 60 min foi o escolhido devido todas as misturas argamassadas apresentarem uma boa aplicabilidade em relação aos demais tempos analisados.

Figura 49 – Processo de fissuração e ruptura dos prismas submetidos ao ensaio de cisalhamento da mistura REF aos 60 min. (a) início do processo; (b) e (c) meio do processo e; (d) final do processo

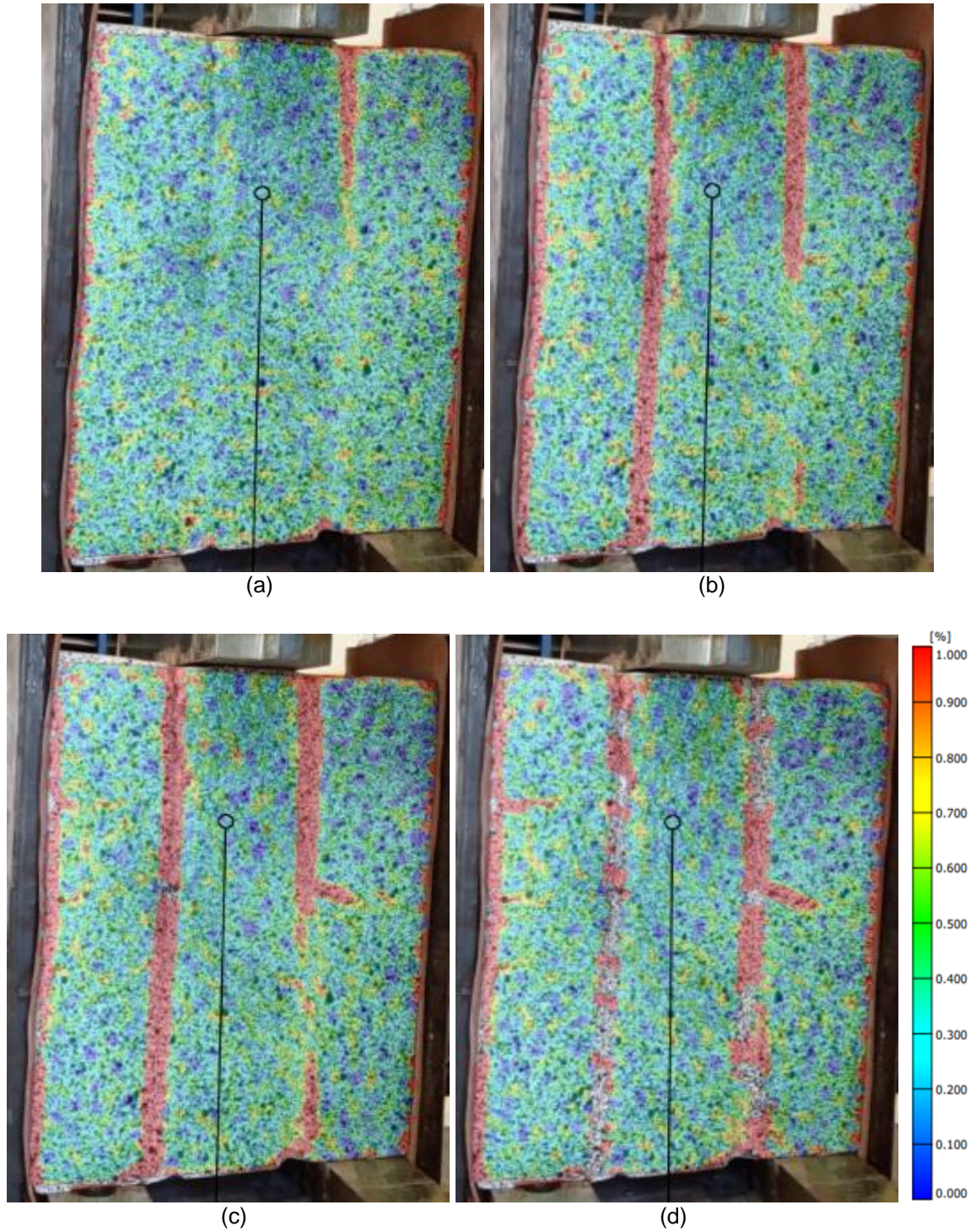
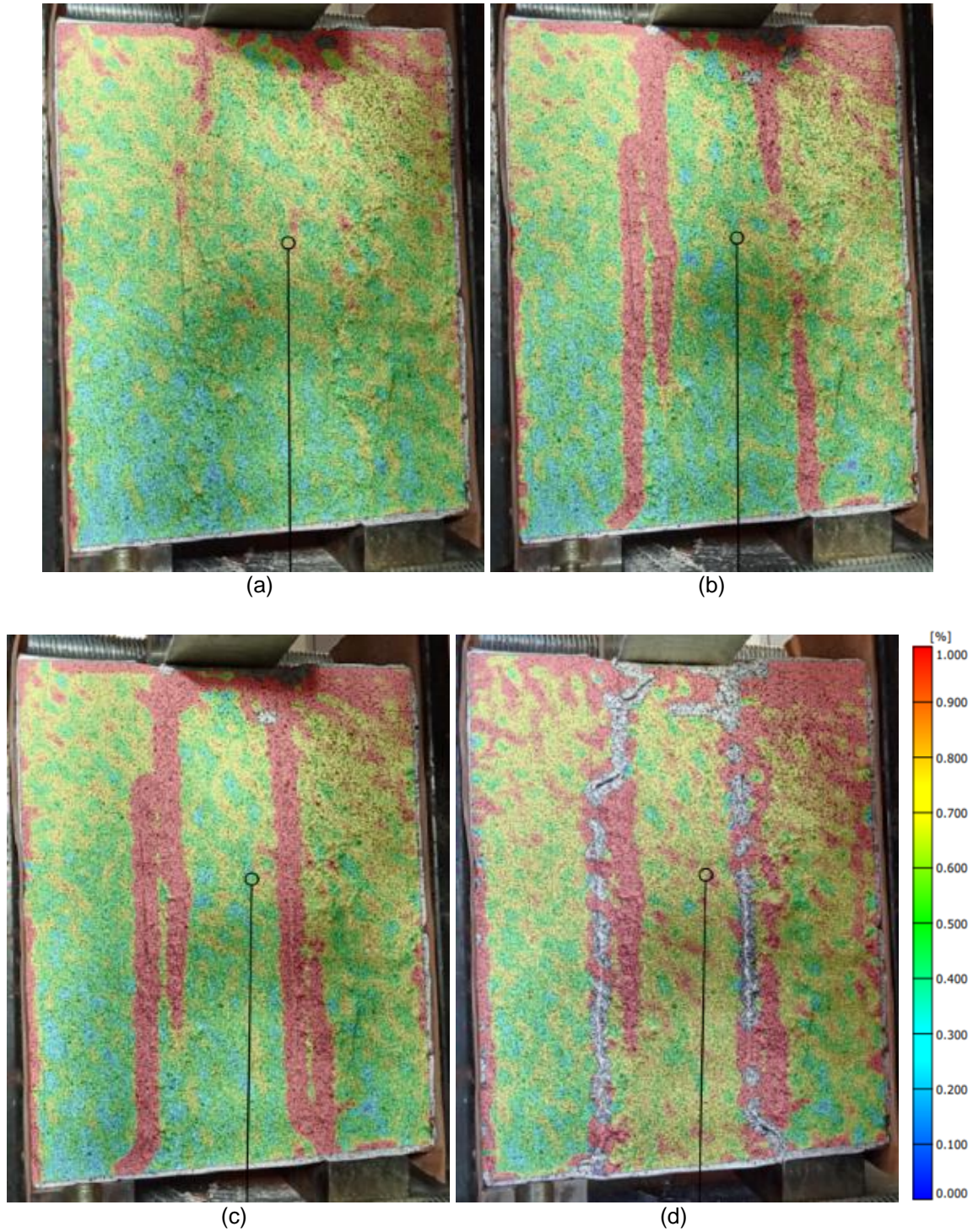


Figura 50 – Processo de fissuração e ruptura dos prismas submetidos ao ensaio de cisalhamento da mistura REFMFP03 aos 60 min. (a) início do processo; (b) e (c) meio do processo e; (d) final do processo



Fonte: Elaboração própria.

Figura 51 – Processo de fissuração e ruptura dos prismas submetidos ao ensaio de cisalhamento da mistura REFMP05 aos 60 min. (a) início do processo; (b) e (c) meio do processo e; (d) final do processo

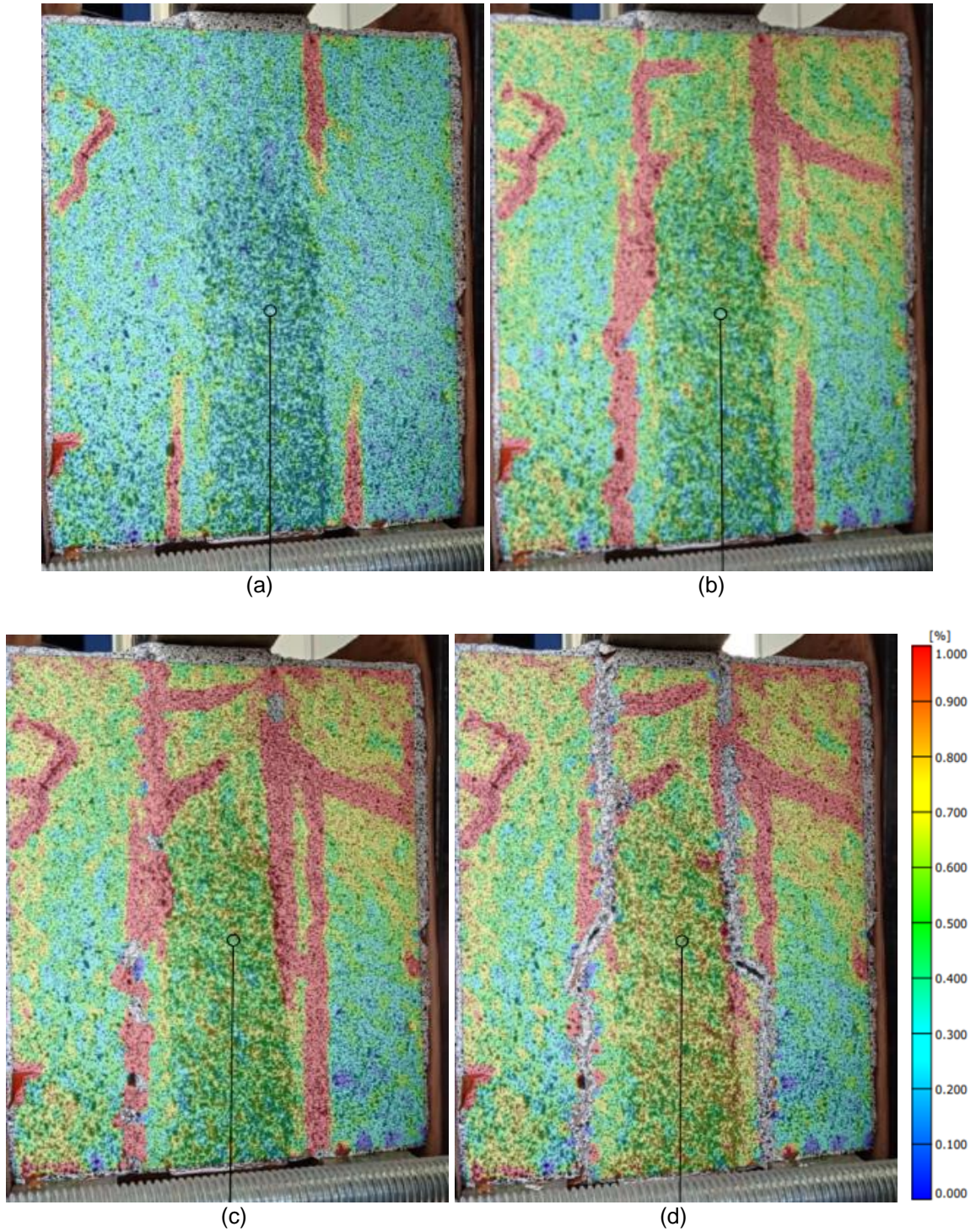
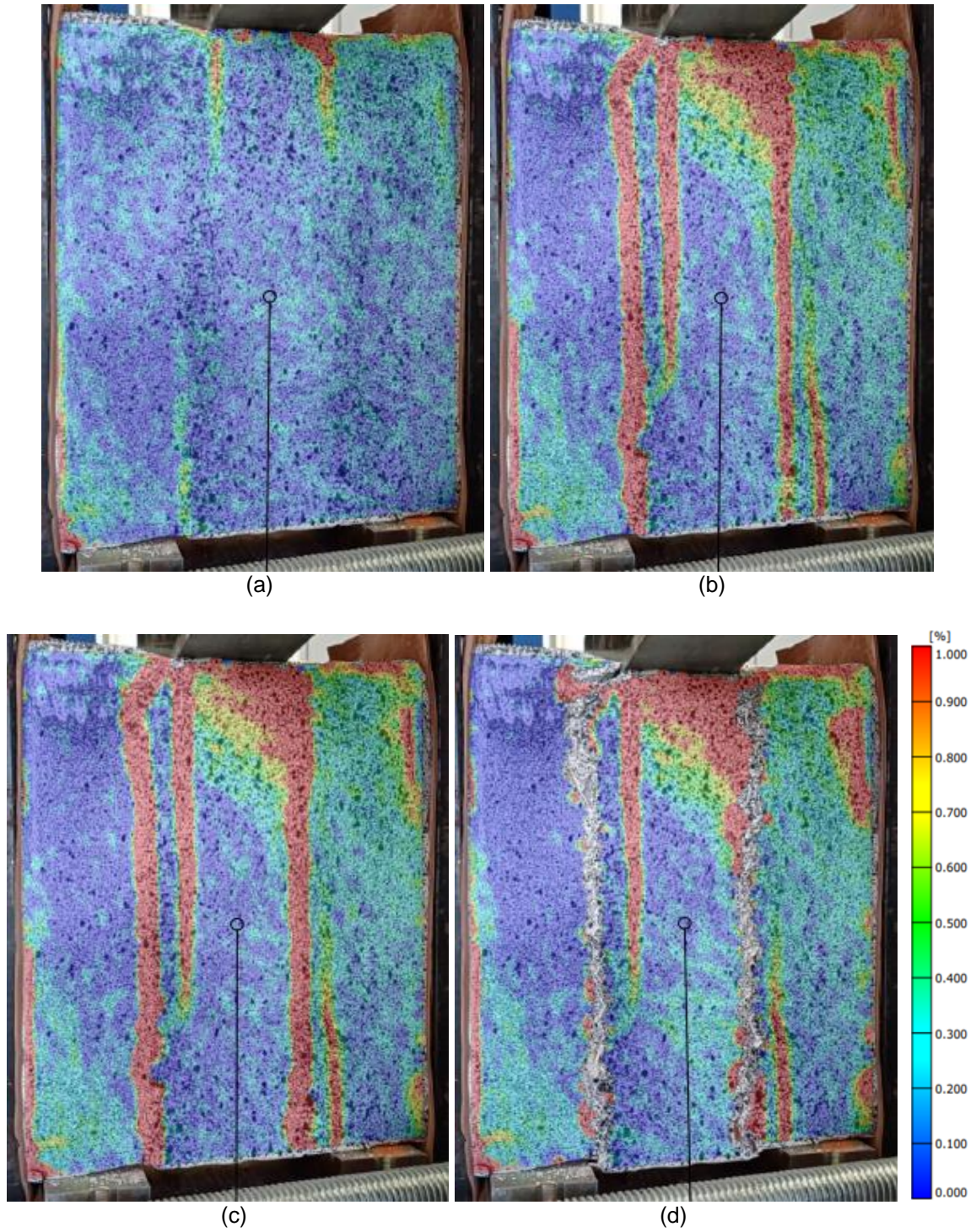
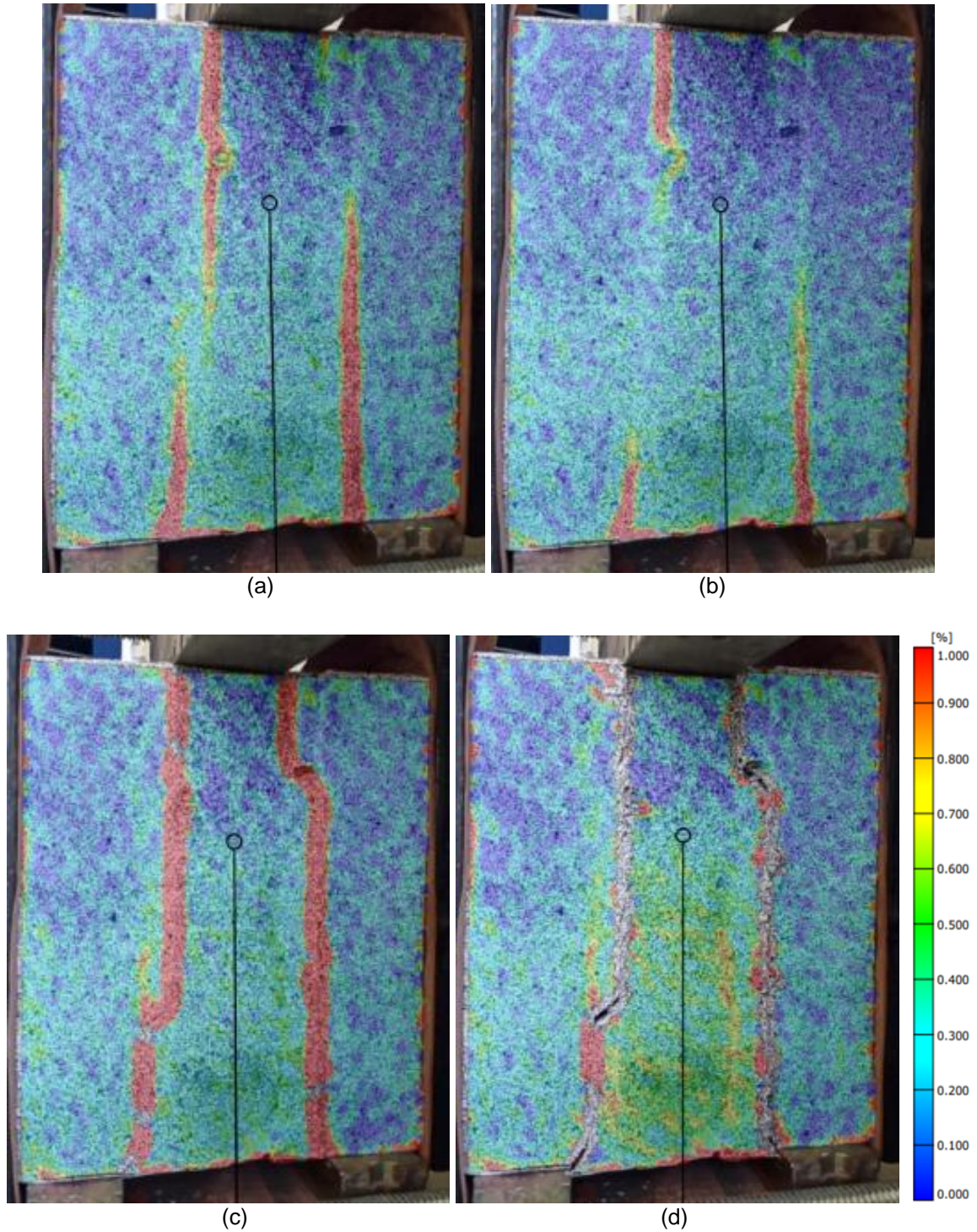


Figura 52 – Processo de fissuração e ruptura dos prismas submetidos ao ensaio de cisalhamento da mistura SCA5MFP03 aos 60 min. (a) início do processo; (b) e (c) meio do processo e; (d) final do processo



Fonte: Elaboração própria.

Figura 53 – Processo de fissuração e ruptura dos prismas submetidos ao ensaio de cisalhamento da mistura SCA5MFP05 aos 60 min. (a) início do processo (b) e (c) meio do processo e; (d) final do processo



Fonte: Elaboração própria.

Conforme pode ser observado nas Figuras 49 a 53, fica evidente que a análise de imagens corrobora com os resultados das curvas características encontrados nos ensaios de resistência ao cisalhamento de acordo com a norma BS EN 1052-3 (2002).

Ao analisar as imagens, pode-se afirmar que as misturas contendo MFP e com substituição parcial do CIM pela SCA, apresentaram uma melhora significativa na homogeneidade da distribuição das tensões entre a argamassa e o substrato em relação a mistura de referência sem fibras e sem sílica da casca de arroz. Isso também comprova o que foi observado nos gráficos de tempo x deslocamento, uma vez que é possível observar que os deslocamentos das juntas de assentamento 1-2 e 2-3 foram predominantemente iguais e mostraram que as juntas/tijolos trabalharam de maneira equivalentes e uniformes, sendo assim uma conclusão importante de que a distribuição das tensões nos prismas com argamassas contendo fibras foram melhores em relação a mistura REF.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados encontrados, são apresentados a seguir as conclusões referentes a resistência de tração à flexão em três pontos e a resistência à compressão axial das misturas de argamassas, a resistência de aderência através do ensaio de cisalhamento com pré-compressão em prismas quando moldados com argamassas nos tempos de 15, 60 e 120 min após o fim da mistura das mesmas e, o processo de fissuração e ruptura da interface argamassa/tijolo por meio de correlação de imagens no software GOM Correlate®.

No que se refere ao comportamento mecânico de tração à flexão e compressão das misturas de argamassas, pode-se verificar que as adições de MFP e a substituição parcial do cimento Portland pela sílica da casca de arroz proporcionaram aumentos nas tensões médias máximas. A mistura REFMFP03 foi a apresentou a maior média de resistência de tração à flexão em três pontos (3,28 MPa), embora estaticamente não tenha apresentado diferença significativa em relação a mistura SCA5MFP05. Com relação a resistência à compressão axial, a mistura que apresentou o melhor desempenho foi a mistura REFMFP03 10,90 MPa e diferença significativa em relação a todas as misturas estudadas.

Nos ensaios de resistência ao cisalhamento com pré-compressão de 0,5 MPa, foi possível analisar através da análise de variância (ANOVA) e as médias de tensão máxima comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 95% de significância que a maioria das misturas não apresentaram diferença significativa. Quanto aos tempos de aplicação das misturas de argamassas analisadas, aconselha-se aplicar as misturas REF e REFMFP05 até no máximo o tempo de 60 min e, as demais misturas de argamassas podem ser aplicadas até o tempo de 120 min, o qual foi o maior tempo estudado. Com relação as curvas características de tempo (s) x deslocamento (mm) das juntas de assentamento 1-2 e 2-3 e análise do modo de fissuração e ruptura (por imagens) dos prismas de tijolos cerâmicos maciços moldados com as diferentes argamassas e nos três intervalos de tempo, pode-se concluir que o uso de MFP proporcionou um deslocamento predominantemente uniforme das juntas. O uso de SCA e MFP também apresentaram deslocamentos uniformes das juntas. Isso demonstra que em uma análise global de uma estrutura de alvenaria, construída com argamassa com microfibras de polipropileno, e até mesmo com MFP e SCA, haverá uma distribuição uniforme de tensões globais,

sendo que isso poderá proporcionar uma melhora significativa no desempenho da edificação, bem como uma maior segurança.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A análise e a caracterização da interface entre argamassas e substratos são complexas e outros trabalhos devem ser realizados para acrescentar e potencializar os resultados aqui encontrados. Deste modo, sugestões de propostas de temas e tópicos de pesquisa são apresentados a seguir:

- Analisar experimentalmente prismas utilizando outros tipos e geometrias de substratos;
- Realizar análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raio-X (DRX) para caracterização das argamassas e principalmente para a compreensão das zonas de interface entre o tijolo cerâmico e a argamassa;
- Verificar o comportamento dos prismas quando submetidos a diferentes níveis de pré-compressão.

REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. v. 5, São Paulo: Blucher, 2011.

ARAUJO, A. F. **Metodologia para avaliação da resistência de aderência ao cisalhamento de prismas para alvenaria estrutural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte, 2002.

ARAÚJO, C. T. F. **Estudo do comportamento de juntas de argamassa reforçadas com fibras de polipropileno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas – UFA. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Maceió, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Indústria brasileira faz a sua parte na redução de emissões**. ABCP, 2021. Disponível em: <https://abcp.org.br/industria-brasileira-faz-a-sua-parte-na-reducao-de-emissoes/>. Acesso em: 10 de jun. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7224**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da área específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

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

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria Parte 2: Métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

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

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites. London and New York: **Modern Concrete Technology Series**, 2^a ed., 2007.

BOMPA, D. V.; ELGHAZOULI, A. Y. Experimental and numerical assessment of the shear behaviour of time mortar clay brick masonry triplets. **Construction and Building Materials**, v. 262, nov. 2020.

BRITISH STANDARD. **EN 1052-3**: Methods of test for masonry – Part 3: Determination of initial shear strength. London: BS 2002.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais – Uma introdução**. 5^a ed., Editora Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. – LTC, Rio de Janeiro, 2002.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Sustentabilidade na construção**. CBCS, 2007. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/website/noticia/show.asp?npgCode=DBC0153A-072A-4A43-BB0C-2BA2E88BEBAE>. Acesso em: 10 jun. 2022.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2011.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos – Estudos e procedimentos**. São Paulo: PINI, 1994.

GHAZALI, M. Z.; RIDDINGTON, J. R. Technical note. Simple tests method for masonry shear strength. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 85, part. 2, p. 567-574, set. 1988.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal**: fundamentos e aplicações na engenharia civil. São Paulo: PINI, 1997.

HIGGINS, D. J. **Properties of Engineering Materials**. 2^a ed., Editora Industrial Press, 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**: estatística da produção agrícola. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. v. 2., cap. 29, São Paulo: IBRACON, 2007.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. **Cinza e aglomerantes alternativos**: In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. Tecnologia e materiais alternativos de construção. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas 2003.

KILL, G.; HUNTER, D. H.; MCLNTYRE, N. S. Reactions of polyethylene surfaces with the downstream products of an air plasma: gas phase and surface spectroscopic studies. **Journal of Polymer Science Parte A: Polymer Chemistry**, v. 34, p. 2299-2310, set. 1996.

LAMEIRAS, R. M. **Contribuição ao estudo das propriedades dos materiais cimentícios reforçados com fibras de vidro (Glass Fibre Reinforced Cement – GRC)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia na modalidade acadêmico) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFGRS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2007.

MARANGON, E.; KULZER, F. E.; COCCO, G. D.; MEICHTRY, R. S.; MENDONÇA, L. C.; KOSTESKI, L. E.; DA COSTA, F. B. P.; DE OLVEIRA, M. J. D. Mortars produced with an environmentally sustainable rice HUSK sílica: Rheological properties. Journal of Cleaner Production. **Journal of Cleaner Production**, v. 22, mar. 2021.

MATA, R. C. **Análise experimental e numérica do comportamento de junta em painéis de contraventamento de alvenaria estrutural**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2011.

MAYER, F. D.; HOFFMANN, R.; RUPPENTHAL, J. E. Gestão energética, econômica e ambiental do resíduo da casca de arroz em pequenas e médias agroindústrias de arroz. In: Simpósio de Engenharia de Produção, 13., 2006, Bauru. **Anais eletrônicos**. Bauru: UNESP, 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete – microstructure, properties, and materials**. 4ª ed., Editora MC Graw Hill Education, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto, estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 574 p.

NEOMATEX – FIBRAS E TÊXTEIS TÉCNICOS PARA ENGENHARIA. **Ficha técnica do produto NeoFibra MF**. São Paulo, 2017. p. 1. Disponível em: https://www.neomatex.com.br/pub_tec/fichas-tecnicas/Microfibra-de-polipropileno-Neofibra-MF.pdf Acesso em: 10 jun. 2022.

OLIVEIRA, J. T.; LOURENÇO, P. B.; BARROS, J. A. Painéis de alvenaria cerâmica com juntas de concreto submetidos a ensaio de cisalhamento. In: International

Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, 7., 2002, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos**. Belo Horizonte, 2002.

OLIVEIRA, L. M. F. Estudo teórico e experimental do comportamento das interfaces verticais de paredes interconectadas de alvenaria estrutural. **Cadernos de Engenharia de Estruturas – Edição especial ENDOSET**, v. 13, n. 59, p. 13-16, 2011.

OLIVEIRA, M. L. L. **Influência da adição de fibras de polipropileno em argamassas**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2001. 171 p.

PENN, L. S.; WANG, H. Chemical modification of polymer surfaces: a review. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 5, p. 809-817, dez. 1994.

PINHEIRO, C. M. P.; STEINHAUS, C.; CHERUTTI, M. Um estudo sobre terminologias de sustentabilidade na moda. **IARA – Revista de Moda, Cultura e Arte**, v. 10, n. 1, dez. 2018.

POPAL, R. **A new shear test method for mortar bed joints**. Dissertation (Master of Science) – University of Calgary. Department of Civil Engineering, Calgary, 2013.

RODRIGUES, C.S. **Efeito da adição da cinza da casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RIO. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2004.

SILVA, A. J. C.; MOTA, J. M. F.; BARBOSA, F. R. Avaliação da influência da altura na resistência de aderência de argamassas de revestimento aplicadas por projeção mecânica. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. 2013, Fortaleza. **Anais eletrônicos**. Fortaleza, 2013.

SILVA, R. P.; BARROS, M. M. S. B. Revestimentos de argamassa com fibras de polipropileno. **Téchne: Revista de Tecnologia da Construção**, v. 127, p. 60-64, out. 2007.

SOBROSA, F. Z.; STOCHERO, N. P.; MARANGON, E.; TIER, M. D. Development of refractory ceramics from residual sílica derived from rice husk ash. **Ceramics International**, v. 43, n. 9, p. 7142-7146, jun. 2017.

TASHIMA, M. M. **Cinza da casca de arroz altamente reativa**: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Área de conhecimento: Estruturas) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira, out. 2006. 81 p.

TAYLOR, G. D. Materials in construction. London: **Longman Sientific & Technical**, 2ª ed., 1994.

WORREL, E.; PRICE, L.; MARTIN, N.; HENDRIKS, C. MEIDA, L. O. Carbon dioxide emissions from the global Cement industry. **Annual Review Energy and the Environment**, v. 26, nov. 2001.

ZUCCO, L. L. **Avaliação do comportamento físico-químico-mecânico de misturas cimento-cinza-casca de arroz por meio de corpos de prova cilíndricos e placas prensadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola – Construções Rurais) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2007.

ANEXOS

Nas tabelas 10 a 12 é possível analisar os resultados do teste de Tukey ao nível de 95% de significância para os ensaios de resistência à tração na flexão, a resistência à compressão axial e resistência de aderência ao cisalhamento, respectivamente.

Tabela 10 – Teste de Tukey ao nível de 95% de significância para o ensaio de resistência à tração na flexão das misturas argamassadas.

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
REFMFP03 REF	6,27833	0,5414	16,39998	<0.0001	0,05	1	4,68832	7,86835
REFMFP05 REF	1,435	0,5414	3,74844	0,09113	0,05	0	-0,15501	3,02501
REFMFP05 REFMFP03	-4,84333	0,5414	12,65153	<0.0001	0,05	1	-6,43335	-3,25332
SCA5MFP03 REF	4,46167	0,5414	11,65456	<0.0001	0,05	1	2,87165	6,05168
SCA5MFP03 REFMFP03	-1,81667	0,5414	4,74541	0,01948	0,05	1	-3,40668	-0,22665
SCA5MFP03 REFMFP05	3,02667	0,5414	7,90612	<0.0001	0,05	1	1,43665	4,61668
SCA5MFP05 REF	4,54833	0,5414	11,88095	<0.0001	0,05	1	2,95832	6,13835
SCA5MFP05 REFMFP03	-1,73	0,5414	4,51903	0,02815	0,05	1	-3,32001	-0,13999
SCA5MFP05 REFMFP05	3,11333	0,5414	8,13251	<0.0001	0,05	1	1,52332	4,70335
SCA5MFP05 SCA5MFP03	0,08667	0,5414	0,22639	0,99984	0,05	0	-1,50335	1,67668

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Sendo: MeanDiff = diferença média;

Prob = probabilidade;

Sig = significância.

Tabela 11 – Teste de Tukey ao nível de 95% de significância para o ensaio de resistência à compressão axial das misturas argamassadas.

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
REFMFP03 REF	1,59	0,24449	9,19692	5,09012E-4	0,05	1	0,78535	2,39465
REFMFP05 REF	0,37	0,24449	2,14016	0,57708	0,05	0	-0,43465	1,17465
REFMFP05 REFMFP03	-1,22	0,24449	7,05675	0,00385	0,05	1	-2,02465	-0,41535
SCA5MFP03 REF	0,48667	0,24449	2,81499	0,33568	0,05	0	-0,31799	1,29132
SCA5MFP03 REFMFP03	-1,10333	0,24449	6,38193	0,00772	0,05	1	-1,90799	-0,29868
SCA5MFP03 REFMFP05	0,11667	0,24449	0,67483	0,98781	0,05	0	-0,68799	0,92132
SCA5MFP05 REF	0,94	0,24449	5,43717	0,02121	0,05	1	0,13535	1,74465
SCA5MFP05 REFMFP03	-0,65	0,24449	3,75975	0,1317	0,05	0	-1,45465	0,15465
SCA5MFP05 REFMFP05	0,57	0,24449	3,29701	0,21203	0,05	0	-0,23465	1,37465
SCA5MFP05 SCA5MFP03	0,45333	0,24449	2,62218	0,39748	0,05	0	-0,35132	1,25799

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Sendo: MeanDiff = diferença média;

Prob = probabilidade;

Sig = significância.

Tabela 12 – Teste de Tukey ao nível de 95% de significância para o ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento dos prismas de tijolos cerâmicos maciços moldados com misturas argamassadas aplicadas nos tempos de 15, 60 e 120 min

Tempo	Mistura	Tempo	Mistura	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
15 min	REFMFP03	15 min	Ref	-0,04786	0,07181	0,94251	0,99999	0,05	0	-0,30601	0,21029
15 min	REFMFP05	15 min	Ref	0,13686	0,07181	2,69505	0,83741	0,05	0	-0,12129	0,39501
15 min	REFMFP05	15 min	REFMFP03	0,18472	0,07181	3,63756	0,41521	0,05	0	-0,07343	0,44287
15 min	SCA5MFP03	15 min	Ref	0,00469	0,07181	0,09229	1	0,05	0	-0,25346	0,26284
15 min	SCA5MFP03	15 min	REFMFP03	0,05255	0,07181	1,0348	0,99998	0,05	0	-0,2056	0,3107
15 min	SCA5MFP03	15 min	REFMFP05	-0,13217	0,07181	2,60276	0,86806	0,05	0	-0,39032	0,12598
15 min	SCA5MFP05	15 min	Ref	-0,09887	0,07181	1,94692	0,98526	0,05	0	-0,35702	0,15928
15 min	SCA5MFP05	15 min	REFMFP03	-0,051	0,07181	1,00441	0,99999	0,05	0	-0,30915	0,20714
15 min	SCA5MFP05	15 min	REFMFP05	-0,23572	0,07181	4,64197	0,10608	0,05	0	-0,49387	0,02243
15 min	SCA5MFP05	15 min	SCA5MFP03	-0,10355	0,07181	2,03921	0,97801	0,05	0	-0,3617	0,1546
60 min	Ref	15 min	Ref	-0,05563	0,07181	1,09542	0,99997	0,05	0	-0,31378	0,20252
60 min	Ref	15 min	REFMFP03	-0,00776	0,07181	0,15291	1	0,05	0	-0,26591	0,25038
60 min	Ref	15 min	REFMFP05	-0,19248	0,07181	3,79046	0,35004	0,05	0	-0,45063	0,06567
60 min	Ref	15 min	SCA5MFP03	-0,06031	0,07181	1,18771	0,99992	0,05	0	-0,31846	0,19784
60 min	Ref	15 min	SCA5MFP05	0,04324	0,07181	0,8515	1	0,05	0	-0,21491	0,30139
60 min	REFMFP03	15 min	Ref	0,12962	0,07181	2,55247	0,88325	0,05	0	-0,12853	0,38777
60 min	REFMFP03	15 min	REFMFP03	0,17748	0,07181	3,49498	0,48025	0,05	0	-0,08067	0,43563
60 min	REFMFP03	15 min	REFMFP05	-0,00724	0,07181	0,14258	1	0,05	0	-0,26539	0,25091
60 min	REFMFP03	15 min	SCA5MFP03	0,12493	0,07181	2,46018	0,90827	0,05	0	-0,13322	0,38308
60 min	REFMFP03	15 min	SCA5MFP05	0,22848	0,07181	4,49939	0,13291	0,05	0	-0,02967	0,48663
60 min	REFMFP03	60 min	Ref	0,18524	0,07181	3,64789	0,41064	0,05	0	-0,07291	0,44339
60 min	REFMFP05	15 min	Ref	0,07844	0,07181	1,54461	0,99843	0,05	0	-0,17971	0,33659
60 min	REFMFP05	15 min	REFMFP03	0,1263	0,07181	2,48712	0,90135	0,05	0	-0,13185	0,38445
60 min	REFMFP05	15 min	REFMFP05	-0,05842	0,07181	1,15044	0,99994	0,05	0	-0,31657	0,19973
60 min	REFMFP05	15 min	SCA5MFP03	0,07375	0,07181	1,45232	0,99919	0,05	0	-0,1844	0,3319
60 min	REFMFP05	15 min	SCA5MFP05	0,1773	0,07181	3,49153	0,48187	0,05	0	-0,08085	0,43545
60 min	REFMFP05	60 min	Ref	0,13406	0,07181	2,64003	0,85611	0,05	0	-0,12409	0,39221
60 min	REFMFP05	60 min	REFMFP03	-0,05118	0,07181	1,00786	0,99999	0,05	0	-0,30933	0,20697
60 min	SCA5MFP03	15 min	Ref	0,13519	0,07181	2,66216	0,84873	0,05	0	-0,12296	0,39334
60 min	SCA5MFP03	15 min	REFMFP03	0,18305	0,07181	3,60467	0,42989	0,05	0	-0,0751	0,4412
60 min	SCA5MFP03	15 min	REFMFP05	-0,00167	0,07181	0,03289	1	0,05	0	-0,25982	0,25648
60 min	SCA5MFP03	15 min	SCA5MFP03	0,1305	0,07181	2,56987	0,87811	0,05	0	-0,12765	0,38865
60 min	SCA5MFP03	15 min	SCA5MFP05	0,23405	0,07181	4,60907	0,11184	0,05	0	-0,0241	0,4922
60 min	SCA5MFP03	60 min	Ref	0,19081	0,07181	3,75757	0,36359	0,05	0	-0,06734	0,44896
60 min	SCA5MFP03	60 min	REFMFP03	0,00557	0,07181	0,10969	1	0,05	0	-0,25258	0,26372
60 min	SCA5MFP03	60 min	REFMFP05	0,05675	0,07181	1,11755	0,99996	0,05	0	-0,2014	0,3149
60 min	SCA5MFP05	15 min	Ref	-0,08533	0,07181	1,68028	0,9963	0,05	0	-0,34348	0,17282
60 min	SCA5MFP05	15 min	REFMFP03	-0,03746	0,07181	0,73777	1	0,05	0	-0,29561	0,22068
60 min	SCA5MFP05	15 min	REFMFP05	-0,22218	0,07181	4,37533	0,16049	0,05	0	-0,48033	0,03597
60 min	SCA5MFP05	15 min	SCA5MFP03	-0,09001	0,07181	1,77257	0,99378	0,05	0	-0,34816	0,16814
60 min	SCA5MFP05	15 min	SCA5MFP05	0,01354	0,07181	0,26664	1	0,05	0	-0,24461	0,27169
60 min	SCA5MFP05	60 min	Ref	-0,0297	0,07181	0,58486	1	0,05	0	-0,28785	0,22845
60 min	SCA5MFP05	60 min	REFMFP03	-0,21494	0,07181	4,23275	0,19746	0,05	0	-0,47309	0,04321
60 min	SCA5MFP05	60 min	REFMFP05	-0,16376	0,07181	3,22489	0,6092	0,05	0	-0,42191	0,09439
60 min	SCA5MFP05	60 min	SCA5MFP03	-0,22051	0,07181	4,34243	0,1685	0,05	0	-0,47866	0,03764
120 min	Ref	15 min	Ref	-0,13567	0,07181	2,67167	0,8455	0,05	0	-0,39382	0,12248
120 min	Ref	15 min	REFMFP03	-0,08781	0,07181	1,72916	0,9951	0,05	0	-0,34596	0,17034
120 min	Ref	15 min	REFMFP05	-0,27253	0,07181	5,36672	0,02974	0,05	1	-0,53068	-0,01438
120 min	Ref	15 min	SCA5MFP03	-0,14036	0,07181	2,76396	0,81231	0,05	0	-0,39851	0,11779
120 min	Ref	15 min	SCA5MFP05	-0,0368	0,07181	0,72475	1	0,05	0	-0,29495	0,22135
120 min	Ref	60 min	Ref	-0,08004	0,07181	1,57625	0,99806	0,05	0	-0,33819	0,17811
120 min	Ref	60 min	REFMFP03	-0,26529	0,07181	5,22414	0,03876	0,05	1	-0,52344	-0,00714

120 min	Ref	60 min	REFMFP05	-0,21411	0,07181	4,21628	0,2021	0,05	0	-0,47226	0,04404
120 min	Ref	60 min	SCA5MFP03	-0,27086	0,07181	5,33383	0,03163	0,05	1	-0,52901	-0,01271
120 min	Ref	60 min	SCA5MFP05	-0,05034	0,07181	0,99139	0,99999	0,05	0	-0,30849	0,20781
120 min	REFMFP03	15 min	Ref	0,17786	0,07757	3,24275	0,60064	0,05	0	-0,10097	0,4567
120 min	REFMFP03	15 min	REFMFP03	0,22572	0,07757	4,11534	0,23235	0,05	0	-0,05311	0,50456
120 min	REFMFP03	15 min	REFMFP05	0,04101	0,07757	0,74762	1	0,05	0	-0,23783	0,31984
120 min	REFMFP03	15 min	SCA5MFP03	0,17318	0,07757	3,1573	0,64143	0,05	0	-0,10566	0,45201
120 min	REFMFP03	15 min	SCA5MFP05	0,27673	0,07757	5,04524	0,05353	0,05	0	-0,0021	0,55556
120 min	REFMFP03	60 min	Ref	0,23349	0,07757	4,2569	0,19078	0,05	0	-0,04534	0,51232
120 min	REFMFP03	60 min	REFMFP03	0,04825	0,07757	0,87962	1	0,05	0	-0,23059	0,32708
120 min	REFMFP03	60 min	REFMFP05	0,09943	0,07757	1,81271	0,99231	0,05	0	-0,17941	0,37826
120 min	REFMFP03	60 min	SCA5MFP03	0,04268	0,07757	0,77807	1	0,05	0	-0,23616	0,32151
120 min	REFMFP03	60 min	SCA5MFP05	0,26319	0,07757	4,79838	0,082	0,05	0	-0,01564	0,54202
120 min	REFMFP03	120 min	Ref	0,31353	0,07757	5,71623	0,01514	0,05	1	0,0347	0,59237
120 min	REFMFP05	15 min	Ref	-0,09106	0,07757	1,66024	0,99672	0,05	0	-0,3699	0,18777
120 min	REFMFP05	15 min	REFMFP03	-0,0432	0,07757	0,78764	1	0,05	0	-0,32204	0,23563
120 min	REFMFP05	15 min	REFMFP05	-0,22792	0,07757	4,15537	0,21999	0,05	0	-0,50675	0,05091
120 min	REFMFP05	15 min	SCA5MFP03	-0,09575	0,07757	1,74568	0,99463	0,05	0	-0,37458	0,18308
120 min	REFMFP05	15 min	SCA5MFP05	0,0078	0,07757	0,14226	1	0,05	0	-0,27103	0,28664
120 min	REFMFP05	60 min	Ref	-0,03544	0,07757	0,64608	1	0,05	0	-0,31427	0,2434
120 min	REFMFP05	60 min	REFMFP03	-0,22068	0,07757	4,02337	0,26256	0,05	0	-0,49951	0,05815
120 min	REFMFP05	60 min	REFMFP05	-0,1695	0,07757	3,09027	0,67293	0,05	0	-0,44833	0,10933
120 min	REFMFP05	60 min	SCA5MFP03	-0,22625	0,07757	4,12492	0,22935	0,05	0	-0,50508	0,05258
120 min	REFMFP05	60 min	SCA5MFP05	-0,00574	0,07757	0,1046	1	0,05	0	-0,28457	0,2731
120 min	REFMFP05	120 min	Ref	0,04461	0,07757	0,81325	1	0,05	0	-0,23423	0,32344
120 min	REFMFP05	120 min	REFMFP03	-0,26893	0,08292	4,58632	0,11597	0,05	0	-0,56701	0,02916
120 min	SCA5MFP03	15 min	Ref	-0,01706	0,07181	0,33602	1	0,05	0	-0,27521	0,24109
120 min	SCA5MFP03	15 min	REFMFP03	0,0308	0,07181	0,60649	1	0,05	0	-0,22735	0,28895
120 min	SCA5MFP03	15 min	REFMFP05	-0,15392	0,07181	3,03107	0,70017	0,05	0	-0,41207	0,10423
120 min	SCA5MFP03	15 min	SCA5MFP03	-0,02175	0,07181	0,42831	1	0,05	0	-0,2799	0,2364
120 min	SCA5MFP03	15 min	SCA5MFP05	0,0818	0,07181	1,6109	0,99758	0,05	0	-0,17635	0,33995
120 min	SCA5MFP03	60 min	Ref	0,03856	0,07181	0,7594	1	0,05	0	-0,21959	0,29671
120 min	SCA5MFP03	60 min	REFMFP03	-0,14668	0,07181	2,88849	0,76263	0,05	0	-0,40483	0,11147
120 min	SCA5MFP03	60 min	REFMFP05	-0,0955	0,07181	1,88063	0,9892	0,05	0	-0,35365	0,16265
120 min	SCA5MFP03	60 min	SCA5MFP03	-0,15225	0,07181	2,99818	0,71502	0,05	0	-0,4104	0,1059
120 min	SCA5MFP03	60 min	SCA5MFP05	0,06826	0,07181	1,34426	0,99965	0,05	0	-0,18989	0,32641
120 min	SCA5MFP03	120 min	Ref	0,11861	0,07181	2,33565	0,93618	0,05	0	-0,13954	0,37676
120 min	SCA5MFP03	120 min	REFMFP03	-0,19493	0,07757	3,55384	0,45299	0,05	0	-0,47376	0,08391
120 min	SCA5MFP03	120 min	REFMFP05	0,074	0,07757	1,34914	0,99964	0,05	0	-0,20483	0,35283
120 min	SCA5MFP05	15 min	Ref	0,01919	0,07181	0,37785	1	0,05	0	-0,23896	0,27734
120 min	SCA5MFP05	15 min	REFMFP03	0,06705	0,07181	1,32035	0,99972	0,05	0	-0,1911	0,3252
120 min	SCA5MFP05	15 min	REFMFP05	-0,11767	0,07181	2,3172	0,93975	0,05	0	-0,37582	0,14048
120 min	SCA5MFP05	15 min	SCA5MFP03	0,0145	0,07181	0,28556	1	0,05	0	-0,24365	0,27265
120 min	SCA5MFP05	15 min	SCA5MFP05	0,11805	0,07181	2,32476	0,9383	0,05	0	-0,1401	0,3762
120 min	SCA5MFP05	60 min	Ref	0,07481	0,07181	1,47326	0,99905	0,05	0	-0,18334	0,33296
120 min	SCA5MFP05	60 min	REFMFP03	-0,11043	0,07181	2,17462	0,96282	0,05	0	-0,36858	0,14772
120 min	SCA5MFP05	60 min	REFMFP05	-0,05925	0,07181	1,16676	0,99993	0,05	0	-0,3174	0,1989
120 min	SCA5MFP05	60 min	SCA5MFP03	-0,116	0,07181	2,28431	0,94578	0,05	0	-0,37415	0,14215
120 min	SCA5MFP05	60 min	SCA5MFP05	0,10451	0,07181	2,05812	0,97624	0,05	0	-0,15364	0,36266
120 min	SCA5MFP05	120 min	Ref	0,15486	0,07181	3,04952	0,69175	0,05	0	-0,10329	0,41301
120 min	SCA5MFP05	120 min	REFMFP03	-0,15868	0,07757	2,89293	0,76077	0,05	0	-0,43751	0,12016
120 min	SCA5MFP05	120 min	REFMFP05	0,11025	0,07757	2,01006	0,98055	0,05	0	-0,16858	0,38908
120 min	SCA5MFP05	120 min	SCA5MFP03	0,03625	0,07181	0,71387	1	0,05	0	-0,2219	0,2944

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Sendo: MeanDiff = diferença média;

Prob = probabilidade;

Sig = significância.