

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

VITOR GABRIEL DORNELLES AVILA

**AVALIAÇÃO NO ESTADO FRESCO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS
DE POLIPROPILENO EM ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO
PORTLAND POR SÍLICA DA CASCA DO ARROZ**

Alegrete

2022

VITOR GABRIEL DORNELLES AVILA

**AVALIAÇÃO NO ESTADO FRESCO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS
DE POLIPROPILENO EM ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO
PORTLAND POR SÍLICA DA CASCA DO ARROZ**

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

2022

VITOR GABRIEL DORNELLES AVILA

AVALIAÇÃO NO ESTADO FRESCO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO EM ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA DA CASCA DO ARROZ

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: 03 de agosto de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. EDERLI MARANGON - UNIPAMPA - Orientador

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

Prof. Dr. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA

Eng. Me. MARCELO DE JESUS DIAS DE OLIVEIRA - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **TELMO EGMAR CAMILO DEIFELD, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/08/2022, às 20:08, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/08/2022, às 20:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCELO DE JESUS DIAS DE OLIVEIRA, ENGENHEIRO-AREA**, em 10/08/2022, às 23:18, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDERLI MARANGON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/08/2022, às 10:02, 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 0892195 e o código CRC 746A21BE.

AGREDECIMENTOS

A minha mãe, Sonia Terezinha de Barros Dornelles, minha maior incentivadora, que esteve comigo desde o início e principalmente durante os momentos mais difíceis da minha a graduação. Ao meu pai, Julio Avila, a minha vó Maria Luiza e aos meus irmãos Lucas e Sandro.

Ao meu orientador, Dr. Ederli Marangon, pela oportunidade de trabalhar ao seu lado, todos seus ensinamentos, sua disponibilidade e paciência.

A todos os meus amigos, ao grupo MAEC, aos colegas que me auxiliaram durante a realização dos ensaios e a Neomatex pelas fibras de polipropileno cedidas para a realização dos ensaios.

Por fim, a Universidade Federal do Pampa e a todos os professores que tive durante a graduação.

RESUMO

Nesse estudo foram avaliadas as propriedades e características de argamassas no estado fresco em diferentes intervalos de tempo com a adição de fibras de polipropileno em traços já estudados com substituições de cimento Portland por Sílica da casca do arroz. As incorporações de fibra de polipropileno foram de 0,3% e 0,5% em relação ao volume da argamassa. Para esse trabalho utilizou-se como referência um traço de argamassa de 8MPa de resistência a compressão axial e foi fixado em 0,71 a relação água/materiais cimentícios. Foi avaliado o comportamento das argamassas no estado fresco através dos ensaios de Flow Table, Vicat Modificado e Squeeze Flow Modificado. Os ensaios de Vicat Modificado e Squeeze Flow Modificado foram realizados nas idades de 15, 60 e 180 minutos. Os resultados mostram que para o ensaio de Flow Table os valores de consistência diminuíram conforme foi aumentado o teor de fibra de polipropileno. No ensaio de Vicat Modificado, as penetrações do cone diminuíram com o aumento da fibra de polipropileno e com o avanço das idades estudadas. No ensaio de Squeeze Flow Modificado, os resultados mostram que a fibra de polipropileno foi determinante nos deslocamentos encontrados, dificultando a compressão das amostras e reduzindo os deslocamentos com a incorporação de 0,5% de fibra em relação ao volume da argamassa. Com 0,3% de fibra, os deslocamentos foram satisfatórios para todas os traços analisados aos 15 e 60 minutos, inclusive com a adição de 30% de sílica da casca do arroz, que não prejudicou os deslocamentos. Aos 15 e 60 minutos as argamassas apresentaram boa trabalhabilidade e aos 180 minutos maior enrijecimento. Os valores de tração máxima aumentaram para maiores idades e a fibra de polipropileno não foi determinante para mudanças de valores de tração aos 15 e 60 minutos, os melhores tempos definidos para utilização da argamassa nesse estudo.

Palavras-chave: Argamassa. Reologia. Fibra de polipropileno. Sílica da casca do arroz. Squeeze Flow.

ABSTRACT

In this study, the properties and characteristics of mortars in the fresh state were evaluated at different time intervals with the addition of polypropylene fibers in mortars already studied with substitutions of Portland cement for Rice Husk Silica. The incorporations of polypropylene fiber were 0.3% and 0.5% in relation to the volume of the mortar. For this work, a mortar mix of 8MPa of axial compressive strength was used as a reference and the water/cement materials ratio was set at 0.71. The behavior of the mortars in the fresh state was evaluated through the Flow Table, Modified Vicat and Modified Squeeze Flow test. The behavior of the mortars in the fresh state was evaluated through the Flow Table, Modified Vicat and Modified Squeeze Flow tests. Modified Vicat and Squeeze Flow assays were performed at ages 15, 60 and 180 minutes. The results show that for the Flow Table test the consistency values decreased as the polypropylene fiber content was increased. In the Modified Vicat test, the penetrations of the cone decreased with the increase of the polypropylene fiber and with the advancement of the ages studied. In the Modified Squeeze Flow test, the results show that the polypropylene fiber was decisive in the displacements found, making it difficult to compress the samples and reducing the displacements with the incorporation of 0.5% of fiber in relation to the volume of the mortar. With 0.3% fiber, displacements were satisfactory for all trait analyzed at 15 and 60 minutes, including the addition of 30% Rice Husk Silica, which did not affect displacements. At 15 and 60 minutes the mortars showed good workability and at 180 minutes greater hardening. Maximum tensile values increased for older ages and the polypropylene fiber was not determinant for changes in tensile values at 15 and 60 minutes, the best times defined for the use of mortar in this study.

Keywords: Mortar. Rheology. Polypropylene fiber. Rice husk silica. Modified Squeeze Flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Microestrutura de uma argamassa no estado fresco.	19
Figura 2 - Gráficos com resultados dos ensaios de Flow Table e Vicat modificado. .	26
Figura 3 - Resultados do Squeeze Flow para os traços com substituição de cimento Portland por SCA e traço referência.	28
Figura 4 - Resultados do Squeeze Flow para diferentes adições de fibra na argamassa de relação água/materiais secos 15,5%.	29
Figura 5 - Resultados do Squeeze Flow para diferentes adições de água na argamassa com teor de fibras de 1000 g/m ³	30
Figura 6 - Curvas obtidas através do ensaio de Squeeze Flow.	31
Figura 7 - Curvas obtidas no ensaio de Squeeze Flow Modificado para substituições entre 5 a 30% de cimento Portland por SCA.	32
Figura 8 - Cargas de tração máxima.	33
Figura 9 - Programa experimental.	36
Figura 10 – Curvas de composição granulométrica.	37
Figura 11 - Fibras de polipropileno.	38
Figura 12 – Etapas do processo de mistura das argamassas; (a) materiais sendo inseridos na cuba; (b) materiais durante o processo de mistura.	39
Figura 13 – Etapas do ensaio de Flow Table; (a) amostra no molde para o ensaio; (b) amostra após a retirada do molde; (c) amostra após 30 golpes; (d) medições realizadas em cruz.	40
Figura 14 – Pesagem recipiente (a) vazio; (b) com água destilada; (c) com argamassa.	41
Figura 15 – (a) aparelho de Vicat Modificado; (b) amostra durante o ensaio.	42
Figura 16 – Etapas do ensaio de Squeeze Flow; (a) preparação da amostra; (b) amostra pronta para ser ensaiada; (c) amostra ao final do processo de compressão; (d) amostra após retirada da carga.	43
Figura 17 - Exemplo das curvas obtidas através do ensaio de Squeeze Flow.	44
Figura 18 – Processo de utilização do ImageJ; (a) Escolha da imagem a ser calibrada; (b) Calibração no Imagej; (c) Medição do deslocamento.	45
Figura 19 – Curvas obtidas através do ensaio de Squeeze Flow modificado para o traço REF.	50

Figura 20 – Curvas obtidas através dos ensaios de Squeeze Flow Modificado para os traços REF FP03 e REF FP05.	51
Figura 21 – Imagens das deformações máximas das argamassas e as amostras após retirada total da carga para os traços REF FP03 e REF FP05 para diferentes idades.	52
Figura 22 - Curvas obtidas através dos ensaios de Squeeze Flow Modificado para os traços SCA5 FP03 e SCA5 FP05.	54
Figura 23 - Imagens das deformações máximas das argamassas e as amostras após retirada total da carga para os traços SCA5 FP03 e SCA5 FP05 para diferentes idades.	55
Figura 24 - Curvas obtidas através dos ensaios de Squeeze Flow Modificado para os traços SCA30 FP03 e SCA30 FP05.	57
Figura 25 - Imagens das deformações máximas das argamassas e as amostras após retirada total da carga para os traços SCA30 FP03 e SCA30 FP05 para diferentes idades.	58
Figura 26 - Cargas de tração máximas	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados de consistência obtidos pelo ensaio de Flow Table.	22
Tabela 2 - Resultados de consistência obtidos pelo ensaio de Flow Table.	23
Tabela 3 - Resultados ensaio de Flow Table e teor de ar incorporado.	24
Tabela 4 - Resultados ensaio de Vicat Modificado para os 5 tipos de argamassa....	25
Tabela 5 - Resultados de consistência obtidos pelo ensaio de Vicat Modificado.....	27
Tabela 6 - Traços com porcentagens da substituição de SCA por cimento Portland e teor de fibra de polipropileno utilizados.	36
Tabela 7 - Especificações técnicas fibra de polipropileno.	38
Tabela 8 - Resultados de consistência obtidos com o ensaio de Flow Table.	46
Tabela 9 - Resultados de penetração obtidos com ensaio de Vicat Modificado para diferentes idades.	47
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de densidade de massa e teor de ar incorporado.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

AF – Areia fina

AG – Areia grossa

AM – Areia média

Cal – Cal hidráulica

Cim – Cimento Portland CP II

FP – Fibra de polipropileno

Fi – Filler

NBR – Norma Brasileira

SCA – Sílica da casca de arroz

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Objetivo geral.....	15
1.1.2 Objetivos específicos	15
1.1.3 Justificativa	15
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Reologia das argamassas	17
2.2 Fibras de polipropileno como reforço em compósitos cimentícios.....	20
2.3 Métodos para caracterização reológica das argamassas	21
2.3.1 Mesa de consistência (Flow Table)	22
2.3.2 Método de penetração do cone (Vicat Modificado).....	24
2.3.3 Squeeze Flow	27
2.3.4 Squeeze Flow modificado (Análise de tração).....	31
3 METODOLOGIA	35
3.1 Materiais e traços utilizados.....	35
3.2 Caracterização dos materiais	36
3.2.1 Composição granulométrica dos agregados miúdos	36
3.2.2 Composição granulométrica dos materiais finos	37
3.2.3 Fibra de polipropileno	37
3.3 Mistura das argamassas.....	38
3.4 Determinação do índice de consistência (Flow Table).....	39
3.5 Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado	40
3.6 Ensaio de Vicat Modificado.....	42
3.7 Ensaio de Squeeze Flow Modificado.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1 Flow Table	46
4.2 Vicat Modificado	47
4.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado	48

4.4 Squeeze Flow Modificado.....	49
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	62
REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é considerada uma das maiores contribuintes para geração de resíduos e que quando não destinados de forma correta provocam grandes impactos no meio ambiente e na sociedade. Todavia, se por um lado a construção civil é responsável direta pela grande quantidade de resíduos gerados, por outro, tem como vantagem a capacidade de receber quase que totalmente os resíduos que produz. A maior problemática está na destinação correta desses materiais e que de acordo com a Associação Brasileira de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON), cerca de 98% dos resíduos gerados poderiam ser reciclados, no entanto, apenas 21% desses materiais são reutilizados corretamente. Segundo Freire e Beraldo (2003), a construção civil é o segmento que apresenta a maior capacidade de receber novas tecnologias e materiais, que podem ser produzidos e desenvolvidos a partir da utilização de diversos resíduos agroindustriais.

O cimento Portland, tão importante para o desenvolvimento da sociedade, é o principal material encontrado em obras de construção civil. A alguns anos se tornou questão de preocupação para o futuro do planeta devido a emissão de grandes quantidades de poluentes e extração de matéria prima da natureza, sendo o gás carbônico o principal poluente. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), a indústria cimenteira é responsável, em escala global, por aproximadamente 7% de todo o dióxido de carbono (CO₂) emitido no planeta. No Brasil, esse índice é menor, algo próximo a 2,6% e justificável por uma série de ações de sustentabilidade implementadas pela indústria ao longo dos últimos anos.

Uma alternativa viável para redução dos problemas causados pelo consumo em larga escala do cimento Portland é a substituição parcial do material no processo de produção de concretos e argamassas. Dessa forma, a sílica da casca do arroz, obtida através da queima da casca para geração de energia, surge como uma alternativa para a substituição parcial do cimento, devido a apresentar um alto teor de sílica amorfa, o que qualifica sua utilização como material pozolânico (LUDWIG, 2014). Mendes *et al.* (2014) afirma em seu estudo que a utilização da sílica da casca do arroz, se utilizada em teores adequados, pode ser uma alternativa sustentável e tecnicamente viável para a obtenção de estruturas de concreto mais duráveis.

Aliado ao desenvolvimento de novos materiais, os compósitos reforçados com fibras vêm ganhando destaque com o passar dos anos e constantes avanços da

tecnologia dos materiais, sendo qualificados também como uma alternativa para estruturas mais duráveis e que conseqüentemente produzam menor quantidade de resíduos. Segundo Oliveira (2001), essas novas tecnologias de materiais são constituídas basicamente pela adição ou incorporação de fibras em matrizes cimentícias que em sua grande maioria não apresentam deformação plástica, sendo consideradas matrizes frágeis. As fibras tem como princípio básico a capacidade de melhorar as propriedades dessas matrizes, principalmente no que tange a deformação e capacidade de absorção de energia. A utilização de fibras polipropileno, por exemplo, tem como objetivo melhorar o desempenho de compósitos cimentícios e reduzir as patologias. Seu uso é justificado pela compatibilidade mecânica, física e química entre as matrizes cimentícias e as fibras, ademais, possui baixo custo e fácil disponibilidade (BECHE, 2021).

Apesar dos principais requisitos de desempenho estarem relacionados a propriedades no estado endurecido, a aplicação da argamassa ocorre no estado fluído e para minimizar a possibilidade de patologias estéticas ou estruturais, e garantir uma aplicação com facilidade e isenta de defeitos, é de suma importância o conhecimento de suas propriedades no estado fresco (CARDOSO; PILEGGI; JOHN; 2005). Cardoso (2009) cita que o desenvolvimento microestrutural das argamassas inicia no processo de mistura, onde são definidas características como homogeneidade, dispersão das partículas e teor de ar incorporado, ou seja, características fundamentais para possibilitar uma aplicação produtiva e como consequência atender as expectativas de serviço das argamassas, sem apresentar patologias ou defeitos que comprometam a segurança das pessoas. Nesse contexto, no presente estudo serão avaliadas, no estado fresco, as influências da adição de diferentes porcentagens de fibras de polipropileno em relação ao volume da argamassa. As argamassas que já foram previamente estudadas utilizam substituições parciais do cimento Portland por sílica de casca do arroz.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Estudar a influência da adição de diferentes teores de fibras de polipropileno no comportamento reológico em argamassas produzidas com substituições parciais do cimento Portland por sílica da casca do arroz.

1.1.2 Objetivos específicos

- 1 – Avaliar o índice de consistência das argamassas através do ensaio de Flow Table.
- 2 – Analisar o índice de consistência das argamassas através do ensaio de Vicat Modificado para diferentes idades.
- 3 – Determinar a densidade e o teor de ar incorporado para os diferentes traços.
- 4 – Analisar as deformações das argamassas através do ensaio de Squeeze Flow modificado proposto por Marangon *et al.* (2021) para diferentes idades.
- 5 – Mostrar a influência da adição de fibras de polipropileno em argamassas no estado fresco.

1.1.3 Justificativa

Os materiais utilizados na construção civil são grandes responsáveis pela extração das matérias primas não renováveis, além de apresentarem custos elevados. Busca-se benefícios ambientais e socioeconômicos substituindo materiais convencionais por resíduos, e com isso, a sílica da casca do arroz tem apresentado potencial para utilização como material cimentício. Diversos autores (Tonello (2017), Klimaczewski (2017), Cortese (2019), Marangon *et al.* (2021), entre outros) tem avaliado os resultados dessa substituição e obtido resultados positivos nas propriedades de argamassas no estado fresco e endurecido.

De acordo com Silva (2006), os materiais cimentícios apresentam rupturas frágeis por natureza e quando submetidos a esforços de tração se rompem repentinamente ao ter a sua resistência mecânica atingida. Esse tipo de ruptura também é potencializado pelos defeitos e imperfeições devidos a sua estrutura e

processos de fabricação. Nesse contexto, a utilização de fibras na matriz cimentícia pode auxiliar a matriz a controlar esses problemas ou até superá-los, possibilitando o uso do compósito em situações que requerem esse tipo de esforço, melhorando as propriedades de argamassas durante as solicitações e a vida útil das estruturas.

Com isso, essa pesquisa busca avaliar da adição de fibras de polipropileno em traços já estudados por Tonello (2017), Kilmaczewski (2017), Cortese (2019), Marangon et. al. (2021), buscando avanço em relação à novas tecnologias e materiais que melhorem o desempenho de compósitos cimentícios, aliando isso a soluções sustentáveis.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Reologia das argamassas

Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, analisando as relações entre a tensão de cisalhamento e as deformações em um determinado intervalo de tempo. Os sistemas ideais podem ser descritos por equações lineares simples como a Lei de Newton para líquidos ideais e quando os fluidos não apresentarem linearidade entre a tensão de cisalhamento e a deformação, como descrito por Newton, são considerados como fluidos não newtonianos (GLATTHOR; SCHWEIZER, 1994). Scharamm (2006) cita que os fluidos newtonianos são ditos como fluidos com comportamento de fluxo ideal devido a viscosidade não ser afetada por alterações na tensão de cisalhamento. Segundo Cardoso (2009), o comportamento reológico dos materiais é caracterizado pela relação entre um esforço ao qual o material está sendo submetido e o seu fluxo ou deformação.

Costa (2006) define viscosidade como a propensão de um líquido em resistir ao escoamento como resultado do atrito interno ocasionado pela tensão de cisalhamento. A Equação 1 define o conceito de viscosidade de um modelo newtoniano que relaciona linearmente a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento.

$$\tau = \eta\dot{\gamma} \quad (1)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

η = viscosidade (Pa.s);

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento (s^{-1}).

A relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento determina como os materiais viscosos se comportaram reologicamente. Para obtenção desses parâmetros é necessário a realização de ensaios experimentais utilizando viscosímetros e, ou, reômetros (Oliveira, 2015).

Cardoso (2009) cita que em composições com elevadas concentrações de partículas, como as argamassas, a reologia do sistema é desviada do modelo

newtoniano para comportamentos não-lineares devido à grande interação entre as partículas. Esses materiais apresentam os seguintes comportamentos:

- Pseudoplástico – a viscosidade reduz com o aumento da tensão de cisalhamento;
- Dilatante – a viscosidade aumenta em função do aumento da tensão de cisalhamento.

De acordo com Cardoso (2009), os materiais que apresentam pseudoplasticidade ou dilatância com tensão de escoamento são denominados como fluidos de Bingham.

Usualmente, de modo a facilitar o espalhamento, nivelamento e acabamento, as argamassas devem apresentar um comportamento pseudoplástico, mas com elevada viscosidade ou considerável tensão de escoamento para manter-se estável após a aplicação (CARDOSO, 2009).

Os fluidos de Bingham são definidos pela Equação 2:

$$\tau = \tau_0 + \eta\gamma \quad (2)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

τ_0 = tensão de escoamento (Pa);

η = viscosidade (Pa.s);

γ = taxa de cisalhamento (s^{-1}).

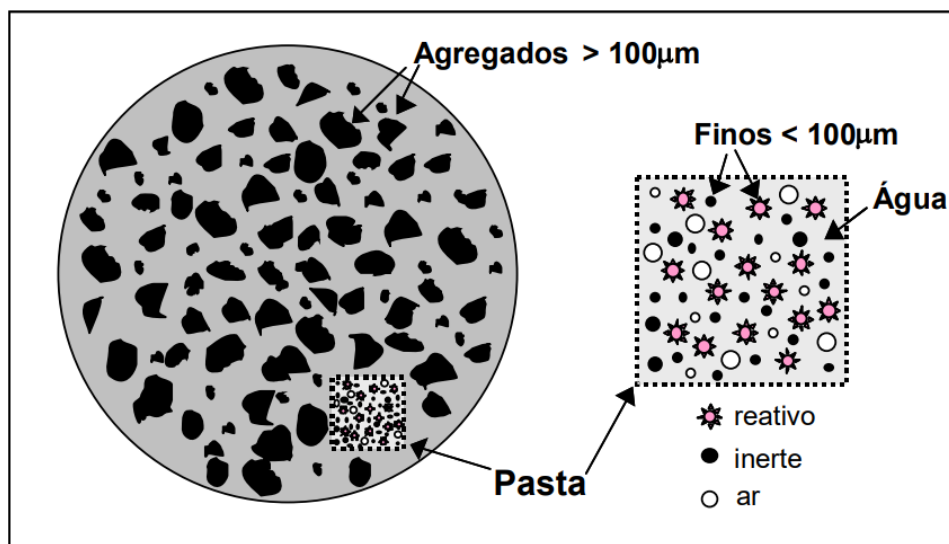
Cardoso (2009) em seu estudo ainda aborda os fluidos não newtonianos em que o comportamento dos materiais pode depender da história ou tempo de aplicação da tensão de cisalhamento. Os comportamentos são:

- Tixotropia – a viscosidade reduz em função do tempo sob cisalhamento constante;
- Reopexia – a viscosidade aumenta em função do tempo sob cisalhamento constante.

É possível considerar o modelo microestrutural das argamassas no estado fresco sendo formado por uma fração “grossa” inerte (areia), com partículas variando de 100 μ m a 2mm e uma pasta reativa de água e “finos” (materiais cimentícios), dessa forma, classificando-as de modo simplificado como uma suspensão bifásica

(CARDOSO, 2009). A Figura 1 apresenta a microestrutura de uma argamassa em seu estado fresco descrita por Cardoso (2009).

Figura 1 - Microestrutura de uma argamassa no estado fresco.



Fonte: Cardoso (2009).

Todavia, devido a diversas formulações apresentarem pozolanas, filler, fibras e teores consideráveis de ar incorporado, em uma ótica mais ampliada, verifica-se que as argamassas são produtos com características multifásicas, tendendo a apresentarem um comportamento reológico complexo, conseqüente da sua natureza multifásica e também devido as solicitações as quais são submetidas nas etapas de preparo e aplicação (CARDOSO, 2009).

Sabattini (1984) aborda a importância da trabalhabilidade e como as suas características reológicas podem interferir na qualidade do serviço do pedreiro durante a aplicação, devido a todas as demais propriedades desejáveis serem dependentes da trabalhabilidade.

A trabalhabilidade é uma propriedade complexa devido a estar diretamente ligada a outras diversas propriedades como plasticidade, retenção de água e consistência. Ela determina a facilidade com que as argamassas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, tudo isso em uma condição homogênea (CARASEK, 2010).

2.2 Fibras de polipropileno como reforço em compósitos cimentícios

As fibras de polipropileno são produzidas em diferentes formas, tamanhos e com propriedades distintas. Segundo Oliveira (2001), o polipropileno é um termoplástico proveniente do monômero propileno (C₃H₆), obtido através do craqueamento do petróleo pela síntese de elementos orgânicos.

Bentur e Mindess (2007) citam entre as vantagens da utilização de fibras de polipropileno o ponto de fusão relativamente alto (165 °C) e o baixo preço do material, e como desvantagens a baixa resistência ao fogo, sensibilidade à luz do sol e ao oxigênio, baixo módulo de elasticidade (entre 1 e 8 GPa) e fraca ligação com a matriz. Os mesmos autores abordam que as desvantagens citadas não são um grande problema devido a matriz cimentícia fornecer uma espécie de capa protetora as fibras, minimizando a sensibilidade ao fogo e outros efeitos ambientais, e que o baixo módulo de elasticidade e a fraca ligação com a matriz podem ser facilmente aumentados.

O polipropileno é um material muito utilizado na indústria devido às inúmeras qualidades, tais como a facilidade de produção, as boas características mecânicas, devido, em grande parte, a sua natureza semicristalina e a sua inércia química, sendo possível sua aplicação mesmo em meios corrosivos (TANCREZ, *et. al.*, 1994, *apud* SANTOS, 2006, p.16).

De acordo com Figueiredo (2011), as fibras de polipropileno são divididas em duas formas básicas: as microfibras e as macrofibras. De modo que as microfibras apresentam dois tipos: as monofilamento e as fibriladas. Segundo o autor, as fibras que apresentam um módulo de elasticidade inferior ao do concreto no estado endurecido, como as fibras de polipropileno, são conhecidas tradicionalmente como fibras de baixo módulo, de modo que as fibras que possuem o módulo de elasticidade superior ao do concreto endurecido são conhecidas como fibras de alto módulo. Abordando os tipos de microfibras citados, segundo Bentur e Mindess (2007), ambas apresentam a mesma resistência e módulo de elasticidade, contudo, os autores citam que a fibras de monofilamento são mais eficazes que as fibriladas devido a sua maior capacidade de conter fissuras.

Figueiredo (2011) em seu estudo menciona que em casos de fibras de reforço que apresentam baixo módulo de elasticidade, é necessário que haja um elevado teor de fibra na matriz de modo que a tensão por fibra não exceda a tensão de ruptura.

Todavia, a necessidade de elevados teores de fibras pode inviabilizar a utilização do material devido ao aumento nos custos e a dificuldade para manutenção da trabalhabilidade da mistura. De acordo com Oliveira (2001), a adição de fibras em compósitos resulta em reduções na trabalhabilidade e índice de consistência proporcionais ao teor utilizado.

A eficiência da atuação das fibras depende da capacidade dessas em atuar como pontes de transferência de tensões com o surgimento das fissuras. De acordo com Bentur e Mindess (2007), a capacidade das fibras em atuar como reforço é proporcional ao teor utilizado, quanto maior a quantidade de fibras, existirão mais pontes de transferência de tensões, aumentando a capacidade de reforço após a fissuração da matriz. Conforme Silva (2006), a utilização de baixos teores de fibras de polipropileno em argamassas não proporciona uma capacidade resistente do compósito em razão das propriedades mecânicas da fibra (baixa resistência e módulo), ficando evidente apenas o aumento da tenacidade do compósito.

2.3 Métodos para caracterização reológica das argamassas

Segundo Ferraris (1999), para definir o comportamento reológico em fluidos não newtonianos é necessário obter ao menos a curva do comportamento reológico e dois parâmetros reológicos: tensão de escoamento e viscosidade. Para Betioli *et al.* (2009), para realizar a caracterização reológica das argamassas é necessário a associação de diversas técnicas, visto que apenas uma única não é capaz de determinar as propriedades reológicas fundamentais e nem simular todas as solicitações que os materiais podem sofrer durante sua mistura, transporte e aplicação.

Cardoso (2009) cita que tradicionalmente as argamassas são caracterizadas por ensaios simples, como a mesa de consistência (Flow Table), método do dropping-ball e os penetrômetros. O autor relata que através desses ensaios é possível avaliar a consistência do material de acordo com a sua trabalhabilidade, porém, os mesmos são insuficientes para realizar uma avaliação mais completa das argamassas no estado fresco.

2.3.1 Mesa de consistência (Flow Table)

O ensaio apresenta a vantagem de ser dinâmico, considerando também a viscosidade do sistema e não só a tensão de escoamento, ademais, em decorrência dos impactos aplicados, o ensaio avalia qualitativamente a tendência à segregação de fases do sistema. Por outro lado, uma desvantagem do método se dá devido à o mesmo não reproduzir condições de aplicação práticas do material, como o lançamento com alto impacto seguido de espalhamento sob intenso cisalhamento (CARDOSO, 2009).

A Tabela 1 apresenta os resultados dos estudos de Marangon *et al.* (2021) onde o cimento Portland foi substituído por diferentes porcentagens (entre 5 e 30%) de sílica da casca do arroz (SCA).

Tabela 1 - Resultados de consistência obtidos pelo ensaio de Flow Table.

Traço	Flow Table (mm)	DP	CV
REF	283,2	1,16	0,41
SCA5	271,2	1,4	0,51
SCA10	270	1,3	0,48
SCA15	265,7	1,35	0,51
SCA20	263,7	4,12	1,53
SCA30	256,3	1,16	0,45

DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação

Fonte: Adaptado de Marangon *et al.* (2021).

Através dos resultados obtidos para os diferentes traços verificou-se que à medida que a porcentagem de SCA foi aumentada, os valores de espalhamento diminuiriam. Marangon *et al.* (2021) justificam essa perda de fluidez a diminuição na densidade de empacotamento das misturas e a superfície porosa (externa e interna) da SCA.

Oliveira (2001) adicionou diferentes teores de fibra de polipropileno em relação à massa do cimento para os traços 1:3 (cimento:areia), 1:0,5:4,5 (cimento:cal:areia) e 1:2:9 (cimento:cal:areia). A fibra utilizada foi do tipo monofilamento, com 10mm de comprimento, 20 μ m de diâmetro e a Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2 - Resultados de consistência obtidos pelo ensaio de Flow Table.

Traço	Teor de fibras (%)	Índice de consistência (mm)	DP	CV
1 : 3	0	259	7,02	2,71
1 : 3	0,05	243	2,65	1,09
1 : 3	0,15	229	1	0,44
1 : 3	0,3	198	2,08	1,05
1 : 0,5 : 4,5	0	268	0,58	0,22
1 : 0,5 : 4,5	0,05	239	0,58	0,22
1 : 0,5 : 4,5	0,15	224	0,58	0,24
1 : 0,5 : 4,5	0,3	206	2,08	1,01
1 : 2 : 9	0	260	3,46	1,33
1 : 2 : 9	0,05	254	7,64	3,01
1 : 2 : 9	0,15	243	2,65	1,09
1 : 2 : 9	0,3	235	3,51	1,5

DP - Desvio padrão; DV - Coeficiente de variação

Fonte: Adaptado de Oliveira (2001).

Observou-se que, independentemente do traço analisado, houve uma gradual redução no índice de consistência à medida que foi aumentado o teor de fibras. Oliveira (2001) justifica esse comportamento a facilidade do aumento do número de fibras dispersas na matriz devido as mesmas possuírem baixo diâmetro. O autor conclui que as fibras podem melhorar a ligação entre o agregado e a pasta aglomerante e que esse aumento na coesão das argamassas pode apresentar melhoras significativas na qualidade e produtividade das alvenarias.

Silva (2011) estudou diferentes adições de fibras de polipropileno em argamassas. As fibras utilizadas foram do tipo monofilamento com comprimento de 6mm. A Tabela 3 apresenta os resultados médios de três repetições para o ensaio de Flow Table e o teor de ar incorporado das argamassas.

Tabela 3 - Resultados ensaio de Flow Table e teor de ar incorporado.

Traço	Principais características	Índice de consistência (mm)	Teor de ar incorporado (%)
1 : 1 : 6	Argamassa mista de cimento, cal hidratada em pó e areia quartzosa no traço em volume 1 : 1 : 6	288	3,66
FPP 0.10	Argamassa 1 : 1 : 6 com adição de 0,10% de fibras de polipropileno em relação à massa de cimento	289	4,07
FPP 0.20	Argamassa 1 : 1 : 6 com adição de 0,20% de fibras de polipropileno em relação à massa de cimento	286	4,5
FPP 0.30	Argamassa 1 : 1 : 6 com adição de 0,30% de fibras de polipropileno em relação à massa de cimento	286	4,59

Fonte: Adaptado de Silva (2011).

Através da Tabela 3 foi observado que as adições de fibras de polipropileno não causaram grande influência no índice de consistência e significativa incorporação de ar nas misturas. De acordo com Silva (2011), seria necessário a utilização de maiores concentrações de fibras de polipropileno nas argamassas estudadas para diferenças relevantes no índice de consistência e teor de ar incorporado.

2.3.2 Método de penetração do cone (Vicat Modificado)

No que se refere a capacidade do ensaio a avaliar o comportamento reológico dos materiais, o ensaio não permite a caracterização da viscosidade, a qual está de fato relacionada com a facilidade de escoamento do material sobre uma superfície, restringindo a análise a tensão de escoamento do material (AGOPYAN *et al.*, 2005). De acordo com Ferraris (1999), a profundidade da penetração da sonda metálica na pasta dependerá da tensão de escoamento do material analisado.

Cascudo e Carasek (2007) analisam o método de Vicat Modificado como um instrumento interessante para o controle das argamassas *in loco*. Para execução do ensaio é necessária uma aparelhagem simples e factível de ser empregada em obra, além do método se mostrar mais eficiente que o da mesa de consistência devido a sua capacidade de detectar alterações de consistência por se mostrar sensível as variações no teor de água das argamassas.

O método apresenta sensibilidade suficiente para detectar a água evaporada para o ambiente pela argamassa, assim como o enrijecimento da mistura ocasionado

pelo início das reações de hidratação do cimento, qualificando-o para análise das alterações de consistência da argamassa ao longo do tempo. O ensaio de Vicat Modificado apresenta grande potencial para análise do ganho ou perda de água do material, seja qual for a origem e o mecanismo desse transporte de água na mistura fresca. (CASCUDO; CARASEK, 2007).

Com o objetivo de potencializar o método de Vicat Modificado, Cascudo e Carasek (2007) estudaram cinco argamassas, duas industrializadas para aplicação manual e duas industrializadas para projeção mecânica, além de uma preparada em obra com o traço 1:1:6 (cimento:cal:areia úmida). O estudo foi realizado em um canteiro de obra durante três meses e a Tabela 4 apresenta os resultados.

Tabela 4 - Resultados ensaio de Vicat Modificado para os 5 tipos de argamassa.

Argamassa	Consistência pelo Cone - Valor médio (mm)	nº. Repetições	Coefficiente de variação
Produzida em obra - aplicação manual	44	72	34%
Industrializada 1 - aplicação manual	62	86	10%
Industrializada 1 - projetada mecanicamente	56	81	12%
Industrializada 2 - aplicação manual	52	55	15%
Industrializada 2 - projetada mecanicamente	47	56	13%

Fonte: Adaptado de Cascudo e Carasek (2007).

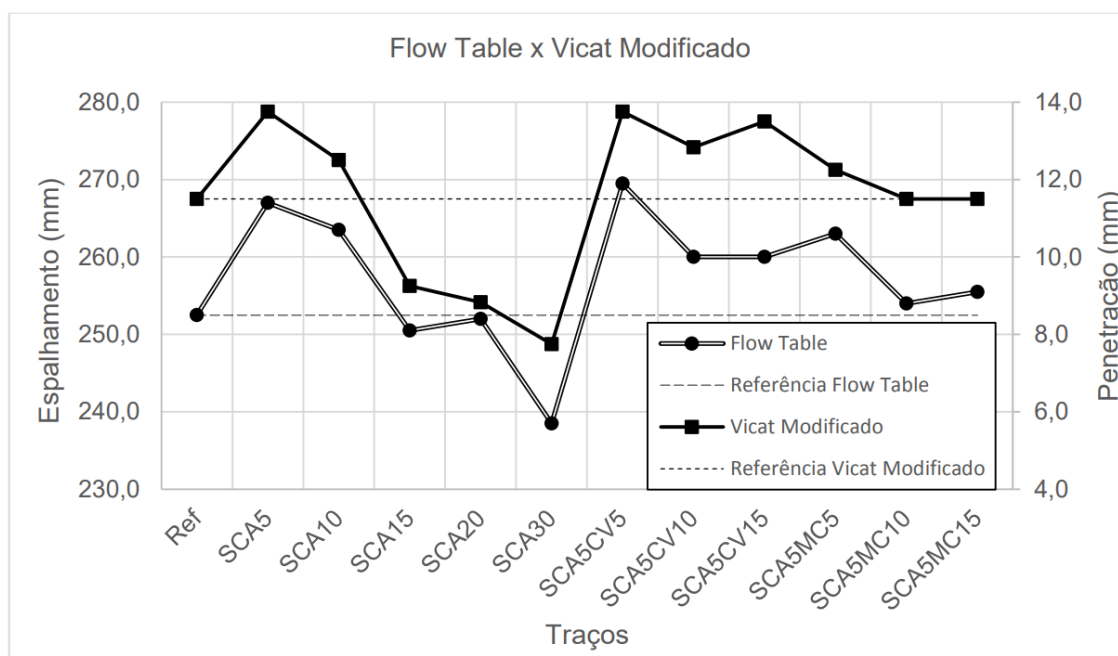
Observou-se que os valores médios para as argamassas industrializadas ficaram entre 47 e 62mm, todos superiores ao da argamassa produzida em obra. De acordo com Cascudo e Carasek (2007), esse comportamento ocorreu devido as argamassas industrializadas serem mais fluidas devido à presença de aditivos.

Foi verificado também que as argamassa industrializadas apresentaram menor dispersão nos resultados, onde o maior coeficiente de variação foi de 15%, já para a argamassa preparada em obra, o coeficiente de variação foi de 34%. Cascudo e Carasek (2007) creditam os coeficientes de variação das argamassas industrializadas

principalmente as variações de lotes, variações climáticas e também a variações ao longo do processo de produção. Para a argamassa preparada em obra, os autores citam que é necessário considerar que houve variáveis mais abrangentes e influentes que as analisadas na argamassa industrializada. Por fim, os autores concluem que o método é eficaz e pode ser respaldado como uma ferramenta de controle em obra.

Klimaczewski (2017) realizou a avaliação de argamassas no estado fresco com a substituição de cimento Portland por adições minerais da SCA, cinza volante e metacaulim. O autor realizou os ensaios de consistência de Flow Table e Vicat Modificado e comparou os resultados apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Gráficos com resultados dos ensaios de Flow Table e Vicat modificado.



Fonte: Klimaczewski (2017).

Verificou-se que todas as misturas que utilizaram 5% de SCA e cinza volante ou metacaulim apresentaram valores de espalhamento e penetração superiores aos encontrados no traço referência. Dessa forma, Klimaczewski (2017) cita que essas adições minerais, se utilizadas em pequenas quantidades, tendem a melhorar a trabalhabilidade das argamassas. O autor analisou que as oscilações dos gráficos tendem a seguir um padrão, designando que os ensaios apresentam correlação entre si referente a consistência das argamassas. Contudo, o autor indica que as variações obtidas através do método de Vicat Modificado foram mais representativas,

evidenciando que o ensaio apresenta maior sensibilidade em relação a mesa de consistência.

A Tabela 5 apresenta os resultados dos estudos de Marangon *et al.* (2021) para o ensaio de Vicat Modificado realizado com substituição de cimento Portland por SCA. O ensaio de penetração foi realizado para diferentes idades da argamassa.

Tabela 5 - Resultados de consistência obtidos pelo ensaio de Vicat Modificado.

Traço	REF	SCA5	SCA10	SCA15	SCA20	SCA30
Tempo	Penetração (mm)					
15min	15,5	15,3	11,8	11,7	11,4	11
60min	10,5	12,5	10,75	8,25	8,25	8,5
120min	9	10,5	9,3	4,5	6,5	7,5
180min	8	6	7,8	3,9	4	4,5

Fonte: Adaptado de Marangon *et al.* (2021).

Com a Tabela 5 foi observado que a penetração diminui com o aumento da porcentagem de SCA na substituição e o para maiores tempos em aberto. Marangon *et al.* (2021) analisam que a queda gradual na penetração do cone aos 15 minutos pode ter sido influenciada por três fatores: diminuição na embalagem da mistura, grande área de superfície e a porosidade da SCA. Segundo os autores, devido ao fato da SCA ter uma estrutura porosa, ela obtém mais água da mistura ao longo do tempo, ocasionando menores valores de penetração devido a uma redução de lubrificação das partículas.

2.3.3 Squeeze Flow

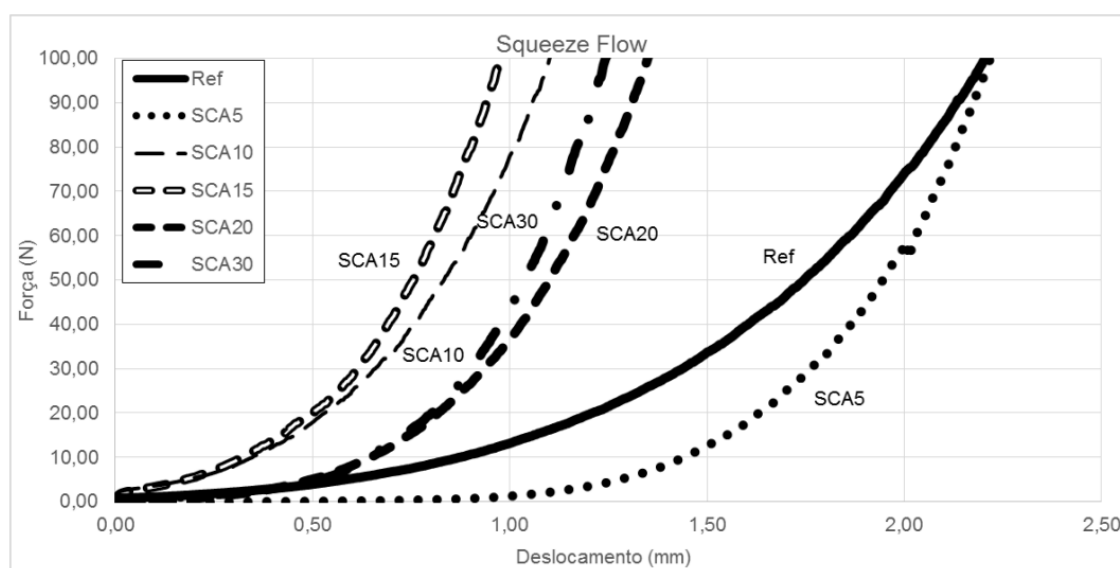
O método apresenta um grande potencial para a pesquisa e desenvolvimento de argamassas devido a capacidade de detectar pequenas alterações nas características reológicas dos materiais e diferentemente dos métodos tradicionais, é possível identificar com clareza mais de um parâmetro reológico, sendo possível a obtenção da tensão de escoamento e viscosidade, avaliando de modo mais pertinente a consistência e plasticidade da amostra. Além disso, o método oferece a simulação de diversas situações reais de aplicação (CARDOSO; PILLEGUI; JOHN, 2005). Segundo Cardoso (2009), principalmente nas etapas de lançamento e aperto da argamassa, o método apresenta uma boa relação com a percepção do pedreiro, onde

argamassas que apresentam difícil deformação durante o ensaio, necessitam de um maior esforço durante sua aplicação, resultando em uma produtividade menor. Contudo, de acordo com Cascudo e Carasek (2007), a dificuldade da sua utilização como instrumento de controle de obra o limita ao ambiente laboratorial.

O método permite a realização do ensaio com controle por força ou deslocamento. O controle por força é o modo mais adequado para argamassas de assentamento, pois simula o peso do bloco ou tijolo, registrando a deformação do material ao ponto que o esforço é aplicado. No controle por deslocamento, o mais indicado para argamassas de revestimento, o material é submetido a um deslocamento efetuado com velocidade constante e mede-se a força (CARDOSO, 2009).

Klimaczewski (2017) substituiu o cimento Portland por porcentagens entre 5 e 30% de SCA. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos através do Squeeze Flow.

Figura 3 - Resultados do Squeeze Flow para os traços com substituição de cimento Portland por SCA e traço referênci.



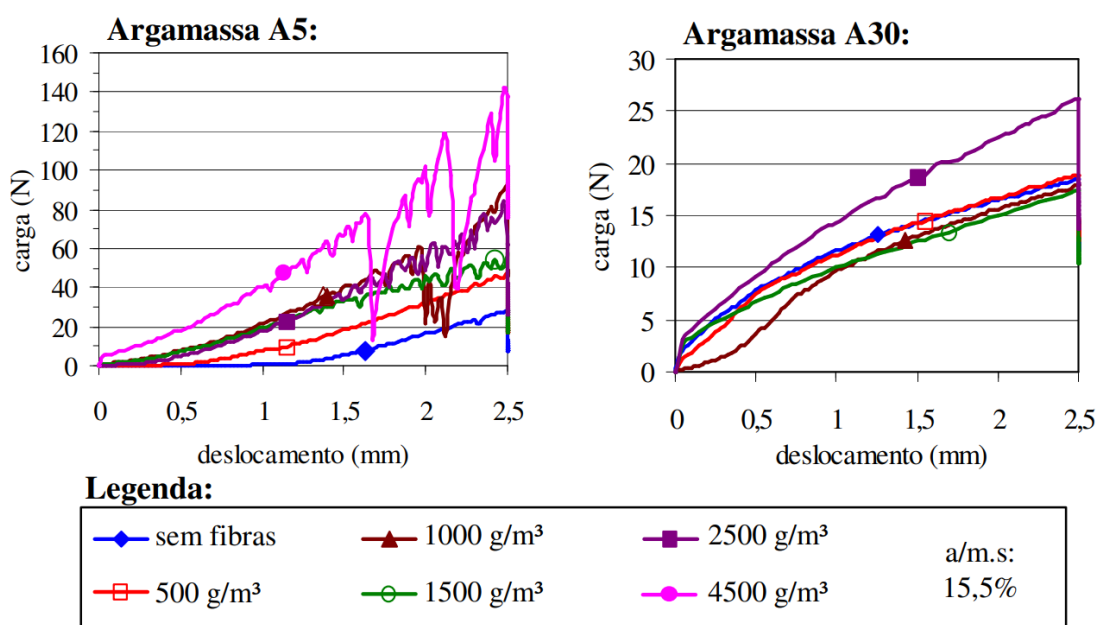
Fonte: Klimaczewski (2017).

Klimaczewski (2017) observou que a utilização acima de 5% de SCA apresentou perfis de plasticidade com maior rigidez, o que pode dificultar a aplicação da argamassa, exigindo um maior esforço do operário e reduzindo a produtividade. O traço SCA5 apresentou maior plasticidade se comparado ao traço referênci, o mesmo comportamento ocorreu nos ensaios de consistência de Flow Table e Vicat

Modificado. Por fim, o autor conclui que as adições minerais de SCA podem melhorar a reologia no estado fresco das argamassas, todavia, destaca a necessidade de estudos mais aprofundados para as substituições estudadas.

Silva (2006) estudou o comportamento reológico de duas argamassas com adição de fibra de polipropileno, uma com um baixo teor de ar incorporado (A5), na ordem de 5%, e outra com alto teor (A30), na ordem de 30%. O autor utilizou diferentes teores de água nas misturas e um único tipo de fibra, de 6mm de comprimento, com cinco teores diferentes e um traço sem fibras.

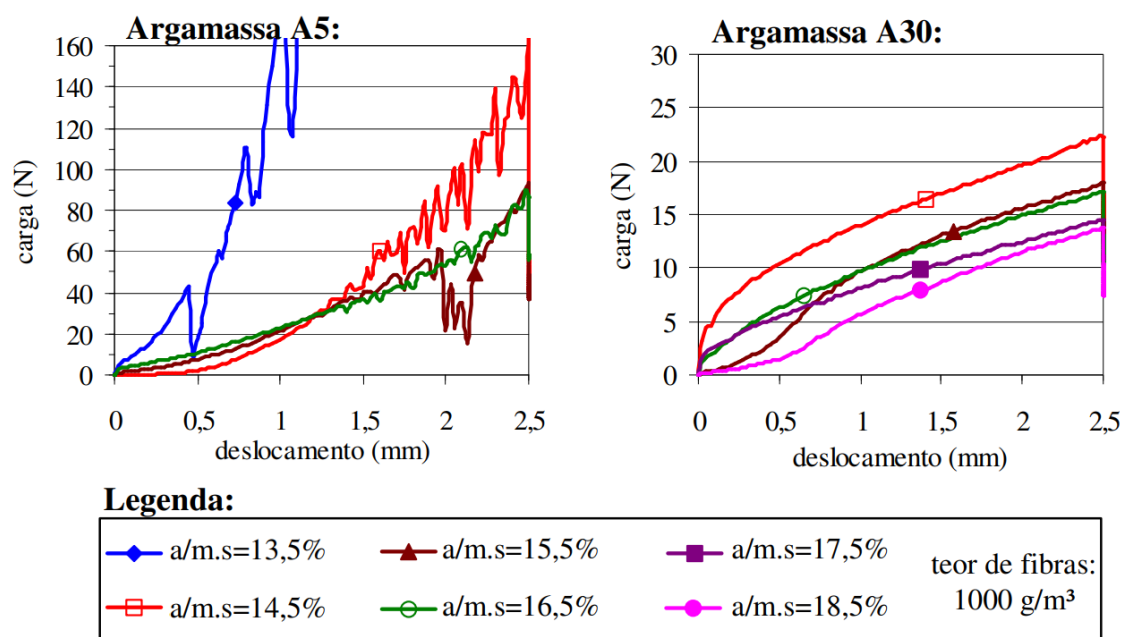
Figura 4 - Resultados do Squeeze Flow para diferentes adições de fibra na argamassa de relação água/materiais secos 15,5%.



Fonte: Silva (2006).

As curvas dispostas na Figura 4 mostram que ocorre um aumento da carga máxima ao ponto que se tem o aumento da fração volumétrica das fibras. Silva (2006) destaca que na argamassa A5 com 15,5% de água/matérias secos, a adição do teor de 2500 g/m³ em relação a argamassa sem fibras ocasionou um aumento na carga máxima de 28N para 80N. Um comportamento similar ocorreu na argamassa A30, o aumento do mesmo teor (2500 g/m³) resultou um aumento na carga máxima de 18N para 26N.

Figura 5 - Resultados do Squeeze Flow para diferentes adições de água na argamassa com teor de fibras de 1000 g/m³.



Fonte: Silva (2006).

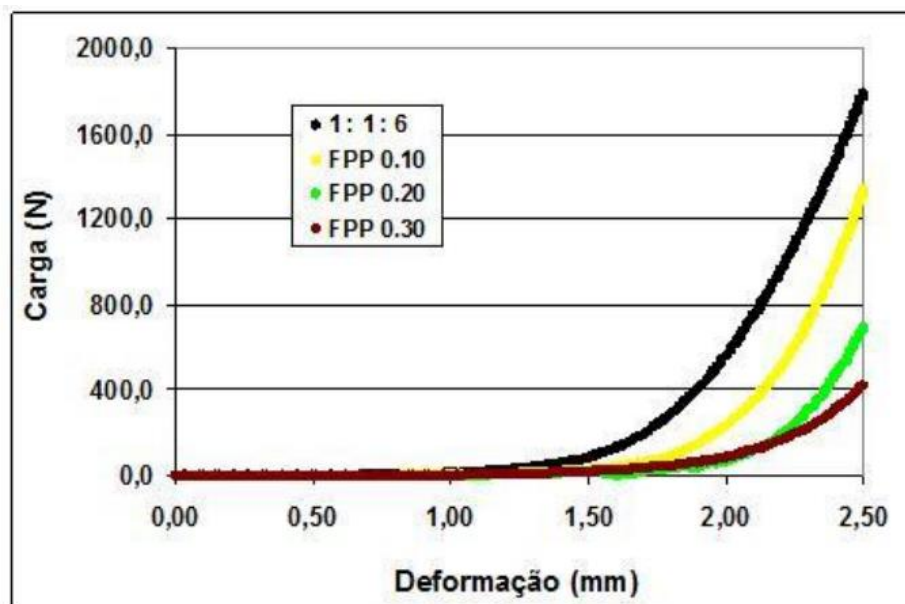
As curvas da Figura 5 apontam a redução da carga máxima à medida que ocorreu um aumento na relação água/matérias secas. Silva (2006) cita que na argamassa A5 com teor de fibras de 1000 g/m³, a alteração na relação água/materiais secos de 14,5% para 16,5% resultou em uma redução de 160N para 90N na carga máxima. Na argamassa A30, foi verificado o mesmo comportamento com a alteração de 14,5% para 16,5%, que resultou em uma redução de 23N para 17N da carga máxima.

Quando o teor de água é fixado, o aumento da quantidade de fibras aumenta o valor de carga máxima e quando o teor de fibras é fixado, o aumento da quantidade de água reduz o valor de carga máxima. Percebe-se que através do método do Squeeze Flow é possível diferenciar argamassas de um mesmo conjunto (SILVA, 2006).

Silva (2006) aborda que os níveis maiores de carga suportado pela argamassa A5 em relação a argamassa A30 reforçam a importância do efeito do teor de ar incorporado para esse tipo de análise.

Silva (2011) realizou a avaliação reológica pelo método do Squeeze Flow adicionando fibras de polipropileno em diferentes teores em relação a massa do cimento. Os traços são os mesmos descritos na Tabela 3.

Figura 6 - Curvas obtidas através do ensaio de Squeeze Flow.



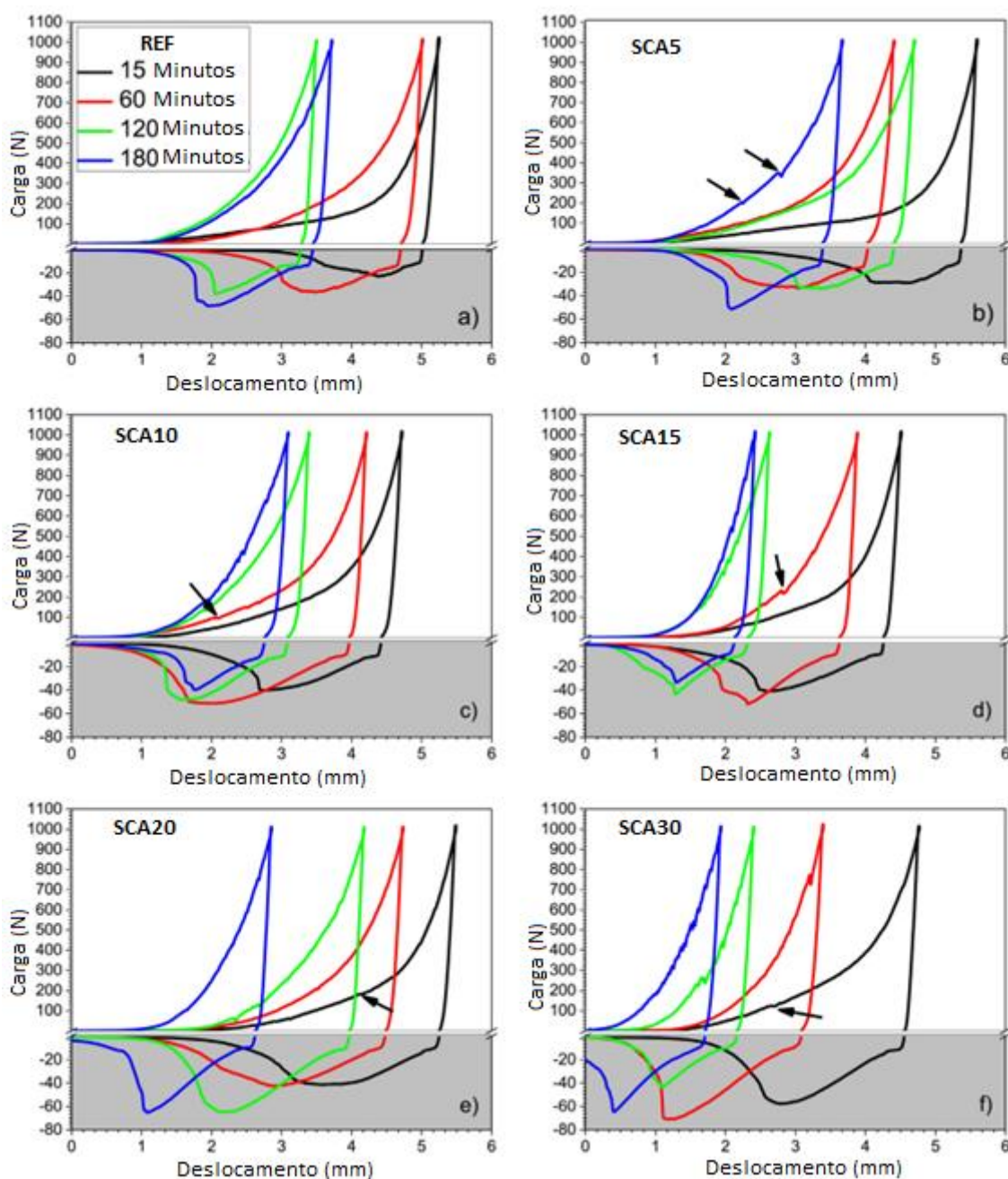
Fonte: Silva (2011).

As curvas apresentadas na Figura 6 mostram que foram necessárias pequenas cargas para que a amostra deformasse até os 2mm. Após isso, foram necessárias cargas acentuadas para que houvessem menores deformações. Silva (2011) relata que à medida o teor de fibras de polipropileno foi aumentado, a carga para um mesmo nível de deformação diminuiu, algo que não foi possível ser observado para as mesmas argamassas no ensaio de Flow Table. O autor cita que esse comportamento provavelmente ocorreu devido ao maior afastamento das partículas ocasionado pela maior concentração de fibras, pois as fibras dispersam e aumentam os volumes dos poros da argamassa. O pequeno aumento no teor de ar incorporado à medida que se aumentou as fibras também pode ter sido preponderante para a redução das cargas.

2.3.4 Squeeze Flow modificado (Análise de tração)

Em seus estudos, Marangon *et al.* (2021) propôs uma versão modificada do ensaio de Squeeze Flow, onde a amostra foi carregada e descarregada até que a chapa não estivesse mais em contato com a argamassa. Os autores citam que com os valores de tração obtidos ao descarregar a amostra é possível obter um indicador da capacidade de adesão da argamassa com o substrato.

Figura 7 - Curvas obtidas no ensaio de Squeeze Flow Modificado para substituições entre 5 a 30% de cimento Portland por SCA.

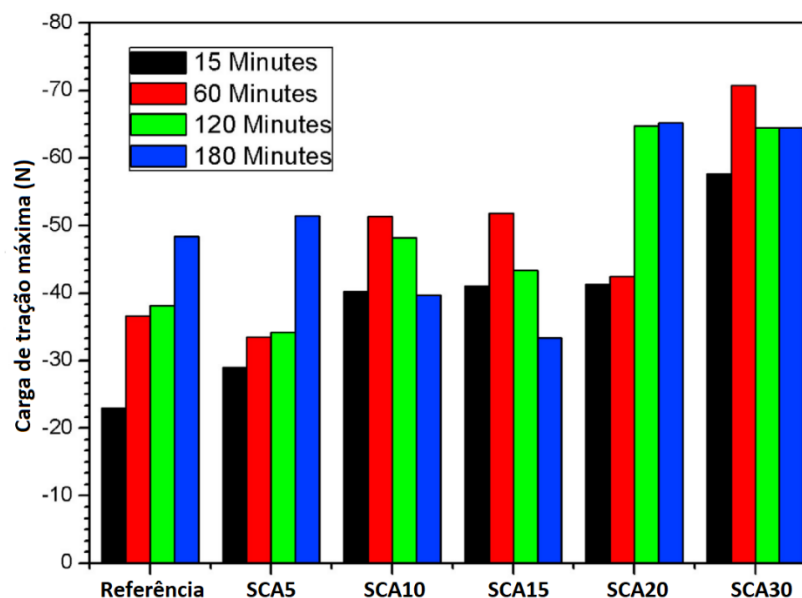


Fonte: Adaptado de Marangon *et al.* (2021).

A Figura 7 mostra os gráficos obtidos por Marangon *et al.* (2021) onde os crescimentos exponenciais representam o método tradicional do Squeeze Flow, em que a amostra está sendo comprimida e as linhas verticais até as curvas abaixo de zero (eixo y) representam o momento em que a amostra está sendo descarregada (tracionando) até não estar mais em contato com a chapa. O ensaio foi realizado para tempos em aberto entre 15 e 180 minutos.

Através dos gráficos visualizou-se que houve um aumento da viscosidade ao longo do tempo nas misturas, representado pela redução dos deslocamentos nas curvas. Marangon *et al.* (2021) citam que aos 15 minutos as argamassas apresentam grandes deformações sem que a carga aplicada seja aumentada significativamente, e que durante essa etapa a argamassa teria facilidade para ser aplicada em uma situação real, aumentando a produtividade. Com o aumento da substituição da SCA pelo cimento Portland, essa etapa é reduzida, necessitando de um aumento na carga aplicada para deformação do material. Os autores ainda abordam que esses comportamentos podem ser atribuídos ao aumento do atrito gerado entre as partículas pela presença da SCA.

Figura 8 - Cargas de tração máxima.



Fonte: Adaptado de Marangon *et al.* (2021).

A Figura 8 apresenta a carga máxima de tração obtida para cada traço. Observa-se que a carga máxima de tração tende a aumentar à medida que o teor de SCA aumenta. Os autores destacam os seguintes pontos:

- Aos 120 e 180 minutos as argamassas com maiores teores de SCA apresentam um aumento na carga de tração e isso correu devido a hidratação demorada, que retardou o tempo de pega e manteve a consistência viscosa da mistura;
- As argamassas REF e SCA5 apresentaram cargas menores nas idades iniciais devido a uma menor capacidade de retenção de água, ocasionando uma maior

quantidade de água liberada e reduzindo o efeito da adesão. Para as idades posteriores, as cargas de tração dessas argamassas se aproximaram das demais devido ao processo de secagem da água, que permitiu uma melhor adesão entre a argamassa e a placa.

O efeito da sucção entre a argamassa e a placa aumenta quanto menor for a quantidade de água liberada e quanto maior for a quantidade de água retida. Dessa forma, com o aumento do teor da SCA, a capacidade de retenção de água da argamassa aumenta, diminuindo a exsudação e aumentando o efeito de adesão entre a placa e a argamassa (Marangon *et al.*, 2021).

Por fim, os autores concluem que as argamassas estudadas com 5% de SCA podem ser misturadas e repousadas por pelo menos 120 minutos para serem aplicadas. Para argamassas com maiores teores de SCA, é possível aplicá-las logo após a mistura devido a sua maior capacidade de retenção de água, permitindo uma melhor adesão sem a perda de água para o substrato.

3 METODOLOGIA

No presente capítulo serão apresentadas todas as etapas realizadas durante desenvolvimento da pesquisa, os materiais utilizados para a produção das argamassas e o passo a passo de cada ensaio previsto no programa experimental.

3.1 Materiais e traços utilizados

Para a produção das argamassas foram utilizados os seguintes materiais:

- Areia Fina Calcária (AF);
- Areia Média (AM);
- Areia Grossa (AG);
- Filler calcário (Fi);
- Cal hidráulica (Cal);
- Cimento CP II – F 32 (Cim);
- Sílica de Casca do Arroz (SCA);
- Fibra de Polipropileno (FP).

Para a realização da pesquisa foram adicionados diferentes teores de fibras de polipropileno em traços já estudados por Marangon *et al.* (2021). Portanto, tendo esse trabalho como referência, definiu-se através das conclusões dos autores as porcentagens de 5% e 30% de SCA em relação ao cimento Portland, onde foi citado que argamassas com 5% de SCA podem ser repousadas após a mistura por ao menos 120 minutos antes da aplicação, enquanto argamassas com maiores porcentagens de SCA podem ser aplicadas logo após a mistura. Dessa forma, conservou-se para todas argamassas a relação de água por materiais cimentícios em 0,71 de modo a não influenciar nos resultados reológicos. O traço referência analisado tem aproximadamente 8 MPa de resistência à compressão e foi produzido sem a substituição da sílica de casca do arroz pelo cimento Portland ou adição de fibras de polipropileno. A Tabela 6 apresenta as porcentagens das substituições de SCA utilizadas e da adição de fibras de polipropileno em relação ao volume da argamassa e a Figura 9 o programa experimental do estudo.

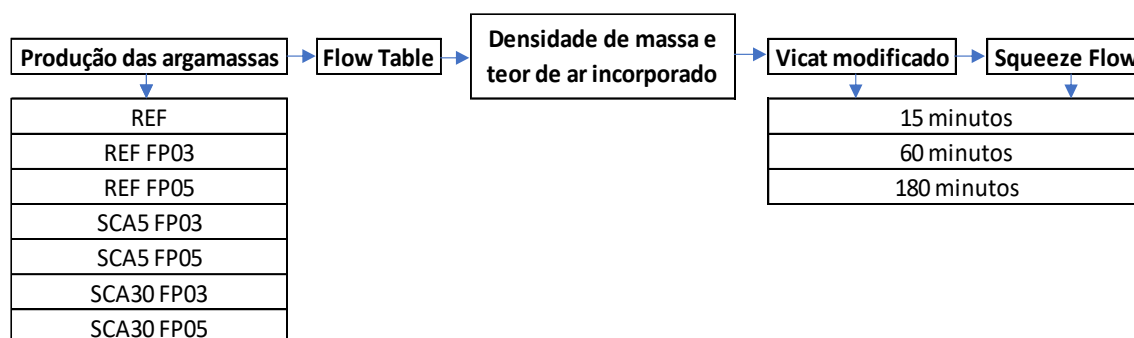
Tabela 6 - Traços com porcentagens da substituição de SCA por cimento Portland e teor de fibra de polipropileno utilizados.

Identificação	Cim (%)	SCA (%)	FP (%)	Traço
				cim:SCA:cal:AF:AM:AG:Fi:FP
REF	100	0	0	1 : 0 : 1,2 : 2,83 : 1,58 : 1 : 0,92 : 0
REF FP03	100	0	0,3	1 : 0 : 1,2 : 2,83 : 1,58 : 1 : 0,92 : 0,3*
REF FP05	100	0	0,5	0,95 : 0 : 1,2 : 2,83 : 1,58 : 1 : 0,92 : 0,5*
SCA5 FP03	95	5	0,3	0,95 : 0,05 : 1,2 : 2,83 : 1,58 : 1 : 0,92 : 0,3*
SCA5 FP05	95	5	0,5	0,95 : 0,05 : 1,2 : 2,83 : 1,58 : 1 : 0,92 : 0,5*
SCA30 FP03	70	30	0,3	0,7 : 0,3 : 1,2 : 2,83 : 1,58 : 1 : 0,92 : 0,3*
SCA30 FP05	70	30	0,5	0,7 : 0,3 : 1,2 : 2,83 : 1,58 : 1 : 0,92 : 0,5*

*em relação ao volume total da argamassa.

Fonte: Elaboração própria.

Figura 9 - Programa experimental.



Fonte: Elaboração própria.

3.2 Caracterização dos materiais

3.2.1 Composição granulométrica dos agregados miúdos

A composição granulométrica é de fundamental importância pois através dela é possível realizar dosagens eficientes para melhores propriedades futuras das argamassas, como trabalhabilidade e as resistências no estado endurecido.

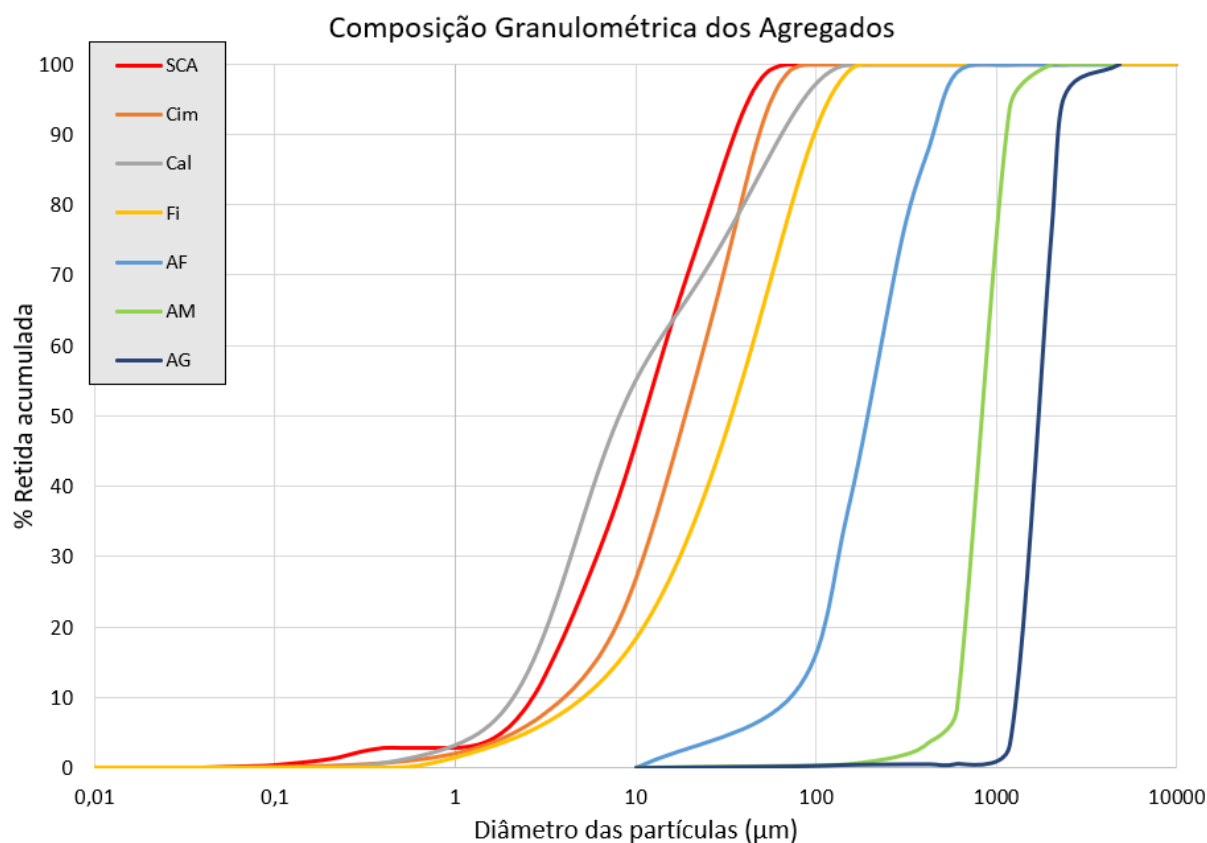
A caracterização dos agregados miúdos foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para a realização do procedimento foram utilizadas peneiras da série normal e intermediária com tampa e fundo, balança de precisão de 0,1g e estufa capaz de manter a temperatura no intervalo de $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.

3.2.2 Composição granulométrica dos materiais finos

As granulometrias do cimento Portland, sílica de casca do arroz, cal hidráulica e filler calcário foram realizadas através da difração de raios laser no laboratório da UNIPAMPA, campus Uruguaiana.

A Figura 10 apresenta as curvas de composição granulométrica dos agregados miúdos (areia fina, areia média e areia grossa) e dos materiais finos (cimento Portland, sílica da casca do arroz, cal hidráulica e filler calcário).

Figura 10 – Curvas de composição granulométrica.



3.2.3 Fibra de polipropileno

As fibras de polipropileno (Figura 11) utilizadas foram do tipo monofilamento de 6 mm de comprimento. A fibra foi produzida pela empresa NeoMatex e suas especificações estão dispostas na tabela 7.

Tabela 7 - Especificações técnicas fibra de polipropileno.

NEOFIBRA MF 6MM	
Matéria prima	100% polipropileno
Massa específica	0,91 g/cm ³
Diâmetro	12 µm
Comprimento	6 mm
Tenacidade	865 MPa
Módulo de elasticidade	9 GPa

Fonte: Dados disponibilizados pelo fabricante.

Figura 11 - Fibras de polipropileno.



Fonte: NeoMatex.

3.3 Mistura das argamassas

A mistura dos materiais para produção das argamassas foi realizada de acordo com o método descrito pela NBR 7215 (ABNT, 2019). Utilizou-se um misturador mecânico com duas velocidades, alta e baixa, uma cuba de aço inoxidável com capacidade de até 5 litros, com uma pá de metal que gira em torno de si mesma e em movimento planetário ao redor do eixo da cuba. A balança utilizada para a pesagem dos materiais conta com uma resolução de 0,1g.

Com a pesagem dos materiais realizada, primeiramente adicionou-se na cuba toda a quantidade de água e em seguida os materiais finos, após isso, no momento que os materiais entraram em contato com a água, o cronometro foi acionado e o misturador ligado por 30 segundos na velocidade baixa. Após esse tempo, sem parar o misturador, colocou-se as areias de modo gradual durante 30 segundos. Com as

areias adicionadas, a velocidade do misturador foi alterada para alta e realizou-se a mistura por mais 30 segundos, após esse tempo, o misturador foi desligado por 90 segundos. Nos primeiros 30 segundos com o misturador desligado, com o auxílio de uma espátula, foi raspada a argamassa que ficou aderida a borda da cuba e nesse mesmo intervalo foi adicionada a porcentagem de fibra de polipropileno definida para a mistura. Nos 60 segundos restantes a argamassa ficou em repouso na cuba. 90 segundos após o misturador ter sido desligado, o mesmo foi acionado na velocidade alta por mais 60 segundos, dessa forma, finalizando o processo de mistura. A Figura 12 apresenta imagens do processo de mistura das argamassas.

Figura 12 – Etapas do processo de mistura das argamassas; (a) materiais sendo inseridos na cuba; (b) materiais durante o processo de mistura.



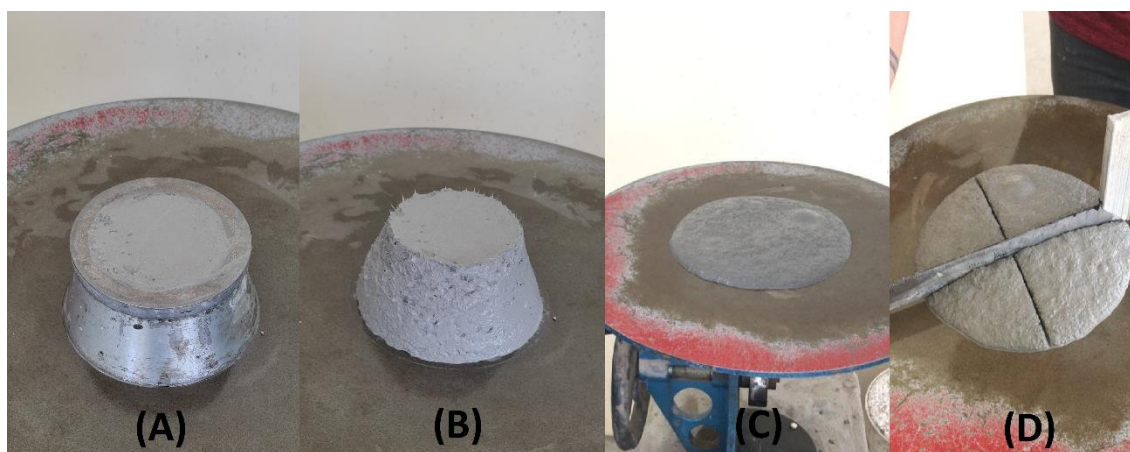
Fonte: Elaboração própria.

3.4 Determinação do índice de consistência (Flow Table)

Para a determinação do índice de consistência das argamassas foram seguidas as prescrições da NBR 13276 (ABNT, 2016). Antes de iniciar o ensaio foi realizada a limpeza e o umedecimento da mesa e do molde troncônico. Após isso, com o molde centralizado sobre a mesa, o molde foi preenchido com a argamassa em três sucessivas camadas com alturas aproximadamente iguais e então foi aplicado sobre as camadas, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com o soquete metálico, dessa forma, garantindo que a argamassa ficasse distribuída uniformemente. Para a remoção do material excedente foi realizado o rasamento da argamassa com uma régua metálica antes da retirada do molde. Em sequência, retirou-se o molde verticalmente e foram

conferidas 30 quedas em 30 segundos na mesa através do acionamento da manivela. Imediatamente após a última queda da mesa, realizou-se a leitura das amostras em três medidas de diâmetros distintos ao redor do perímetro da argamassa. A Figura 13 apresenta as etapas do ensaio de Flow Table.

Figura 13 – Etapas do ensaio de Flow Table; (a) amostra no molde para o ensaio; (b) amostra após a retirada do molde; (c) amostra após 30 golpes; (d) medições realizadas em cruz.



Fonte: Elaboração própria.

3.5 Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado

Para a determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas seguiu-se as diretrizes dispostas na NBR 13278 (ABNT, 2005). Inicialmente pesou-se o recipiente vazio (m_V) e o recipiente com água destilada (m_A), dessa forma, através da Equação 3 determinou-se o volume recipiente cilíndrico (v_R) utilizado.

$$v_R = m_A - m_V \quad (3)$$

Após a realização das pesagens, o procedimento consistiu em sequentemente a realização da mistura da argamassa adicionar ao recipiente metálico três camadas de alturas aproximadamente iguais e em cada camada aplicar 20 golpes ao longo do perímetro da argamassa. Após isso, foram efetuadas 3 quedas do recipiente metálico de modo que fossem removidos os vazios entre a argamassa e a parede do recipiente. Por fim, realizou-se o rasamento do recipiente com uma espátula e foi pesada a massa

do molde com a argamassa. O cálculo da densidade da massa foi realizado através da Equação 4:

$$d = \frac{m_C - m_V}{v_R} 1000 \quad (4)$$

Sendo:

d = densidade de massa (kg/m^3)

m_C = massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio (g)

m_V = massa do recipiente cilíndrico vazio (g)

v_R = volume do recipiente cilíndrico (cm^3)

A Figura 14 apresenta etapas do ensaio para determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado.

Figura 14 – Pesagem recipiente (a) vazio; (b) com água destilada; (c) com argamassa.



Fonte: Elaboração própria.

Com os resultados da densidade de massa realizou-se o cálculo do teor de ar incorporado das argamassas, em porcentagem, através da Equação 5:

$$A = 100 \left(1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad (5)$$

Sendo:

A = teor de ar incorporado na argamassa (%)

d = densidade de massa da argamassa (g/cm^3)

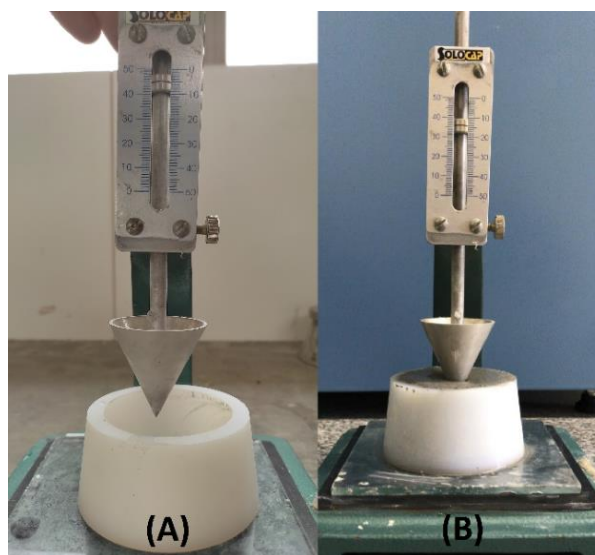
d_t = densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios (g/cm^3)

3.6 Ensaio de Vicat Modificado

O ensaio de Vicat modificado foi realizado de acordo as prescrições da NBR 14399 (ABNT, 1999) e consiste em realizar a medição da penetração de uma sonda metálica em uma amostra contida em um molde troncônico. O ensaio de Vicat Modificado foi realizado para diferentes idades, sendo 15, 60 e 180 minutos após o início da mistura dos materiais.

Inicialmente preencheu-se um molde troncônico posicionado sobre uma placa de vidro disposta sobre uma superfície plana e com isso foram realizados suaves golpes na placa de vidro de modo a promover a saída de eventuais bolhas de ar retidas na pasta. A preparação do molde para o ensaio foi finalizada com a realização da rasadura com o auxílio de uma espátula. Dessa forma, o ensaio foi realizado soltando a sonda em queda livre e os dados foram obtidos através da leitura da penetração da sonda (em milímetros) na argamassa após 30 segundos. A Figura 15 apresenta o aparelho utilizado e a amostra sendo ensaiada.

Figura 15 – (a) aparelho de Vicat Modificado; (b) amostra durante o ensaio.



Fonte: Elaboração própria.

3.7 Ensaio de Squeeze Flow Modificado

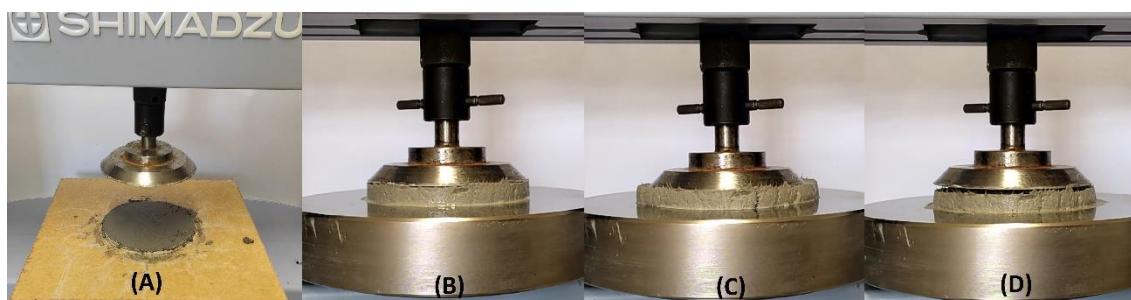
Para os ensaios de Squeeze Flow Modificado foi utilizada como referência a NBR 15839 (ABNT, 2010) e o método proposto por Marangon *et al.* (2021). De modo semelhante ao ensaio de Vicat Modificado, os ensaios de Squeeze Flow Modificado

também foram realizados para as idades de 15, 60 e 180 minutos. Para realização do ensaio foi utilizada uma prensa Shimadzu AGS-X com capacidade de carga de 5kN.

A preparação da amostra deu-se sobre a placa inferior com o auxílio de um gabarito de 100mm de diâmetro interno e 10mm de altura. Com uma espátula, a argamassa foi inserida e acomodada no gabarito de modo que fosse evitada a compactação da amostra, após isso, realizou-se o rasamento da superfície com a espátula e a retirada do gabarito.

Com a amostra preparada, a placa superior, que possui o mesmo diâmetro do gabarito, foi descida até que se aproximasse da amostra, sempre com cuidado para que não ocorresse a compactação do material antes do início do ensaio. Por fim, a célula de carga e o deslocamento foram zerados e foi dado início ao ensaio. Para a realização do ensaio utilizou-se a velocidade de deslocamento de 0,1 mm/s e a aplicação do esforço de compressão até que a amostra apresentasse 1000N de resistência ou 9mm de deslocamento. Após isso, a amostra foi descarregada e verificado o esforço de tração até que a placa não estivesse mais em contato com a amostra. Os ensaios de Squeeze Flow Modificado foram gravados por um aparelho celular Redmi Note 10 e a Figura 16 (b), (c) e (d) apresenta imagens retiradas das gravações.

Figura 16 – Etapas do ensaio de Squeeze Flow; (a) preparação da amostra; (b) amostra pronta para ser ensaiada; (c) amostra ao final do processo de compressão; (d) amostra após retirada da carga.

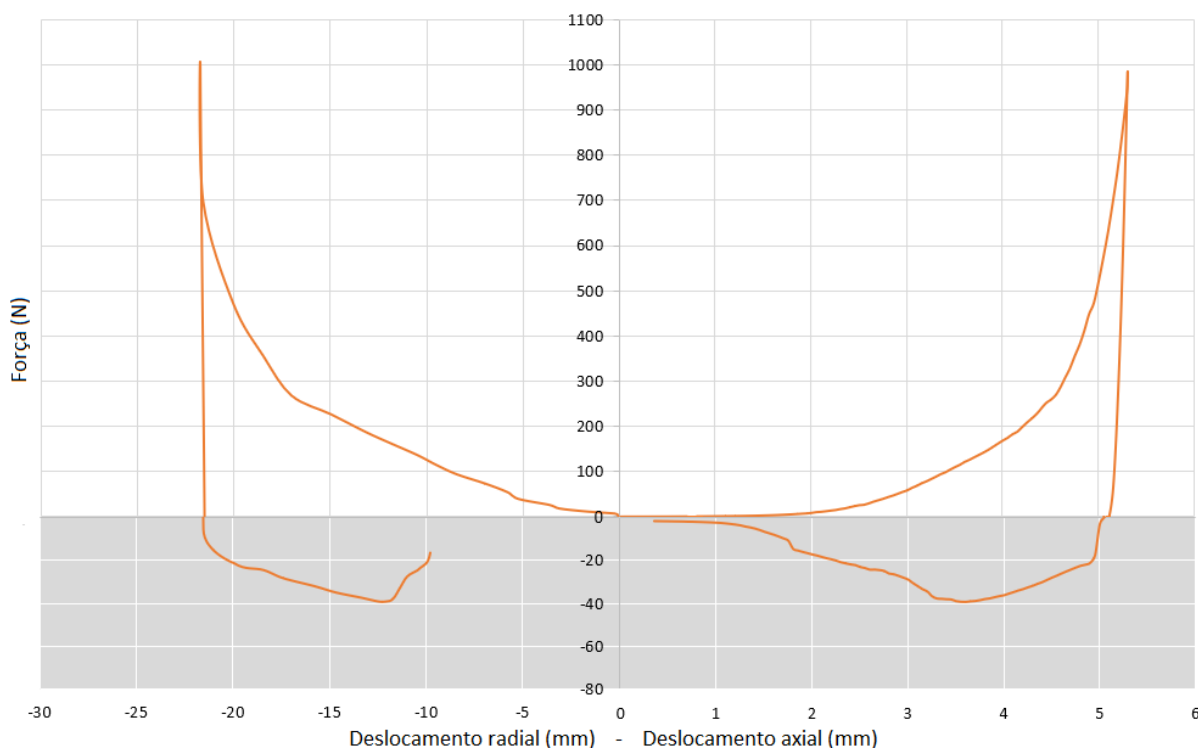


Fonte: Elaboração própria.

De posse das gravações, realizou-se a análise dos deslocamentos radiais das amostras através do processamento de imagens no programa ImageJ. No software, tendo a placa inferior como referência, medindo 198 mm, inicialmente foi realizada a calibração para medição dos deslocamentos e com isso mediu-se o deslocamento

radial das amostras a cada 2 segundos de ensaio com o objetivo de obter dados suficientes para traçar uma curva que representasse adequadamente o comportamento do material. Assim, os resultados do ensaio de Squeeze Flow foram expressos pela curva de carga em relação ao deslocamento axial, com os dados retirados da prensa Shimadzu AGS-X, e da carga em relação ao deslocamento radial, com as medições obtidas através da análise usando ImageJ. A Figura 17 apresenta um exemplo de como ficaram as curvas com os deslocamentos. A esquerda do gráfico, o deslocamento radial, e a direita, o axial, ambos em relação a força aplicada na amostra.

Figura 17 - Exemplo das curvas obtidas através do ensaio de Squeeze Flow.

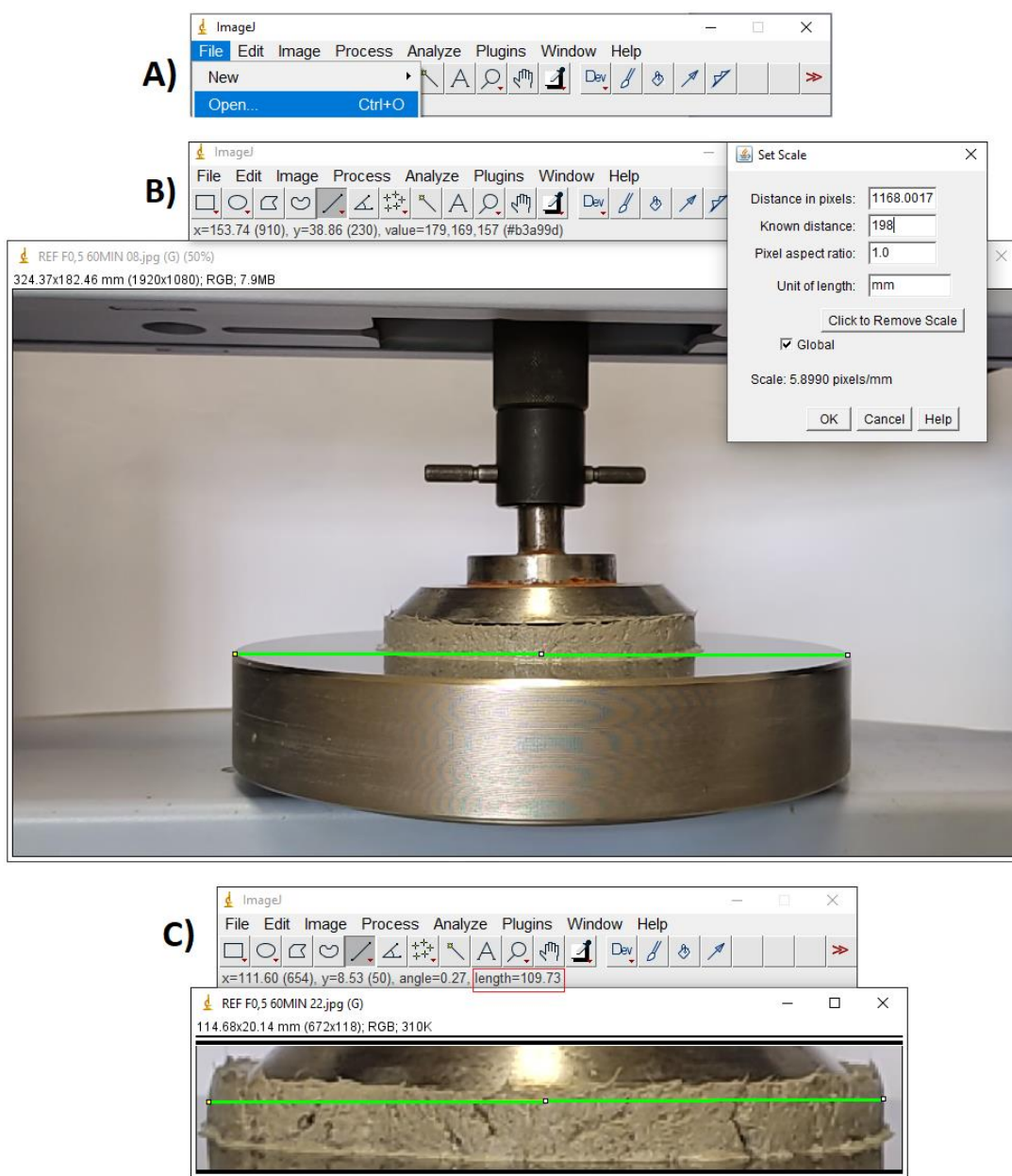


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 18 apresenta como foram realizadas as medições no ImageJ. Ao abrir o programa é necessário primeiramente clicar na ferramenta “File” e na sequência em “Open”, como representado na Figura 18 (a). Assim, será aberta a janela para a escolha da imagem que será utilizada para calibração. Com a imagem aberta, é necessário selecionar o comando “Straight” e traçar a linha no local que é de comprimento conhecido. Com a linha traçada, clica-se na ferramenta “Analyze” e na sequência em “Set Scale”, assim, abrirá uma janela como representado a direita da

Figura 18 (b). Assim, em “Known Distante” insere-se a distância da referência utilizada para calibração, nesse caso, a da placa inferior da máquina de ensaios que mede 198mm, e após isso é necessário colocar a unidade em que se está trabalhando em “Unit of length”, marcar a caixa “Global” e clicar em “Ok”. Com isso, basta abrir as imagens que devem ser analisadas e realizar as medições através do comando “Straight”, como representado na Figura 17 (c). A interface do programa mostrará o comprimento que está sendo medido na unidade inserida, nesse caso, em milímetros.

Figura 18 – Processo de utilização do ImageJ; (a) Escolha da imagem a ser calibrada; (b) Calibração no ImageJ; (c) Medição do deslocamento.



Fonte: Elaboração própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão descritos os resultados obtidos através da metodologia exposta no capítulo anterior. Nos resultados apresentados, a fim de fazer uma comparação com o traço referência, sem adição de fibra de polipropileno e SCA, os dados do traço REF foram retirados do estudo de Marangon *et al.* (2021).

4.1 Flow Table

A tabela 8 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios de consistência (Flow Table) e os resultados obtidos por Klimaczewski (2017) a fim de fazer uma comparação da influência da SCA nos espalhamentos encontrados e evidenciar a atuação das fibras de polipropileno no comportamento das argamassas.

Tabela 8 - Resultados de consistência obtidos com o ensaio de Flow Table.

Traço	Flow Table (mm)	DP	CV (%)
REF	283,20	1,40	0,49
REF FP03	244,33	2,70	1,11
REF FP05	214,67	0,43	0,20
SCA5 FP03	256,33	3,07	1,20
SCA5 FP05	220,33	0,43	0,20
SCA30 FP03	234,33	4,47	1,91
SCA30 FP05	210,67	0,86	0,41
REF - Klimaczewski (2017)	252,50	-	-
SCA5 - Klimaczewski (2017)	267,50	-	-
SCA30 - Klimaczewski (2017)	238,50	-	-

DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de Variação

Fonte: Elaboração própria.

Em relação ao traço REF, todos os traços com adição de fibra de polipropileno apresentaram reduções de espalhamento. O traço REF FP03 apresentou uma redução de 15,9% em relação ao REF, enquanto o REF FP05 reduziu 31,9%. Essas reduções são atribuídas a diminuição da densidade de empacotamento causada na interação do agregado com a fibra devido as suas geometrias distintas e as fibras estarem restringindo a movimentação das argamassas. O aumento de 0,3% para 0,5% de fibra em relação ao volume da argamassa reduziu em 16% o espalhamento da amostra.

Em seus estudos, Klimaczewski (2017) concluiu que argamassas que utilizam 5% de SCA em relação ao cimento Portland tendem a melhorar a trabalhabilidade da mistura. O mesmo comportamento foi observado para os traços estudados com adições de fibra de polipropileno. Klimaczewski (2017) verificou um aumento de 5,7% no espalhamento para a adição de 5% de SCA em relação ao traço referência. No presente estudo, comparando os traços REF FP03 e SCA5 FP03, o SCA5 FP03 apresentou um espalhamento 4,9% maior. Em comparação com os resultados obtidos por Klimaczewski (2017), a fibra contribuiu em 0,8% na redução do espalhamento. Comparando os traços REF FP05 e SCA5 FP05, o SCA5 FP05 apresentou um espalhamento 2,6% maior, dessa forma, a fibra causou uma redução de 3,1% no espalhamento em comparação com os resultados obtidos por Klimaczewski (2017).

Para adições de 30% de SCA, Klimaczewski (2017) encontrou uma redução no espalhamento de 5,8% em relação ao traço referência. O traço SCA30 FP03 reduziu 4,3% de seu espalhamento em relação ao REF FP03, assim, a fibra contribuiu em 1,5% na redução do espalhamento. Para o traço SCA30 FP05, o espalhamento reduziu 1,9% em relação ao REF FP05, com isso, a fibra foi determinante em 3,9% da redução encontrada.

4.2 Vicat Modificado

Através do ensaio de Vicat modificado foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados de penetração obtidos com ensaio de Vicat Modificado para diferentes idades.

Traço	Penetração (mm)		
	15 minutos	60 minutos	180 minutos
REF	15,50	10,50	8,00
REF FP03	15,00	12,50	6,00
REF FP05	10,00	8,50	4,00
SCA5 FP03	14,50	13,00	8,50
SCA5 FP05	9,50	8,50	3,50
SCA30 FP03	13,00	12,00	5,00
SCA30 FP05	9,00	8,00	3,75

Fonte: Elaboração própria.

É possível verificar que todos os traços estudados com adição de fibra tiveram menores penetrações aos 15 minutos em relação ao traço REF e que as penetrações reduziram para idades maiores. Analisando individualmente cada traço, aos 60 minutos, todas penetrações foram menores que aos 15 minutos, e aos 180 minutos, todas penetrações foram menores que aos 60 minutos.

Os traços com 0,5% de adição de fibra apresentaram menores penetrações em relação aos traços com 0,3% para todos os tempos analisados. Em relação as adições de SCA, diferentemente do Flow Table, onde a consistência aumentou com 5% de SCA, no ensaio de Vicat Modificado as penetrações aos 15 minutos apresentaram leves reduções em relação aos traços referência com fibras. Aos 60 minutos a penetração no traço SCA5 FP03 aumentou em relação ao REF FP03, e ficou igual nos traços SCA5 FP05 e REF FP05, evidenciando que a adição de 5% de SCA em relação ao cimento Portland não tende a prejudicar os valores de consistência da argamassa.

Os traços com 30% de SCA tiveram menores penetrações, assim como menores espalhamentos encontrados no Flow Table. No ensaio de Vicat Modificado essas reduções são justificadas devido a dispersão das fibras, que podem formar um arranjo na amostra e dificultar a penetração da sonda metálica e também a SCA apresentar uma estrutura porosa e absorver a água da mistura, deixando a sua superfície seca e reduzindo as penetrações.

Analisando os tempos em aberto, exceto o traço REF, sem adição de fibra e SCA, todos os traços apresentaram pequenas variações de penetração após 60 minutos em relação aos 15 minutos, assim, verificou-se que para esse tempo em aberto a argamassa ainda oferece uma boa trabalhabilidade para manuseio e aplicação. No que tange ao tempo de análise de 180 minutos, considera-se que as baixas penetrações podem dificultar a aplicação da argamassa em obra.

4.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de densidade de massa e teor de ar incorporado.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de densidade de massa e teor de ar incorporado.

Traço	Densidade da massa (Kg/m ³)	Teor de ar incorporado (%)
REF	2187,74	1
REF FP03	2115,53	3
REF FP05	2098,10	4
SCA5 FP03	2129,58	2
SCA5 FP05	2064,53	5
SCA30 FP03	2070,77	4
SCA30 FP05	2029,66	6

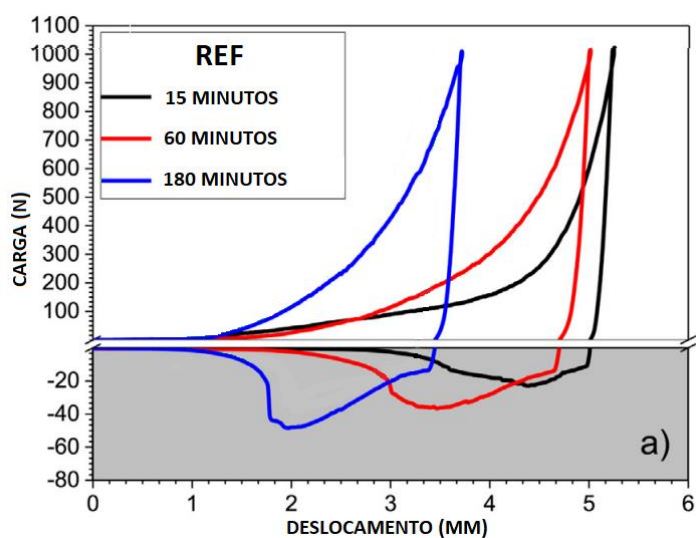
Fonte: Elaboração própria.

Com os resultados obtidos verificou-se que a adição de fibras reduziu a densidade de massa da mistura e isso é justificado pela massa específica da fibra de 0,91 g/cm³. Foi constatado que à medida que o teor de sílica aumentou, a densidade de massa diminuiu e isso ocorreu devido a SCA ter uma massa específica menor que a do cimento Portland. Em relação ao teor de ar incorporado, foi verificado que com o aumento do teor de fibra, de 0,3% para 0,5%, o teor de ar incorporado aumentou e isso se deve ao menor empacotamento das partículas causado pelos maiores teores de fibras. Para as adições de SCA, verificou-se que à medida que a SCA foi aumentada, os teores de ar incorporado aumentaram, exceto para o traço SCA5 FP03 de fibra, assim, evidencia-se que a adição de 5% de SCA pode aumentar o empacotamento das partículas e melhorar as propriedades da argamassa, assim como verificado nos ensaios de Flow Table e Vicat Modificado.

4.4 Squeeze Flow Modificado

A Figura 19 apresenta o gráfico com o deslocamento axial em relação a força aplicada obtido por Marangon *et al.* (2021) para o traço REF.

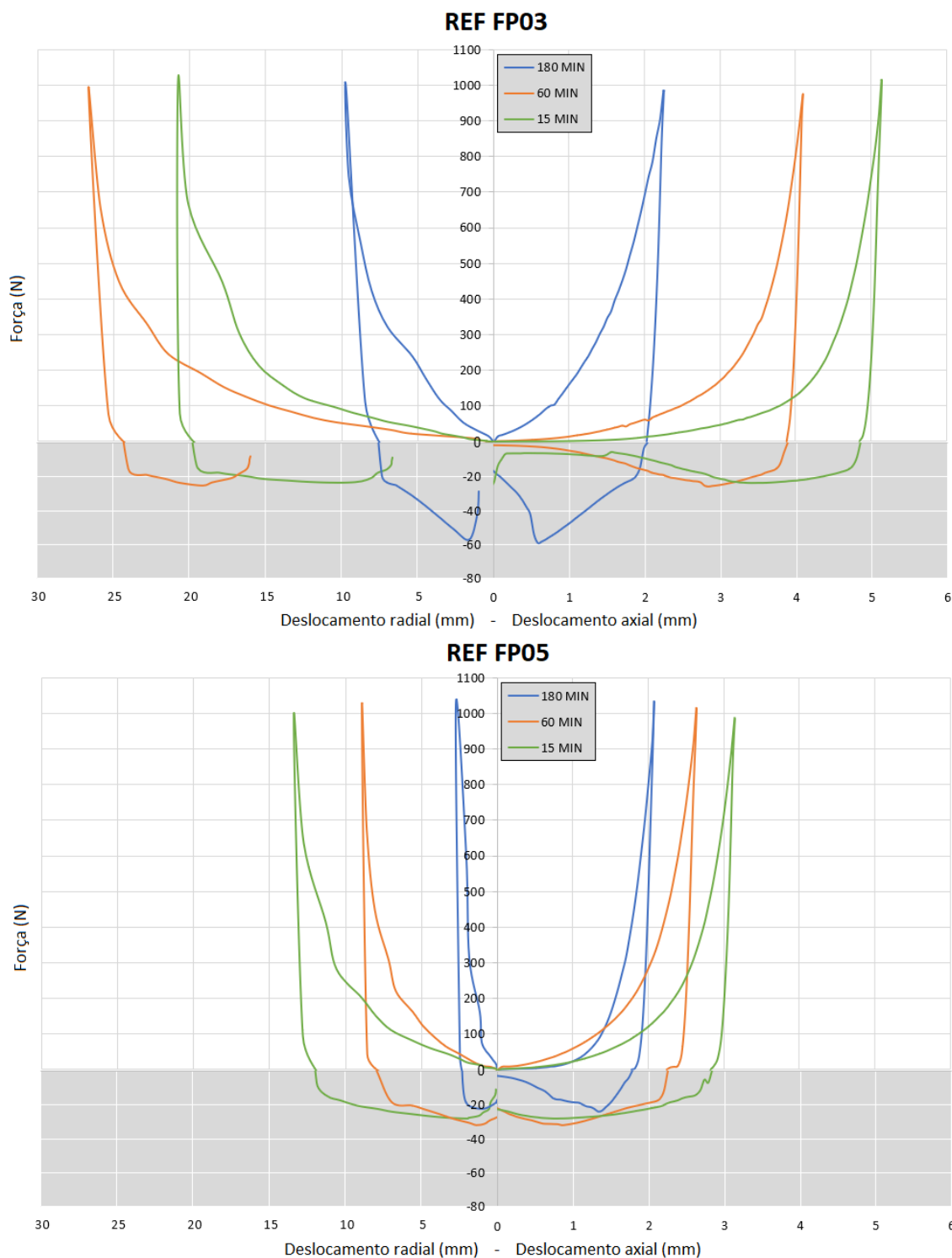
Figura 19 – Curvas obtidas através do ensaio de Squeeze Flow modificado para o traço REF.



Fonte: Adaptado de Marangon *et al.* (2021).

A Figura 20 apresenta o gráfico com os deslocamentos radial e axial em relação a força aplicada nos ensaios de Squeeze Flow para os traços com fibra e sem adição de SCA.

Figura 20 – Curvas obtidas através dos ensaios de Squeeze Flow Modificado para os traços REF FP03 e REF FP05.

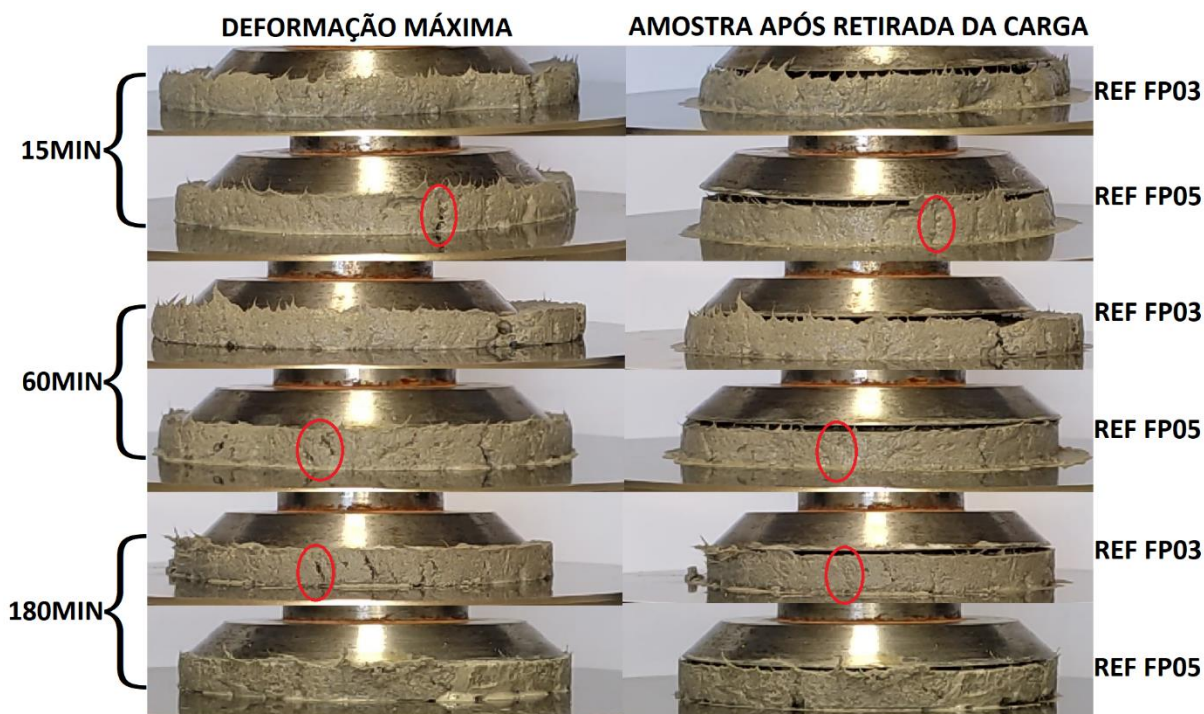


Fonte: Elaboração própria.

Observando os gráficos da Figura 20 evidencia-se a influência de diferentes porcentagens de fibra no comportamento das argamassas. As curvas mostram que no deslocamento axial, à medida que a fração volumétrica das fibras foi aumentada,

a argamassa apresentou maior resistência aos esforços de compressão, chegando à carga de 1000N em deslocamentos menores. No deslocamento radial, o comportamento segue o mesmo padrão do deslocamento axial, mostrando que a maior quantidade de fibras restringe a movimentação da amostra em ambos os sentidos. Através dos gráficos do traço REF FP03, verificou-se que aos 60 minutos a argamassa ainda apresenta uma boa trabalhabilidade, o que qualifica sua aplicação mesmo com esse tempo em aberto. Aos 180 minutos os deslocamentos ficaram reduzidos, o que poderia dificultar sua aplicação e manuseio. Destaca-se no traço REF FP05 a deformação mais elástica visualizada no deslocamento radial, onde em todas as idades a amostra apresentou capacidade de retornar praticamente a sua posição inicial após a retirada da carga. O traço com 0,3% de fibra não apresentou a mesma capacidade, tendo uma deformação plástica maior. A Figura 21 apresenta a comparação das deformações máximas das argamassas para a carga de 1000N e como as amostras ficaram após a retirada total da carga.

Figura 21 – Imagens das deformações máximas das argamassas e as amostras após retirada total da carga para os traços REF FP03 e REF FP05 para diferentes idades.

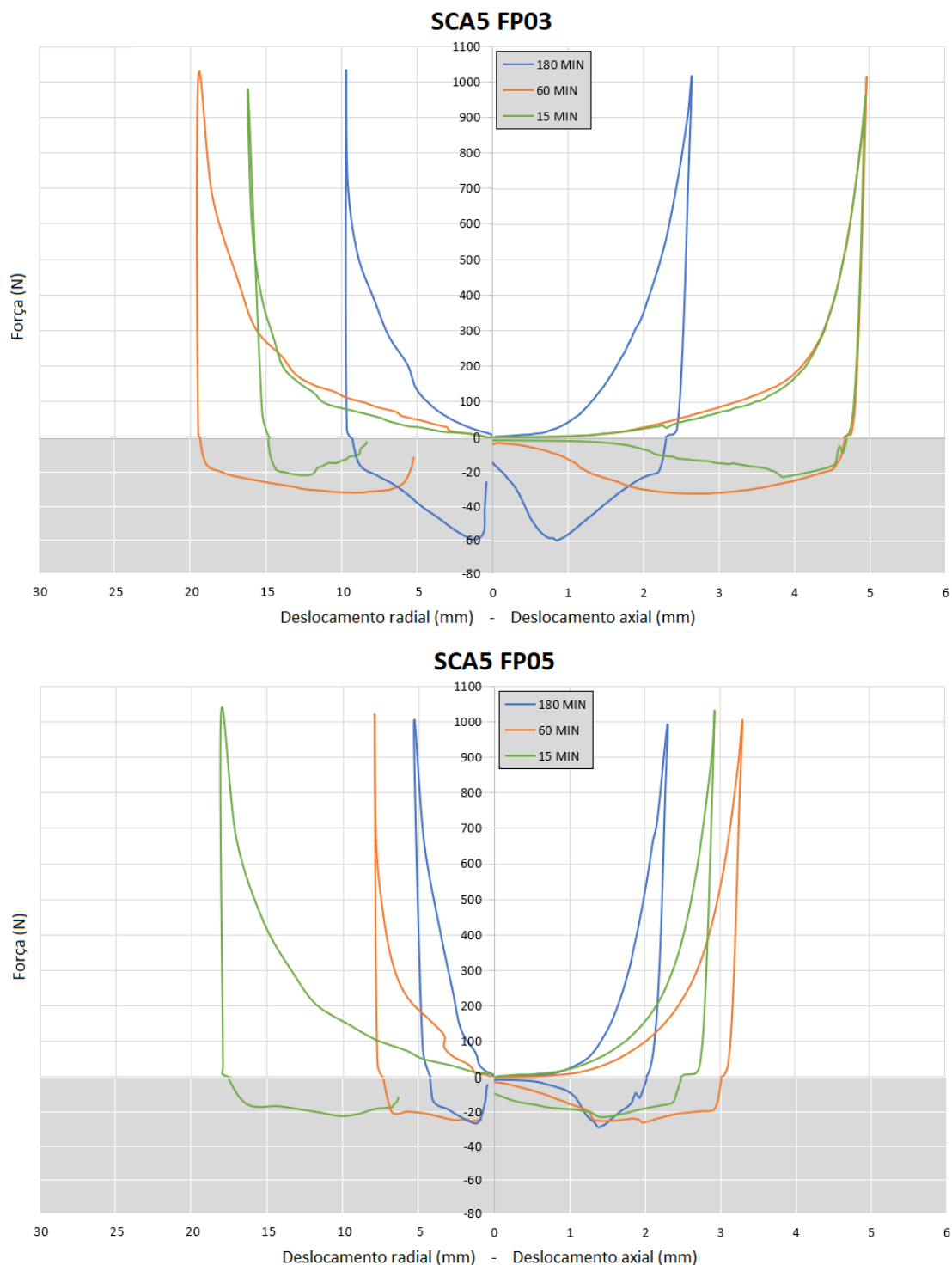


Fonte: Elaboração própria.

Como abordado anteriormente, através das imagens é possível perceber o comportamento mais elástico apresentado pelo traço REF FP05, que apesar de ter o deslocamento reduzido, praticamente voltou a sua posição inicial e apresentou um deslocamento radial ao final do ensaio praticamente nulo. Destaca-se nas imagens a capacidade das fibras de “costurar” as fissuras após a retirada da carga, tal fato ficou mais evidente no traço REF FP05 e isso é justificado pelo maior teor de fibra. Contudo, o traço com menor teor de fibra também apresenta, ainda que menor, a capacidade de fechar suas fissuras.

Na Figura 22 está representado o gráfico com os deslocamentos radial e axial em relação a força nos ensaios de Squeeze Flow para os traços com 5% de substituição de SCA em relação ao cimento.

Figura 22 - Curvas obtidas através dos ensaios de Squeeze Flow Modificado para os traços SCA5 FP03 e SCA5 FP05.

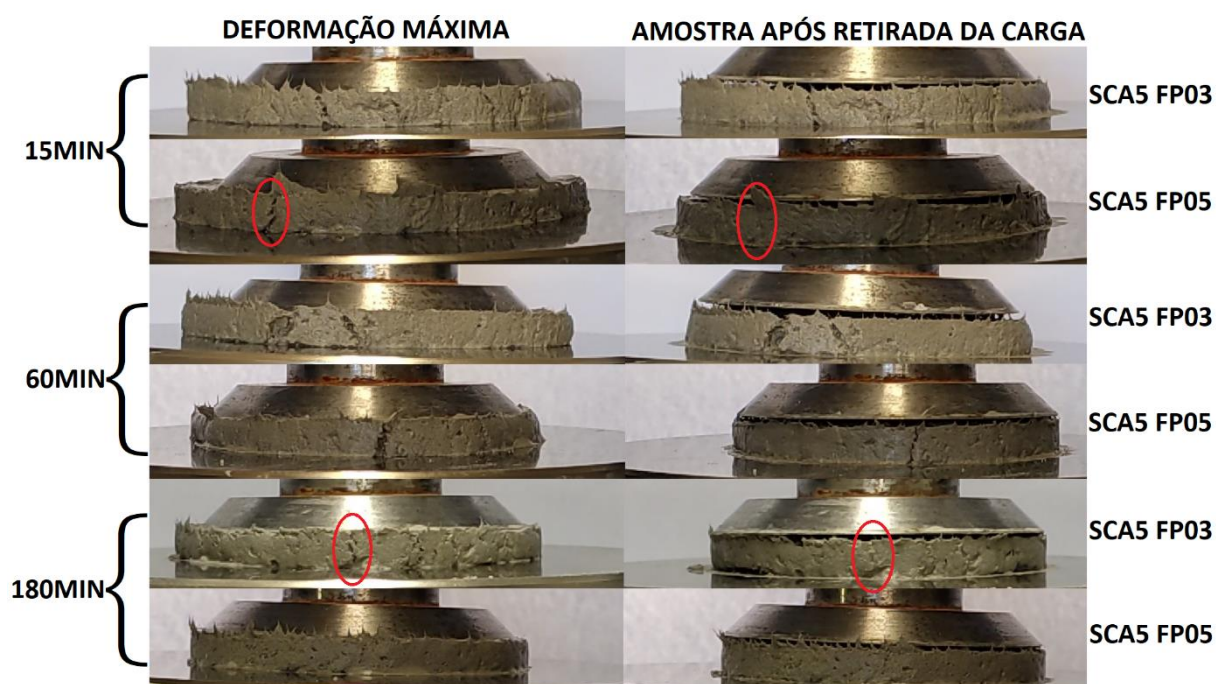


Fonte: Elaboração própria.

As curvas obtidas nos traços com 5% de adição de SCA corroboraram com os resultados encontrados para os ensaios de Flow Table e Vicat Modificado. É possível verificar que os deslocamentos não tiveram mudanças significativas em relação ao

traço sem adição de SCA, ainda que, com a adição de 0,5% de fibra, os deslocamentos axiais foram maiores em relação ao traço REF FP05, mostrando a tendência a melhor trabalhabilidade das argamassas com essa adição. Aos 60 minutos, no traço com 0,3% de fibra, o deslocamento axial ficou similar ao obtido aos 15 minutos e maior no deslocamento radial, mostrando a capacidade de espalhamento e adensamento para aplicação ainda 60 minutos após o preparo. Assim, a adição de maiores teores de fibras na matriz contribuiu para o aumento da viscosidade, o que pode dificultar sua aplicação com 0,5% de fibra em relação ao volume da argamassa. Para os tempos em aberto, foi verificado que aos 180 minutos a amostra apresentou grande enrijecimento, o que também dificultaria sua aplicação. A Figura 23 apresenta a comparação das deformações máximas das argamassas na carga de 1000N e como as amostras ficaram após a retirada total da carga.

Figura 23 - Imagens das deformações máximas das argamassas e as amostras após retirada total da carga para os traços SCA5 FP03 e SCA5 FP05 para diferentes idades.



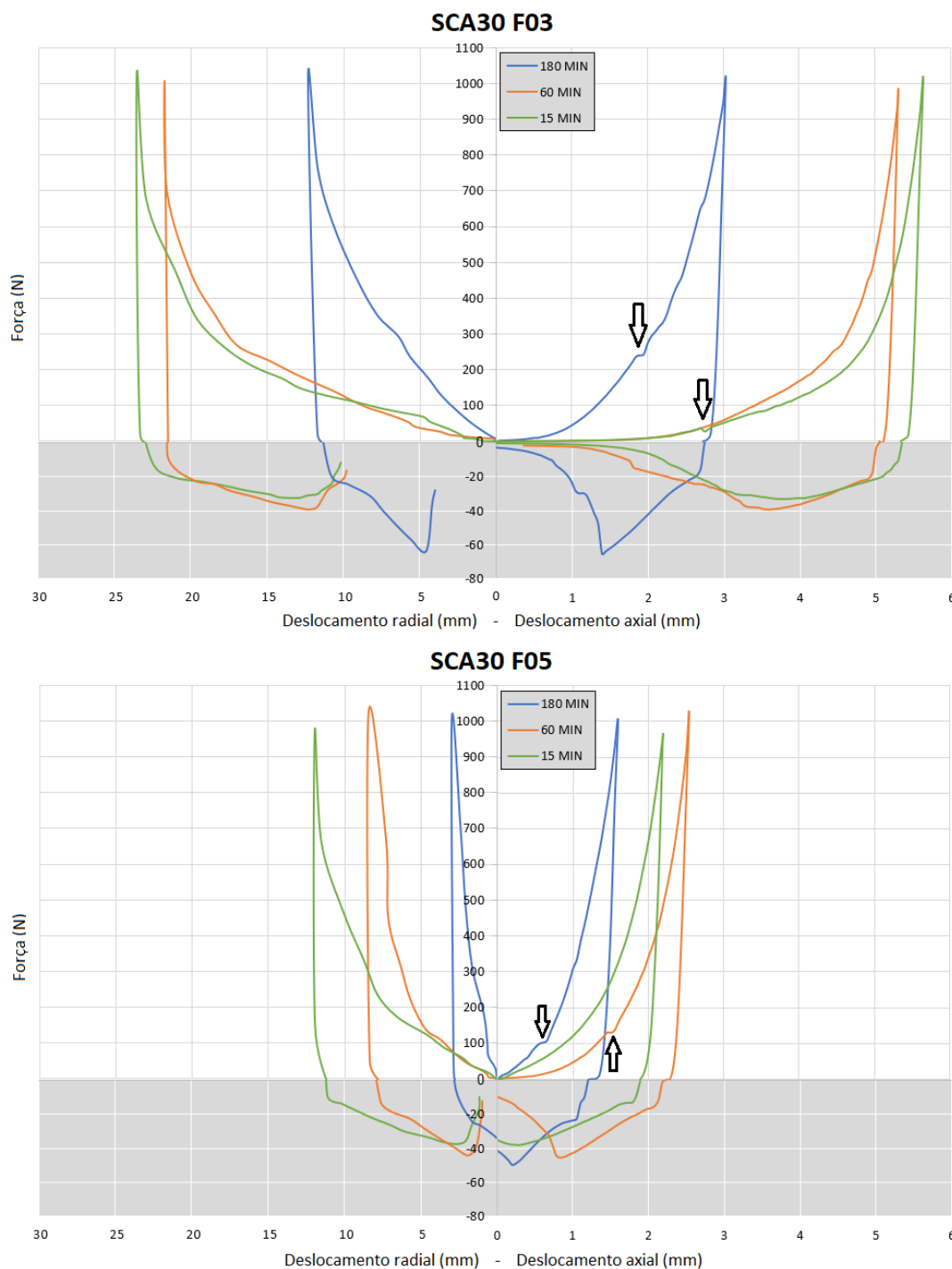
Fonte: Elaboração própria.

Através das imagens é possível visualizar a capacidade das fibras de fechar as fissuras abertas até o momento da máxima deformação, ainda que, aos 15 e 60 minutos, diversas fissuras não foram fechadas após a retirada da carga, assim, as

amostras sofreram deformações irrecuperáveis. As imagens, em conjunto com as curvas apresentadas, mostram que o traço com maior adição de fibra apresentou um comportamento elástico maior, assim como observado nos traços sem SCA. Também é possível destacar que aos 180 minutos, ao atingir a carga máxima de 1000N, as amostras apresentam baixas deformações para o traço SCA5 FP05, sem nenhuma abertura de fissura visível, evidenciando que, para esse tempo em aberto, a aplicação pode ser dificultada.

Na Figura 24 está disposto o gráfico com os deslocamentos radial e axial em relação a força aplicada nos ensaios de Squeeze Flow para os traços com 30% de substituição da SCA em relação ao cimento.

Figura 24 - Curvas obtidas através dos ensaios de Squeeze Flow Modificado para os traços SCA30 FP03 e SCA30 FP05.

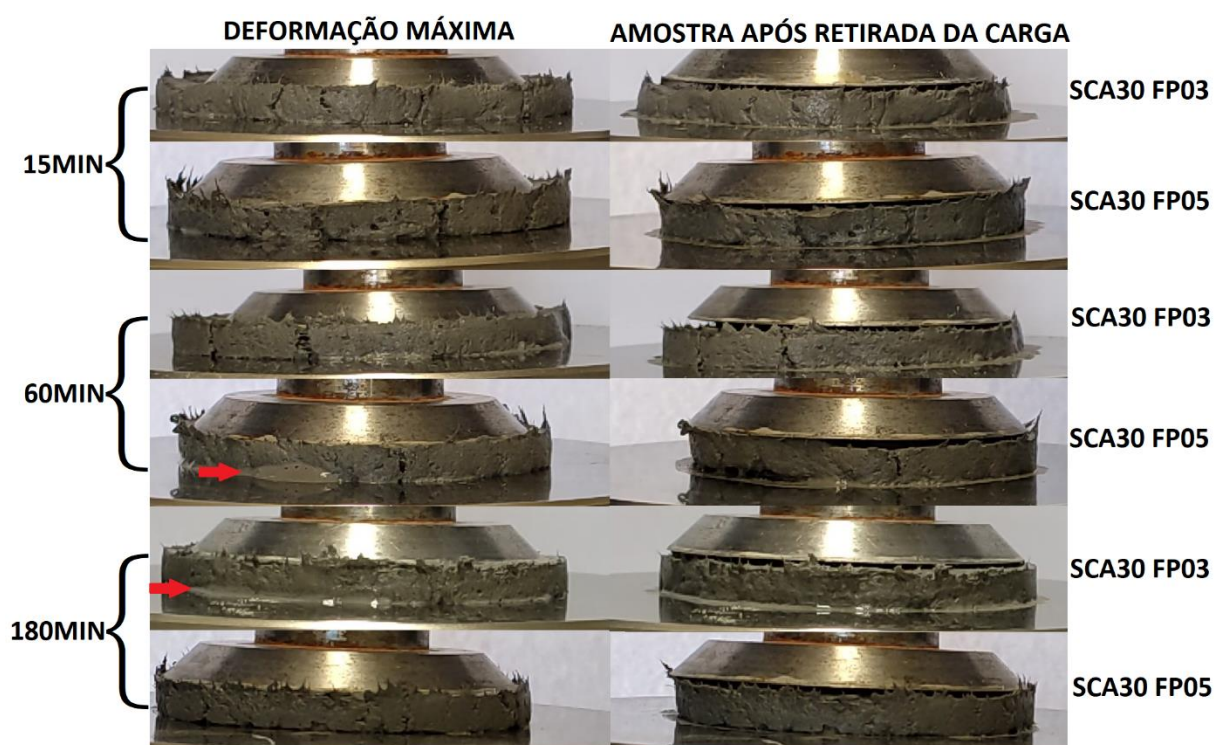


Fonte: Elaboração própria.

Com as curvas apresentadas na Figura 24 verificou-se que as fibras seguiram sendo o fator determinante para as mudanças nos deslocamentos. No ensaio de Flow Table e Vicat foi verificado que a adição de 30% de SCA reduziu, respectivamente, o espalhamento e penetração das amostras. O mesmo comportamento não foi

observado no traço SCA30 FP03 durante os ensaios de Squeeze Flow, onde os deslocamentos se assemelharam ao traço REF FP03, sem nenhuma adição de SCA. No traço SCA30 FP05 foi verificado menos deslocamentos em relação a todos os outros traços, sem e com adição de 5% de SCA, porém, os menores deslocamentos justificam-se principalmente pelo maior teor de fibra. Dessa forma, a adição de maiores teores de fibra exige uma maior energia para que a amostra seja comprimida. Ademais, o comportamento dos gráficos SCA30 seguiu o padrão visto anteriormente, o deslocamento aos 60 minutos se assemelhou ao obtido aos 15 minutos e o traço com maior adição de fibra apresentou um comportamento elástico maior, retornando ao seu estado inicial após o final do ensaio. Nas setas indicadas na Figura 24, é possível observar algumas descontinuidades nas curvas e esse comportamento pode ter ocorrido devido a quebras de bolhas de ar estarem acontecendo no momento em que a amostra estava sendo comprimida. A Figura 25 apresenta a comparação das deformações máximas das argamassas na carga de 1000N e como as amostras ficaram após a retirada total da carga.

Figura 25 - Imagens das deformações máximas das argamassas e as amostras após retirada total da carga para os traços SCA30 FP03 e SCA30 FP05 para diferentes idades.



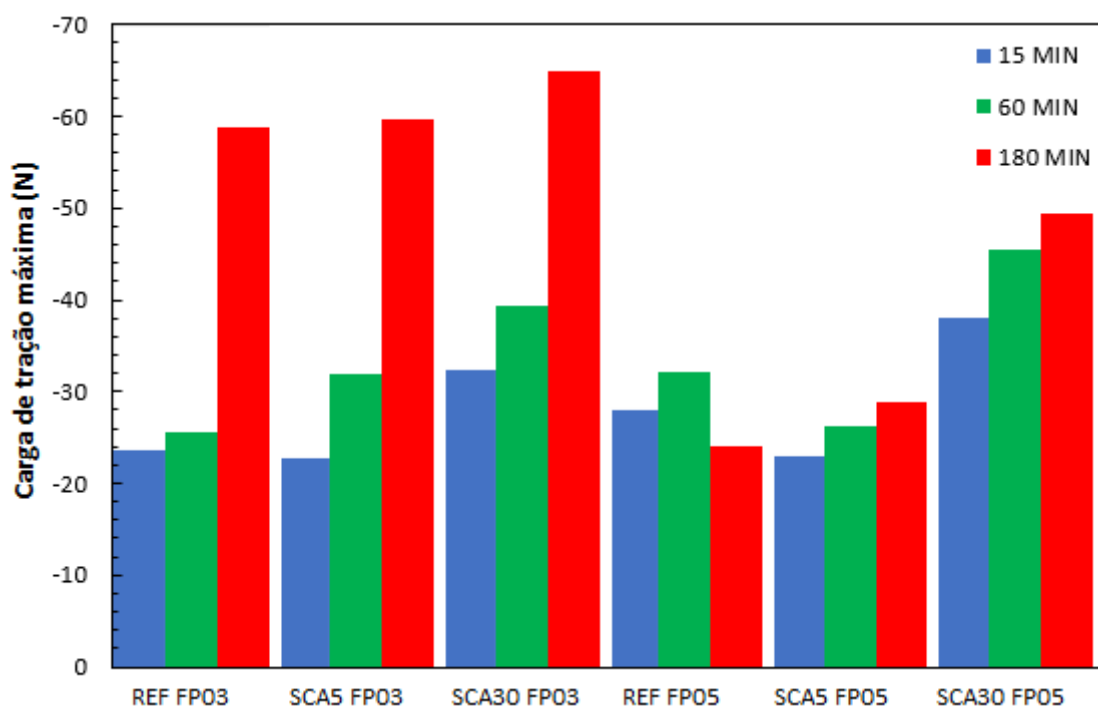
Fonte: Elaboração própria.

Nas imagens da Figura 25 é possível visualizar que as amostras apresentaram comportamento similar as apresentadas anteriormente para os traços sem e com 5% de SCA, onde é possível visualizar o fechamento de algumas fissuras, o comportamento mais elástico do traço com maior adição de fibra e a pouca deformação das amostras aos 180 minutos. Contudo, para os traços com 30% de SCA, conforme observado nas setas destacadas na imagem, houve a expulsão de uma maior quantidade de água para tempos em aberto de 60 e 180 minutos, o que não foi visualizado com tal clareza para menores concentrações de SCA. O fato é explicado devido a SCA em maior quantidade absorver maior quantidade de água através de sua estrutura porosa e com maiores tempos em aberto. Essa água retida na estrutura porosa da SCA é expulsa da amostra, formando pontos de concentração de água conforme observado nas imagens.

Em seus estudos, Marangon *et al.* (2021) encontrou para o traço REF as cargas de tração máximas, em Newton (N), de 23, 36 e 48 para os tempos de 15, 60 e 180 minutos, respectivamente.

A Figura 26 apresenta as cargas máximas de tração obtidas para os traços analisados.

Figura 26 - Cargas de tração máximas



Fonte: Elaboração própria.

Através da Figura 26 é possível visualizar que à medida que a porcentagem de SCA é aumentada na mistura, a carga de tração tende a aumentar. Esse comportamento foi o mesmo encontrado por Marangon *et al.* (2021) para traços estudados com diferentes porcentagens de SCA em relação ao cimento Portland. Isso se deve ao fato da SCA absorver a água da mistura devido a sua superfície porosa, assim, confirmando que adições de SCA tendem a aumentar adesão entre a argamassa e o substrato, como observado por Marangon *et al.* (2021). Os traços com maiores teores de fibra apresentaram maiores valores de tração em uma diferença pouco significativa para os traços REF FP03 e SCA30 FP03 aos 15 e 60 minutos, sendo nesse trabalho aparentemente os melhores tempos para a aplicação da argamassa. Também é possível visualizar que para tempos em aberto maiores, independente do traço, os valores de tração aumentam. Nesse estudo, aos 60 minutos, todos os traços estudados apresentam uma maior capacidade de adesão entre o substrato e a argamassa e consistência similar em relação aos 15 minutos, reiterando a possibilidade da utilização de argamassas após 60 minutos de repouso.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo a análise da influência da adição de diferentes teores de fibras de polipropileno no comportamento reológico em argamassas produzidas com substituições parciais do cimento Portland por sílica da casca do arroz. Desse modo, ao final dos procedimentos experimentais e baseado na análise dos resultados, foram possíveis alcançar as seguintes conclusões.

Em relação ao ensaio de Flow Table, foi verificado que os valores de espalhamento diminuem à medida que o teor de fibra de polipropileno é aumentado. Assim, a viscosidade de argamassa aumenta com maiores concentrações de fibra.

Para o ensaio de Vicat Modificado, constatou-se que os valores de penetração diminuíram conforme foi aumentada a porcentagem de fibra de polipropileno e para tempos em aberto maiores. Dessa forma, a tensão de escoamento da argamassa aumenta para maiores teores de fibra e maiores tempos em aberto.

Nos ensaios de densidade de massa e teor de ar incorporado verificou-se que a densidade de massa reduz para maiores teores de fibra e que os teores de ar incorporado aumentam à medida que maiores teores de fibras são incorporados à matriz.

Em relação aos deslocamentos radial e axial obtidos através do ensaio de Squeeze Flow Modificado, verificou-se que ambos seguem o mesmo padrão analisando individualmente cada traço e tempo em aberto, até mesmo quando a amostra está sob esforço de tração. Assim, como os deslocamentos se equivalem, é possível obter uma confiabilidade maior para os resultados encontrados.

Analisando os deslocamentos do Squeeze Flow Modificado de maneira conjunta, constatou-se que a fibra foi fator determinante para as mudanças no comportamento dos traços analisados. O maior teor de fibra reduziu os deslocamentos axial e radial das amostras, assim, indo ao encontro do que foi concluído no ensaio de Flow Table e Vicat Modificado, onde é verificado que a adição da fibra de polipropileno aumenta a viscosidade e a tensão de escoamento das argamassas. Para as diferentes idades de utilização da argamassa, foi verificado que independente da porcentagem de fibra adicionada ao compósito, a aplicação de argamassas após 180 minutos em repouso pode ser dificultada devido ao enrijecimento da amostra. Contudo, os deslocamentos mostraram que existem poucas variações aos 15 e 60

minutos, classificando os dois tempos como idades adequadas para manuseio e aplicação da argamassa.

Referente aos esforços de tração, os traços com maiores teores de fibra apresentaram valores levemente maiores para os tempos de 15 e 60 minutos, em tese, garantindo uma maior adesão da argamassa ao substrato. Em relação à influência dos tempos em aberto nos esforços de tração, constatou-se que argamassa repousadas por 60 minutos podem apresentar uma maior adesão com o substrato do que aos 15 minutos, e visto que ambos tempos apresentam deslocamentos similares, é possível concluir que as argamassas estudadas, se repousadas por 60 minutos, podem apresentar propriedades no estado endurecido melhores do que se fossem aplicadas 15 minutos após a mistura. Dessa forma, independentemente da adição de sílica da casca do arroz, a incorporação de 0,3% de fibra de polipropileno em relação ao volume da argamassa mantém a argamassa com trabalhabilidade suficiente para ser aplicada aos 15 e aos 60 minutos. Para maiores teores de fibra, a aplicação pode ser dificultada devido a maior dificuldade observada na compressão das amostras.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Comparar através de ensaios mecânicos as resistências de argamassas repousadas em 15 e 60 minutos para os traços estudados.
- Analisar com maior repetição de ensaios o comportamento reológico de argamassas com idades de 15 e 60 minutos.
- Aumentar as idades dos traços estudados, verificando as possibilidades de utilização aos 90 e 120 minutos.
- Analisar no estado fresco os traços estudados com maiores e menores teores de fibra de polipropileno.
- Verificar a viabilidade de aplicação de argamassas com maiores teores de fibra devido ao aumento da viscosidade à medida que o teor é aumentado.

REFERÊNCIAS

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

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278: Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14399: Cal hidratada para argamassas - Determinação da água da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, 1999.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15839: Argamassa de Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Caracterização Reológica pelo Método Squeeze-Flow**. Rio de Janeiro, 2010.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Redução na emissão de CO2 é sinônimo de competitividade na indústria global do cimento**. Disponível em: <<https://abcp.org.br/reducao-na-emissao-de-co2-e-sinonimo-de-competitividade-na-industria-global-do-cimento/>>. Acesso em: 18 de dezembro de 2021.

AGOPYAN, Anne K. *et al.* **Análise reológica de pastas para revestimento à base de gesso por squeeze-flow**. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas - I International Symposium on Mortar Technology, p. 144–157, 2005.

BECHE, Renata. **Avaliação de desempenho de argamassas modificadas com areia de PET e fibras de polipropileno**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2021.

BETIOLI, Murillo Andrea *et al.* **Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre, v. 9, n.4, p. 37-48, 2009.

BENTUR E MINDESS. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2ª edição. New York: Taylor e Francis Group, 2007. 601 p.

CARASEK, H. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Argamassas. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 886-936.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow**. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas - I International Symposium on Mortar Technology, p. 121–143, 2005.

CARDOSO, Fernando Alonso. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP. São Paulo, 2009.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Controle de Produção de Argamassas Industrializadas em Obra Empregando o Método de Penetração do Cone**. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa, 2007.

CORTESE, Nadine. **Estudo do comportamento reológico no tempo de argamassas com substituição de sílica de casca do arroz**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2019.

COSTA, Marienne do Rocio de Mello da. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2006.

GLATTHOR, A.; SCHWEIZER, D. **Rheological Lab Testing of Building Formulations**. ConChem Conference, Düsseldorf, 1994.

FARIA, Vivian. Brasil pode reciclar 98% dos resíduos da construção civil, mas só consegue dar conta de 21%. **Gazeta do Povo**. 30 de setembro de 2019. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/haus/sustentabilidade/brasil-pode-reciclar-98-dos-residuos-da-construcao-civil-mas-so-consegue-dar-conta-de-21/>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2021.

FERRARIS, Chiara F. **Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report**. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, v. 104, n. 5, p. 461-478, 1999.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2011.

FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. **Tecnologias e Materiais Alternativos de Construção**. 1ª edição. Editora UNICAMP, 2003. 331 p.

KLIMACZEWSKI, Felipe Augusto. **Avaliação da Reologia no Estado Fresco de Argamassas com Substituição de Cimento Portland por Cinza Volante, Sílica da Casca do Arroz e Metacaulim**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2017.

LUDWIG, Douglas Giongo. **Concreto com adição de cinza de casca de arroz**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari. Lajeado, 2014.

MARANGON, Ederli *et al.* **Mortars produced with an environmentally sustainable rice HUSK silica: Rheological properties**. Journal of Cleaner Production. v, 287. 2021.

MENDES, G. G.; MARTINS, R. P.; SILVA, D. M. G.; MARANGON, E.; OLIVEIRA, M. J. D.; **Durabilidade de concretos com adição de sílica da casca de arroz obtida em leiro fluidizado à penetração de íons cloretos**. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. Guimarães, Portugal, p. 697-707, 2014.

OLIVEIRA, Marcelo de Jesus Dias. **Avaliação do tempo de consolidação de argamassas colantes através de métodos reológicos**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Santa Maria, 2015.

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

TONELLO, Ismael. **Estudo do Comportamento Mecânico à Compressão e Flexão em Argamassas de Revestimento com Substituição Parcial de Cimento Portland por Sílica da Casca de Arroz, Cinza Volante e Metacaulim**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2017.

SABBATINI, Fernando Henrique. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria estrutural**. Boletim Técnico 02/86. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1986.

SANTOS, Alexandre Maneira dos. **Estudo de compósitos híbridos polipropileno / fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Curitiba, 2006.

SCHARAMM, Gebhard. **Reologia E Reometria: Fundamentos Teóricos E Práticos**. 1ª edição. São Paulo: Artiliber Editora, 2006, 240 p.

SILVA, Narciso Gonçalves da. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

SILVA, Rosiany da Paixão da. **Argamassas com adição de fibras de polipropileno – estudo comportamento reológico e mecânico**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.