

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**NADINE CORTESE**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO NO TEMPO DE ARGAMASSAS  
COM SUBSTITUIÇÃO DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ**

**Alegrete  
2019**

**NADINE CORTESE**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO NO TEMPO DE ARGAMASSAS  
COM SUBSTITUIÇÃO DE SÍLICA DE CASCA DE 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: Ederli Marangon

Coorientador: Marcelo de Jesus Dias de  
Oliveira

**Alegrete  
2019**

**NADINE CORTESE**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO NO TEMPO DE ARGAMASSAS  
COM SUBSTITUIÇÃO DE SÍLICA DE CASCA DE 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: 27, junho de 2019.

Banca examinadora:



---

Prof. Dr. Ederli Marangon  
Orientador  
UNIPAMPA



---

Prof. Me. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira  
Coorientador  
UNIPAMPA



---

Prof. Me. Aldo Leonel Temp  
UNIPAMPA



---

Prof. Me. Maurício Silveira dos Santos  
UNIPAMPA

Dedico este trabalho à toda minha família e às pessoas que me apoiaram e acreditaram na minha capacidade de chegar até aqui.

## **AGRADECIMENTO**

Reservo meus agradecimentos aos meus pais Maristela e Valmir Cortese, por todo o amor e incentivo, por sempre investirem nos meus estudos, acreditarem em mim e em meu potencial.

A minha irmã Letícia por todo o carinho, e aos meus avós Zilá e Vivaldino por toda preocupação e apoio nesta etapa da minha vida.

Ao meu professor e orientador Dr. Ederli, pelo tempo dedicado a mim e a este trabalho, e pela oportunidade de aprender e crescer como pessoa e profissional.

Ao meu coorientador Me. Marcelo, pelos ensinamentos e ajuda no laboratório e auxílio na construção deste trabalho.

A todos os professores da Engenharia Civil da UNIPAMPA que de uma forma ou outra contribuíram com seus conhecimentos agregando na minha formação profissional.

Aos meus colegas e amigos, pelas horas de estudo, pelos momentos de descontração e pelo apoio nas horas que mais precisei. Em especial, ao meu amigo e colega Guilherme Cocco por todas as horas de trabalho no laboratório, que se tornaram mais leves e engraçadas, obrigada pela ajuda e pela parceria de sempre.

A Pilecco Nobre e a FIDA pelos materiais doados.

"A maior recompensa para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso".

John Ruskin

## RESUMO

Nessa pesquisa foram avaliadas as propriedades e características de argamassas no estado fresco em diferentes intervalos de tempo e velocidades de ensaio, com substituições de cimento Portland por sílica de casca de arroz (SCA). A análise foi feita a partir de um traço referência onde foram feitas substituições em massa de cimento Portland por SCA em 5, 10, 15, 20 e 30%, com a relação água/cimento fixada em 0,71. Para a análise do comportamento reológico das argamassas foram realizados os ensaios de mesa de consistência (Flow Table), densidade da massa e teor de ar incorporado logo após a produção da mistura, e o Vicat Modificado e Squeeze Flow nas idades de 15, 60, 120 e 180 minutos. O ensaio de Squeeze Flow também foi realizado para diferentes velocidades (1mm/min, 0,1mm/s e 1mm/s). Os resultados obtidos pelos ensaios de consistência (Flow Table e Vicat Modificado) diminuíram conforme aumentou-se a porcentagem de SCA. Com o avanço da idade, os resultados no ensaio de Vicat Modificado, demonstraram que a penetração do cone diminuiu, pelo fato da sílica absorver a água da mistura, deixando-a seca. Para os ensaios físicos de densidade de massa e o teor de ar incorporado, os resultados não apresentaram alterações significativas com inclusão da SCA. No ensaio de Squeeze Flow os dados sugerem uma melhora na trabalhabilidade da argamassa com substituição de 5% na mistura em relação ao traço referência, porém esse comportamento não se repete nas idades posteriores. Ainda, pode ser observado que o deslocamento diminuiu e a rigidez aumentou. A tensão de escoamento das misturas e a viscosidade variam de acordo com a velocidade de ensaio. Velocidades mais elevadas, como a ensaiada de 1mm/s, não são viáveis para a análise dos dados do Squeeze Flow, pelo fato de que o comportamento elástico da argamassa é muito pequeno. Os valores de tração máxima aumentaram com o avanço da idade e quanto maior a porcentagem de sílica presente na mistura.

Palavras Chave: Argamassa, reologia no estado fresco, sílica da casca de arroz, Squeeze Flow.

## ABSTRACT

In this research, the properties and characteristics of mortar in fresh state were evaluated at different time intervals and at different test speeds, with substitutions of Portland cement with rice husk silica (SCA). The analysis was done from a reference trace where mass substitutions of Portland cement by SCA were made in 5, 10, 15, 20 and 30%, with the water/cement ratio fixed at 0.71. For the analysis of the rheological behavior of the mortars, the tests of consistency table (Flow Table), density of the mass and air content incorporated soon after the production of the mixture, and the modified Vicat and Squeeze Flow in the ages of 15, 60, 120 and 180 minutes. The Squeeze Flow test was also performed for different speeds (1mm/min, 0,1mm/s and 1mm/s). The results obtained by the consistency tests (Flow Table and modified Vicat) decreased as the percentage of ACS was increased. With advancing age, the results in the modified Vicat assay showed that the penetration of the cone decreases, because the silica absorbs the water of the mixture, leaving it dry. For the physical assays of mass density and the incorporated air content, the results did not present significant alterations with inclusion of ACS. In the Squeeze Flow test the data suggest an improvement in the workability of the mortar with a 5% substitution in the mixture in relation to the reference trait, but this behavior does not repeat in later ages. Further, it can be seen that the displacement decreased and the stiffness increased. The flow stress of the mixtures and the viscosity will vary according to the test speed. Higher velocities, such as the 1mm/s test, are not feasible for analyzing the Squeeze Flow data, because the elastic behavior of the mortar is very small. The values of maximum traction increased with the advancement of age and the higher the percentage of silica present in the mixture.

Keywords: Mortar, fresh rheology, rice husk silica, Squeeze Flow.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Macro e microestrutura de uma argamassa.....	16
Figura 2 – Resultados obtidos pelos ensaios de Flow Table e Vicat Modificado. ....	19
Figura 3 – Assentamento de blocos. ....	21
Figura 4 – Perfil típico de um ensaio de Squeeze Flow. ....	21
Figura 5 – Ensaio de Consistência e Squeeze Flow. ....	24
Figura 6 – Squeeze Flow para traços com pozolanas.....	25
Figura 7 – Squeeze Flow realizado em diferentes taxas de deslocamento.....	26
Figura 8 – Curvas granulométricas: Sílica de Casca de Arroz e cimento Portland CII-Z. ....	29
Figura 9 – Procedimento experimental.....	31
Figura 10 – Curvas de composição granulométrica dos agregados miúdos. ....	32
Figura 11 – Curvas de composição granulométrica dos materiais finos. ....	32
Figura 12 - Mistura dos componentes das argamassas. ....	33
Figura 13 – Ensaio de Flow Table.....	34
Figura 14 – Ensaio da Densidade de Massa e do Teor de Ar Incorporado.....	35
Figura 15 – Ensaio de Vicat Modificado. ....	36
Figura 16 – Máquina utilizada no ensaio de Squeeze Flow. ....	37
Figura 17 – Procedimento do Ensaio de Squeeze Flow.....	38
Figura 18 – Valores de compactidade.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Porcentagem de cimento e SCA para cada traço. ....	31
Tabela 2 – Massas específicas dos agregados.....	33
Tabela 3 – Massas específicas dos materiais finos. ....	33
Tabela 4 – Resultados de consistência através dos ensaios de Flow Table.....	39
Tabela 5 - Resultados de consistência através dos ensaios de Vicat Modificado.....	40
Tabela 6 - Resultados obtidos através dos ensaios de densidade de massa e teor de ar incorporado. ....	40

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tensão de Escoamento para cada traço nas velocidades: 1mm/min em a), e 0,1mm/s em b). .....	41
Gráfico 2 – Curvas obtidas nos ensaios de Squeeze Flow na velocidade 1mm/s.....	43
Gráfico 3 – Valores de Energia comparados com Tensão de Escoamento nas velocidades: 1mm/min em a), e 0,1mm/s em b).....	44
Gráfico 4 – Valores de Energia na velocidade 1mm/s.....	45
Gráfico 5 – Valores de Viscosidade nas velocidades: 1mm/min em a) e 0,1mm/s em b). .....	46
Gráfico 6 – Squeeze Flow na velocidade 0,1mm/s para os traços: REF em a), e SCA5 em b). .....	47
Gráfico 7 – Squeeze Flow do traço referência e SCA5: REF idade de 15 minutos em a), REF idade de 180 minutos em b), SCA5 idade de 15 minutos em c) e SCA5 idade de 180 minutos em d).....	49
Gráfico 8 – Resultados de tração no ensaio de Squeeze Flow. ....	50

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>12</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1.1 Objetivo Geral .....	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	15
<b>2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
2.1 Conceitos Básicos de Reologia das Argamassas .....	16
2.2 Ensaio Reológico – Vicat Modificado e Squeeze Flow .....	18
2.3 Tempo Útil das Argamassas .....	27
2.4 Adições Mineraias .....	27
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>30</b>
3.1 Ensaio de Caracterização dos Materiais .....	31
3.1.1 Composição Granulométrica e Massas específicas dos materiais .....	31
3.1.2 Mistura das Argamassas .....	33
3.1.3 Ensaio da Mesa de Consistência (Flow Table) .....	34
3.1.4 Ensaio da Densidade de Massa e do Teor de Ar Incorporado .....	35
3.1.5 Ensaio de Vicat Modificado.....	36
3.1.6 Ensaio de Squeeze Flow .....	37
<b>4 ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>39</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>52</b>
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	53
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>54</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com muitas alterações climáticas acontecendo em nosso planeta, a preocupação com sustentabilidade é prioridade no cenário atual. Porém, o consumo crescente de Cimento Portland, que tem o clínquer como principal constituinte, é um dos principais responsáveis pela alta concentração de gases poluentes, que dão força às mudanças climáticas com gradual e contínuo aquecimento da atmosfera e dos oceanos.

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), no ano de 2018 foram produzidas no país cerca de 35 milhões de toneladas de cimento, sendo que para cada tonelada emitem-se entre 600 e 900kg de CO<sub>2</sub>, o que torna a indústria cimenteira a terceira maior produtora de gases do efeito estufa, sendo a primeira e a segunda, a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento, respectivamente.

Segundo o IBGE (2018), somente no Brasil, em 2016, 488 mil toneladas de cinza de casca de arroz foram produzidas gerando problemas em relação ao seu descarte. Diante desses fatos, o produto da queima da casca para geração de energia, que é a sílica da casca do arroz (SCA), surge como uma opção na construção civil para substituir parcialmente o cimento Portland na preparação de concretos e argamassas, mesclando potencialidades técnicas, econômicas e ambientais.

Essa substituição pode ocorrer pelo fato de a SCA ser considerada uma pozolana reativa, especialmente quando o processo de moagem é controlado e a forma de produção é realizada pelo sistema de combustão com leito fluidizado, resultando em uma SCA predominantemente amorfa e de boa qualidade, apresentando características granulométricas muito parecidas com o cimento Portland, porém com maior superfície específica (MARANGON *et al.*, 2013). Segundo Mendes *et al.* (2014) o uso desta pozolana em teores adequados aumenta a resistência mecânica à compressão do concreto, assim como a sua durabilidade.

Outro fator de suma importância na construção civil, é a necessidade de obter maior produtividade nos canteiros de obra, diminuindo o custo final das construções. Uma das maneiras para que isso ocorra, é ter um maior conhecimento das propriedades das argamassas no estado fresco e no estado endurecido.

Conhecer os parâmetros reológicos das argamassas no estado fresco é essencial para que o comportamento final no estado endurecido seja o esperado. O estudo reológico é feito a partir de tensões de escoamento e viscosidade plástica da

mistura, que nas argamassas de revestimento, podem gerar patologias como deslocamento e desagregação, respectivamente. Estudos, como o de Sinhorelli (2018), analisam esse comportamento reológico nas argamassas de revestimento, porém pouco se fala que estes parâmetros também são muito importantes para as argamassas de assentamento.

Uma das funções das argamassas de assentamento é garantir a união dos blocos de alvenaria para que não ocorra tombamento, e para isso é essencial que além de resistência aos esforços mecânicos ela tenha aderência e resistência à tração adequada. Para que a argamassa tenha uma boa resistência aos esforços mecânicos, é importante que ela tenha trabalhabilidade, e segundo Carasek (2007), a trabalhabilidade é a propriedade no estado fresco, que determina a sua facilidade de ser misturada, aplicada, consolidada e acabada. Deve permanecer plástica pelo tempo necessário para os ajustes de alinhamento, prumo e nível das unidades.

A argamassa de assentamento é considerada trabalhável quando o aplicador consegue assentar os blocos com facilidade. Quando a trabalhabilidade já não é mais a adequada, o aplicador necessita fazer um esforço adicional, porque o tempo de utilização da argamassa já venceu, diminuindo suas propriedades no estado fresco e conseqüentemente influenciando nas propriedades no estado endurecido.

A técnica de Squeeze Flow caracteriza argamassas no estado fresco, além de detectar pequenas alterações nas características reológicas dos materiais, fornece não apenas valores pontuais, como os ensaios tradicionais, mas um perfil de comportamento de acordo com as solicitações impostas (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005). O ensaio é considerado ideal para a simulação do comportamento de argamassas de assentamento durante a aplicação, pois pode-se controlar a carga durante o ensaio, podendo simular o peso do bloco ou tijolo (CARDOSO, 2009).

Sendo assim, neste estudo será avaliada a influência da substituição parcial da sílica de casca de arroz em relação ao cimento Portland em argamassas, variando porcentagens e analisando o seu tempo útil.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar o comportamento reológico no estado fresco, em relação ao tempo, de argamassas para diferentes substituições parciais do cimento Portland pela sílica de casca de arroz.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- 1- Analisar a consistência das argamassas pelos ensaios de Flow Table e Vicat Modificado;
- 2- Determinar as variações de densidade e ar incorporado de acordo com a substituição;
- 3- Analisar tensão de escoamento e viscosidade plástica das argamassas através do ensaio de Squeeze Flow;
- 4- Avaliar o tempo útil da argamassa.

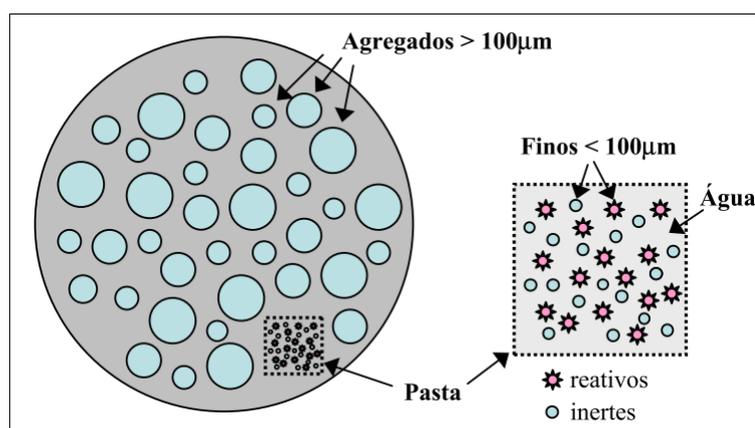
## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Conceitos Básicos de Reologia das Argamassas

Reologia é o estudo do fluxo do material, com ênfase no fluxo e sua relação entre tensão, deformação, taxa de deformação e o tempo (BANFILL, 2005). Nos sistemas ideais, a relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante é linear e, segundo Glatthor e Schweizer (1994), podem ser descritos por equações lineares simples como, por exemplo, a Lei de Newton para líquidos ideais. Os fluídos que não apresentam a linearidade descrita por Newton se enquadram dentro da categoria de fluídos não newtonianos.

A argamassa em seu estado fresco pode ser considerada uma suspensão aquosa concentrada composta de partículas sólidas, que são os agregados, imersos em um fluído viscoso (pasta cimentícia), a matriz. Esta matriz é composta de cimento, cal hidratada e adições imersas em água (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005). A Figura 1 mostra uma ilustração esquemática descrevendo a macro e a microestrutura de uma argamassa.

Figura 1 – Macro e microestrutura de uma argamassa.



Fonte: Cardoso; Pileggi; John (2005).

No caso da reologia de suspensões, as partículas sólidas no meio de um fluído perturbam as linhas de fluxo aumentando a resistência do sistema ao escoamento, ou seja, elevando a viscosidade (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Quando a concentração de partículas é alta e estas passam a agir mais intensamente, como é o caso das

argamassas, o sistema passa a ser também, dependente da cinética de hidratação do cimento e desvia do modelo ideal de Newton passando a ter comportamentos não-lineares, como pseudoplástico e dilatante (COSTA, 2006).

Materiais que apresentam pseudoplasticidade são aqueles em que a viscosidade da suspensão diminui com o aumento da tensão de escoamento, já nos materiais dilatantes ocorre aumento da viscosidade do sistema com a tensão de escoamento. Viscosidade é a propriedade dos fluídos que define a forma pela qual o fluído escoar, sendo uma característica de cada tipo de mistura (ROMA, 2006).

Segundo Cardoso (2009), uma argamassa deve apresentar idealmente um comportamento pseudoplástico para facilitar espalhamento e acabamento, mas com elevada viscosidade ou uma considerável tensão de escoamento para manter-se estável após a aplicação. Dessa forma, é limitado encontrar um modelo ideal para as argamassas, portanto, como os materiais que apresentam pseudoplasticidade ou dilatância com tensão de escoamento são denominados Fluídos de Bingham, de maneira a simplificar os processos, seguimos este conceito para a determinação da reologia das argamassas frescas (BANFILL, 1991).

Neste modelo, os fluídos possuem uma resistência inicial que os impedem de fluir, logo, para que ocorra uma deformação, é necessária a aplicação de uma tensão mínima denominada tensão de escoamento (CASTRO, 2011). A Equação 1 define o plástico de Bingham e é expressa por:

Equação 1

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma$$

Onde:

$\tau$  = tensão de cisalhamento (Pa);

$\tau_0$  = tensão de escoamento (Pa);

$\mu$  = viscosidade plástica (Pa.s);

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

Desta forma, para que as propriedades de fluxo de argamassa estejam de acordo com o modelo de Bingham é necessária a determinação de dois parâmetros: o limite de escoamento e a viscosidade plástica. Ambos os parâmetros dependem

diretamente das proporções de cimento, areia, água e adições, e podem ser determinados através do ensaio de Squeeze Flow (BANFILL, 1991).

A tensão de escoamento pode ser originada pela aglomeração das partículas do fluido, de modo a formar uma estrutura espacial rígida de partículas por toda a suspensão. A tensão de escoamento das suspensões corresponde à tensão necessária para romper essa estrutura tridimensional das partículas (OLIVEIRA *et al.*, 2000; BARNES, 1998).

## 2.2 Ensaio Reológico – Vicat Modificado e Squeeze Flow

O ensaio de Vicat Modificado, também conhecido como método de penetração do cone avalia basicamente a sua consistência. Segundo Ferraris (1999), o resultado fornecido por este método apresenta forte correlação com o parâmetro reológico tensão de escoamento. Sendo que a profundidade de penetração dependerá da tensão de escoamento do material testado.

Este método é um instrumento interessante de controle das argamassas *in loco*.

Sua capacidade em se mostrar sensível às variações no teor de água das argamassas, o que o torna apto a detectar alterações de consistência de forma muito mais eficiente do que o método da mesa ABNT, e, sobretudo, o fato dele possuir uma aparelhagem simples e factível de ser empregada em obra, o credenciam como uma ferramenta eficaz de controle *in situ* (CASCUDO; CARASEK, 2007).

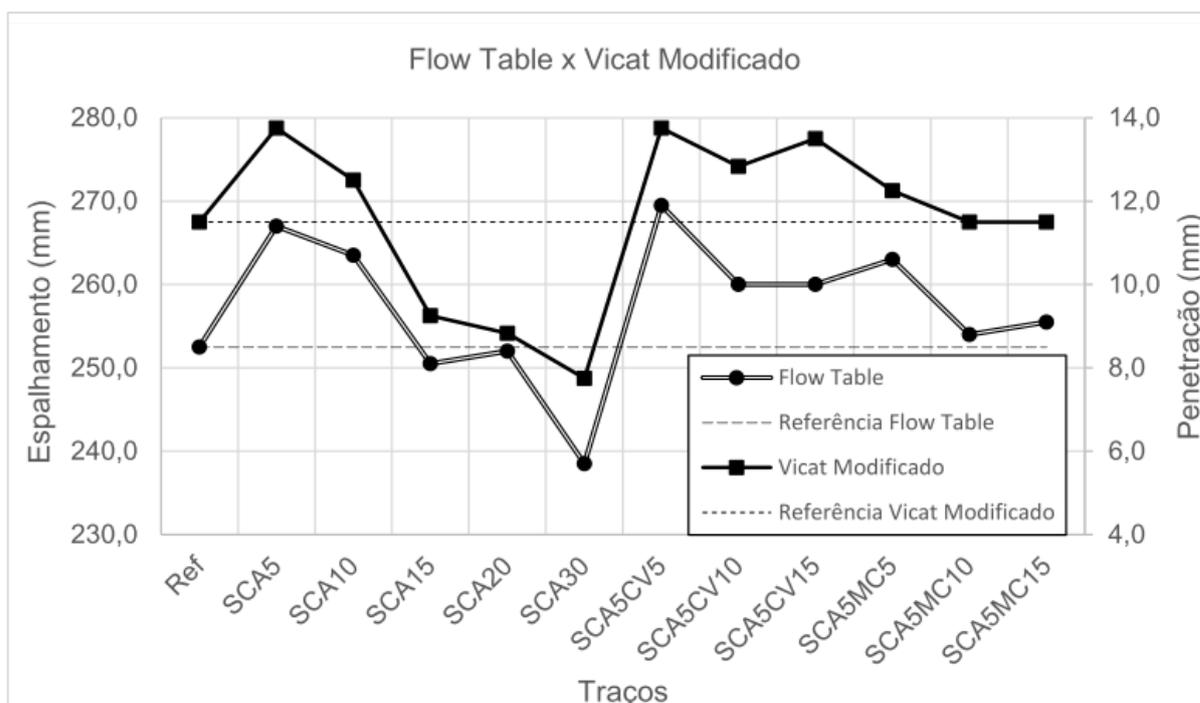
O ensaio de Vicat Modificado pode ser realizado logo após a dosagem executada em obra e assim, controlar a produção e qualidade das argamassas que serão utilizadas. Porém, outros ensaios podem ser realizados para determinar um ponto muito importante a ser considerado em obra: a alteração da consistência ao longo do tempo. O ensaio controla esta alteração que ocorre pela perda de água da argamassa para o ambiente externo por evaporação, assim como controla o enrijecimento da mistura pelo início das reações de hidratação do cimento. A produção de argamassas controladas pelo ensaio são mais confiáveis e, conseqüentemente, tem-se a obtenção de produtos aplicados com desempenhos satisfatórios (CASCUDO; CARASEK, 2007).

A redução da penetração do cone ou a redução da fluidez da argamassa interfere diretamente na trabalhabilidade da argamassa e esta propriedade é decisiva quando se trata do desempenho de aplicação. Segundo Cascudo e Carasek (2007), esta redução pode ocorrer por fatores climáticos, como variações de temperatura e umidade do ar, ou por características intrínsecas das argamassas que se refletem em sua maior ou menor capacidade de retenção de água.

No entanto, pode-se ter duas argamassas com resultados iguais de consistência, seja pela penetração do cone ou pela Flow Table, e uma ser muito boa do ponto de vista da trabalhabilidade e a outra chegar ao ponto de não ser aplicável. Como a característica da trabalhabilidade não é avaliada ou definida pelos ensaios de consistência (Vicat Modificado e Flow Table), estudos mais aprofundados do ponto de vista reológico são realizados por meio do ensaio de Squeeze Flow.

Em seus estudos, Klimaczewski (2017) substituiu o cimento Portland por adições minerais, como SCA, Cinza Volante e Metacaulim em um traço referência, sem substituições, e realizou os ensaios de Flow Table e Vicat Modificado, obtendo os seguintes resultados indicados na Figura 2.

Figura 2 – Resultados obtidos pelos ensaios de Flow Table e Vicat Modificado.



Fonte: Klimaczewski (2017).

Na análise do gráfico, Klimaczewski (2017) percebeu que as oscilações tendem a um padrão, o que indica que além de possuir uma relação de plasticidade, os ensaios apresentam uma correlação com a consistência das argamassas. Pode-se observar que pequenas porcentagens de SCA diminuem a consistência das misturas em relação à mistura referência, entretanto, quando esta porcentagem aumenta a consistência sofre um acréscimo. Verifica-se também, que as misturas contendo 5% de SCA e cinza volante ou metacaulim apresentam valores de espalhamento e penetração superiores aos encontrados para o traço referência, demonstrando que essas substituições, em pequenas porcentagens, tendem a melhorar a consistência e, provavelmente a trabalhabilidade das argamassas.

Como conclusão, Klimaczewski (2017) ressalta a correlação dos ensaios ao analisar a consistência das misturas, porém evidencia que as variações obtidas através da penetração de cone foram mais representativas, considerando este ensaio mais sensível.

O ensaio de Squeeze Flow apresenta grande potencial para avaliar a reologia de materiais como a argamassa, identificando com clareza os parâmetros reológicos (tensão de escoamento e viscosidade), assim como permitindo uma avaliação mais complexa acerca das propriedades associadas à trabalhabilidade (consistência e plasticidade) (CASCUDO; CARASEK, 2007).

É uma técnica simples que consiste em medir o esforço necessário para a compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica do material entre duas placas paralelas, sendo tal esforço empreendido normalmente por uma máquina universal de ensaios (CARASEK, 2007).

O ensaio permite encontrar a variação da taxa de cisalhamento e também da magnitude das deformações e, ao contrário dos ensaios tradicionais, fornece não apenas valores pontuais, mas um perfil do comportamento reológico de acordo com as solicitações impostas (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005). Este método pode ser realizado com controle por força ou por deslocamento. No caso de argamassas de assentamento é mais adequado o controle por carga, podendo ser simulado o peso do bloco ou tijolo, onde o material é submetido a um deslocamento efetuado com velocidade constante (CARDOSO, 2009). A Figura 3 mostra o assentamento de blocos, que pode ser simulado no ensaio.

Figura 3 – Assentamento de blocos.

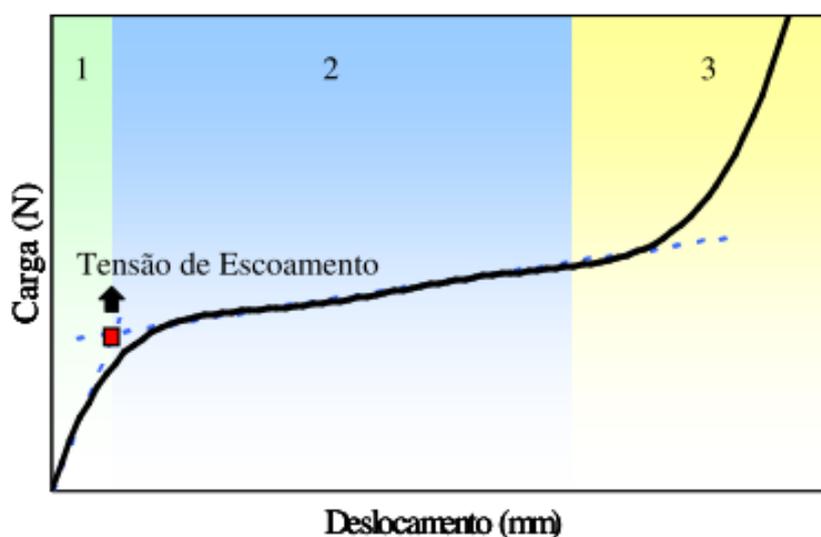


Fonte: <<https://www.mapadaobra.com.br>>.

O método tem como vantagem possibilitar a simulação de diversas situações reais de aplicação das argamassas. No entanto, apresenta como limitações, a restrição de utilização em obra, sendo possível utilizar a técnica somente em ambiente laboratorial e o alto custo da máquina necessária para o ensaio (CARASEK, 2007).

A ABNT NBR 15839/2010 – “Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método Squeeze Flow” normaliza o ensaio e os resultados são expressos de maneira simples e direta, com gráficos de carga de compressão em (N) e deslocamento em (mm) que são divididos em três estágios, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 – Perfil típico de um ensaio de Squeeze Flow.



Fonte: Cardoso; Pileggi; John (2005).

Primeiro estágio: Na região I ocorre a deformação linear elástica. Nesta faixa, ocorrem pequenas deformações e o material se comporta como um sólido. Uma argamassa que apresente uma grande parte de seu comportamento nesse estágio, possivelmente apresentará problemas de fissuração no estado fresco devido à recuperação elástica após a retirada do esforço. (OLIVEIRA, 2015; MATTANA; COSTA, 2015). Entretanto as argamassas devem apresentar um estágio linear elástico de forma que permitam uma devida adesividade (KLIMACZEWSKI, 2017).

Segundo estágio: Na região II ocorre a deformação plástica ou fluxo viscoso. Inicia quando a força de compressão excede a tensão de escoamento a qual mantinha o material com comportamento elástico, resultando em uma deformação radial elongacional e de cisalhamento (MATTANA; COSTA, 2015). Para análise do comportamento das argamassas no estado fresco, esta é a região adequada, pois as deformações estão agindo sem acréscimo significativo da força de compressão, indicando facilidade de manuseio da argamassa (KLIMACZEWSKI, 2017).

Terceiro estágio: A região III é quando o material é submetido a grandes deformações (*strain hardening*), equivale ao enrijecimento, pode ocorrer um aumento expressivo da carga necessária para o deslocamento. A aproximação das partículas submetidas a grandes deformações gera forças restritivas ao fluxo devido ao embricamento e entrelaçamento delas. (OLIVEIRA, 2015). É um estágio de comportamento em que procedimentos de aplicação e acabamento da argamassa devem ser dificultados, devido às altas cargas necessárias para ocorrer a deformação.

Por fim, com os dados obtidos no ensaio, podemos determinar os valores de tensão de escoamento e viscosidade através das Equação 2 e Equação 3, respectivamente (MEETEN, 2000).

Equação 2

$$\tau_0 = \frac{12 \cdot h \cdot F}{\pi \cdot D^3}$$

Equação 3

$$\mu = \frac{64 \cdot F \cdot t}{3 \cdot \pi (h^{-2} - h_0^{-2}) \cdot D^4}$$

Onde:

$\tau_0$  = tensão de escoamento (Pa);

$h$  = altura instantânea da amostra (m);

$F$  = força de compressão (N);

$D$  = diâmetro da amostra (m);

$\mu$  = viscosidade (Pa.s);

$t$  = tempo (s);

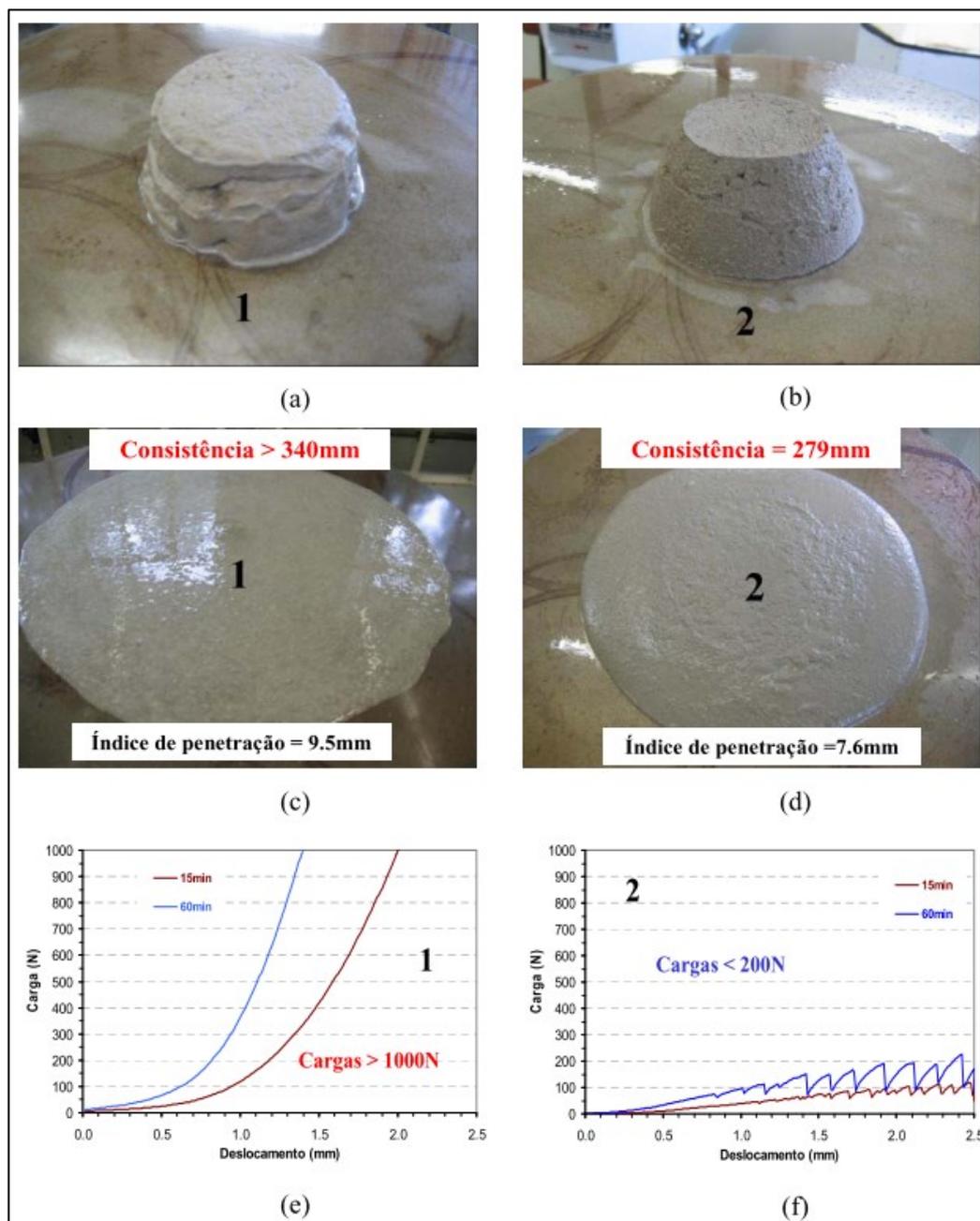
$h_0$  = altura inicial (m).

A força de compressão utilizada para encontrar a tensão de escoamento e a viscosidade é obtida no ponto de encontro de duas retas: a reta que segue a partir da parte linear elástica e outra que segue quando ocorre a deformação plástica. Este ponto e as retas podem ser observados na Figura 4.

Cardoso (2009) afirma que o ensaio de Squeeze Flow tem uma boa relação com a percepção do pedreiro, principalmente, nas etapas de lançamento e aperto da argamassa. Argamassas com difícil deformação durante o ensaio necessitam de maior esforço da mão de obra durante a aplicação, resultando em menor produtividade.

Em seus estudos, Cardoso (2009) comparou o comportamento de duas argamassas industrializadas, relacionando os ensaios de consistência e o Squeeze Flow, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 – Ensaio de Consistência e Squeeze Flow.



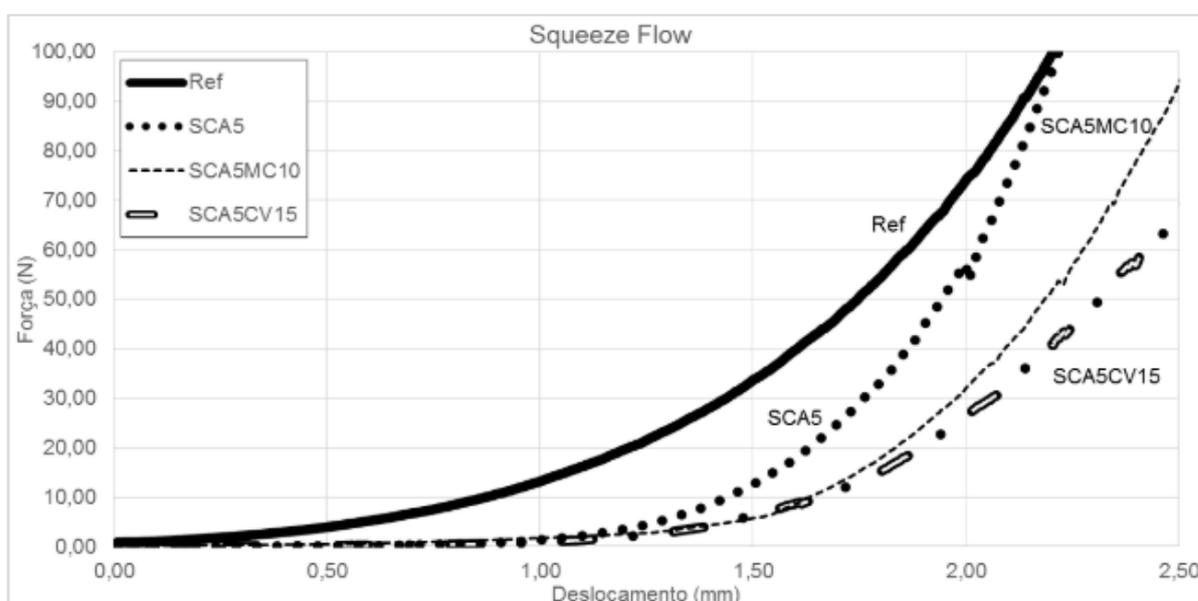
Fonte: Cardoso (2009).

Cardoso (2009) explica que a argamassa 1 apresentou espalhamento bastante elevado na mesa de consistência e um índice de consistência considerado aceito para aplicação, porém durante o fluxo de ensaio do Squeeze Flow, este material não conseguiu ser deformado até 2,5mm sendo a força interrompida em 1000N. Já a argamassa 2, que apresentou consistência e índice de penetração menores do que o produto 1, fluiu com facilidade quando a força de compressão foi aplicada no ensaio do Squeeze Flow. Conclui-se que a argamassa 1 possui uma pasta pouco viscosa,

não fornecendo coesão e nem lubrificação ao sistema, durante o ensaio do Squeeze Flow, o atrito entre os agregados é intenso e ocorre grande separação de fases, dificultando a deformação da argamassa. Já a mistura número 2 apresenta uma pasta em quantidade e com características reológicas adequadas para manter a coesão do sistema, lubrificando e mantendo os agregados distantes, resultando em uma argamassa de fácil espalhamento (CARDOSO, 2009).

Ao substituir o cimento Portland por pozolanas nas misturas, Klimaczewski (2017) obteve, a partir do ensaio de Squeeze Flow, os resultados apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Squeeze Flow para traços com pozolanas.



Fonte: Klimaczewski (2017).

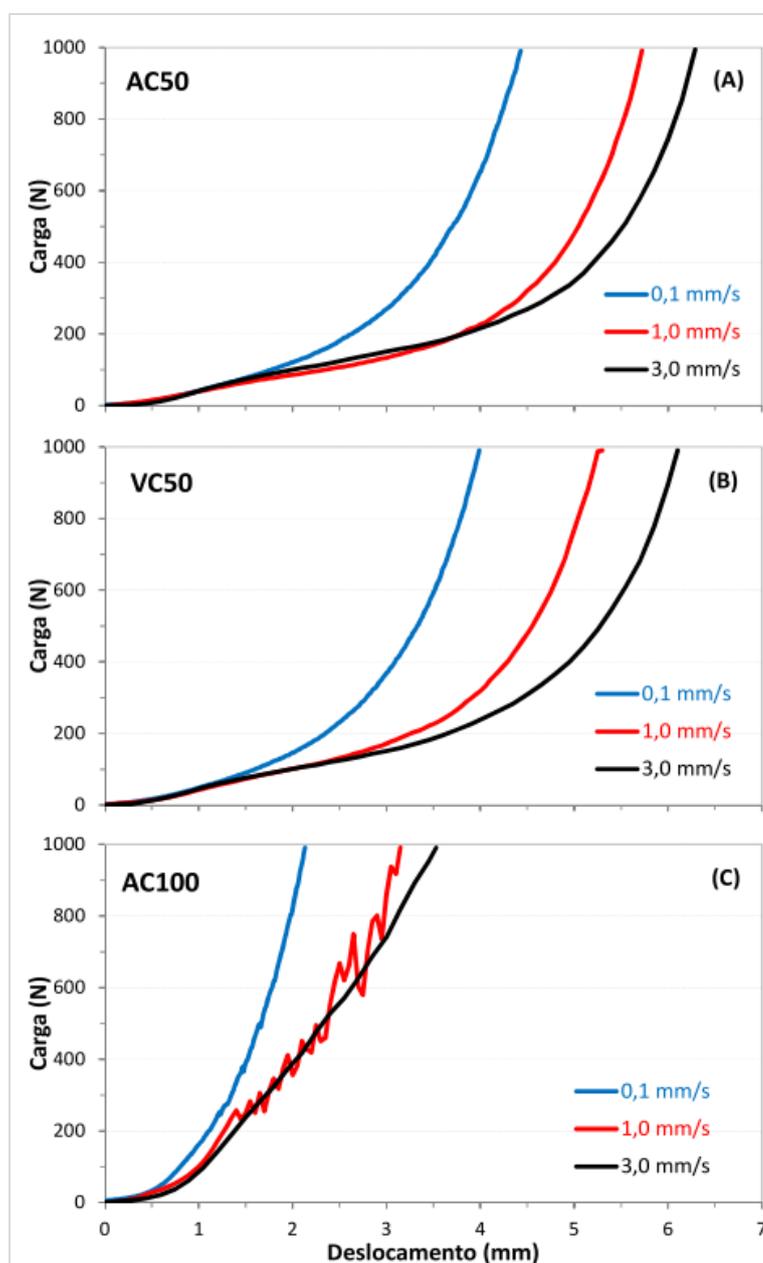
As adições minerais em pequenas porcentagens apresentam maiores viscosidades plásticas quando comparadas ao traço referência, o que demonstra que essas argamassas podem apresentar maior facilidade de aplicação, demandando menor esforço do operário e aumentando sua produtividade. Com estes resultados, Klimaczewski (2017) conclui que aparentemente a reologia das argamassas no estado fresco pode ser melhorada com substituições parciais das adições minerais de SCA, cinza volante e/ou metacaulim.

Este método permite variar a velocidade de deslocamento do punção. As partículas presentes na mistura se orientam de acordo com a taxa de cisalhamento aplicada. As mesmas tendem a se orientar perpendicularmente ao fluxo e, em altas

taxas, as partículas podem se alinhar paralelamente ao fluxo, reduzindo a viscosidade aparente da suspensão, resultando em um comportamento pseudoplástico (KUDO, 2012).

Segundo Dallora, *et al.* (2011) amostras com menor taxa de deslocamento fluem com maior dificuldade e possuem menor deslocamento final em relação à amostras testadas com maior taxa de deslocamento, o que pode ser analisado na Figura 7.

Figura 7 – Squeeze Flow realizado em diferentes taxas de deslocamento.



Fonte: Dallora, *et al.* (2011).

Isso ocorre pela movimentação entre fluído e sólido e acarreta em separação de fases na argamassa. Porém, caso o teste seja realizado com taxas de deslocamento elevadas, o fluído tem menos tempo para percolar a amostra, reduzindo a possibilidade de segregação. Portanto, deve-se estudar e analisar a velocidade ideal para cada amostra a ser ensaiada (DALLORA, *et al.* 2011).

### **2.3 Tempo Útil das Argamassas**

Pode-se chamar de tempo útil aquele o qual a argamassa pode ser utilizada após a sua mistura com água, sem a perda de suas propriedades no estado fresco ou prejuízo das propriedades no estado endurecido (OLIVEIRA, 2015). Após este período a argamassa não pode mais ser utilizada, mesmo com o acréscimo de água. Porém nos canteiros de obra o uso de argamassas vencidas (fora do tempo útil) ainda é feito, o que pode gerar uma série de patologias futuras. Em geral, o tempo de utilização da argamassa diminui de acordo com fatores externos (temperatura, umidade, etc.) fazendo com que as propriedades da mesma diminuam gradativamente.

Silva (2003, p.60) diz que “o tempo útil da argamassa depende de sua formulação e das condições ambientais durante a preparação até o momento da aplicação”. Ainda segundo Silva (2003), o tempo útil pode ser relacionado ao tempo de pega da argamassa, sendo que quanto mais rápido é o tempo de pega, menor será o tempo útil.

O tempo de pega pode ser definido como o tempo de enrijecimento da pasta de cimento. Os estados de início e final de pega depende das condições ambientais e podem ser verificados pelo ensaio de Vicat Modificado (NEVILLE, 1997).

### **2.4 Adições Minerai**

Segundo Mehta e Monteiro (2013), a utilização de pozolanas como adições minerai em argamassas apresenta as vantagens de promover ganho de durabilidade da pasta frente a ambientes ácidos (devido ao consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$ ), além do refinamento dos poros, de forma geral melhoram o desempenho mecânico da matriz e diminuem sua permeabilidade.

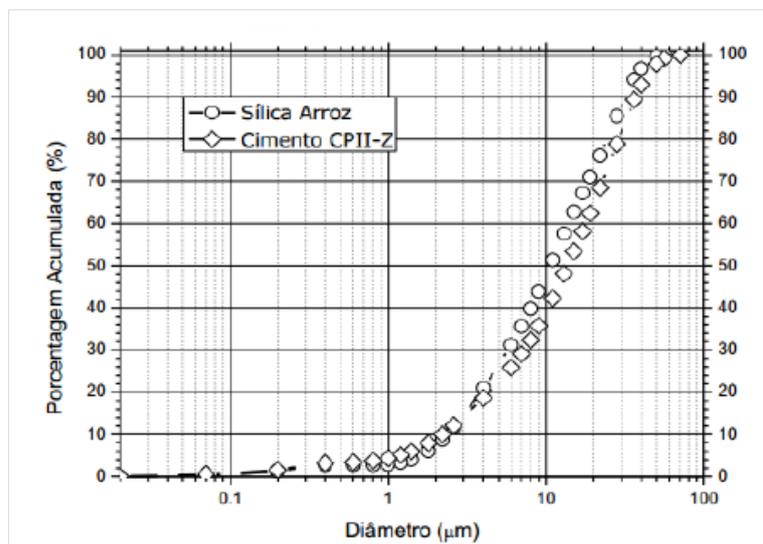
Pozolanas são definidas como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finalmente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes, similares aos produtos gerados na hidratação do cimento Portland (ABNT, 1992).

Apesar de ainda serem utilizadas pozolanas naturais em estado bruto ou após ativação térmica, torna-se viável economicamente e ambientalmente a utilização de subprodutos industriais, classificadas como pozolanas artificiais, como fonte primária de adições minerais para concretos e argamassas. As adições minerais mais conhecidas são a cinza volante, a escória de alto-forno, a sílica ativa, e a cinza de casca de arroz (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A atividade pozolânica também está influenciada pela granulometria e pela superfície específica das pozolanas. Estes materiais são mais finos que o cimento e, devido a este fato, melhoram o empacotamento das partículas, atuando no preenchimento de vazios de concretos e argamassas melhorando a coesão e diminuindo a exsudação.

O processo de queima da casca do arroz por leito fluidizado permite a obtenção da sílica amorfa, que possui elevado caráter pozolânico e é compatível com a necessidade da indústria da construção civil (CARRA; GOMES, 2014).

A sílica de casca de arroz (SCA) produzida é altamente amorfa e de boa qualidade, possibilitando sua utilização como adição ou substituição parcial do cimento em dosagens de concretos e argamassas (MARANGON *et al.*, 2013). Ainda segundo os autores, a SCA produzida na região do pampa gaúcho possui uma granulometria muito próxima à do cimento CII-Z. A Figura 8 apresenta as curvas granulométricas dos materiais.

Figura 8 – Curvas granulométricas: Sílica de Casca de Arroz e cimento Portland CII-Z.



Fonte: Marangon *et al.* (2013).

Gomes (2013) cita que a microporosidade e a elevada área superficial das partículas da sílica da casca de arroz contribuem para a alta atividade pozolânica.

A adição da SCA nas misturas influencia nas propriedades das argamassas tanto no estado fresco quanto no endurecido. Como o diâmetro médio das partículas de SCA é semelhante ao do cimento Portland, a menor massa específica das misturas com substituição de SCA faz com que o volume da pasta de cimento seja superior ao da pasta referência sem substituição, e com isso há uma maior coesão e maior plasticidade da argamassa devido ao aumento da relação do volume de sólidos em relação ao volume de água, resultando na redução da exsudação e segregação no estado fresco (DALCIN, 2016).

No estado endurecido, pelo fato da SCA reagir com o hidróxido de cálcio para formar hidrossilicato de cálcio que ocupa os vazios de maiores dimensões existentes na pasta, ocorre o aumento do desempenho mecânico e a impermeabilidade do concreto ou argamassa, assim como a resistência à fissuração térmica devido ao baixo calor de hidratação e, conseqüentemente, sua durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

### 3 METODOLOGIA

Para a execução deste trabalho, foi utilizado um traço de argamassa referência (REF), sem nenhuma substituição pozolânica, com resistência à compressão aproximada de 8 Mpa. Foram realizadas substituições em massa de Sílica de Casca de Arroz (SCA) em função do cimento Portland, sendo elas de 5, 10, 15, 20 e 30%. A relação de água por material cimentante foi preservada em 0,71 afim de não interferir na morfologia das partículas, sendo muito complexa a análise posterior devido ao diferente afastamento entre os grãos dos materiais constituintes da argamassa. Os agregados miúdos são provenientes da jazida da empresa Fida de Caçapava do Sul – RS.

Para isso, utilizou-se 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 de Arroz (SCA);

Estes traços, com estes mesmos materiais, já foram estudados anteriormente por Klimaczewski (2017) e Tonello (2017).

Desta forma, na Tabela 1 estão as porcentagens de substituição parcial em massa de cimento e SCA utilizadas em cada traço.

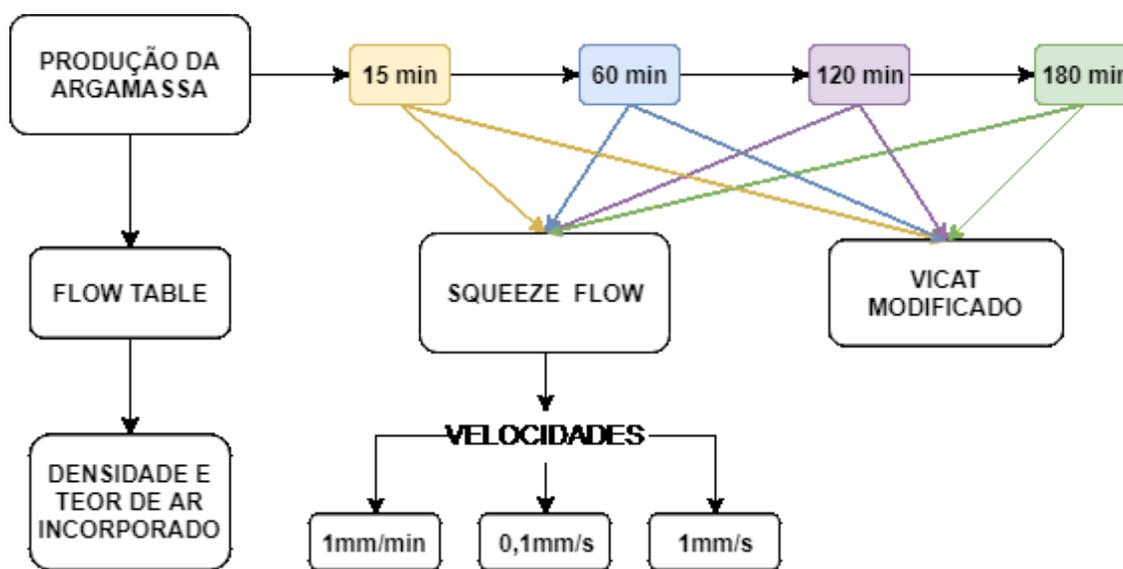
Tabela 1 – Porcentagem de cimento e SCA para cada traço.

Traço	Cim (%)	SCA (%)	Traço Unitário cim:cal:SCA:Fi:AG:AM:AF
Ref	100	-	1: 1: 0: 0,92: 1: 1,58: 2,83
SCA5	95	5	1: 1: 0,05: 0,92: 1: 1,58: 2,83
SCA10	90	10	1: 1: 0,1: 0,92: 1: 1,58: 2,83
SCA15	85	15	1: 1: 0,15: 0,92: 1: 1,58: 2,83
SCA20	80	20	1: 1: 0,2: 0,92: 1: 1,58: 2,83
SCA30	70	30	1: 1: 0,3: 0,92: 1: 1,58: 2,83

Fonte: Elaboração Própria.

O procedimento experimental seguido está representado na Figura 9.

Figura 9 – Procedimento experimental.



Fonte: Elaboração Própria.

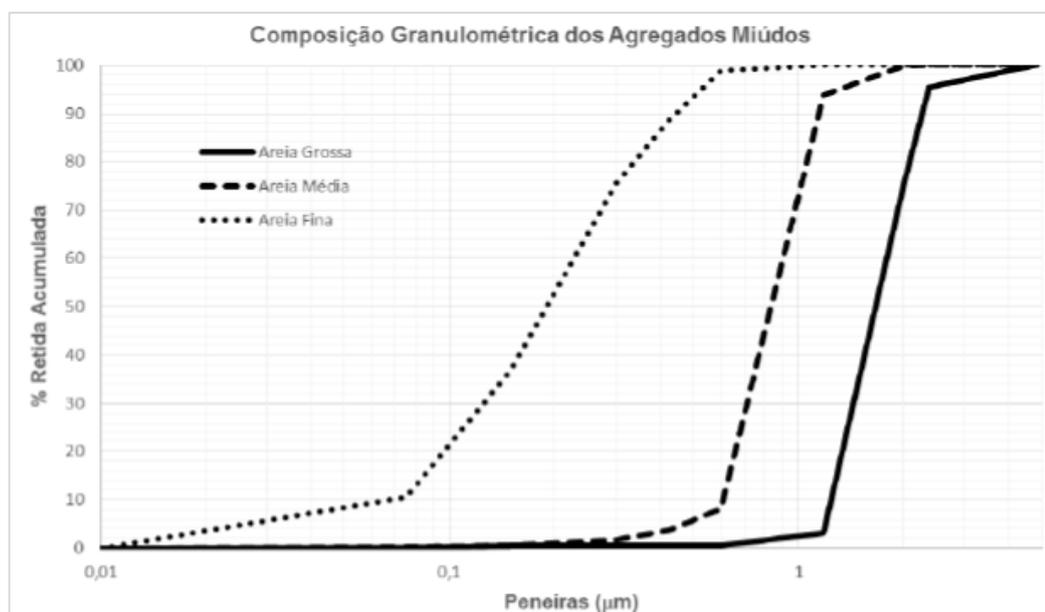
### 3.1 Ensaios de Caracterização dos Materiais

#### 3.1.1 Composição Granulométrica e Massas específicas dos materiais

A composição granulométrica e as massas específicas dos agregados miúdos (areia fina, areia média e areia grossa), assim como dos materiais finos (filler, cal,

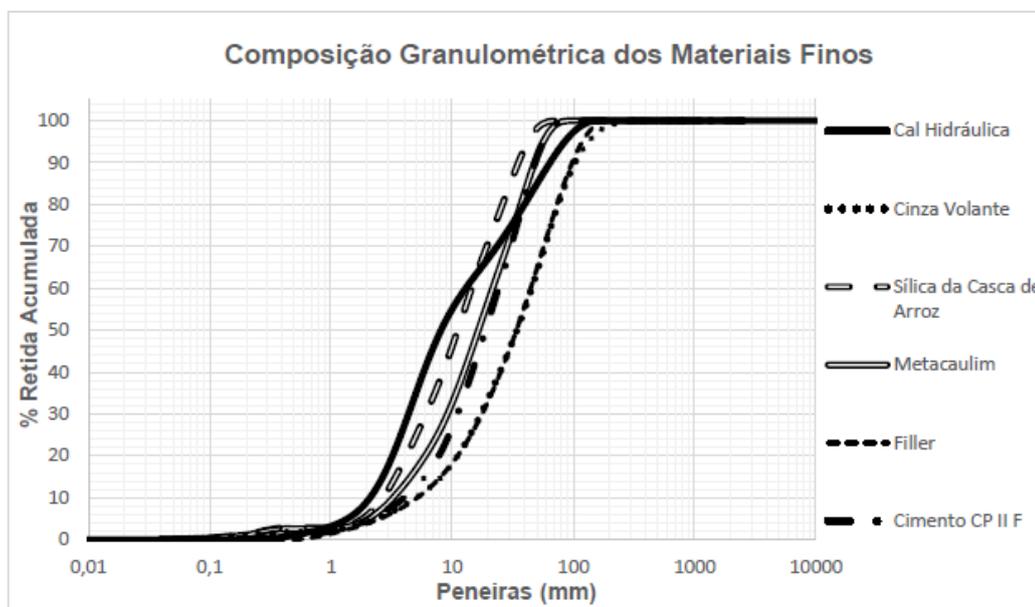
cimento e sílica de casca de arroz) foram realizadas por Klimaczewski (2017) e são representadas na Figura 10 e Figura 11, e na Tabela 2 e Tabela 3.

Figura 10 – Curvas de composição granulométrica dos agregados miúdos.



Fonte: Klimaczewski (2017).

Figura 11 – Curvas de composição granulométrica dos materiais finos.



Fonte: Klimaczewski (2017).

Tabela 2 – Massas específicas dos agregados.

Material	Areia Grossa		Areia Média		Areia Fina	
li (cm <sup>3</sup> )	200	200	200	200	200	200
lf (cm <sup>3</sup> )	377,5	378,5	379,5	380	377	377
$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,80	2,81	2,78	2,78	2,83	2,82
$\gamma$ média (g/cm <sup>3</sup> )	2,80		2,78		2,82	

Fonte: Klimaczewski (2017).

Tabela 3 – Massas específicas dos materiais finos.

Material	Média das Massas Específicas (g/cm <sup>3</sup> )
Cimento	2,97
Sílica	2,09
Cal Hidráulica	2,53
Filler Calcário	2,87
Cinza Volante	1,98
Metacaulim	2,60

Fonte: Klimaczewski (2017).

### 3.1.2 Mistura das Argamassas

A mistura dos componentes das argamassas realizou-se conforme o método descrito pela NBR 7215/1996, utilizando um misturador mecânico de duas velocidades, cuba de aço inoxidável com capacidade de até 5 litros, e uma pá de metal que gira em torno de si mesma em movimento planetário em torno do eixo da cuba, movimentos estes em sentidos opostos. A Figura 12 mostra a execução da mistura.

Figura 12 - Mistura dos componentes das argamassas.



Fonte: Elaboração Própria.

### 3.1.3 Ensaio da Mesa de Consistência (Flow Table)

O ensaio da mesa de consistência (Flow Table) realizou-se logo após a mistura dos materiais e conforme a NBR 13276/2002 para determinar o índice de consistência da mistura referência e das misturas com diferentes porcentagens de sílica de casca de arroz. Antes de iniciar a execução, o tampo da mesa para o índice de consistência e a parede do molde tronco-cônico foram umedecidos. Logo após a preparação da argamassa, encheu-se o molde tronco-cônico, colocado de modo centralizado sobre a mesa de consistência, com três camadas sucessivas, de alturas aproximadamente iguais, e aplicado em cada uma delas, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com o soquete, de maneira a distribuí-las uniformemente. Após foi realizado o rasamento da argamassa, passando uma régua metálica rente à borda com movimentos curtos de vai-e-vem ao longo de toda superfície.

Assim, retirou-se o molde e acionou-se a manivela, de modo que a mesa suba e caia 30 vezes em 30 segundos de maneira uniforme. Imediatamente após a última queda, mediu-se com o paquímetro o espalhamento da argamassa. Três medidas foram realizadas e registradas em três diâmetros tomados em pares de pontos diferentes em torno do perímetro. O valor do índice de consistência foi obtido pela média das três medidas ( $m_1$ ,  $m_2$  e  $m_3$ ), expressa em milímetros. Quanto menor o espalhamento subentende-se que a argamassa é mais difícil de se deformar.

A Figura 13 mostra os equipamentos utilizados no ensaio (a) e a argamassa já espalhada, onde ocorre a medição do diâmetro (b).

Figura 13 – Ensaio de Flow Table.



Fonte: Elaboração Própria.

### 3.1.4 Ensaio da Densidade de Massa e do Teor de Ar Incorporado

O ensaio de densidade de massa e do teor de ar incorporado seguiu os procedimentos propostos pela NBR 13278/2005. O ensaio constituiu-se de balança com resolução de 0,1g, espátula e um recipiente cilíndrico, rígido, de material não absorvente. O procedimento realizou-se após a mistura da argamassa onde a mesma foi introduzida no recipiente em três camadas de igual altura, aplicando 20 golpes após cada camada preenchida. Ao completar as camadas, deu-se três quedas a uma altura de aproximadamente 3cm, afim de retirar os vazios presentes entre a argamassa e a parede do recipiente, podendo assim rasar o recipiente com a espátula em movimentos de vai-e-vem.

Com o recipiente cilíndrico cheio e rasado, a massa do molde com a argamassa ( $m_c$ ) foi pesada e registrada. Assim, o cálculo da densidade de massa ( $d$ ) pode ser feito através da Equação 4, onde  $v_r$  é o volume e  $m_v$  a massa do recipiente.

Equação 4

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \cdot 1000$$

Na Figura 14, tem-se a balança e o recipiente indicados pela norma para a realização do ensaio (a) e o recipiente já com a argamassa sendo pesado (b).

Figura 14 – Ensaio da Densidade de Massa e do Teor de Ar Incorporado.



Fonte: Elaboração Própria.

Para determinar o teor de ar incorporado (A) em porcentagem, utilizou-se a Equação 5, com a densidade de massa teórica da argamassa sem vazios ( $d_1$ ).

Equação 5

$$A = 100. \left(1 - \frac{d}{d_1}\right)$$

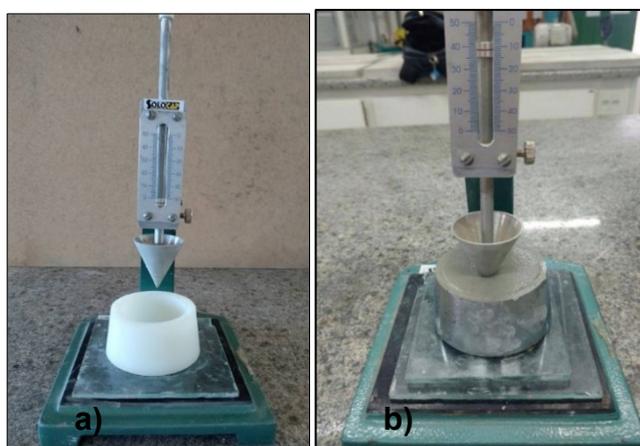
### 3.1.5 Ensaio de Vicat Modificado

O ensaio de Vicat Modificado foi realizado aos 15, 60, 120 e 180 minutos após a mistura dos materiais. Teve como referência a NBR 14399/1999, e consiste em medir a penetração de uma sonda cônica na argamassa que está contida em um molde tronco-cônico.

O molde foi preenchido, tendo como base uma placa de vidro, realizando a devida saída de eventuais bolhas de ar retidas na pasta através de suaves golpes. Prosseguiu-se com a rasadura do corpo de prova com a espátula e a sonda foi posicionada na escala adequada para o início do ensaio.

Com as etapas de preparo feitas, a sonda foi solta em queda livre e após 30 segundos realizou-se a leitura da penetração, em milímetros. Para cada traço foram realizados dois ensaios em cada porção de tempo, e o valor apresentado corresponde à média desses dois valores. Na Figura 15, tem-se os equipamentos utilizados para o ensaio (a) e a amostra dentro do cone já penetrada pela sonda cônica (b).

Figura 15 – Ensaio de Vicat Modificado.



Fonte: Elaboração Própria.

### 3.1.6 Ensaio de Squeeze Flow

Assim como o ensaio de Vicat Modificado, o ensaio de Squeeze Flow também foi realizado em 15, 60, 120 e 180 minutos após a mistura dos materiais. O ensaio teve como base a NBR 15830/2010 e utilizou-se um aparato composto por duas placas lisas e rígidas de aço inox, horizontais e paralelas entre si, acopladas numa prensa universal (Shimadzu AGS-X), com capacidade de carga de 5kN, mostrada na Figura 16.

Figura 16 – Máquina utilizada no ensaio de Squeeze Flow.

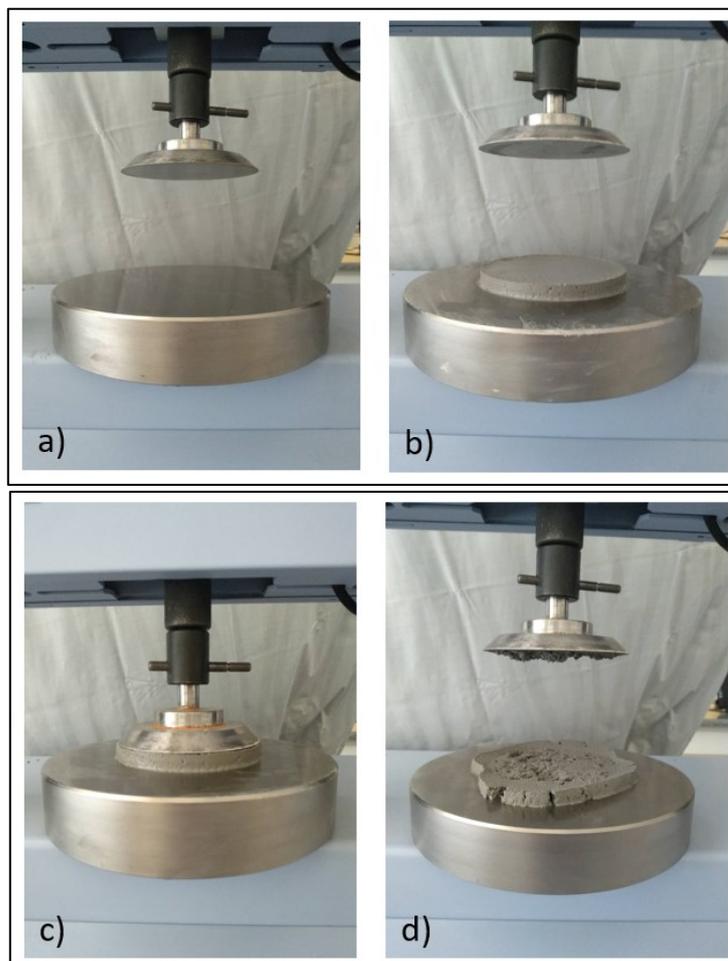


Fonte: Elaboração Própria.

A placa inferior é fixa, enquanto a superior, que possui o mesmo diâmetro da amostra, foi movida verticalmente a uma velocidade constante.

A Figura 17 representa as etapas do ensaio realizado: a prensa universal utilizada (a), a amostra de argamassa moldada no centro da placa inferior, com diâmetro de 100mm e espessura de 10mm (b), o pulsor posicionado no topo da amostra, ou seja, 10mm acima da placa inferior (c) e o procedimento já encerrado, com a amostra deformada (d).

Figura 17 – Procedimento do Ensaio de Squeeze Flow.



Fonte: Elaboração Própria.

Para cada traço, em cada proporção de tempo foram realizados três ensaios com velocidades de deslocamento diferentes, 1mm/min, 0,1mm/s e 1mm/s. O método adotado consiste na aplicação de um esforço de compressão na amostra até que a mesma apresentasse 1kN de resistência ou 9mm de deslocamento.

Os resultados do ensaio de Squeeze Flow foram expressos por uma curva carga em relação ao deslocamento, onde a carga representa a energia necessária para que ocorra a deformação do corpo de prova da argamassa, e o deslocamento representa a movimentação do pistão atribuída no programa de ensaio.

#### 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através do ensaio de consistência (Flow Table), encontrou-se os seguintes dados apresentados na Tabela 4. Cabe lembrar que a relação água/material cimentante foi mantida em 0,71.

Tabela 4 – Resultados de consistência através dos ensaios de Flow Table.

Traço	Flow Table (mm)					
	m1	m2	m3	Média	DP	CV (%)
REF	282,70	282,10	284,80	283,20	1,16	0,41
SCA5	273,00	271,00	269,60	271,20	1,40	0,51
SCA10	270,50	271,40	268,30	270,07	1,30	0,48
SCA15	266,20	267,10	263,90	265,73	1,35	0,51
SCA20	274,10	267,90	264,10	268,70	4,12	1,53
SCA30	255,50	255,60	258,00	256,37	1,16	0,45

Fonte: Elaboração Própria.

Observa-se que os dados médios de espalhamento das misturas diminuíram conforme foi aumentada a porcentagem de SCA, que pode ser explicada pela superfície lamelar, irregular e de grande área superficial que a sílica da casca do arroz possui, além da estrutura porosa citada por Gomes (2013). Através do desvio padrão calculado (DP), percebe-se que a medida de dispersão dos valores em relação à sua média é bem pequena, assim como com os baixos valores do coeficiente de variação (CV), que mostram uma boa consistência dos dados obtidos.

Na Tabela 5 tem-se os resultados de penetração obtidos pelo ensaio de consistência (Vicat Modificado), que foi realizado em diferentes idades. Nota-se que os valores de consistência destacados mostram menores penetrações, ocorridas com o aumento da porcentagem de SCA e com o tempo em aberto das misturas de argamassa. Estes valores são encontrados pelo fato de a sílica ser porosa e conseqüentemente absorver a água da mistura, deixando sua superfície seca e sem lubrificação.

Tabela 5 - Resultados de consistência através dos ensaios de Vicat Modificado.

Traço	REF	SCA 5	SCA 10	SCA 15	SCA 20	SCA 30
Tempo	Penetração (mm)					
15 min	15,5	15,3	11,8	11,7	13,4	13
60 min	10,5	12,5	10,75	8,25	8,25	8,5
120 min	9	10,5	9,3	<b>4,5</b>	<b>6,5</b>	<b>7,5</b>
180 min	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>7,8</b>	<b>3,9</b>	<b>4</b>	<b>5,5</b>

Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados obtidos nos ensaios de densidade de massa e teor de ar incorporado, apresentados na Tabela 6, mostram que a SCA não teve maior relevância, pois os valores não seguiram um aumento ou decréscimo significativo em relação à porcentagem de sílica substituída.

Tabela 6 - Resultados obtidos através dos ensaios de densidade de massa e teor de ar incorporado.

Traço	Densidade de massa (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de Ar Incorporado (%)
REF	2213,55	11
SCA5	2221,71	11
SCA10	2203,42	12
SCA15	2197,63	12
SCA20	2211,58	12
SCA30	2203,42	12

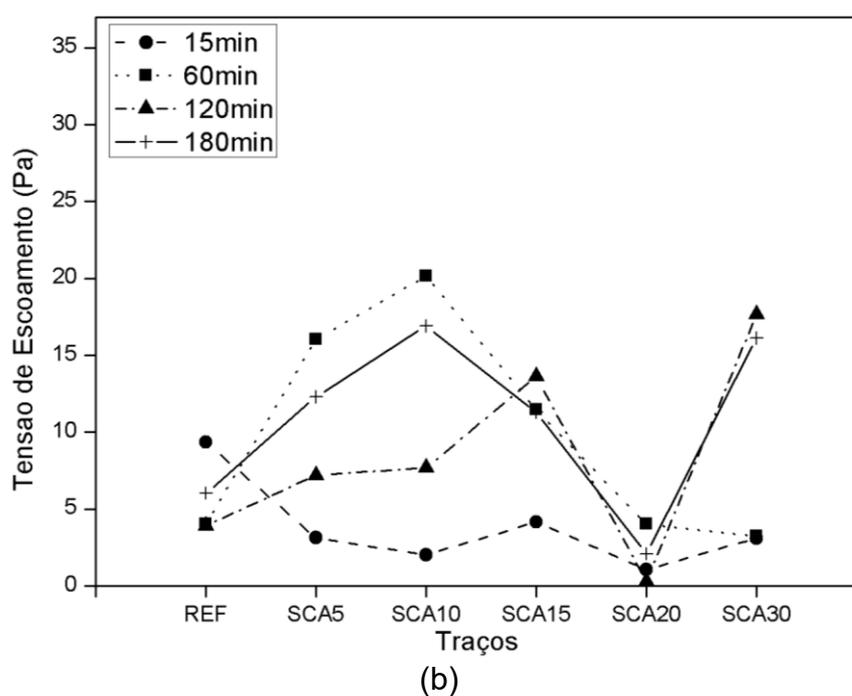
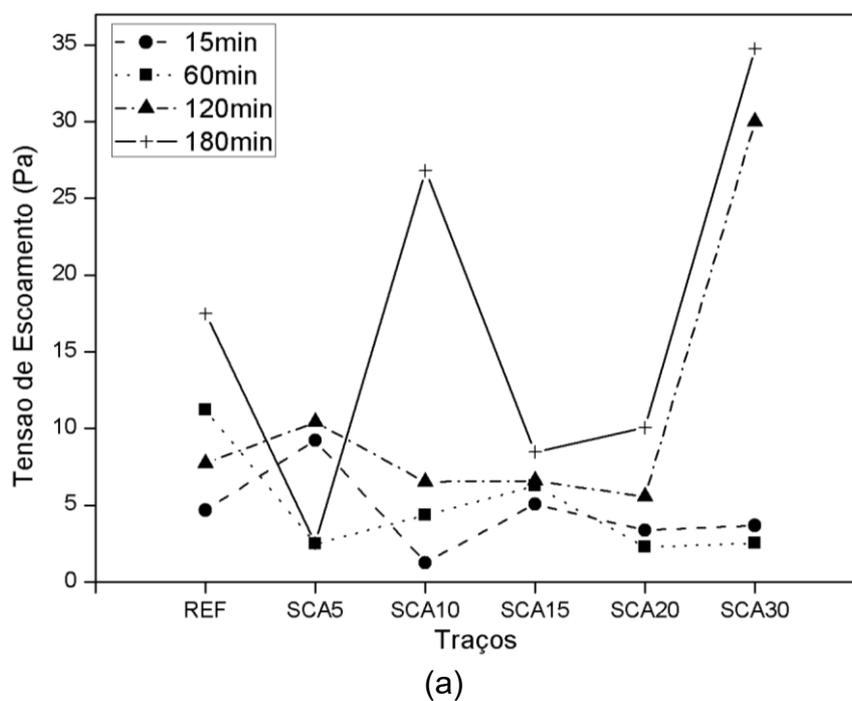
Fonte: Elaboração Própria.

A avaliação da reologia das argamassas apenas pelos ensaios de consistência é insuficiente portanto, ensaios de Squeeze Flow foram realizados para um estudo mais detalhado.

Com os dados obtidos pelo ensaio de Squeeze Flow, tem-se os valores de tensão de escoamento e viscosidade, calculados a partir da Equação 2 e Equação 3 apresentadas no item 2.2.2 (página 21).

O Gráfico 1 (a) e (b) mostra a tensão de escoamento para cada traço nos tempos de 15, 60, 120 e 180 minutos e nas velocidades 1mm/min e 0,1mm/s, respectivamente.

Gráfico 1 – Tensão de Escoamento para cada traço nas velocidades: 1mm/min em a), e 0,1mm/s em b).

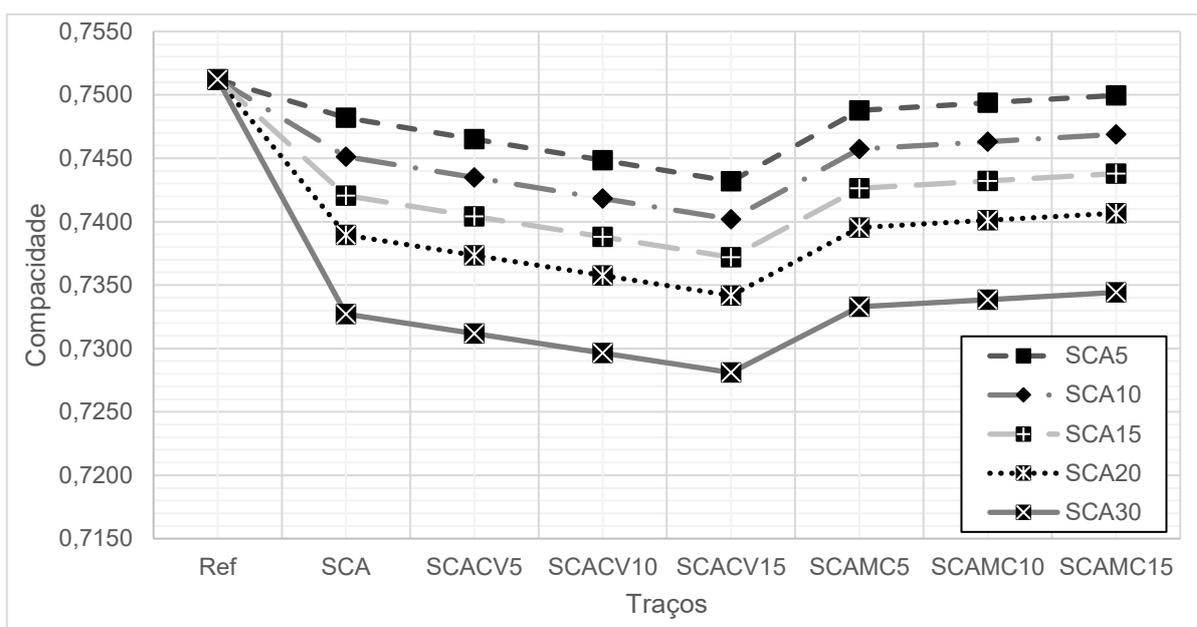


Fonte: Elaboração Própria.

No Gráfico 1 (a), as curvas que representam os tempos de 15, 60 e 120 minutos têm comportamentos similares, que podem ser explicados pela baixa velocidade de realização do ensaio (1mm/m), a tensão de escoamento, em geral, permanece próxima do traço referência, tendo em vista que o esqueleto granular tem “tempo” para se rearranjar na mistura.

Observa-se no Gráfico 1 (b) que as curvas dos traços para até aproximadamente 10% de substituição de SCA apresentam valores de tensão de escoamento maiores que a referência, aparentemente por ocorrer uma perturbação no arranjo granular bem acentuada, que pode ser observada na Figura 18 onde a compacidade das misturas diminuiu conforme aumenta-se a porcentagem de SCA, juntamente com absorção da água superficial e possíveis forças de Van Der Waals.

Figura 18 – Valores de compacidade.



Fonte: Tonello (2017).

No Gráfico 1 (b), entre os 15% e 25% de substituição de SCA, a área superficial das misturas continuam maiores, porém pode ter havido um arranjo por empacotamento das misturas melhor que o visto anteriormente, que faz com que a tensão de escoamento diminua. Após 20%, novas perturbações granulares ocorrem, com aumento muito grande da área superficial e absorção de água na mistura, causando grande atrito para os tempos de 120 e 180 minutos, ocasionando maior variação do enrijecimento.

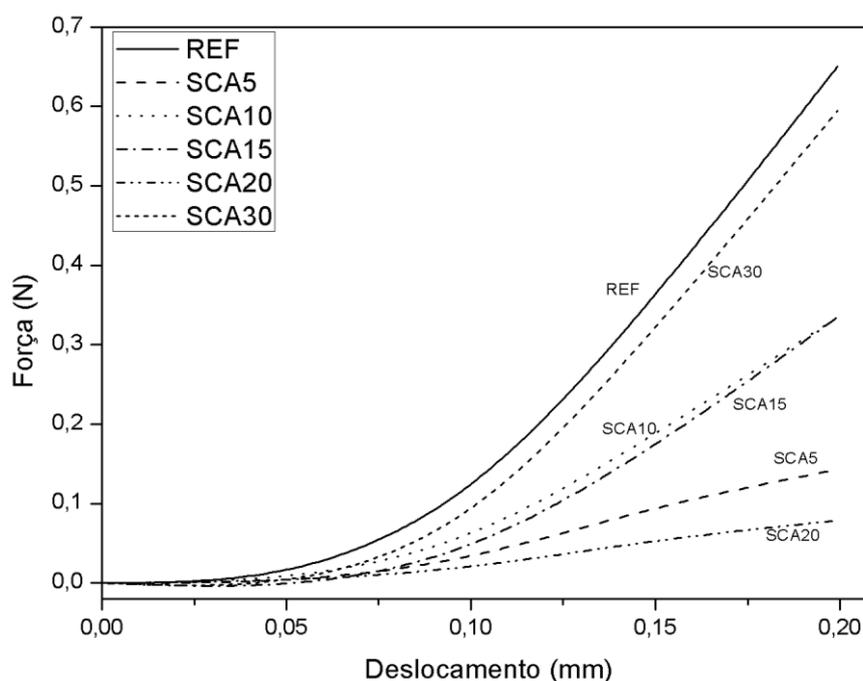
Nos menores tempos (15 e 60 minutos) a variação do enrijecimento não é grande pelo fato de ainda estar ocorrendo processo de absorção de água.

A curva fora deste comportamento é a que contém os valores para a mistura com tempo em aberto de 15 minutos, que pode ser explicada, possivelmente, pelo fato de o processo de absorção de água ainda estar ocorrendo.

Os valores de tensão de escoamento para a velocidade de 1mm/s não puderam ser calculados pelo fato de a velocidade ensaiada ser muito elevada e assim, a curva expressa pelos resultados obtidos nos ensaios não forma uma região de linearidade elástica, e nem uma curva apropriada para análise.

As curvas de todos os tempos ensaiados obtidas com esta velocidade se assemelham com a observada no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Curvas obtidas nos ensaios de Squeeze Flow na velocidade 1mm/s.



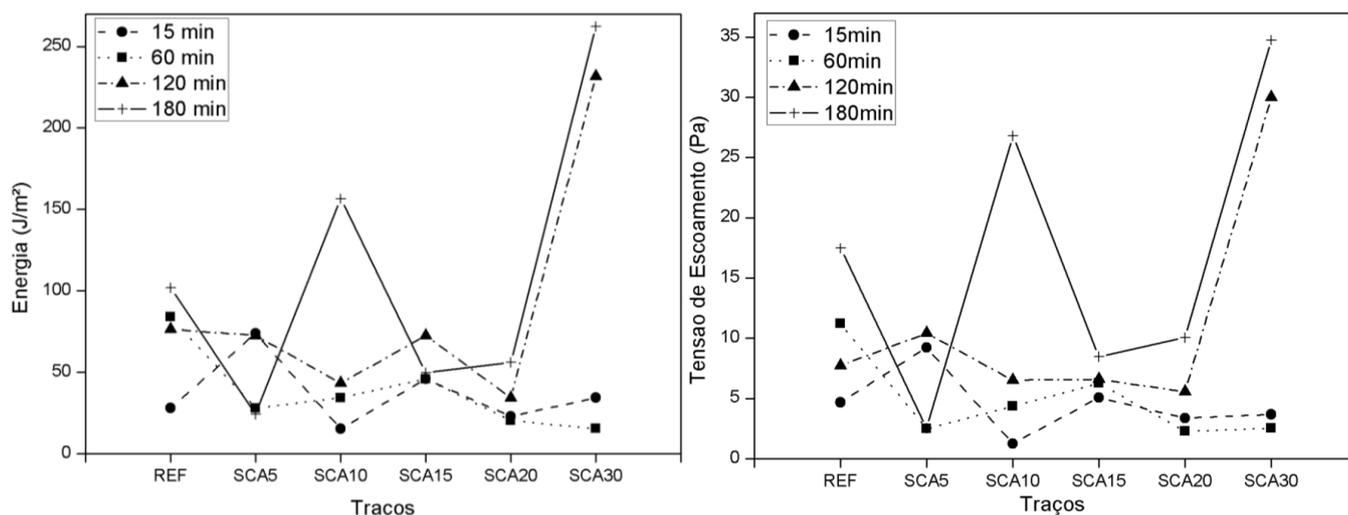
Fonte: Elaboração Própria.

A partir das curvas feitas com os dados dos ensaios de Squeeze Flow (Anexo A), calcula-se a área abaixo da curva com deslocamento de 0 a 0,5mm, e relacionando esta área com a área da amostra, calcula-se a energia em  $J/m^2$ .

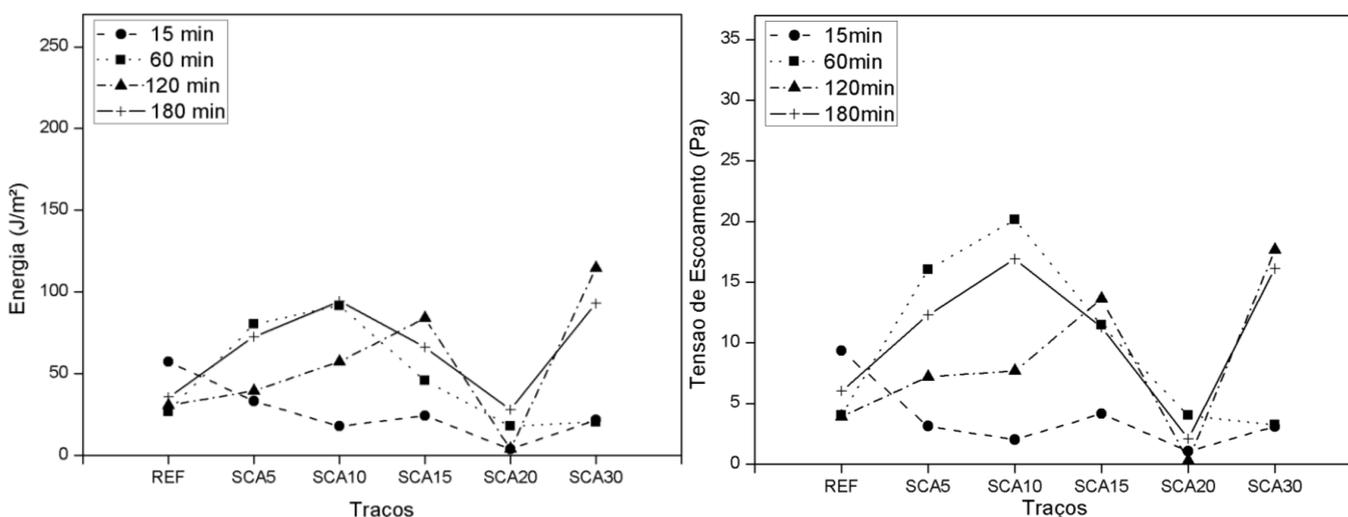
No Gráfico 3, tem-se os valores de energia calculados para os traços nos variados tempos e nas velocidades de 1mm/min e 0,1mm/s. Estes valores são comparados com os valores dos gráficos de tensão de escoamento analisados

anteriormente, e percebe-se que o comportamento das curvas são muito semelhantes, mostrando que os valores de tensão de escoamento calculados pela Equação 2 são bastante relevantes.

Gráfico 3 – Valores de Energia comparados com Tensão de Escoamento nas velocidades: 1mm/min em a), e 0,1mm/s em b).



(a)



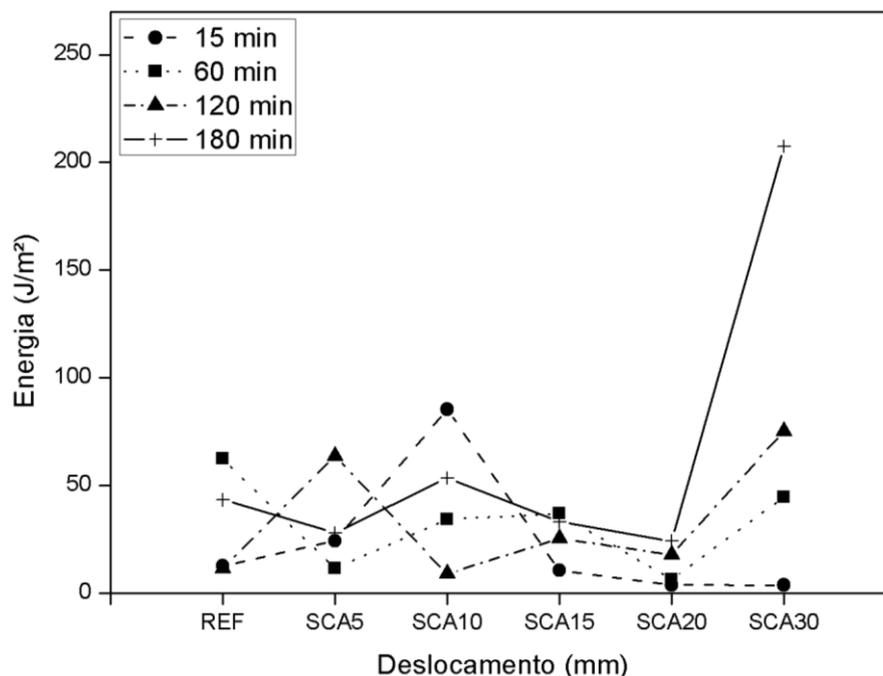
(b)

Fonte: Elaboração Própria.

Como o comportamento das curvas nos gráficos de energia são semelhantes aos de tensão de escoamento nas duas velocidades (1mm/min e 0,1mm/s), este mesmo comportamento, possivelmente, prosseguirá para a velocidade 1mm/s. Com os valores de energia na velocidade 1mm/s, pode-se então, ter o comportamento que

as curvas de tensão de escoamento possivelmente terão nesta velocidade, apresentados no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Valores de Energia na velocidade 1mm/s.

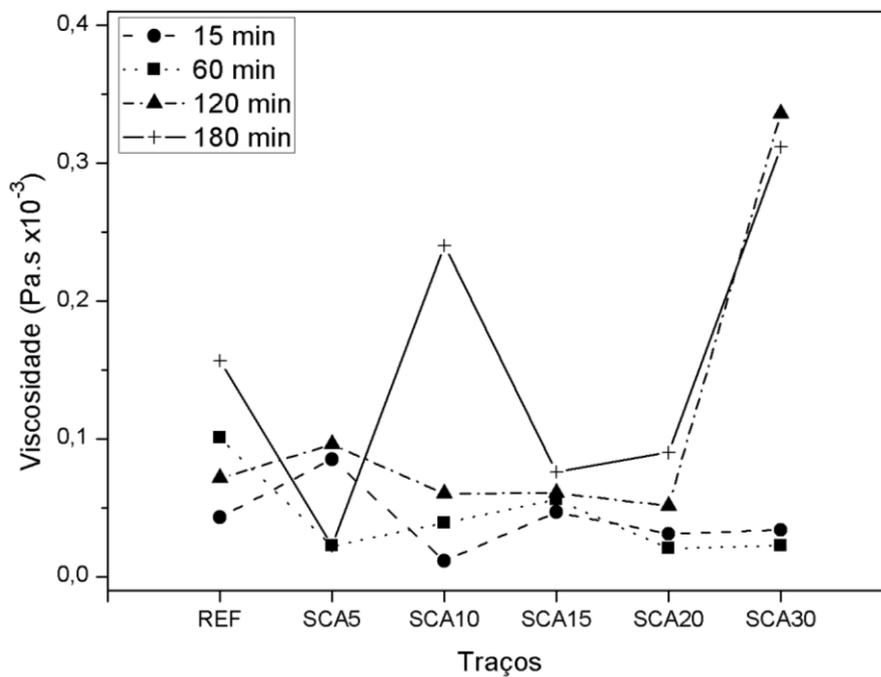


Fonte: Elaboração própria.

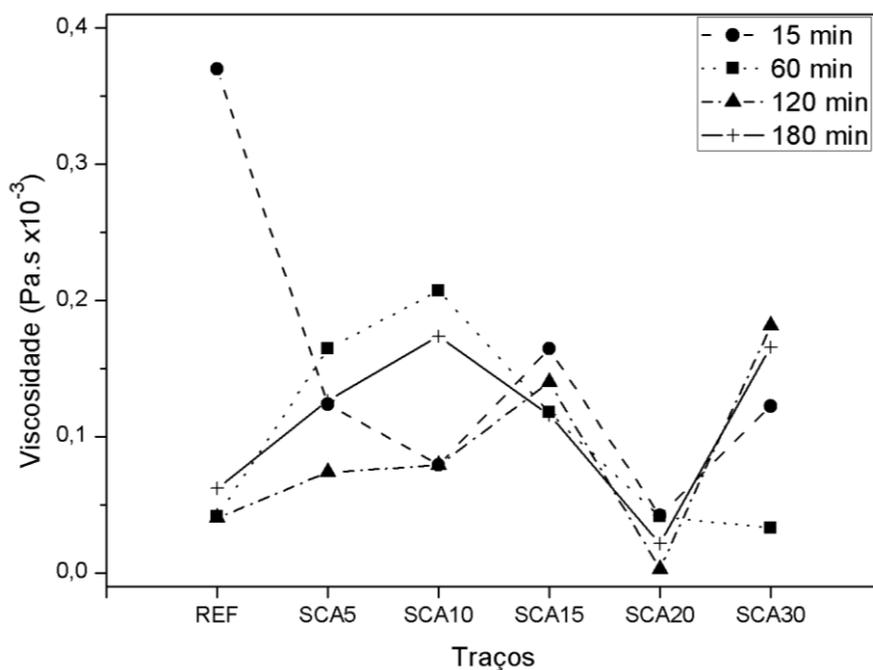
Observa-se que os valores de energia para os traços com a substituição de SCA na velocidade 1mm/s permanecem similares ao do traço referência, com exceção do traço com 30% de substituição de sílica na idade de 180 minutos, que tem um considerável acréscimo de energia. Esse comportamento semelhante entre as curvas ocorre, possivelmente, pelo fato de o ponto de deslocamento analisado ser bastante baixo e, portanto, ainda há bastante espaço para o esqueleto granular se rearranjar na mistura.

Os valores de viscosidade encontrados, para todos os tempos em aberto analisados e nas velocidades 1mm/min e 0,1mm/s estão representados no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Valores de Viscosidade nas velocidades: 1mm/min em a) e 0,1mm/s em b).



(a)



(b)

Fonte: Elaboração Própria.

No Gráfico 5 (a), a viscosidade das misturas permanece praticamente constante, em relação ao traço referência, conforme aumenta a porcentagem de SCA, para os tempos em aberto de 15, 60 e 120 minutos, exceto a curva de 120 minutos

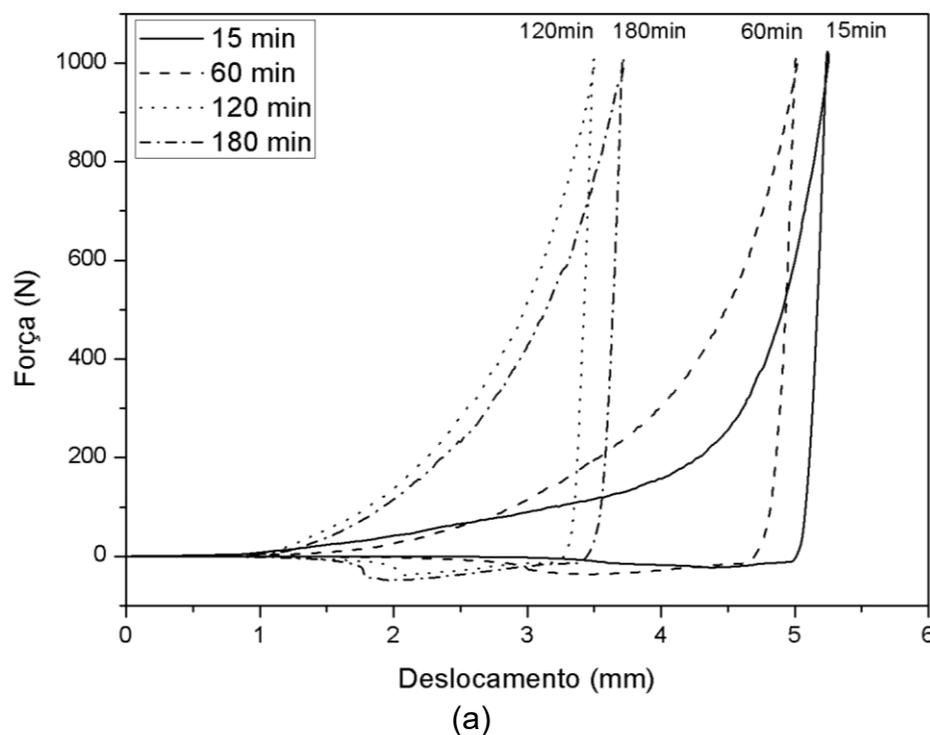
que tem a viscosidade bastante elevada com 30% de SCA na mistura. A curva que representa os valores de 180 minutos é a que tem um comportamento diferente, apresentando maiores valores de viscosidade conforme aumenta a porcentagem de SCA.

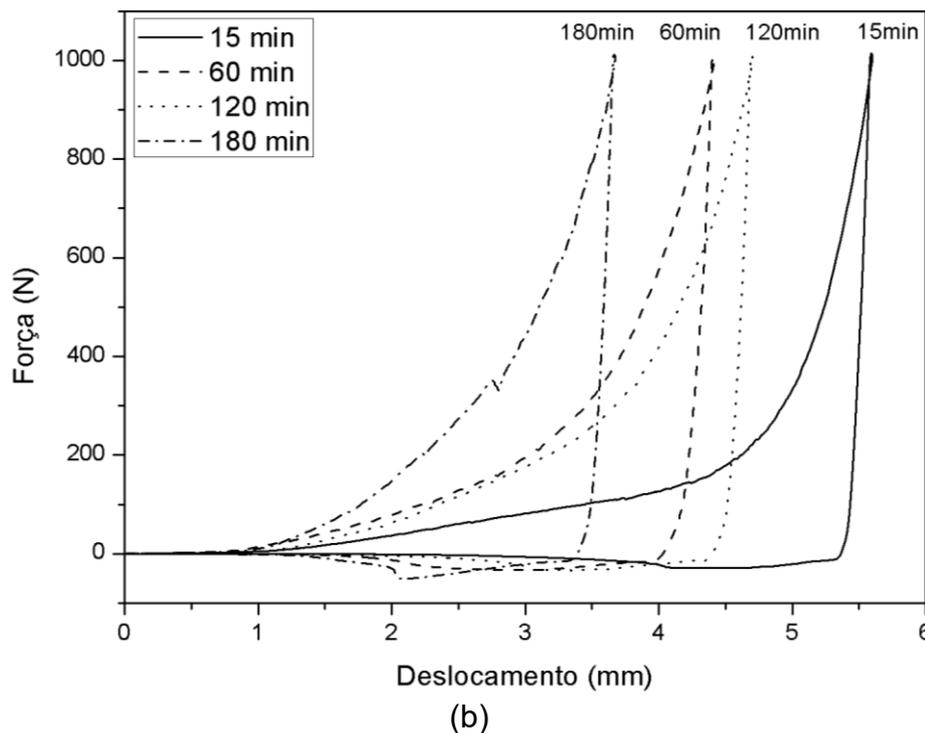
No Gráfico 5 (b), a viscosidade, em geral, aumenta conforme aumenta-se a porcentagem de SCA na mistura, exceto no traço SCA20, que apresenta uma menor viscosidade.

Este fato assemelha-se com resultados obtidos por Klimaczewski (2017), onde o traço com 20% de SCA apresenta menor viscosidade que traços com mais sílica na mistura.

No Gráfico 6, foram feitas análises para o traço referência (REF) e para o traço com 5% de substituição de sílica da casca do arroz (SCA5), na velocidade 0,1mm/s (velocidade normativa), variando os tempos em aberto das misturas.

Gráfico 6 – Squeeze Flow na velocidade 0,1mm/s para os traços: REF em a), e SCA5 em b).





Fonte: Elaboração Própria.

Observa-se no Gráfico 6 (a), que a mistura do traço referência enrijece (menores valores de deslocamento), somente após uma hora do tempo em aberto, apresentando baixa trabalhabilidade, o que dificulta a aplicação e conseqüentemente diminui a produtividade em obra.

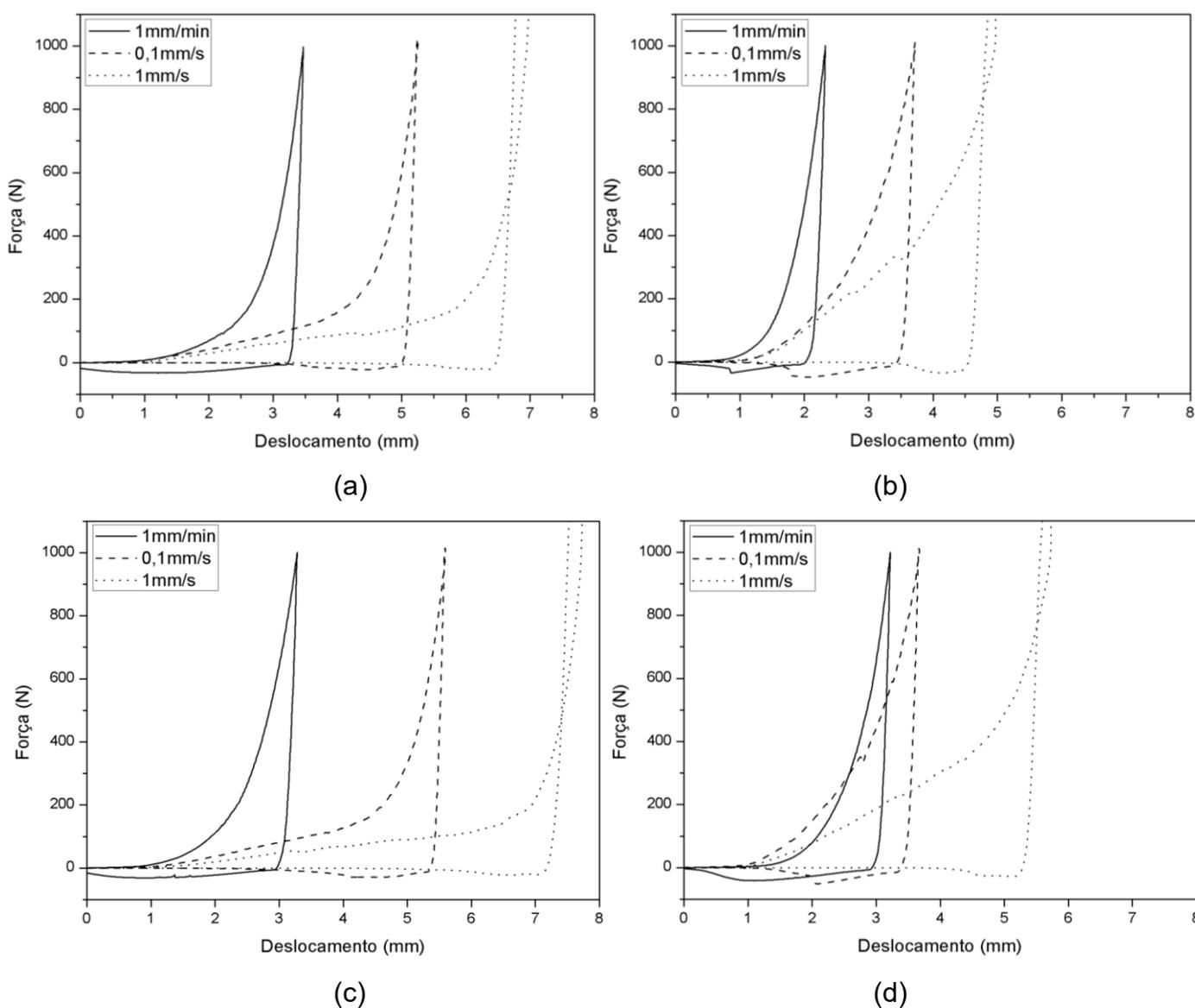
No Gráfico 6 (b), observa-se que para o tempo de 15 minutos o traço SCA5 apresenta menor valor de enrijecimento em relação com o traço REF. Porém este comportamento não segue nos maiores intervalos de tempo (60, 120 e 180 minutos), onde a mistura tem maior rigidez e menores valores de deslocamento. Aparentemente a maior trabalhabilidade do traço SCA5 aos 15 minutos se deve a um comportamento físico da mistura, ao formato geométrico da sílica e a sua baixa capacidade de reter água, uma vez que a porcentagem de SCA usada é baixa.

Analisando os traços REF e SCA5 nos tempos de 15 e 180 minutos, em relação às velocidades ensaiadas 1mm/min, 0,1mm/s e 1mm/s (Gráfico 7) percebe-se que os resultados se equivalem aos encontrados por Dallora, *et al.* (2011) demonstrados na Figura 7 do item 2.2.2 (página 22). As amostras ensaiadas com menor taxa de deslocamento fluem com maior dificuldade e possuem menor deslocamento final em relação às amostras testadas com maior taxa de deslocamento. Conforme Dallora, *et al.* (2011), nas menores velocidades essa dificuldade ocorre pela movimentação entre

fluido e sólido e ocasiona separação de fases na argamassa, já nas maiores velocidades o fluido tem menos tempo para percolar a amostra, reduzindo a possibilidade de segregação.

O Gráfico 7 mostra os resultados em relação às velocidades ensaiadas e pode-se observar que para 5% de substituição a SCA não interfere este comportamento das amostras.

Gráfico 7 – Squeeze Flow do traço referência e SCA5: REF idade de 15 minutos em a), REF idade de 180 minutos em b), SCA5 idade de 15 minutos em c) e SCA5 idade de 180 minutos em d).



Fonte: Elaboração Própria.

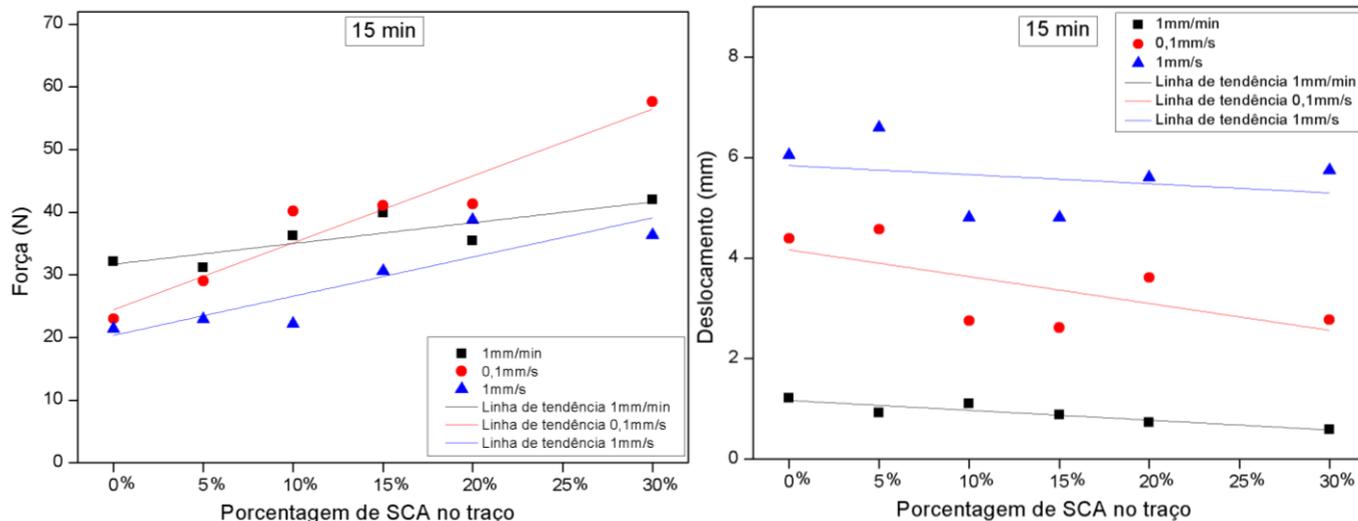
Ainda com os dados obtidos nos ensaios de Squeeze Flow, tem-se os valores de tração máxima de cada traço (Anexo B), para determinada velocidade e nos variados tempos de ensaio.

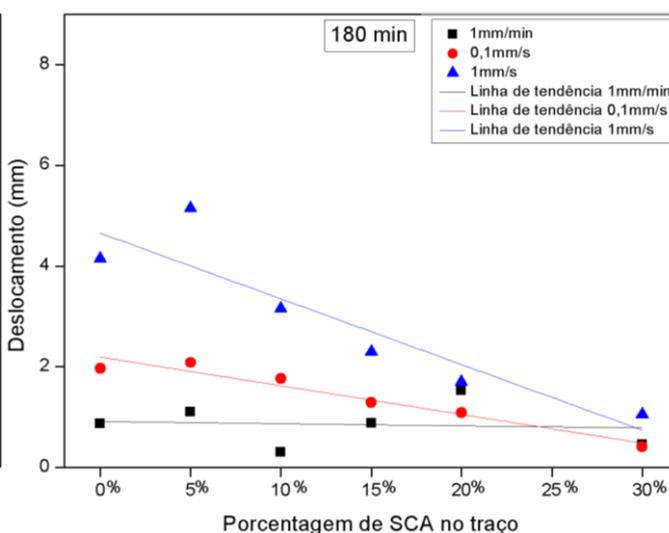
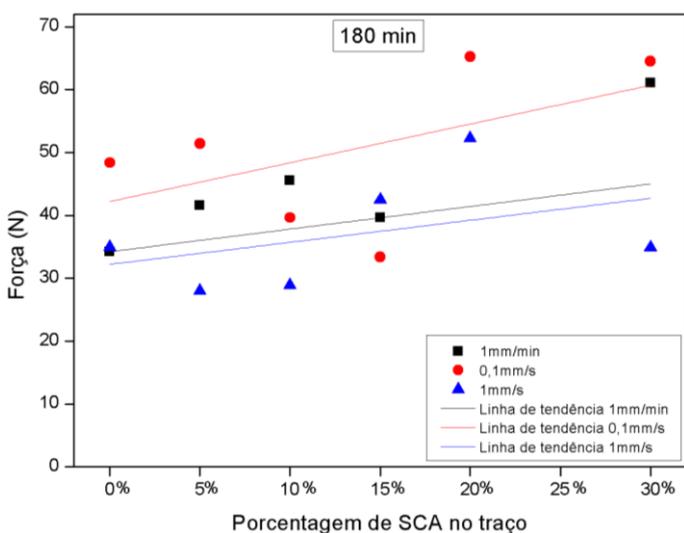
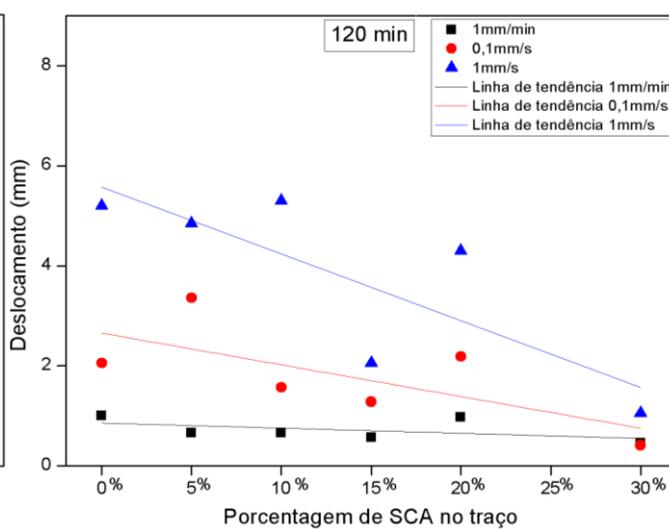
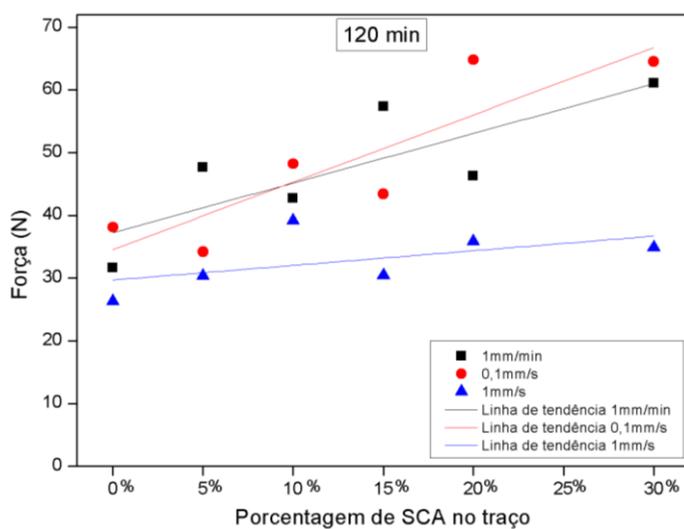
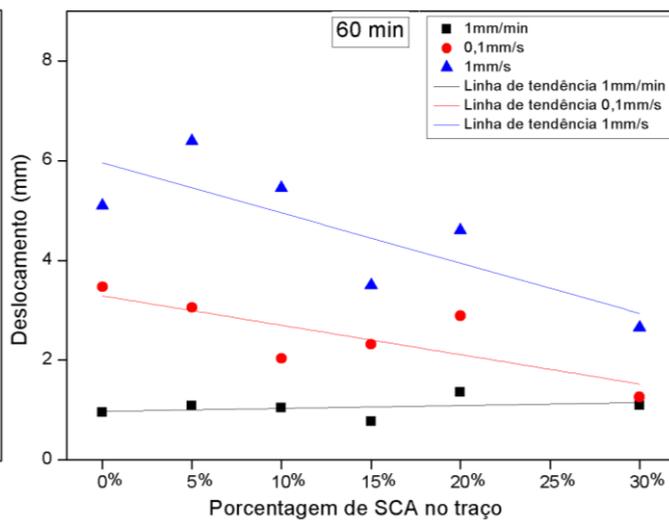
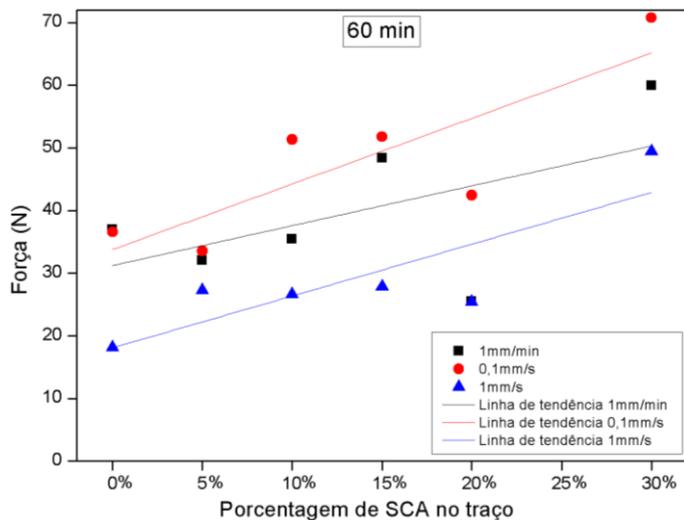
Percebe-se que para as três velocidades analisadas (1mm/min, 0,1mm/s e 1mm/s) e para os variados tempos (15, 60, 120 e 180 minutos), os valores de tração máxima aumentam conforme aumenta a porcentagem de SCA, ou seja, a mistura aparentemente apresenta maior adesão inicial quanto maior a presença de sílica no traço.

Os valores de deslocamento presentes no Gráfico 8 são correspondentes aos valores de tração máxima. Pode-se observar que estes valores diminuem conforme aumenta-se a porcentagem de SCA e o tempo em aberto das misturas, mostrando então, que as misturas se tornam mais rígidas.

As linhas de tendência dos valores de tração máxima e de deslocamento presentes no Gráfico 8 salientam os resultados citados anteriormente.

Gráfico 8 – Resultados de tração no ensaio de Squeeze Flow.





Fonte: Elaboração Própria.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo o objetivo foi de avaliar o comportamento reológico no estado fresco de argamassas, em relação ao tempo, velocidade e substituições parciais do cimento Portland pela sílica de casca de arroz (SCA). Assim, foram possíveis alcançar as seguintes conclusões.

Em relação aos ensaios de consistência, através do ensaio de Flow Table constatou-se que os valores de espalhamento diminuíram conforme aumentou-se a porcentagem de SCA na mistura.

No ensaio de Vicat Modificado, que foi realizado em diferentes idades, menores valores de penetração foram observados conforme o aumento da porcentagem de SCA e do tempo em aberto das misturas de argamassa.

No que se refere aos índices físicos de densidade de massa e teor de ar incorporado, percebeu-se que a inclusão da SCA não apresentou variações significativas de maior relevância.

No que diz respeito aos valores de tensão de escoamento encontrados através do ensaio de Squeeze Flow, foram possíveis obter os resultados para as velocidades de 1mm/min e 0,1mm/s. Para a velocidade de 1mm/s, não foi possível obter o ponto de mudança do estágio elástico para o estágio plástico, uma vez que o estágio elástico é muito pequeno e a velocidade muito alta. Por conseguinte, os resultados de viscosidade plástica para a velocidade de 1mm/s também não puderam ser obtidos.

Para a velocidade 0,1mm/s, até aproximadamente 10% de substituição de SCA estes valores são maiores que os encontrados para o traço referência. Entre 15% e 25% de substituição a tensão de escoamento diminui, e com porcentagens entre 20% e 30% a tensão de escoamento permanece baixa para os tempos 15 e 60 minutos, e aumenta consideravelmente aos 120 e 180 minutos de idade.

Na velocidade 1mm/min os valores de tensão de escoamento permanecem semelhantes aos encontrados para o traço referência, em todas as substituições e em todos os tempos analisados.

Velocidades mais elevadas, como a ensaiada de 1mm/s, aparentemente não são viáveis para a análise dos ensaios de Squeeze Flow.

Na análise dos valores de energia encontrados, pode-se perceber que o comportamento das curvas obedece ao mesmo comportamento das curvas obtidas

para tensão de escoamento. Deste modo, com a curva de energia na velocidade 1mm/s pode-se ter o comportamento da tensão de escoamento.

Na análise da viscosidade, com o aumento da porcentagem de SCA e do tempo em aberto das misturas, os valores aumentaram na velocidade 0,1mm/s e permaneceram semelhantes ao traço referência na velocidade 1mm/min.

Em relação ao tempo útil das argamassas estudadas verificou-se, através dos ensaios de Squeeze Flow, que para menores intervalos de tempo (15 e 60 minutos), os traços apresentam menor rigidez, e para maiores intervalos a rigidez aumenta.

Ao analisar a presença da SCA nas misturas, tem-se que nas menores porcentagens (5%, 10% e 15%) os traços apresentam menor rigidez, e para maiores porcentagens (20% e 30%) a rigidez aumenta.

No que diz respeito à tração máxima, para as três velocidades analisadas no ensaio de Squeeze Flow, os valores aumentaram conforme aumentou-se a porcentagem de SCA e o tempo em aberto das misturas, apresentando aparentemente, maior adesão inicial quanto mais sílica presente no traço e quanto maior a idade de ensaio. Os valores correspondentes de deslocamento no pico máximo de força diminuíram, mostrando que as misturas se tornaram mais rígidas.

Por fim, conclui-se que não houve melhoras significativas nas propriedades das argamassas no estado fresco, e até 60 minutos baixas substituições de SCA (até 15%) podem ser feitas sem prejudicar a trabalhabilidade da mistura.

## **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Para uma maior compreensão das características reológicas no estado fresco das argamassas com substituições de Sílica de Casca de Arroz e também para uma melhor avaliação do tempo em aberto das misturas, sugere-se os seguintes estudos:

- Realizar ensaios com reômetro e viscosímetro para melhor análise da tensão de escoamento e da viscosidade das misturas;
- Diminuir o atrito do ensaio de Squeeze Flow;
- Realizar os ensaios de Squeeze Flow com maiores tempos em aberto e analisar o tempo de consolidação das misturas com diferentes porcentagens de SCA;
- Estudar alguns traços mais detalhadamente, com maior repetição dos ensaios.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_. **NBR 13276**: Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_. **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.

\_\_\_\_. **NBR 14399**: Cal hidratada para argamassas - Determinação da água da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 1999.

\_\_\_\_. **NBR 15839**: Argamassa de Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Caracterização Reológica pelo Método Squeeze-Flow. Rio de Janeiro, 2010.

BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh mortar**. Magazine of Concrete Research, v. 43, n. 154, p. 13–21, 1991.

BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh mortar – A Review**. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas - I International Symposium on Mortar Technology, 2005.

BARNES, H. A. **The yield stress a review or everything flows**. Construction and Building Materials. Volume 81, Pages 133 – 178. Março 1998.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 2, cap. 26, p. 864-904.

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**. Tese de Doutorado, 2009. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2009.

CARRA, C. B.; EDUARDO, C.; GOMES, M. **Influência da Sílica da Casca do Arroz (SCA) nas Propriedade dos Compósitos Cimentícios**. XXIV Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP p. 2183, Campinas, Brasil, 2014.

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, 2007.

CASTRO, C. **Caracterização reológica de uma mistura de água e sedimento**. Trabalho de Diplomação, 2011. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Rio Grande do Sul, 2011.

COSTA, M. D. R. D. M. M. DA. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos**. Tese de Doutorado, 2006. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2006.

DALCIN, J. B. **Avaliação do potencial do uso da sílica de casca de arroz obtida através da queima controlada como substituição parcial ao cimento Portland na produção de concretos autoadensáveis**. Dissertação de Mestrado, 2016. Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2016.

DALLORA, R. A. P.; LOFRANO F. C.; CARDOSO F. A.; PILEGGI R. G.; JOHN V. M. **Influência da Configuração Experimental do Método Squeeze-Flow Aplicado à Argamassa de Revestimento**. IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Belo Horizonte, Brasil, 2011.

FERRARIS, C. 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, 1999.

GLATTHOR, A.; SCHWEIZER, D. **Rheological Lab Testing of Building Formulations**. ConChem Conference, Düsseldorf, 1994. Disponível em: <<http://www.baustoffchemie.de/en/rheology>>. Acesso em: 20 out. 2018.

GOMES, Valtencir L. L. **Efeito da Adição de Diatomita no Comportamento Reológico e Mecânico de Argamassas Colante**. 2013. 138f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, 2018.

KLIMACZEWSKI, F. A. **Avaliação da Reologia no Estado Fresco de Argamassas com Substituição de Cimento Portland por Cinza Volante, Sílica da Casca do Arroz e Metacaulim**. 2017.

KUDO, E. K. **Caracterização Reológica De Argamassas Colantes**. Dissertação de Mestrado, 2012. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

MAPA DA OBRA. Disponível em: <<https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/aprenda-a-orcar-novo-comodo-em-alvenaria-estrutural/>>. Acesso em 19 nov. 2018.

MARANGON, E.; MARTON, L. F. M.; SOARES, E. L.; MENDES, G. G.; MARTINS, R. P.; SILVA, D. M. G. **Atividade pozolânica da sílica da casca de arroz produzida**

**por combustão em leito fluidizado.** 55º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON, Gramado, RS. 2013.

MATTANA, A. J.; COSTA, M. D. R. D. M. M. DA. **Avaliação da Plasticidade de Pastas de Cal Hidratada pelo Ensaio Squeeze Flow.** XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Porto Alegre, Brasil, 2015.

MEETEN, G. H., **Yield stress of structured fluids measured by squeeze flow.** Rheol. Acta 39, 399–408 (2000).

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2013.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

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.

NAIR, D. G., FRAAIJ, A., KLAASSEN, A. A. K., KENTGNES, A. P. M.. **A Structural Investigation Relating to the Pozzolanic Activity of Rice Husk Ashes.** Cement and Concrete Research. Vol 38, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** São Paulo, PINI, 1997.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico.** Fazendo Arte Editorial, 2000.

OLIVEIRA, Marcelo de Jesus Dias. **Avaliação do tempo de consolidação de argamassas colantes através de métodos reológicos.** Dissertação de Mestrado, 2015. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM. Santa Maria, 2015.

ROMA, W. N. L. **Fenômenos de Transporte para a Engenharia.** São Carlos: Rima, 2006.

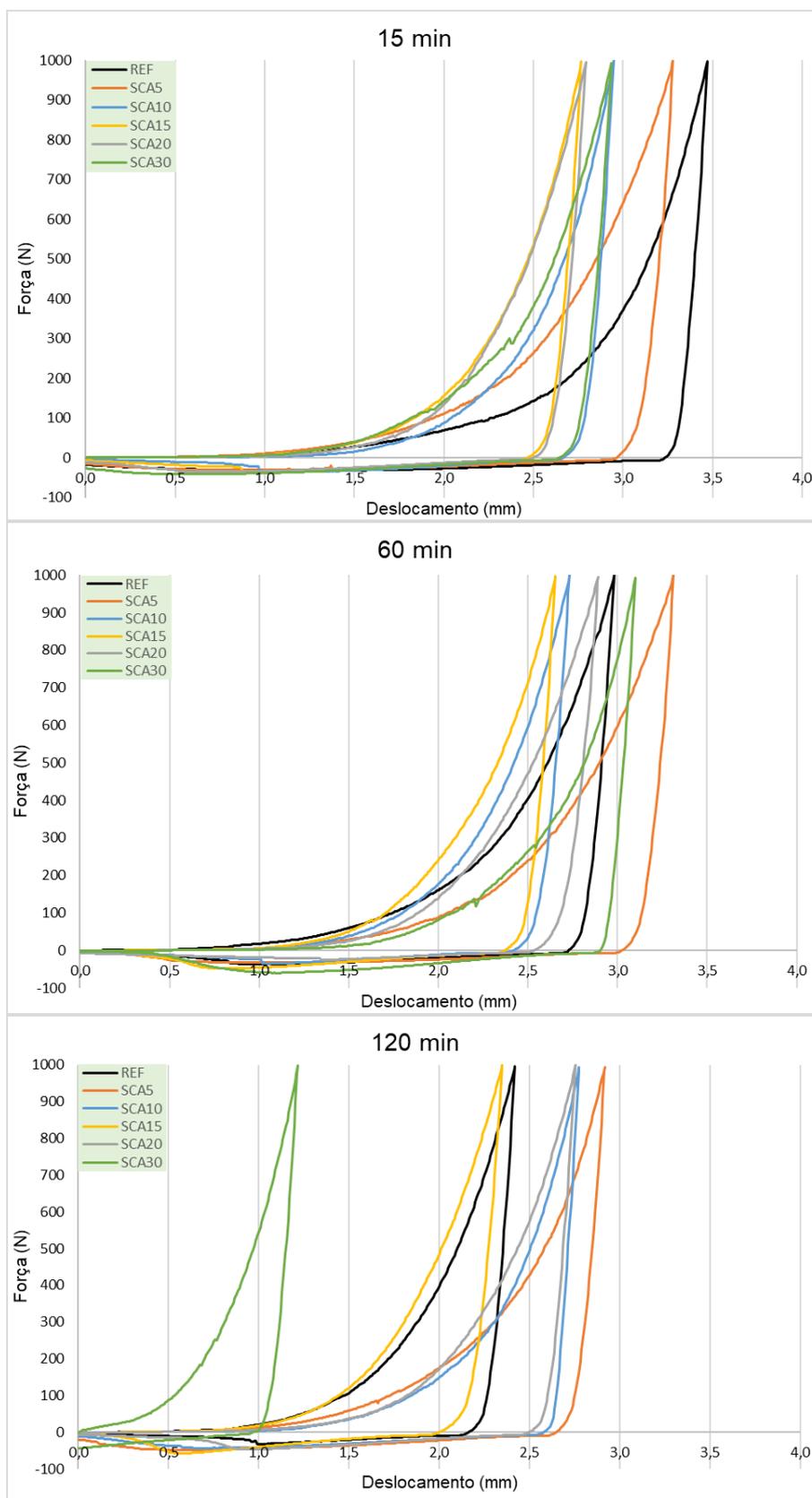
SILVA, C. O. **Análise Crítica dos Requisitos e Critérios de Qualidade da Argamassa Colante.** Dissertação de Mestrado, 2003. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

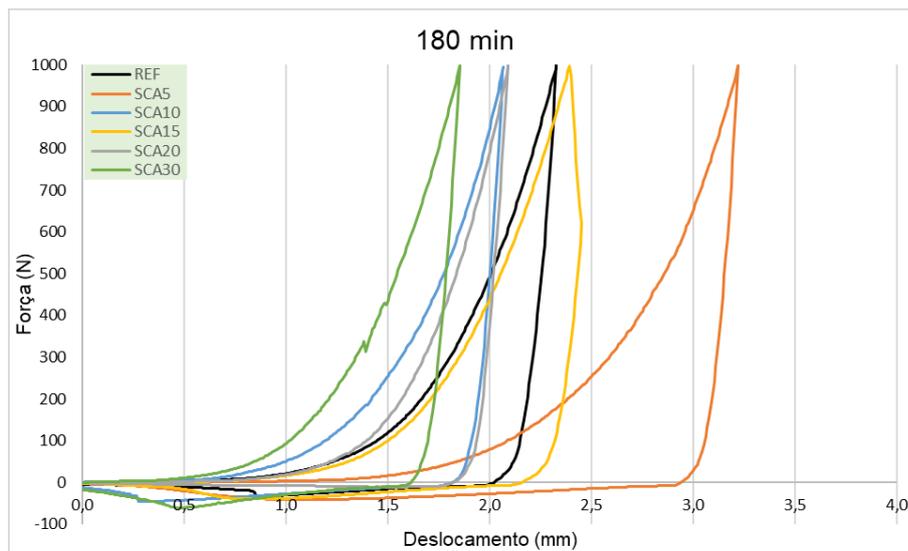
SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Disponível em: <<http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1556548378.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2019.

SINHORELLI, K. S.; FILHO, J. S. A.; SOUZA, L. D. P.; AZEREDO, A. F. N.; AZEREDO, G. A. **Influência das Adições Pozzolânicas na Reologia das Argamassas para Revestimento.** 60º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON, Foz do Iguaçu, PR. 2018.

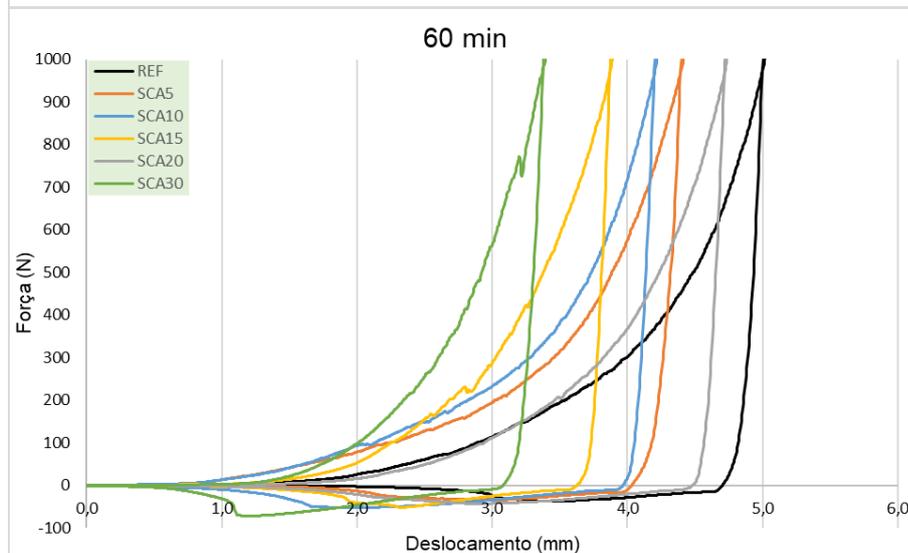
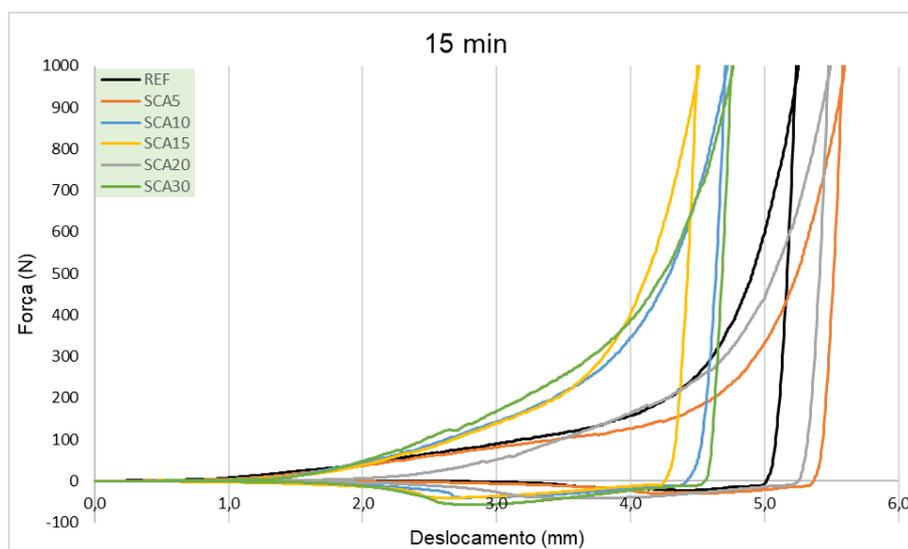
**TONELLO, Ismael. Estudo do Comportamento Mecânico à Compressão e Flexão em Argamassas de Revestimento com Substituição Parcial de Cimento Portland por Sílica da Casca de Arroz, Cinza Volante e Metacaulim. 2017.**

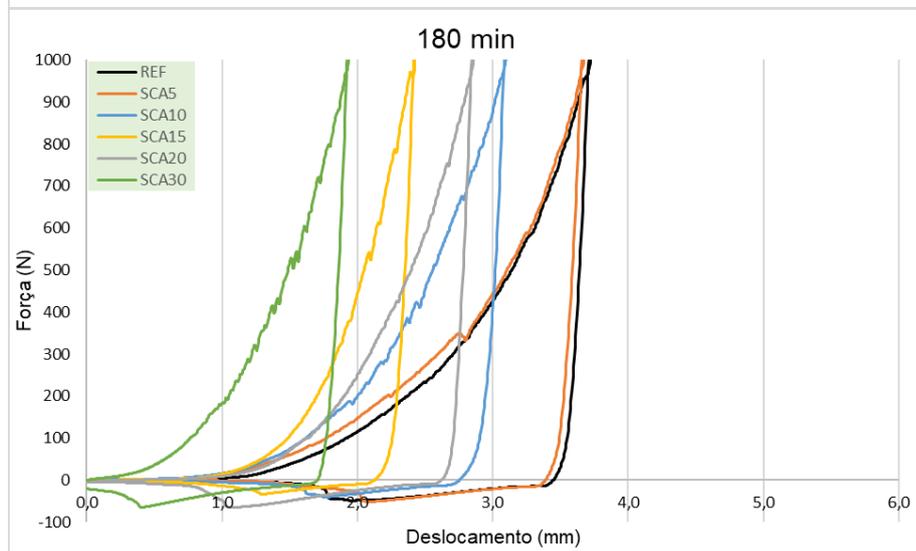
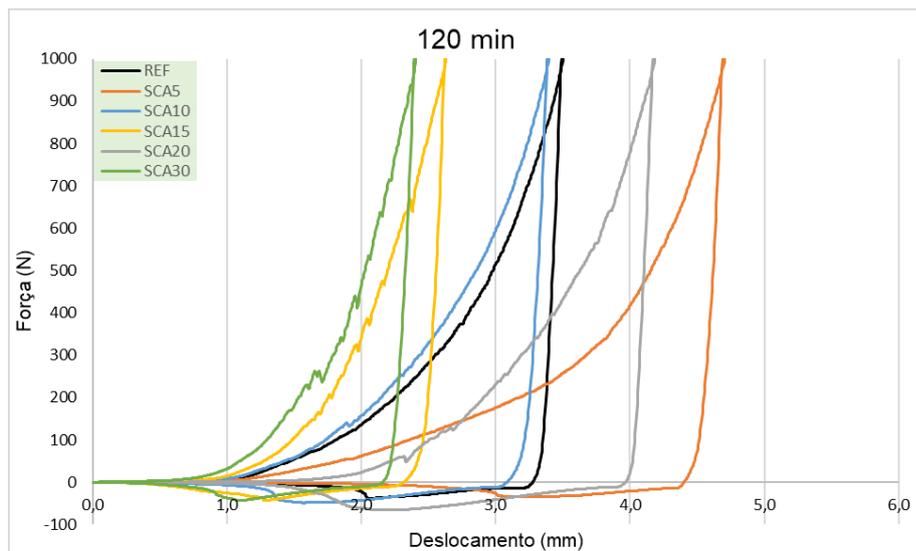
## **ANEXOS**

**Anexo A – Gráficos do ensaio de Squeeze Flow.****Velocidade de ensaio: 1mm/min**

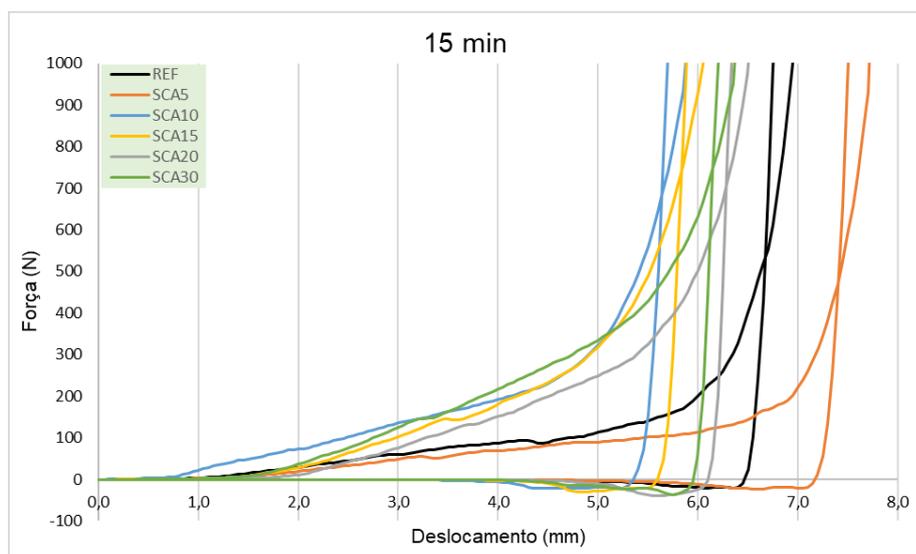


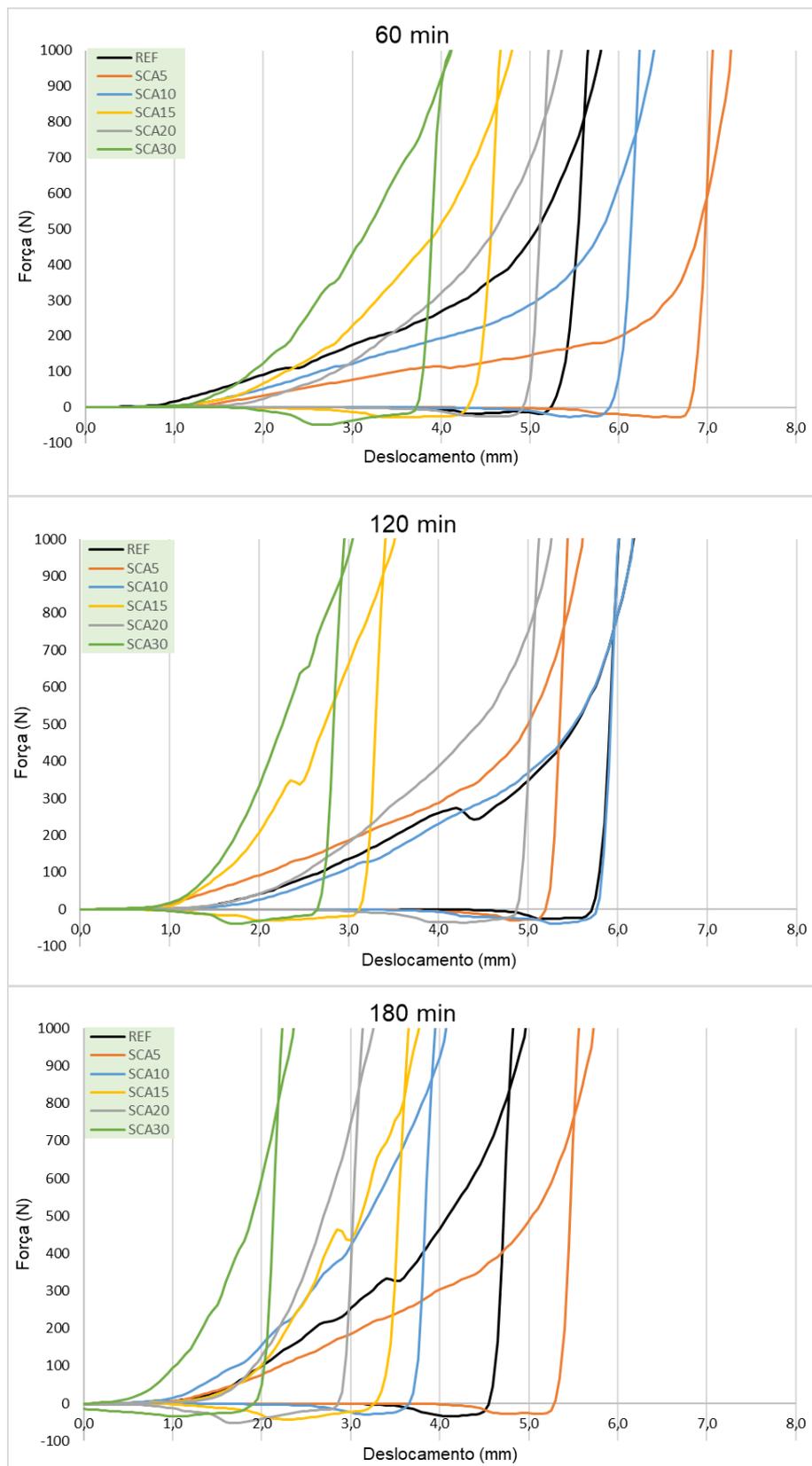
**Velocidade de ensaio: 0,1mm/s**

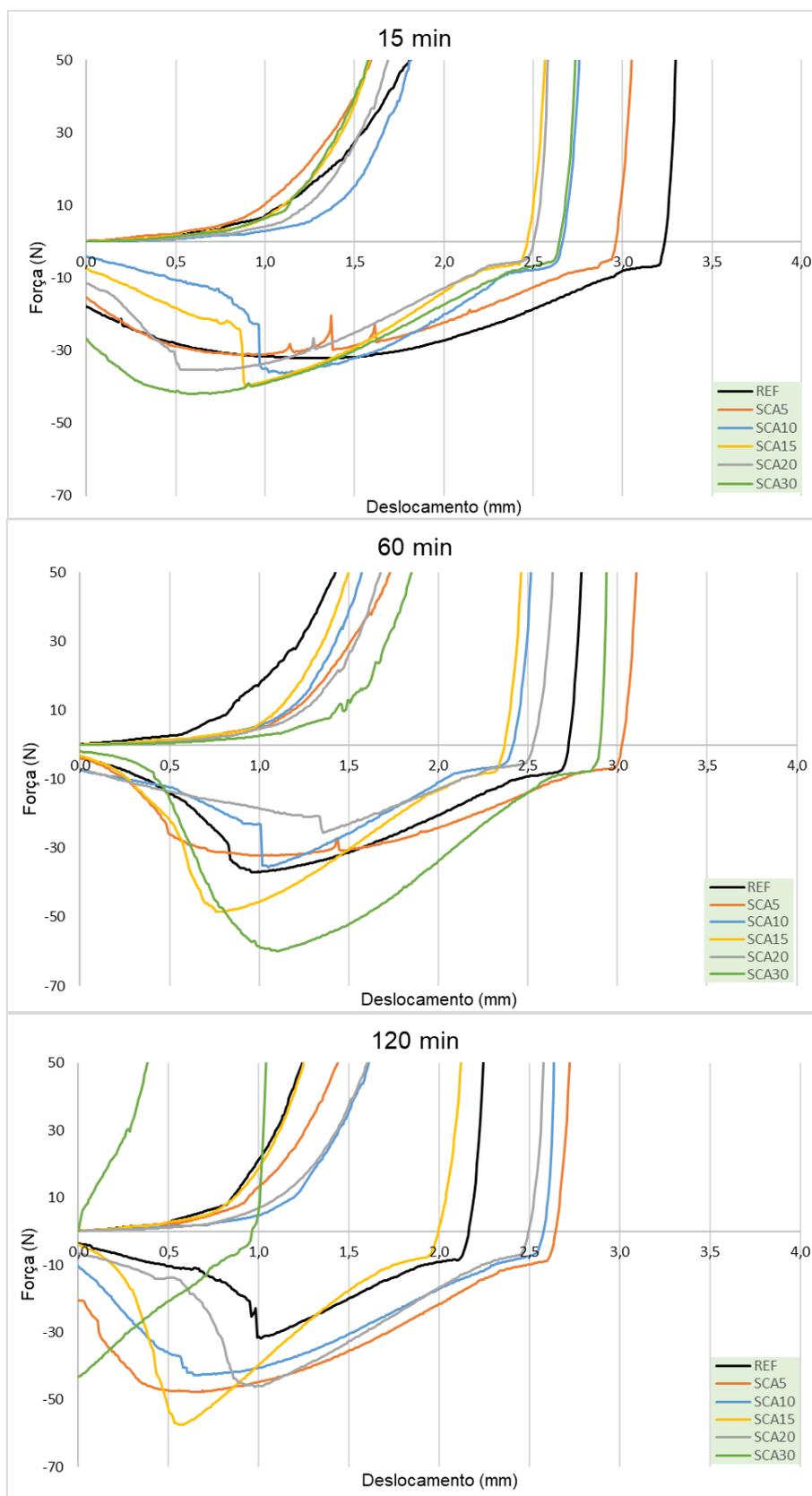


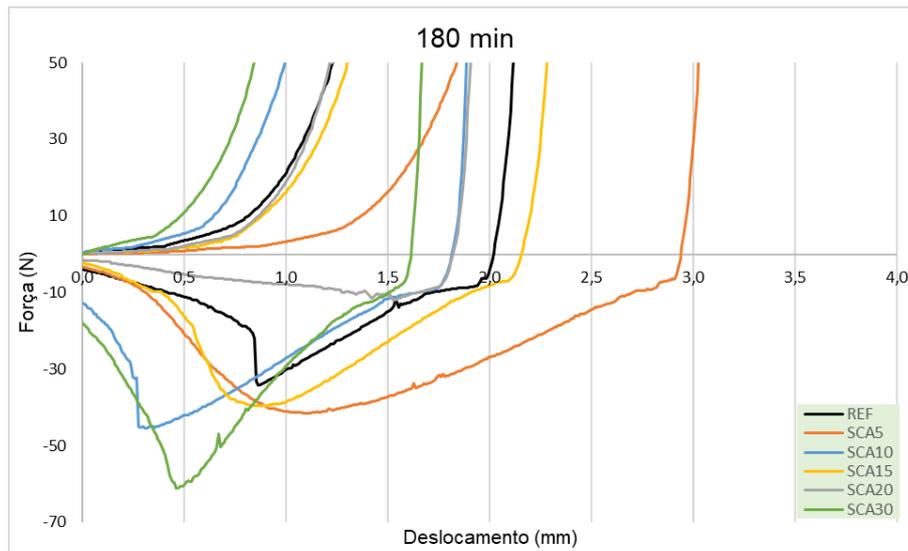


### Velocidade de ensaio: 1mm/s

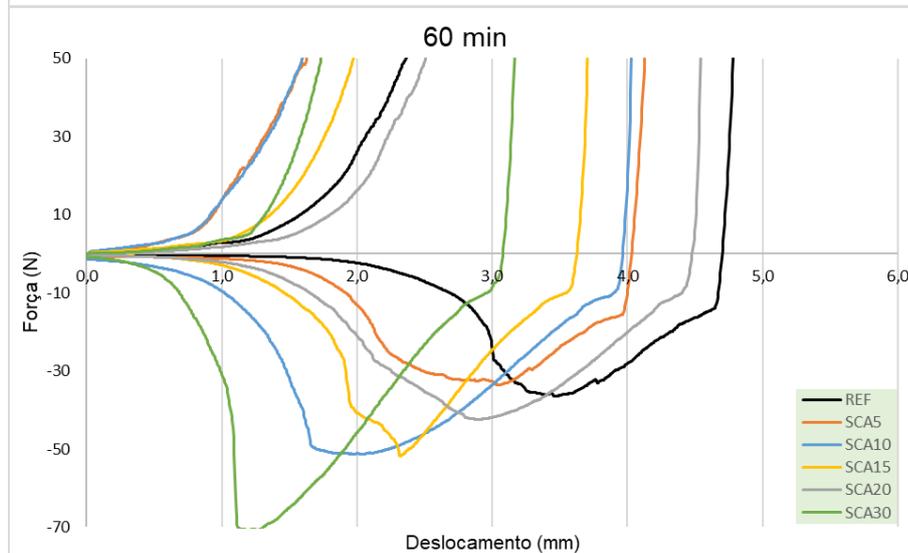
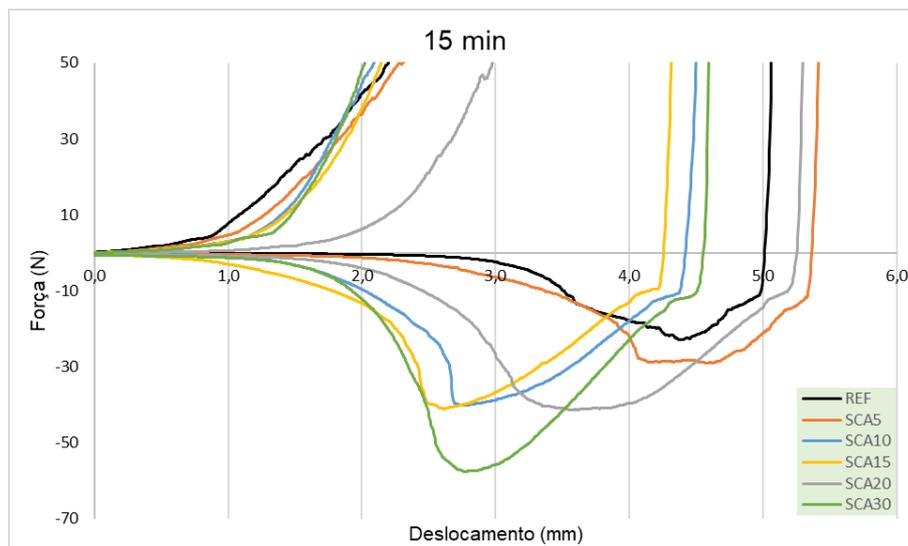


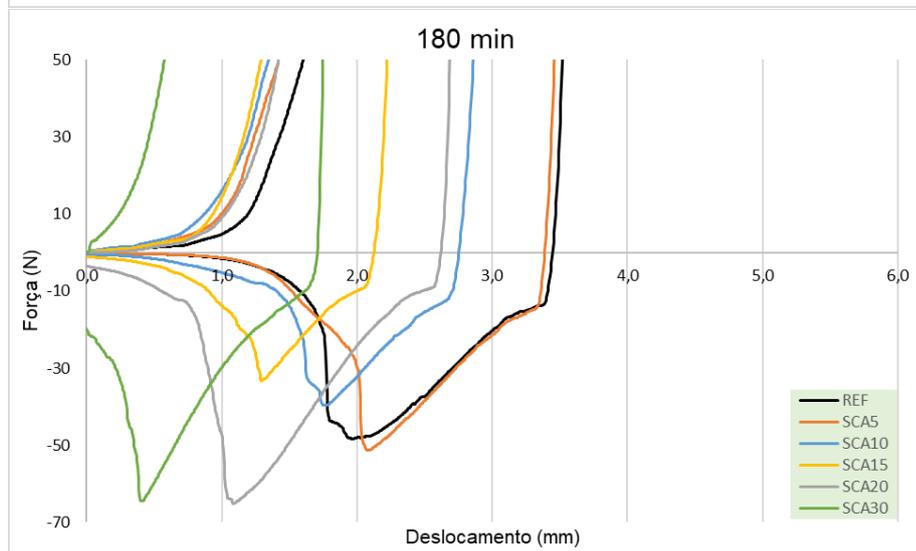
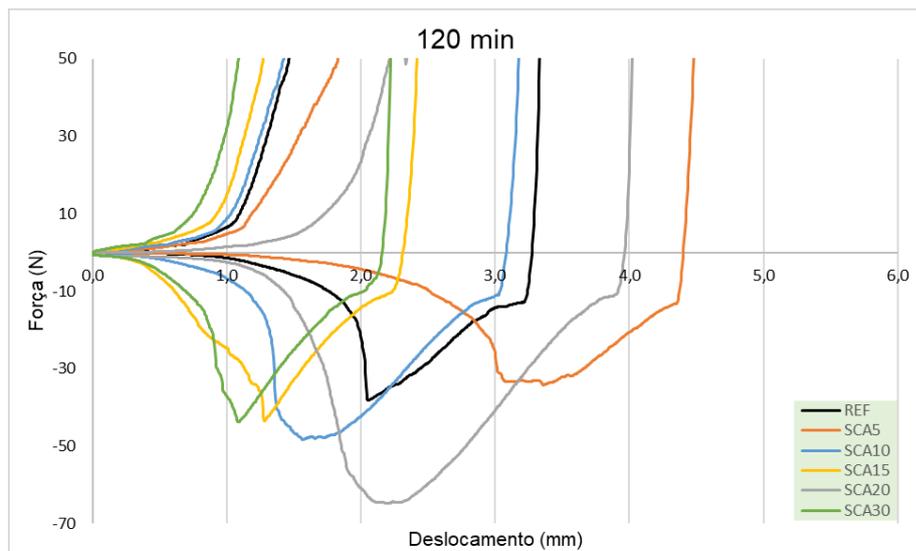


**Anexo B – Gráficos do ensaio de Squeeze Flow para análise da tração.****Velocidade de ensaio: 1mm/min**

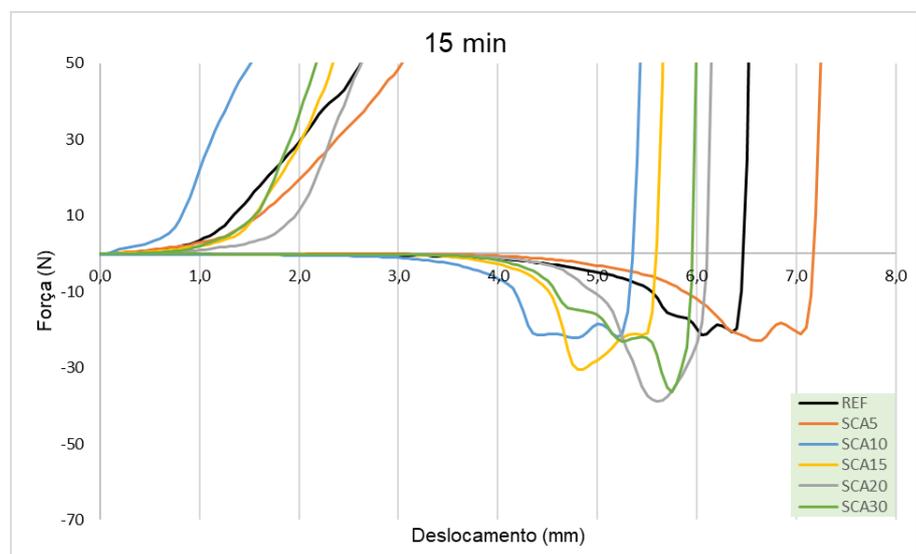


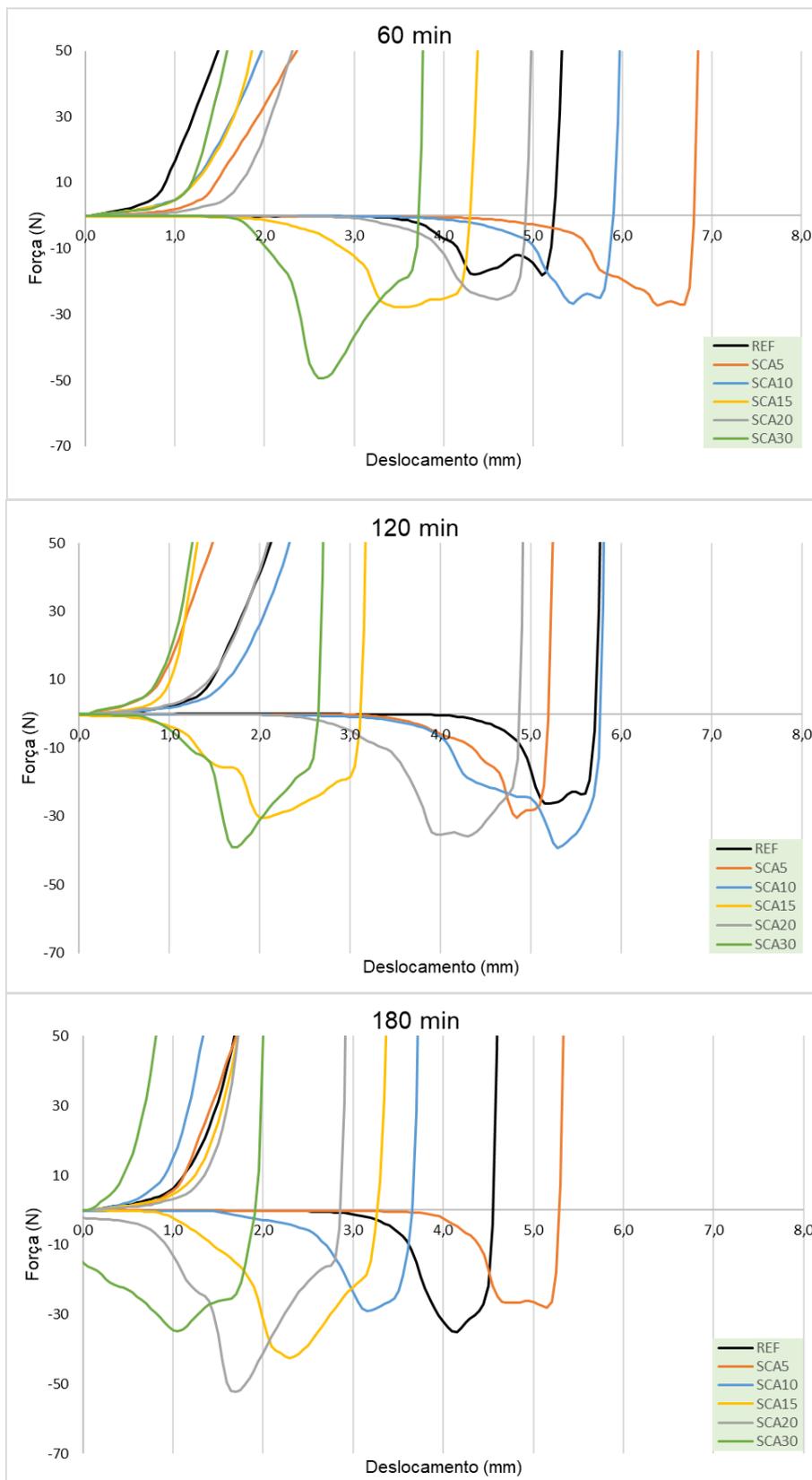
**Velocidade de ensaio: 0,1mm/s**





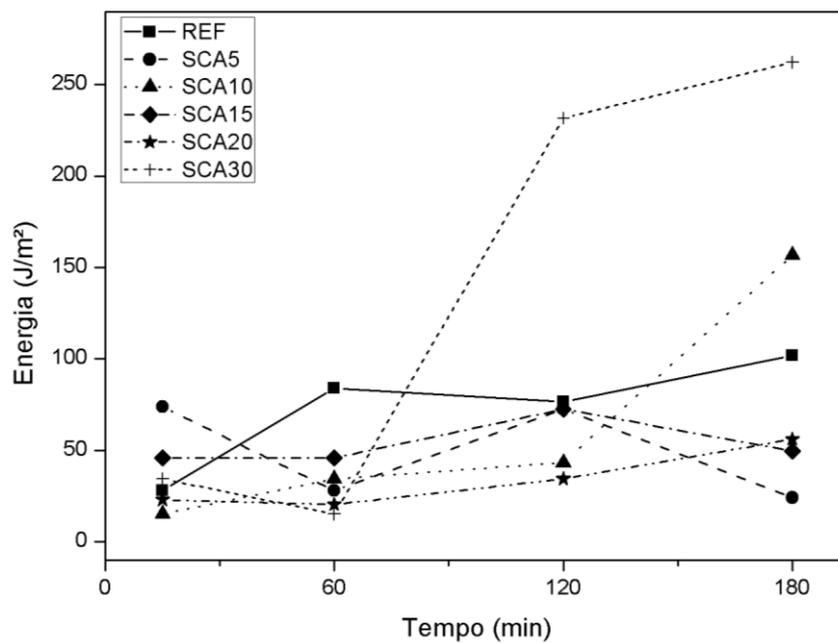
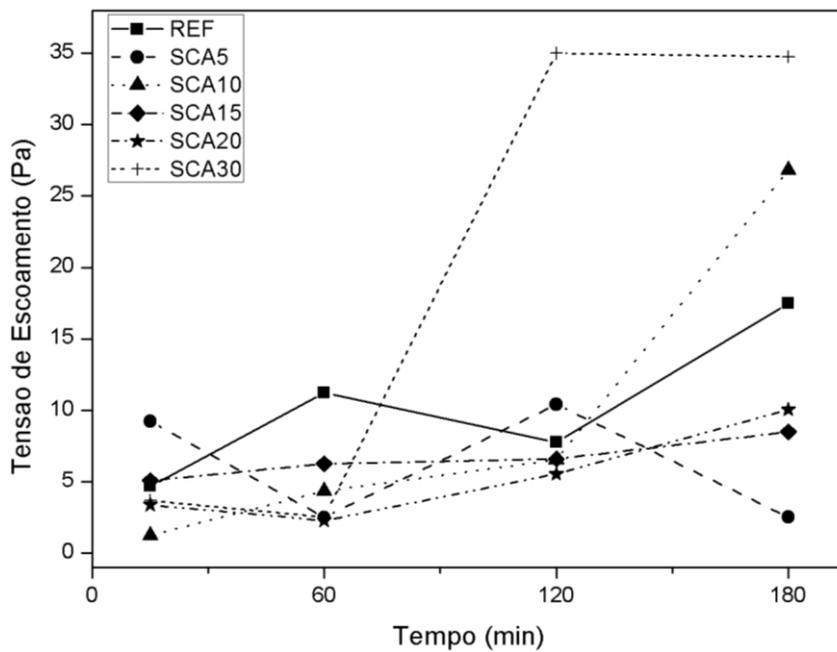
**Velocidade de ensaio: 1mm/s**



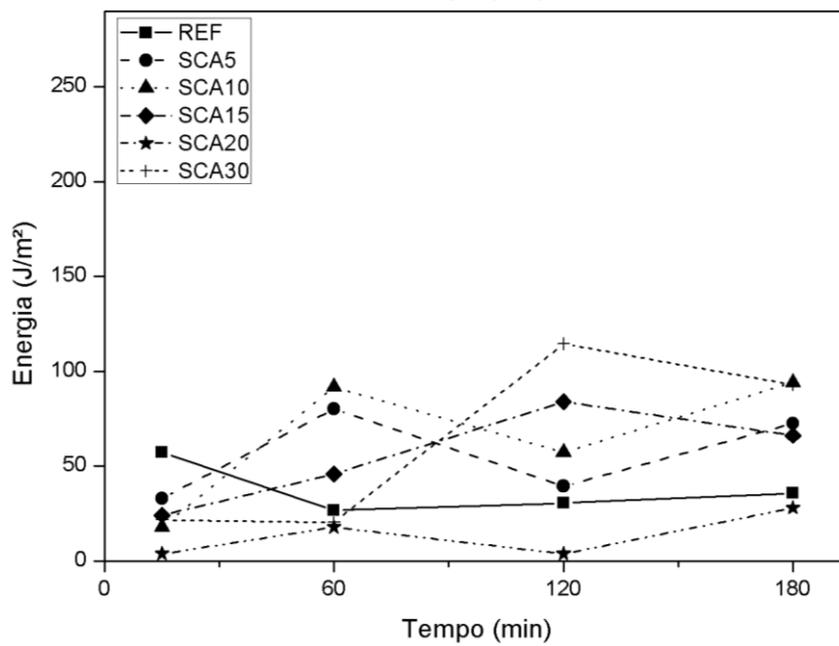
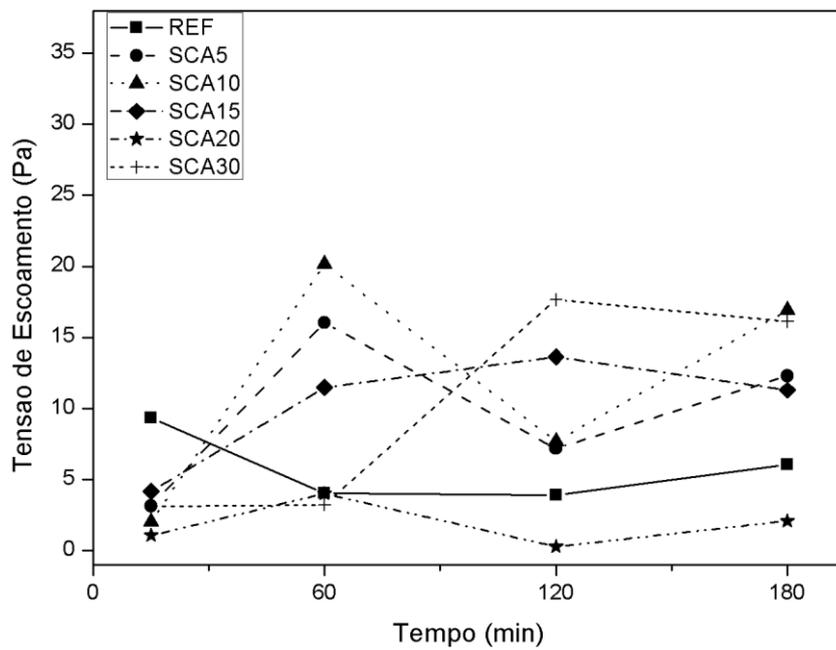


## ANEXO C – Gráficos de Tensão de Escoamento e Energia (traços na legenda)

Velocidade de ensaio: 1mm/min



## Velocidade de ensaio: 0,1mm/s



## Velocidade de ensaio: 1mm/s

