

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FELIPE AUGUSTO KLIMACZEWSKI

**AVALIAÇÃO DA REOLOGIA NO ESTADO FRESCO DE ARGAMASSAS COM
SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POR CINZA VOLANTE, SÍLICA DA
CASCA DO ARROZ E METACAULIM**

**Alegrete, RS
2017**

FELIPE AUGUSTO KLIMACZEWSKI

**AVALIAÇÃO DA REOLOGIA NO ESTADO FRESCO DE ARGAMASSAS COM
SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POR CINZA VOLANTE, SÍLICA DA
CASCA DO ARROZ E METACAULIM**

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: Dr. Ederli Marangon

Coorientador: Me. Marcelo de Jesus Dias
de Oliveira

**Alegrete, RS
2017**

FELIPE AUGUSTO KLIMACZEWSKI

AVALIAÇÃO DA REOLOGIA DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POR CINZA VOLANTE, SÍLICA DA CASCA DO ARROZ E METACAULIM

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: 30, junho de 2017.

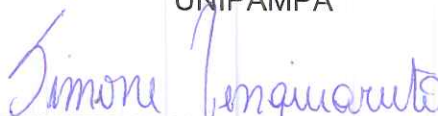
Banca examinadora:



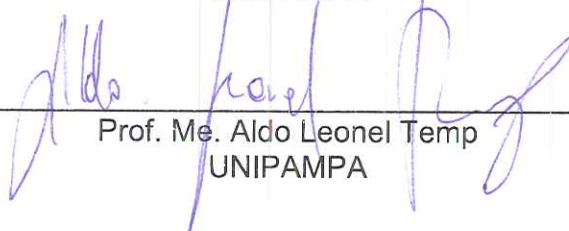
Prof. Dsc. Ederli Marangon
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Me. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira
Co-orientador
UNIPAMPA



Prof. Msc. Simone Domelles Venquiaruto
UNIPAMPA



Prof. Me. Aldo Leonel Temp
UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus pais Orlando e Irene, e aos meus irmãos Josiane e Tiago.

AGRADECIMENTO

Aos meus pais Orlando e Irene e aos meus irmãos Josiane e Tiago pela força e apoio incondicional.

Ao meu orientador Ederli e ao meu co-orientador Marcelo, pela orientação e ensinamentos desde o início do curso.

Ao Ismael e ao Marcos pela amizade e pela ajuda na construção do trabalho, não teria conseguido fazer sozinho.

Aos meus amigos que deixei em minha cidade natal, que sempre estiveram do meu lado mesmo distantes.

Aos meus amigos que a engenharia me deu: Alan, Camila, Emanuele, Francisco, Ismael, Lucas, Matthews, Marcos, Mônica e Nadine.

Aos demais professores do curso de engenharia civil, que me possibilitaram somar os conhecimentos ao passar dos anos.

A todos os colegas da universidade.

A Pilecco Nobre e a Construtora Sotrin pelos materiais.

“Fazer algo bem vale tanto a pena que morrer tentando fazer algo melhor não pode ser loucura. A vida é medida por realizações, e não por anos”.

Bruce McLaren (1937-1970)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comportamento de fluidos.	16
Figura 2: Desplacamento da argamassa de revestimento.	18
Figura 3: Fissuras em argamassas de revestimento.	18
Figura 4: Representação esquemática do ensaio de squeeze-flow.	19
Figura 5: Perfil típico de curva x deslocamento de um ensaio de Squeeze flow realizado com deslocamento controlado.	20
Figura 6: Concreto sem grande controle granulométrico, e com controle granulométrico.	22
Figura 7: Microestrutura de uma argamassa.	23
Figura 8: Curvas de carga vs. deslocamento obtidas por squeeze-flow das argamassas com 15% de água, sem e com a adição de 1% de incorporador de ar. As amostras com 15 e 60 minutos após mistura foram submetidas à deformação de 1,5mm em taxa de 0,01mm/s.	24
Figura 9: Curva Força x Deslocamento com diferentes porcentagens de sílica e cinza volante.	25
Figura 10: Etapas dos ensaios de granulometria: a-redução da amostra de campo; b-conjunto de peneiras da série normal e intermediária; c-material sobre a peneira de maior abertura; d-frações retidas em cada peneira.	28
Figura 11: Determinação das massas específica dos agregados miúdos.	31
Figura 12: Etapas de ensaio de massa específica dos materiais finos.	32
Figura 13: Etapas de ensaio de Consistência.	33
Figura 14: Máquina para o ensaio de squeeze flow.	34
Figura 15: Ensaio de squeeze flow (etapas).	35
Figura 16: Leitura da penetração do ensaio de Vicat modificado.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μ - Viscosidade Plástica

$(\partial v / \partial y)$ – gradiente de velocidade

τ – Tensão de Cisalhamento

τ_0 – Tensão de escoamento da argamassa

δ – Função da taxa de cisalhamento

AG – Areia Grossa

AM – Areia Média

AF – Areia Fina

Fi – Fíler Calcário

Cim – Cimento Portland CP II-F

Cal – Cal Hidráulica

CV – Cinza Volante

SCA – Sílica da Casca do Arroz

MC - Metacaulim

F – Força de compressão

t – tempo

h – Altura instantânea da amostra

h_0 – Altura inicial

D - Diâmetro

k – Constante do comportamento do fluido

z - Constante do comportamento do fluido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos específicos	13
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Definição e modelos de reologia	14
2.2 Conceito da Tensão de Escoamento e da viscosidade	17
2.3 Ensaio de Squeeze Flow e sua relação com a reologia	19
2.4 Influência das adições minerais no comportamento reológico	21
3 METODOLOGIA	26
3.1 Ensaios de caracterização dos materiais	28
3.1.1 Ensaio de composição Granulométrica dos Agregados	28
3.1.2 Ensaio de composição Granulométrica dos materiais finos	29
3.1.3 Determinação das massas específicas dos agregados miúdos	30
3.1.3 Determinação das massas específicas dos materiais finos	31
3.1.4 Mistura das argamassas	32
3.1.5 Ensaio na Mesa de Consistência (Flow Table)	33
3.1.6 Ensaio de Squeeze Flow	34
3.1.7 Determinação da densidade da massa e do teor ar incorporado	35
3.1.8 Ensaio de Vicat modificado	36
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	37
5 CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS	47

RESUMO

As propriedades reológicas no estado fresco das argamassas estão intimamente ligadas com o surgimento de patologias. Além disso, tem-se buscado diariamente nos empreendimentos, diferentes formas de aliar sustentabilidade com produtividade, necessitando assim de estudos que melhorem as propriedades das argamassas tanto no estado endurecido quanto o comportamento reológico no estado fresco. Dessa forma, busca-se melhorar a eficiência e produtividade de argamassas de revestimento com o auxílio de substituições pozolânicas em massa de sílica da casca do arroz, cinza volante e metacaulim, já que diminuindo o consumo de cimento e utilizando materiais antes descartados pela sociedade, podem-se reduzir as emissões de gás carbônico. Para a realização desse trabalho, utilizou-se como referência um traço de argamassa de revestimento de 8 MPa de resistência à compressão. Os melhores resultados em termos de reologia no estado fresco das argamassas foram obtidos para as substituições de 5% de sílica da casca do arroz, e 5% de sílica da casca do arroz com 15% de cinza volante ou com 10% de metacaulim.

Palavras Chave: Reologia, Squeeze Flow, sílica da casca do arroz, cinza volante, metacaulim.

ABSTRACT

The rheological properties in the fresh state of mortars are associated with the appearance of pathologies. In addition, different ways of allying sustainability with productivity have been search every day in the enterprises, but this requires studies that improve the properties of the mortars in both the hardened state and the rheological behavior in the fresh state. In this way, mineral additions like husk rice silica, fly ash and metakaolin were used to improve the efficiency and productivity of coating mortars, as decreasing the consumption of cement and using materials previously discarded by society, to reduce emissions of carbon dioxide. For the accomplishment of this work, a coating mortar of 8 MPa of compressive stress was used as reference. The best results in fresh rheology of mortars were obtained for cement replacements for 5% of husk rice silica, 5% of husk rice silica with 15% of fly ash or 10% metakaolin.

Keywords: Rheology, Squeeze Flow, husk rice silica, fly ash, metakaolin.

1 INTRODUÇÃO

O processo de produção do cimento Portland, além de ser um grande consumidor dos recursos naturais do planeta, é responsável por cerca de 5% a 8% das emissões mundiais de CO₂ na atmosfera (SCRIVENER, 2007). Além disso, muitos países têm buscado por tecnologias que garantam a diminuição da emissão de carbono, com o objetivo de não comprometer os recursos naturais das próximas gerações. Assim, uma das alternativas possíveis para a redução do consumo de cimento e consequente diminuição das emissões de CO₂, envolve a substituição parcial do cimento por adições minerais e tem apresentado certa viabilidade técnica e econômica.

Outro fator relevante é a necessidade de obter maior produtividade nos canteiros de obra, aliada as exigências do mercado e diminuição no custo final, torna cada vez mais importante a busca por formas eficientes e sustentáveis de melhorar as propriedades das argamassas, tanto no estado endurecido quanto o comportamento reológico no estado fresco. Ainda que os requisitos essenciais para a produção de argamassas seja os dados finais do estado endurecido, o estudo da argamassa no estado fresco é essencial, já que este é o seu estado de aplicação, podendo ter seu comportamento melhorado ao ser introduzido diferentes adições minerais em substituição parcial a sua massa de cimento.

O incremento de cinza volante (KLIMACZEWSKI, 2015), de sílica da casca de arroz (MARANGON, 2013) ou de metacaulim (SANTOS JUNIOR, 2012) têm apresentado melhorias nas propriedades mecânicas no estado endurecido. Entretanto, propriedades como tensão de escoamento e viscosidade no estágio fresco ainda tem sido pouco estudado. Cabe ressaltar a importância de tais estudos, uma vez que o estado fresco das argamassas é responsável por grande parte das patologias que afetam as construções do país, uma vez que a falta de controle sobre os parâmetros reológicos, podem resultar em segregação e exsudação da mistura, potencializando as retrações plásticas e consequentemente fissuras indesejadas no revestimento.

Nesse contexto, a trabalhabilidade de argamassas com adições minerais de cinza volante, sílica da casca de arroz e metacaulim é alterada, dependendo dos materiais empregados. Sendo assim, este estudo permitirá avaliar a influência dessas adições no comportamento no estado fresco das argamassas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência das adições minerais de sílica de casca de arroz, cinza volante, metacaulim e blendas em substituição parcial do cimento Portland no comportamento reológico de argamassas no estado fresco.

1.1.2 Objetivos específicos

- 1 - Analisar consistência no estado fresco das argamassas através de ensaios de Flow Table e penetração de cone;
- 2 – Determinar a densidade da argamassa no estado fresco e seu teor de ar aprisionado.
- 3 - Avaliar a influência das adições minerais na argamassa através de ensaios de Squeeze Flow.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Definição e modelos de reologia

Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, através da análise das forças cisalhantes em um intervalo de tempo (GLATTHOR, 1994). Dessa forma, a utilização de adições minerais em argamassas de cimento Portland, podem alterar a viscosidade das argamassas, alterando a reologia no estágio fresco devido a fatores tais como: a concentração volumétrica de sólidos, as características do meio líquido, a temperatura, as características das partículas, a interação entre as partículas, a concentração de moléculas dispersantes e seu peso molecular, e espessura das camadas de dispersante em torno das partículas (OLIVEIRA, 2009).

Reologia é um ramo da física relacionada com a mecânica dos corpos deformáveis. Etimologicamente, reologia vem dos vocábulos gregos rheo = deformação e logia = ciência ou estudo. Tal ciência é regida por leis que descrevem a variação contínua do grau de deformação em função das forças externas aplicadas ao material.

Atualmente, muitas teorias da reologia já foram idealizadas e baseadas em equações diferenciais de primeira ordem, cujo conceito admite que as constantes nessas equações não se alteram com a mudança de suas variáveis (MACHADO, 2002). Entretanto, existem inúmeras exceções a esses modelos ideais, os quais são tratados individualmente, matematicamente ou experimentalmente, podendo se apresentar mais comuns do que a reologia em fluidos ideais.

Dentro desse contexto, cabe ressaltar que a viscosidade é uma propriedade dos fluidos, a qual define a forma pela qual o fluido escoar, possuindo um papel relevante na mesma (ROMA, 2006). Os valores da viscosidade são características de cada tipo de fluido, sendo importante ressaltar que pequenas modificações em um certo traço de argamassa, resultam em alterações consideráveis na reologia das mesmas.

Os fluidos podem ser classificados como newtonianos e não newtonianos. Pode-se chamar de fluido newtoniano, um material que possui viscosidade dinâmica constante (μ), e seu valor pode ser determinado pela relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade ($\partial v / \partial y$), como pode ser observado na Equação 1. Devido à essa proporcionalidade, o gráfico obtido é uma reta.

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad \dots(1)$$

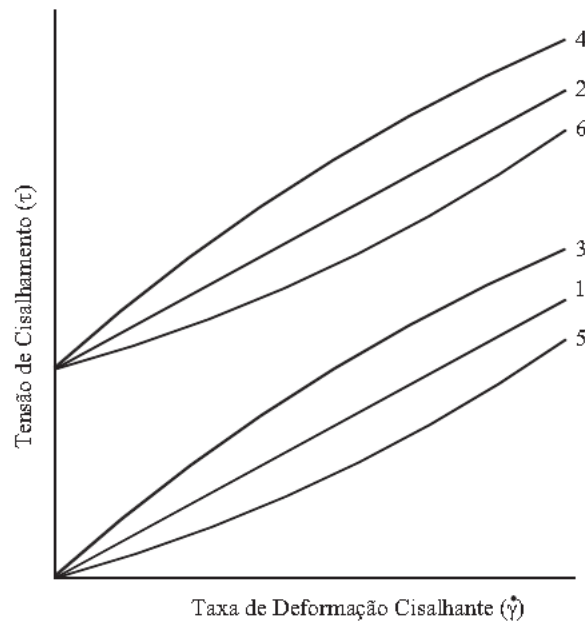
Dentre os materiais que se enquadram dentro da categoria dos fluidos não newtonianos, existem diversas classes que definem diferentes comportamentos, os quais tendem a variar de acordo com suas características. Dentre eles, pode-se citar: Fluidos de Bingham, pseudoplásticos, dilatantes, tixotrópicos e reopéticos.

Veja-se a seguir a descrição de cada um deles:

- **Fluidos de Bingham** – sofrem deformações somente quando submetidos a tensões cisalhantes superiores a um valor característico do material (τ_0). Possui dois comportamentos distintos, acima da tensão de escoamento, possui viscosidade constante e abaixo de τ_0 se comporta como um sólido. Percebe-se em lamas de perfuração de poços de petróleo e suspensões de sólidos granulares.
- **Fluido Pseudoplástico** – o diagrama reológico possui um ponto de inflexão, uma vez que a curva possui proporcionalidade para valores da taxa de velocidade muito altos ou muito baixos. É observado em polímeros ou em outros materiais com cadeia molecular alongada.
- **Fluidos Dilatantes** – apresentam comportamento newtoniano apenas para baixos gradientes de velocidade, porém, a altas taxas cisalhantes a mistura que possui somente o líquido necessário para preencher os vazios, oferece maior resistência ao escoamento, fato explicado pelo brusco aumento de viscosidade. Ocorre em suspensões de amido e areia.
- **Tixotrópicos e Reopéticos** – apresentam tensão de cisalhamento variável com o tempo de aplicação de um gradiente de velocidades constante. Como os fluidos reagem de formas diferentes em relação ao tempo, a descrição desse modelo matematicamente é muito complexa. Quando a viscosidade diminui com relação ao tempo, o fluido é tixotrópicos, quando aumenta, reopético.

Pode-se observar na Figura 1 o comportamento variável nos diferentes modelos de fluidos, em função da taxa de deformação cisalhante pela tensão de cisalhamento.

Figura 1: Comportamento de fluidos.



Retirado de Formagini (2005, p.46).

Na Figura 1 é possível observar o comportamento de fluidos versus os respectivos modelos de fluidos como segue:

- Curva 1 – newtonianos;
- Curva 2 – Bingham;
- Curva 3 – pseudoplástico;
- Curva 4 – pseudoplástico com tensão de escoamento;
- Curva 5 – dilatante;
- Curva 6 – dilatante com tensão de escoamento (Herschel-Bulkley).

Segundo de Larrard (1999), o concreto no estado fresco se adapta muito bem ao modelo de Herschel-Bulkley. Assim, acredita-se que a reologia das argamassas no estado fresco pode ser descrita pelo mesmo modelo, uma vez que são diferenciados pela dimensão de seus agregados. Oliveira (2000) afirma que o comportamento dilatante é característico de suspensões altamente concentradas, onde as partículas

encontram-se muito bem empacotadas e bastante próximas entre si. O modelo pode ser descrito segundo a Equação 2, sendo τ_0 a tensão de escoamento, k e z constantes do comportamento do fluido, onde o z para o modelo dilatante deve possuir valor superior a 1.

$$\tau = \tau_0 + k \delta^z \quad \dots(2)$$

2.2 Conceito da Tensão de Escoamento e da viscosidade

Cabe destacar que o estudo da viscosidade de um fluido possui extrema importância para várias áreas do conhecimento, já que esse método descreve a mudança de geometria em um curto espaço de tempo, em fluidos com escoamento transiente e heterogêneo (ENGMANN, 2005). Em argamassas, tal fato possui extrema relevância, uma vez que se sua viscosidade não for condizente, juntamente com sua tensão de escoamento, o material não terá características de aderência ao substrato e de coesão necessária para evitar o deslizamento (BAUER, 2005). Além disso, segundo Cardoso (2009, p.31), a segregação de fases ocorrida no estado fresco pode causar patologias como manchas e fissuras após o endurecimento, devido a gradientes significativos de propriedades entre regiões do revestimento decorrentes de heterogeneidade microestrutural.

Cardoso (2009), afirma que uma argamassa deve apresentar idealmente um comportamento pseudoplástico para facilitar espalhamento, nivelamento e acabamento, mas com elevada viscosidade e tensão de escoamento para garantir a estabilidade. Além disso, Cardoso (2005) reitera que elas são produtos com características multifásica (devido a presença de pozolanas, fibras, fíller, e teores consideráveis de ar incorporado) e reativas (dissolução, aglomeração, precipitação de fases, alterações no pH e ações decorrentes de aditivos químicos).

Dessa forma, destaca-se a importância dos estudos reológicos em argamassas de revestimento, já que patologias comuns em obras do país como deslocamento, poderão ocorrer quando a mistura não tiver tensão de escoamento coerente, e fissuras por retrações plásticas quando o material não tiver viscosidade adequada de modo a impedir a segregação e exsudação da mistura, expondo uma película de água na superfície do revestimento, permitindo assim uma rápida

evaporação da água exposta ao tempo. Ademais, as argamassas que não possuem uma plasticidade adequada, além de dificultar a execução do serviço do operário, necessitarão de um tempo maior de contato entre o desempenho e o acabamento, o que poderia potencializar o aparecimento de fissuras. Pode-se observar exemplos de deslocamento e retração plástica nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

Figura 2: Deslocamento da argamassa de revestimento.



Fonte: Gomes Júnior (2013?, não paginado).

Figura 3: Fissuras em argamassas de revestimento. A imagem mostra uma mão segurando uma ferramenta pontiaguda, apontando para uma rede de fissuras irregulares e profundas em uma superfície de argamassa de revestimento.

Fonte: Maccaferri (2012?, não paginado).

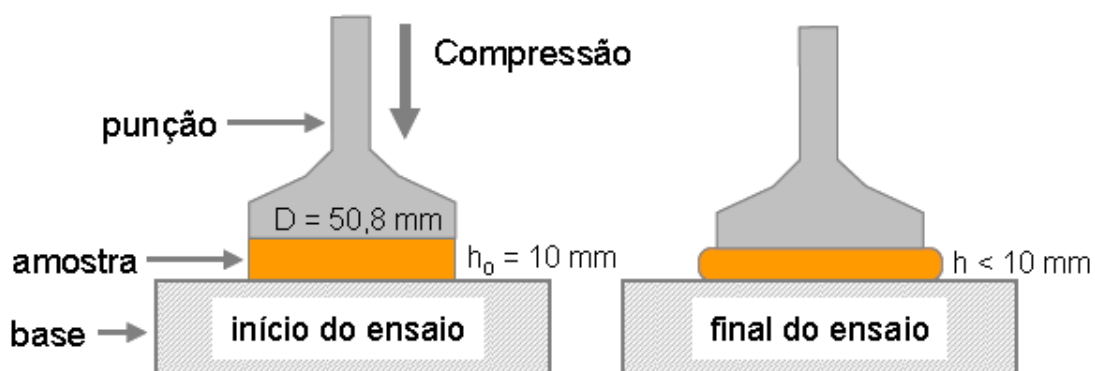
Assim sendo, ensaios simplificados que indicam conceitos somente sobre trabalhabilidade como o de mesa Flow Table, Dropping-Ball e penetrômetros, não

demonstram totalmente as características significativas dos compostos por estes apresentarem conceitos de consistência e não de reologia.

2.3 Ensaio de Squeeze Flow e sua relação com a reologia

O ensaio de Squeeze flow consiste na aplicação de uma força normal de compressão em um material considerado viscoso entre duas placas paralelas, fazendo com que o material flua radialmente (LAUN, 1999). Já que esse método é aplicado em diversas áreas do conhecimento (engenharias, biologia, medicina, entre outras), é conhecido de diversas formas (“squeezing flow”, “squeeze film flow”, “up setting”, “uniaxial compression”, “simple unconfined compression”), dependendo da sua área de aplicação (ENGMANN, 2005). Sendo assim, o mesmo pode ser realizado de diversas formas, de acordo com a necessidade do projeto de pesquisa, variando a velocidade do carregamento e do deslocamento, diâmetro e altura do corpo de prova, área de contato constante e variável com as placas, aplicação de patamares de relaxação, etc. Pode-se observar na Figura 4 a representação do ensaio adotado, sendo D o diâmetro da punção e da amostra, h_0 a altura da amostra e h a altura da amostra após a compressão.

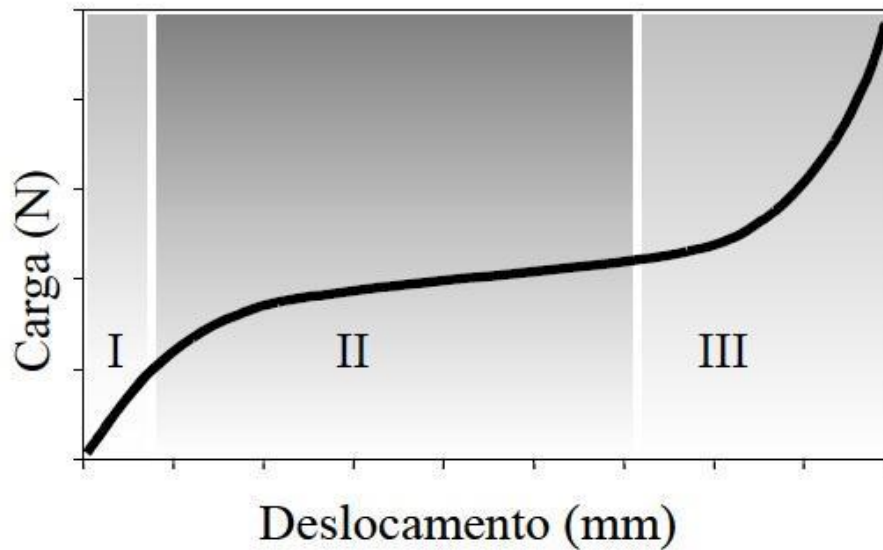
Figura 4: Representação esquemática do ensaio de squeeze-flow.



Retirado de Cardoso (2009, p. 15).

A ABNT NBR 15839/2010 normaliza o ensaio de squeeze flow para argamassas de assentamento e revestimento, e seus resultados expressos em um gráfico que contém 3 estágios definidos conforme o mostrado na Figura 5.

Figura 5: Perfil típico de curva x deslocamento de um ensaio de Squeeze flow realizado com deslocamento controlado.



Retirado de Cardoso, (2009, p. 24).

O estágio I do gráfico exibido na Figura 5 representa pequenos deslocamentos no qual o material comporta-se como um sólido que há apenas deformação elástica, apresentando uma região com relação linear entre a carga e o deslocamento que se refere à tensão de escoamento do material. Argamassas que necessitam de um deslocamento maior para entrar na fase plástica tendem a fissurar devido à recuperação elástica após a retirada do esforço (MATTANA, 2015). Entretanto as argamassas devem apresentar um estágio linear elástico de forma permitam uma devida adesividade no substrato.

O segundo estágio inicia quando a força de compressão excede a tensão de escoamento a qual mantinha o material com comportamento elástico, resultando em uma deformação radial alongacional e de cisalhamento (MATTANA, 2015). Para análise do comportamento da argamassa, esta é a região adequada, pois as deformações estão agindo sem acréscimo significativo da força de compressão, indicando facilidade de manuseio da argamassa.

Quando a argamassa está no estágio III, ocorre um aumento exponencial da carga de compressão necessária para prosseguir a deformação do material. A aproximação das partículas gera um embricamento dos componentes da argamassa, aumentando consideravelmente as forças de atrito entre os grãos, restringindo o

deslocamento. Este estágio é conhecido como enrijecimento por deformação (strain hardening).

Com posse dos dados, é possível estimar a tensão de escoamento e a viscosidade da argamassa através das Equações 3 e 4, onde F é a força de compressão (N), t é o tempo (s), h é a instantânea da amostra (m), h_0 é a altura inicial (m), D o diâmetro da amostra (m), μ a viscosidade (Pa.s) e τ_0 é a tensão de escoamento sob cisalhamento (Pa) (Meete/n, 2000 apud Mattana,2015).

$$\mu = \frac{64Ft}{3\pi(h^{-2}-h_0^{-2})D^4} \quad \dots(3)$$

$$\tau_0 = \frac{12hF}{\pi D^3} \quad \dots(4)$$

Squeeze-flow tem boa relação com a percepção do pedreiro, principalmente, nas etapas de lançamento e aperto. Argamassas de difícil deformação no squeeze-flow necessitam de maior esforço da mão-de-obra durante a aplicação, resultando em menor produtividade. O método deve também ser usado para avaliar a adesão da argamassa na ferramenta através da puxada após o ensaio comum de esmagamento, visto que este é um fator que dificulta a aplicação manual (Cardoso, 2009, p.114).

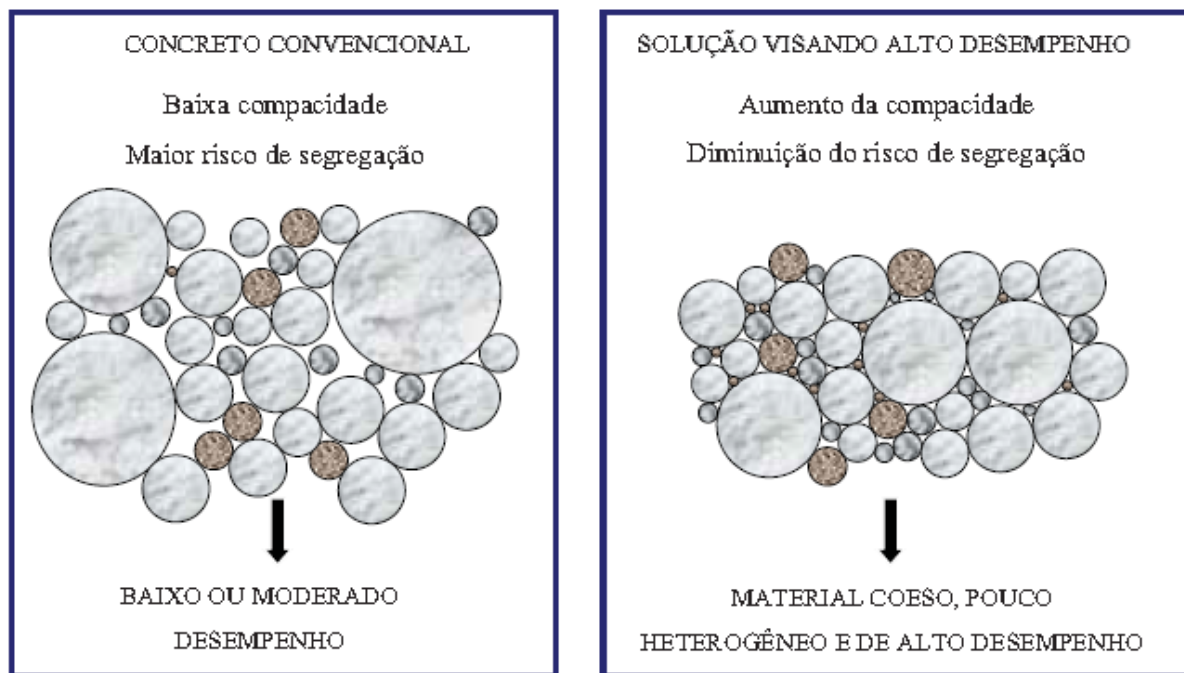
Oliveira (2015) demonstrou que o ensaio de squeeze flow e pull-out que esses métodos se mostraram sensíveis a variação da viscosidade de argamassas colantes com o passar do tempo. Esse comportamento reopético, também ocorre em argamassas de revestimento, e tal variação também deve ser amplamente estudada, com o objetivo de determinar o tempo máximo e que a argamassa se encontra com propriedades adequadas a sua aplicação.

2.4 Influência das adições minerais no comportamento reológico

O comportamento reológico de misturas cimentícias pode ser afetado de diversas maneiras, entre elas pode-se citar: distribuição granulométrica dos materiais, empacotamento das partículas, volume de sólidos, máxima espessura da pasta de cimento, morfologia, porosidade e densidade das partículas.

A distribuição granulométrica tem grande influência na dosagem de argamassas, pois possui grande influência sobre o empacotamento de partículas, já que dois materiais de diâmetros diferentes tendem a diminuir os vazios deixados pelo outro. Cabe ressaltar que misturas de alta compactidade tendem a apresentar maior resistência e menor porosidade, as quais são características preponderantes em argamassas de revestimento. Observa-se na Figura 6 a diferença de dois concretos, sendo um dosado de forma convencional e o outro sendo uma solução visando alto desempenho de compactação dos constituintes do concreto.

Figura 6: Concreto sem grande controle granulométrico, e com controle granulométrico.



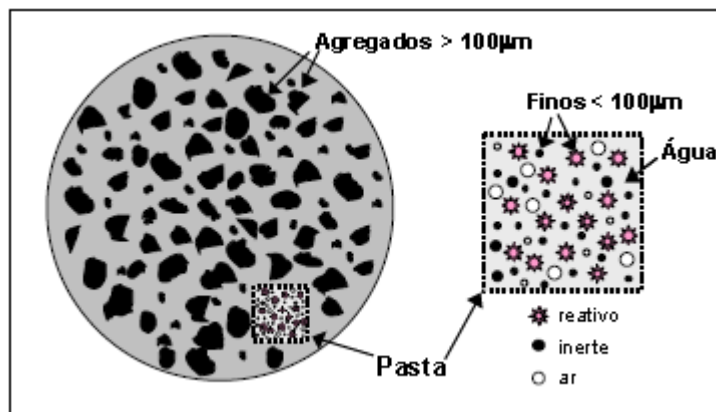
Retirado de Formagini (2005, p. 8).

Cardoso (2009), afirma que a otimização do empacotamento permite um melhor aproveitamento da pasta para promover argamassas com comportamento reológico mais adequado à aplicação ou com menor consumo de finos e água.

Cabe ressaltar que o comportamento reológico da argamassa é extremamente complexo, onde além de se possuir a interação entre as partículas dos mesmos materiais, ocorre a interação dos agregados com a pasta de cimento. Além disso, a pasta também é marcada por interferências relacionadas com o cimento, cal, e as adições minerais, e todos os constituintes ainda podem possuir interações

diferentes com a água ou com o próprio ar incorporado do composto. A Figura 7 demonstra esquematicamente a microestrutura de uma argamassa.

Figura 7: Microestrutura de uma argamassa.



Retirado de Cardoso (2009, p. 6).

Segundo Cardoso (2009), em condições de cisalhamento no estado fresco, a fração das partículas grosseiras é sujeita a fenômenos mássicos (atrito e impacto), enquanto a fração fina (<100µm) é afetada por fenômenos de superfície e reações de hidratação.

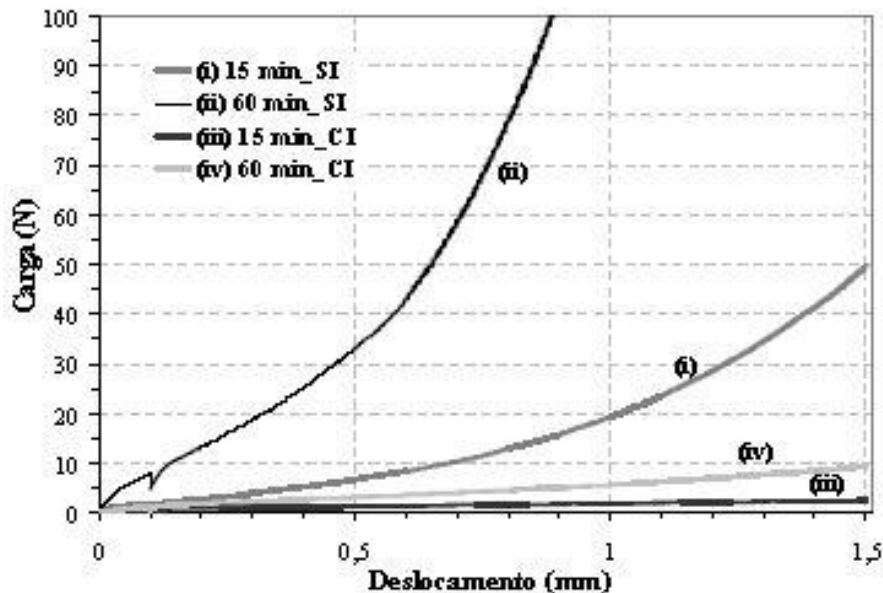
Considerando a adição de água a uma mistura de materiais secos, a água tenderá a preencher os espaços vazios deixados pelos grãos de seus componentes. Denomina-se volume mínimo de água como o volume necessário para o preenchimento dos vazios da mistura granular sólida no estado seco (Formagini, 2005). Quando a água preencher todos os vazios, a superfície de contato entre os grãos ainda será a mesma, fazendo com que o material gerado ainda não possua trabalhabilidade devido ao alto atrito entre os grãos. Ao se incrementar mais água, os grãos tenderão a ser afastados, o que permitirá que os grãos possam se movimentar com mais facilidade, melhorando sua trabalhabilidade até que sejam atingidos valores limites que favoreçam a exsudação e a segregação da argamassa.

Cabe ressaltar que as argamassas podem conter um considerável teor de ar incorporado no estado fresco, o que aumenta consideravelmente a dificuldade na avaliação reológica desse material devido ao incremento de mais uma fase.

Cardoso (2005), através de ensaios de Squeeze Flow em argamassas com 15% de água, pôde constatar que a presença de ar incorporado fez com que o enrijecimento por deformação seja discreto ou quase inexistente, reduzindo

drasticamente as cargas necessárias para a deformação do material. Tal fato pode ser observado na Figura 8, através da curva força x deslocamento gerado a partir de amostras de argamassa ensaiadas a 15 e 60 minutos após a mistura, sem e com o aditivo incorporador de ar (siglas SI e CI, respectivamente). Quando utilizado, o incorporador de ar foi em 1% da massa de cimento utilizado.

Figura 8: Curvas de carga vs. deslocamento obtidas por squeeze-flow das argamassas com 15% de água, sem e com a adição de 1% de incorporador de ar. As amostras com 15 e 60 minutos após mistura foram submetidas à deformação de 1,5mm em taxa de 0,01mm/s.



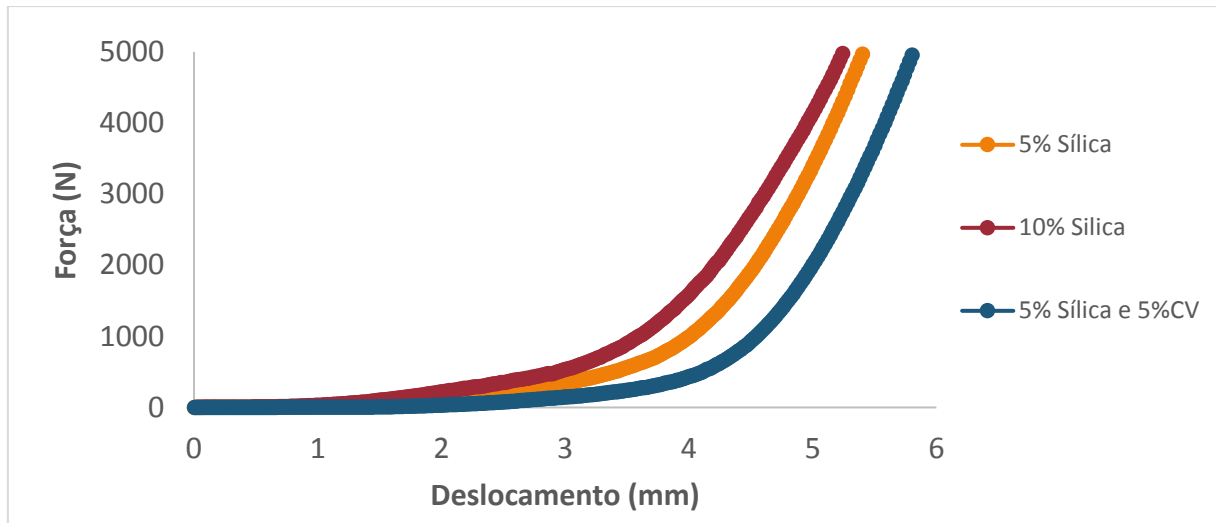
Retirado de Cardoso (2005, p.137)

Pode-se destacar que o aumento do teor de ar incorporado tende a diminuir a densidade da argamassa, uma vez que são fatores inversamente proporcionais.

Além dos diversos fatores citados acima, o comportamento reológico pode ser alterado dependendo da morfologia das partículas da mistura estudada. Através da substituição em massa de cimento por 5% de sílica, 10% de sílica, e 5% de sílica juntamente com 5% de cinza volante, observou-se com o ensaio de espalhamento que com a substituição de cimento Portland por sílica da casca de arroz o espalhamento da mistura diminui, entretanto, com a substituição por cinza volante ocorre um acréscimo no espalhamento. Isso ocorre porque a sílica possui superfície lamelar, irregular e de grande área superficial. Já os grãos de cinza volante, possuem

os grãos de forma esférica. Com os ensaios de Squeeze Flow, nota-se que as misturas com maior quantidade de sílica tendem ser mais rígidas, comprovando o que foi acima citado, pode-se observar na Figura 9 as curvas força x deslocamento obtido.

Figura 9: Curva Força x Deslocamento com diferentes porcentagens de sílica e cinza volante.



Retirado de Klimaczewski (2015)

Pelo fato da sílica apresentar uma grande área superficial por área de volume (MARANGON, 2013), as argamassas e concretos são bastante influenciados por forças superficiais entre as partículas, destacando-se as forças atrativas de van der Waals (OLIVEIRA, 2000).

Assim, a atuação das forças superficiais de Van der Waals favorece a formação de aglomerados entre as partículas, que dificultam significativamente sua trabalhabilidade a seco e, com isso, a etapa de conformação do processamento (OLIVEIRA, 2000). Além de afetar a reologia, a presença desses aglomerados pode resultar em pontos frágeis no estado endurecido devido a heterogeneidade do material.

3 METODOLOGIA

Para a execução desse trabalho, preservou-se a relação de água por material cimentante (0,71), já que se a quantidade de água não for a mesma para as diferentes misturas, a análise dos dados com relação a morfologia das partículas seria muito complexa devido ao diferente afastamento entre os grãos dos materiais constituintes da argamassa.

Os traços têm resistência aproximada de 8 MPa e são apresentados na Tabela 2. Dessa forma, um traço referência com resistência aproximada de 8 Mpa, sem nenhuma substituição pozolânica, para comparar com as substituições de cimento por cinza volante, sílica da casca do arroz e metacaulim. Além disso, os agregados miúdos são areias artificiais britadas, da jazida da empresa Fida de Caçapava do Sul.

Para isso, utilizou-se os seguintes materiais:

- Areia Fina Calcária (AF);
- Areia Média (AM);
- Areia Grossa (AG);
- Filer Calcário (Fi);
- Cal Hidráulica (Cal);
- Cimento CP II – F 32 (Cim);
- Sílica de Casca de Arroz (SCA);
- Metacaulim (MC);
- Cinza volante (CV).

Dessa forma, a Tabela 1 contém as porcentagens de substituição parcial em massa dos três tipos de adições minerais, e a Tabela 2 as proporções de cada tipo de material.

Tabela 1 – Proporção de cada adição mineral para cada traço.

Traço	Cim (%)	SCA (%)	CV (%)	Met (%)
Ref	100	-	-	-
SCA5	95	5	-	-
SCA10	90	10	-	-
SCA15	85	15	-	-
SCA20	80	20	-	-
SCA30	70	30	-	-
SCA5CV5	90	5	5	-
SCA5CV10	85	5	10	-
SCA5CV15	80	5	15	-
SCA5MC5	90	5	-	5
SCA5MC10	85	5	-	10
SCA5MC15	80	5	-	15

Elaboração Própria

Tabela 2 – Quantidade dos materiais para cada traço.

Traço	AG	AM	AF	Fi	Cal	Cim	SCA	CV	MC
Ref	120	190	340	110	120	120	-	-	-
SCA5	120	190	340	110	120	114	6	-	-
SCA10	120	190	340	110	120	108	12	-	-
SCA15	120	190	340	110	120	102	18	-	-
SCA20	120	190	340	110	120	96	24	-	-
SCA30	120	190	340	110	120	84	36	-	-
SCA5CV5	120	190	340	110	120	96	18	6	-
SCA5CV10	120	190	340	110	120	90	18	12	-
SCA5CV15	120	190	340	110	120	84	18	18	-
SCA5MC5	120	190	340	110	120	96	18	-	6
SCA5MC10	120	190	340	110	120	90	18	-	12
SCA5MC15	120	190	340	110	120	84	18	-	18

Elaboração própria.

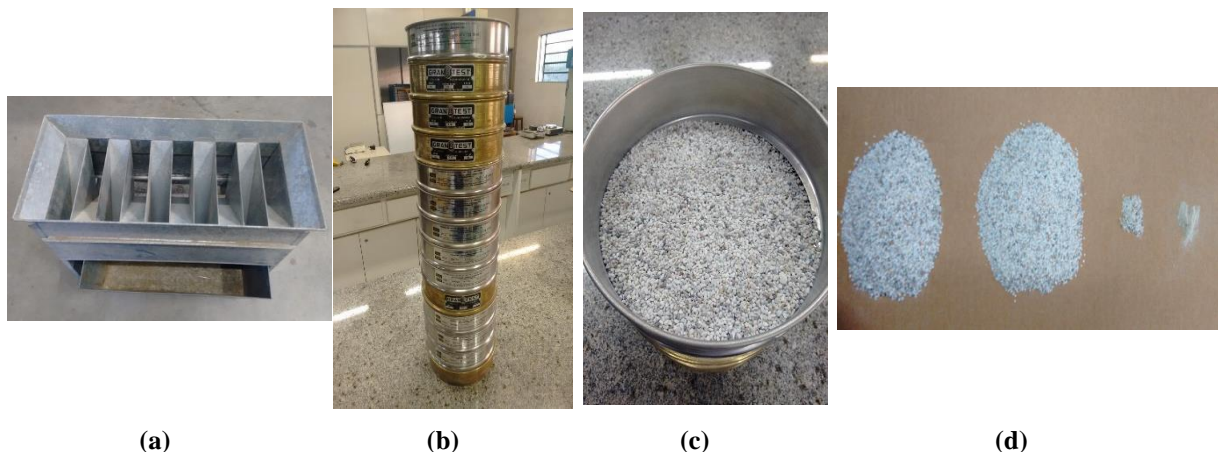
3.1 Ensaios de caracterização dos materiais

3.1.1 Ensaio de composição Granulométrica dos Agregados

A composição granulométrica de uma amostra de material granular é fundamental para estudar o empacotamento das misturas nas quais estes materiais serão empregados. Dessa forma, as composições granulométricas dos agregados miúdos serão obtidas conforme a ABNT NBR NM 248/03 com a utilização das peneiras da série normal, e algumas peneiras da série intermediária (75, 42,5 e 2000 μm) presentes no laboratório de Materiais de Construção Civil.

Na Figura 10 têm imagens das etapas executivas deste ensaio, onde a Figura 10(a) mostra uma parte da etapa de redução da amostra de campo para ensaio em laboratório (de acordo ANBT NBR NM 27/01) necessário para a obtenção de uma amostra representativa ao restante do material coletado. A Figura 10 (b e c) mostram, respectivamente, os conjuntos de peneira da série normal e intermediária para a areia grossa. Por fim, na Figura 10 (d) é ilustrada uma imagem típica das frações retidas em cada uma das peneiras em que o material ficou retido.

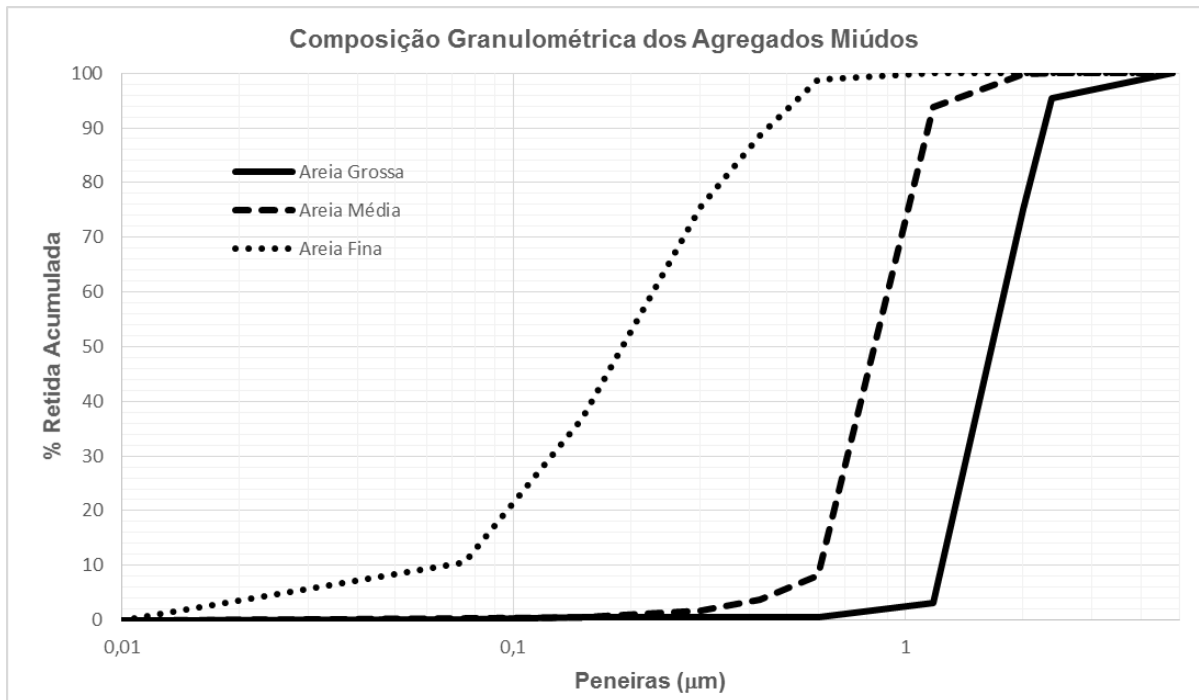
Figura 10: Etapas dos ensaios de granulometria: a-redução da amostra de campo; b-conjunto de peneiras da série normal e intermediaria; c-material sobre a peneira de maior abertura; d-frações retidas em cada peneira.



Elaboração própria.

Dessa forma, as curvas de composição granulométrica dos agregados miúdos podem ser observadas no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Curvas de composição granulométrica dos agregados.

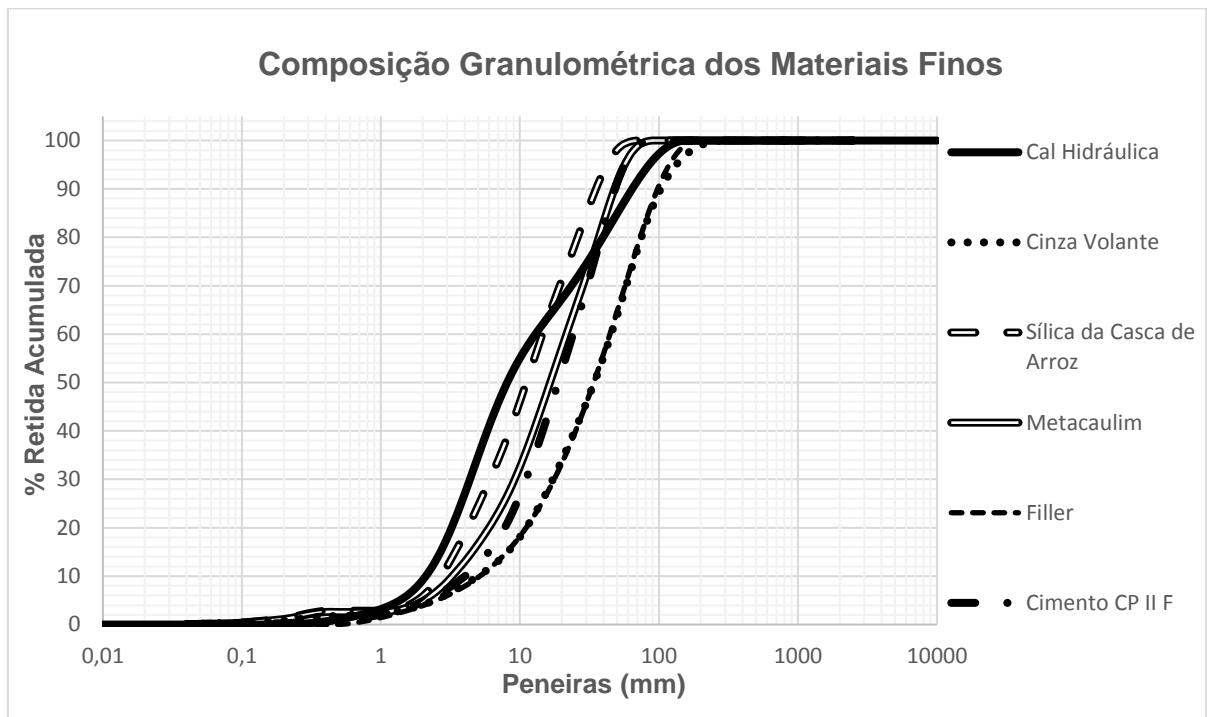


Elaboração própria.

3.1.2 Ensaio de composição Granulométrica dos materiais finos

As granulometrias dos materiais finos como cimento, cal, filler, cinza volante, sílica e metacaulim, foram obtidas através da difração de raios laser, realizadas no laboratório da UNIPAMPA, campus Bagé. Dessa forma, observa-se no Gráfico 2 as composições granulométricas dos materiais finos.

Gráfico 2: Curvas de composição granulométrica dos materiais finos.



3.1.3 Determinação das massas específicas dos agregados miúdos

As massas específicas dos agregados miúdos foram determinadas através da ABNT NBR 9776/87 e na Figura 11 ilustram-se os principais procedimentos realizados. Para a execução do ensaio, pesa-se 500g de material (a) e preenche-se o frasco Chapman até a marca de 200ml com água (b), logo, utiliza-se um pano para a secagem das paredes internas do frasco de forma que o material que será despejado não contenha grãos aderidos, seguindo as recomendações do item 6 da norma (c). Coloca-se 500g de agregado miúdo seco no qual foi devidamente agitado para a eliminação das bolhas de ar. A leitura é feita no nível atingido pela água em dm^3 (d). A execução do ensaio ocorreu com temperatura controlada, mesmo que a norma vigente não exija tal controle.

Figura 11: Determinação das massas específicas dos agregados miúdos.



Elaboração própria.

Além disso, o item 7.2 da mesma norma, prescreve que dois ensaios sucessivos não devem divergir de $0,05\text{g/cm}^3$. Satisfazendo esta condição, não serão necessários mais ensaios para a determinação das massas específicas. Os resultados obtidos através desse ensaio são apresentados na Tabela 3, podendo assim, classificar tais agregados como normais com relação a sua massa específica.

Tabela 3 – Massas específicas dos agregados.

Material	Areia Grossa		Areia Média		Areia Fina	
li (cm^3)	200	200	200	200	200	200
lf (cm^3)	377,5	378,5	379,5	380	377	377
γ (g/cm^3)	2,80	2,81	2,78	2,78	2,83	2,82
γ média (g/cm^3)	2,80		2,78		2,82	

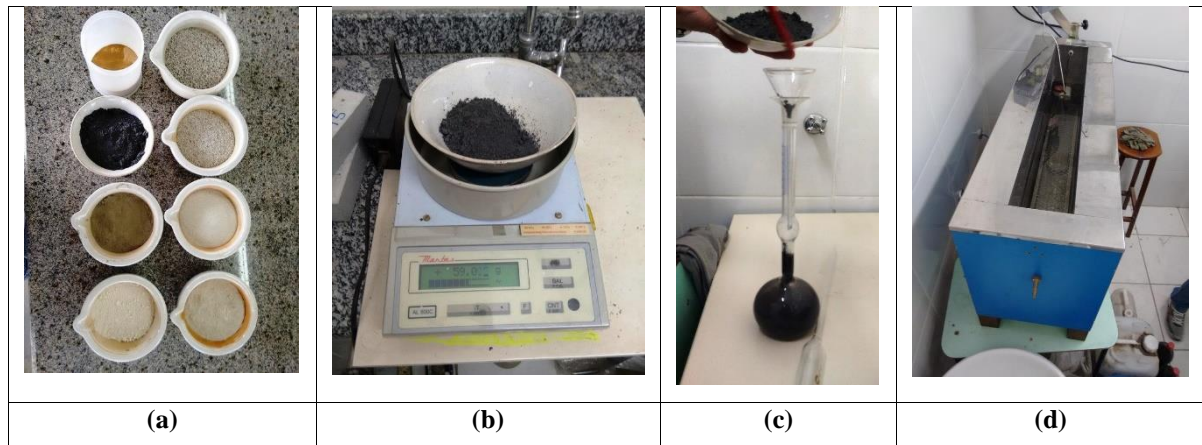
Elaboração própria.

3.1.3 Determinação das massas específicas dos materiais finos

Os ensaios para determinação da massa específica do cimento Portland CP II-F, cal hidráulica, cinza volante, filler calcário, sílica da casca de arroz e do metacaulim, foram realizados conforme a ABNT NBR NM 23/00, a qual recomenda a utilização de um material que não reaja com os mesmos. Neste trabalho, será utilizado o querosene como fluido inerte para o preenchimento dos vazios dos materiais. Os frascos de Le Chatelier com querosene serão imersos em água com temperatura controlada de 20°C por pelo menos 30 min antes da realização do ensaio, com o objetivo de estabilizar a temperatura no querosene.

O ensaio é reproduzido na Figura 12, e consiste em separar os materiais (a), pesagem dos quais serão determinadas as massas específicas (b), incorporar os pós no frasco (c), inserir o conjunto no tanque com temperatura controlada (d), realizando a da leitura do volume de fluido deslocado após a estabilização da temperatura.

Figura 12: Etapas de ensaio de massa específica dos materiais finos.



Elaboração própria.

Além disso, o item 8.1 da ABNT NBR NM 23/00 descreve que dois ensaios da mesma matéria, executados pelo mesmo operador, não devem apresentar divergência superior a $0,01 \text{ g/cm}^3$. Dessa forma, os materiais foram ensaiados atendendo esta prescrição normativa. Os resultados obtidos para os materiais finos podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4: Massas específicas obtidas e calculadas para os materiais em pó.

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

Elaboração própria.

3.1.4 Mistura das argamassas

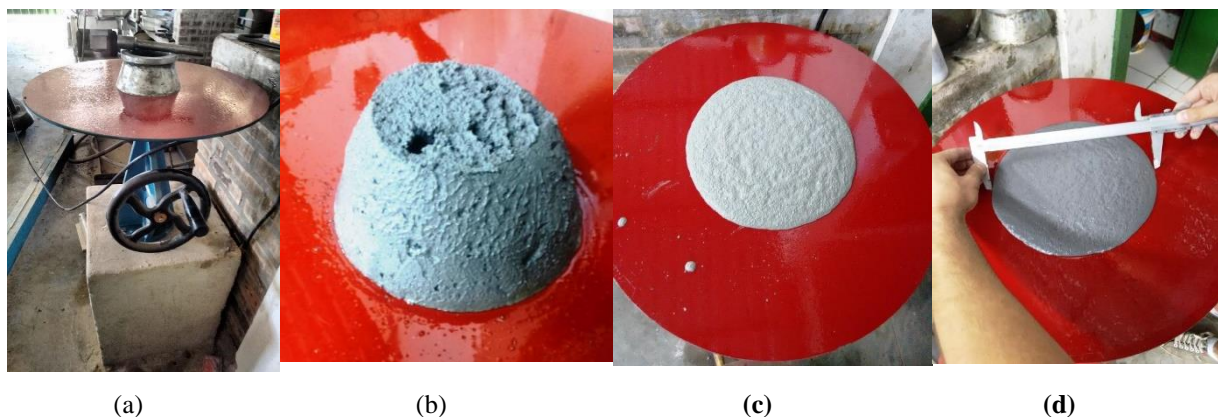
A mistura dos componentes da argamassa se deu conforme o método descrito pela NBR 7215/1996, utilizando um misturador mecânico de duas velocidades, cuba

de aço inoxidável com capacidade aproximadamente de 5 litros, com pá de metal que gira em torno de si mesma e, em movimento planetário, em torno do eixo da cuba, movimentos estes em sentidos opostos. A balança utilizada teve resolução de 0,1g.

3.1.5 Ensaio na Mesa de Consistência (Flow Table)

A Mesa de Consistência (Flow Table) é constituída por uma chapa de metal não corrosivo, horizontal, lisa e plana com uma haste fixada a seu centro no qual recebe, por meio de uma guia, um movimento vertical ascendente (a). Para a execução do ensaio, moldam-se os corpos de prova segundo o item 3.5.1.1 da norma ABNT NBR 7215/96. O procedimento (Figura 13) consiste em centralizar um aparelho de metal com sua base maior apoiada na mesa. Enche-se o tronco de cone com argamassa em três camadas de mesma altura aplicando uma sequência de 15, 10 e 5 golpes uniformemente distribuídos na primeira, segunda e terceira camadas, respectivamente (a). Ao completar esta operação deve-se rasar a parte superior do molde e depois tirá-lo (b), levantando-o verticalmente para cima tomando cuidado para não causa desmoronamento nas laterais do cone e em seguida, gira-se a manivela da mesa e provoca-se 30 golpes em 30 segundos (c). Para a medida do espalhamento, utiliza-se um paquímetro (d). Para a execução do trabalho, utilizou-se a quantidade de água necessária para atingir um espalhamento obedecendo a variação de 250 ± 5 mm para o traço SCA20, já que foi possível observar através de ensaios anteriores que se a água encontrada para essa análise fosse para traços com porcentagem menores de sílica, a mistura dos materiais para os traços SCA20 e SCA30 seria dificultada.

Figura 13: Etapas de ensaio de Consistência.



Elaboração própria.

3.1.6 Ensaio de Squeeze Flow

Para a execução dos ensaios de Squeeze Flow, com base na ABNT NBR 15839/2010 utilizou-se os seguintes equipamentos: punção com diâmetro de 101 mm, placa inferior e com diâmetro de 200 mm, feita de aço inox. A máquina de ensaio utilizada foi uma Shimadzu AGS-X (Figura 14) com capacidade de carga de 5kN e com controle de deslocamento a uma velocidade de 1 mm/s. Durante os ensaios, será utilizado uma célula de carga de 5000N e deslocamento do máximo do travessão de 6 mm.

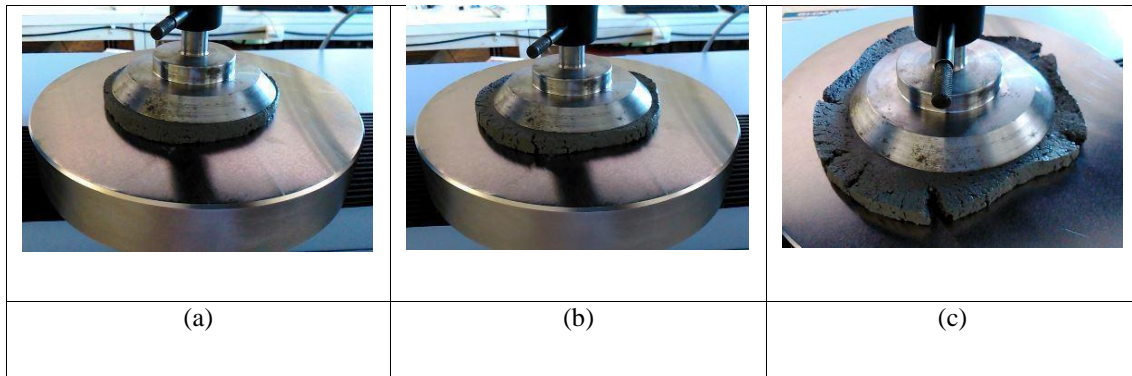
Figura 14: Máquina para o ensaio de squeeze flow.



Elaboração própria.

A Figura 15 demonstra a amostra moldada (a) com a punção já posicionada para a execução do ensaio, a argamassa sendo comprimida durante um ensaio (b), e o estado final após chegar ao deslocamento proposto (c).

Figura 15: Ensaio de squeeze flow (etapas).



Elaboração própria.

3.1.7 Determinação da densidade da massa e do teor ar incorporado

O ensaio de densidade da massa e do teor de ar incorporado é constituído por uma balança com resolução de 0,1g, recipiente cilíndrico, rígido, de material não absorvente (conforme item 4.2 da ABNT NBR 13278/2005), espátula e placa de vidro quadrada e transparente. O procedimento consiste em calibrar o recipiente (conforme item 5.1 da norma), preparação da argamassa, introduzir a argamassa suavemente no recipiente em três camadas com alturas iguais, aplicando 20 golpes na argamassa após cada camada preenchida. Ao completar essa operação, deve-se aplicar três quedas a uma altura aproximada de 3 cm, de forma com que não fiquem vazios entre a argamassa e a parede do recipiente, podendo assim rasar o recipiente com a espátula em duas passadas ortogonais entre si, com movimentos de vai e vem.

Assim, pode-se pesar e registrar a massa do molde com a argamassa (m_c), para o cálculo da densidade de massa (d) através da Equação 5, sendo v_r o volume e m_v a massa do recipiente.

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \cdot 1000 \quad \dots(5)$$

Para o cálculo do teor de ar incorporado (A) em porcentagem, utilizou-se a Equação 6, utilizando a densidade de massa teórica da argamassa sem vazios (d_1).

$$A = 100 \left(1 - \frac{d}{d_1} \right) \quad \dots(6)$$

3.1.8 Ensaio de Vicat modificado

O ensaio de Vicat modificado foi realizado com base na ABNT NBR 14399/1999, e consiste em medir a penetração de uma sonda cônica na argamassa, a qual está contida em um molde tronco-cônico, tendo a sonda posicionada no topo do material.

O molde foi preenchido imediatamente após a mistura (ABNT NBR 7215), tendo como base uma placa de vidro, realizando a devida saída das bolhas de ar eventualmente retidas na pasta com através de suaves golpes. Prosseguiu-se com a rasadura do corpo de prova com a espátula, posicionando e zerando sua escala adequadamente.

Terminadas as operações de preparo do ensaio, a sonda deve ser solta em queda livre. A leitura da penetração foi feita em milímetros, 30 segundos após o momento em que a haste da sonda tiver sido solta. Foram feitos dois ensaios de Vicat modificado para cada traço, sendo que o valor apresentado corresponde à média desses valores. A Figura 16 mostra a realização da leitura da medida de penetração da sonda na argamassa.

Figura 16: Leitura da penetração do ensaio de Vicat modificado.



Elaboração própria.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através dos ensaios de consistência (Flow Table e Vicat Modificado) e de ar aprisionado, obtiveram-se os resultados conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Resultados obtidos através dos ensaios de mesa Flow Table, Vicat Modificado e de Ar Aprisionado.

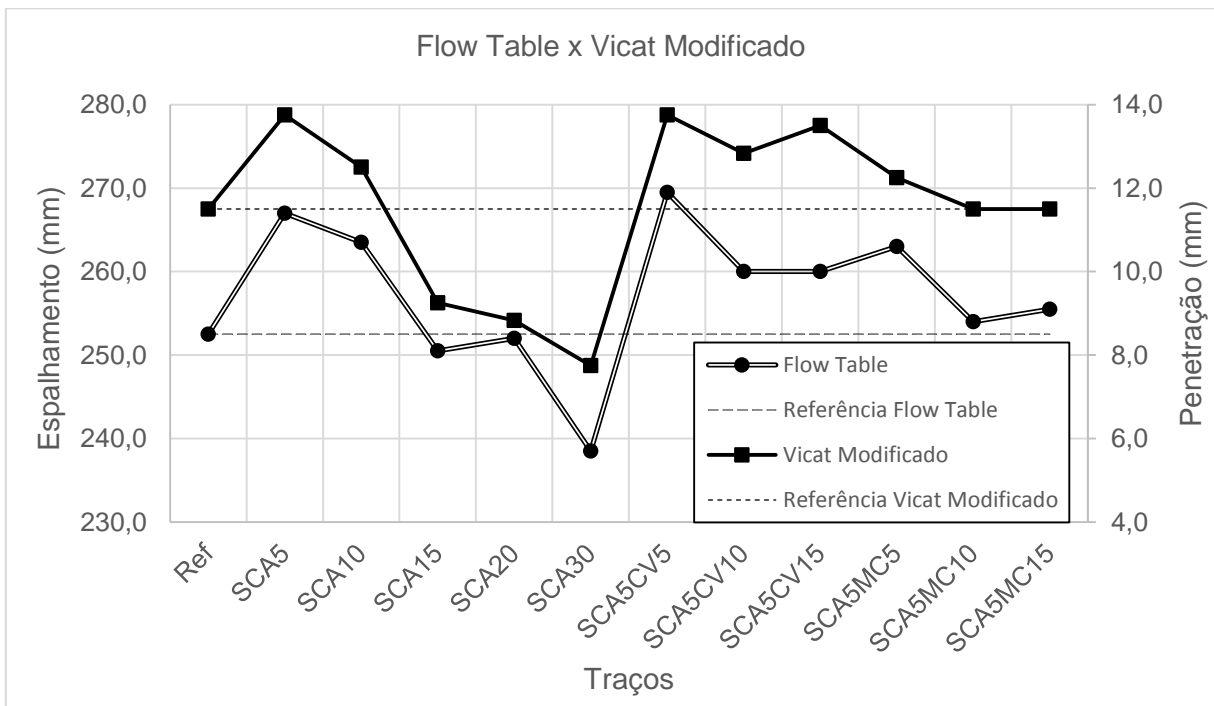
Traços	Flow Table (mm)	Penetração de Cone (mm)	Densidade da argamassa (kg/m³)	Ar Aprisionado (%)
Ref	252,5	11,5	2209,4	13,0
SCA5	267,0	13,8	2235,7	11,8
SCA10	263,5	12,5	2198,4	13,1
SCA15	250,5	9,3	2199,1	13,0
SCA20	252,0	8,8	2205,7	12,5
SCA30	238,5	7,8	2188,1	12,9
SCA5CV5	269,5	13,8	2221,8	12,2
SCA5CV10	260,0	12,8	2211,6	12,4
SCA5CV15	260,0	13,5	2209,4	12,3
SCA5MC5	263,0	12,3	2228,4	12,0
SCA5MC10	254,0	11,5	2224,0	12,2
SCA5MC15	255,5	11,5	2198,4	13,1

Elaboração própria.

Cascudo (2007) confirma que o método do cone realmente avalia a consistência, uma vez que, as alterações no teor de água para uma dada argamassa levam a modificações na sua consistência, porém, quando a composição da argamassa é alterada nas quantidades ou natureza dos materiais empregados (exceto a água), esta modificação reflete-se principalmente na sua plasticidade.

Entretanto, observa-se no Gráfico 3 que o ensaio de mesa Flow Table e o de Vicat modificado possuíram oscilações que tendem a um padrão, o que indica que o além de possuir uma relação de plasticidade, pode apresentar uma correlação com a consistência das argamassas.

Gráfico 3: Gráfico obtidos através dos ensaios de mesa Flow Table e Vicat Modificado.



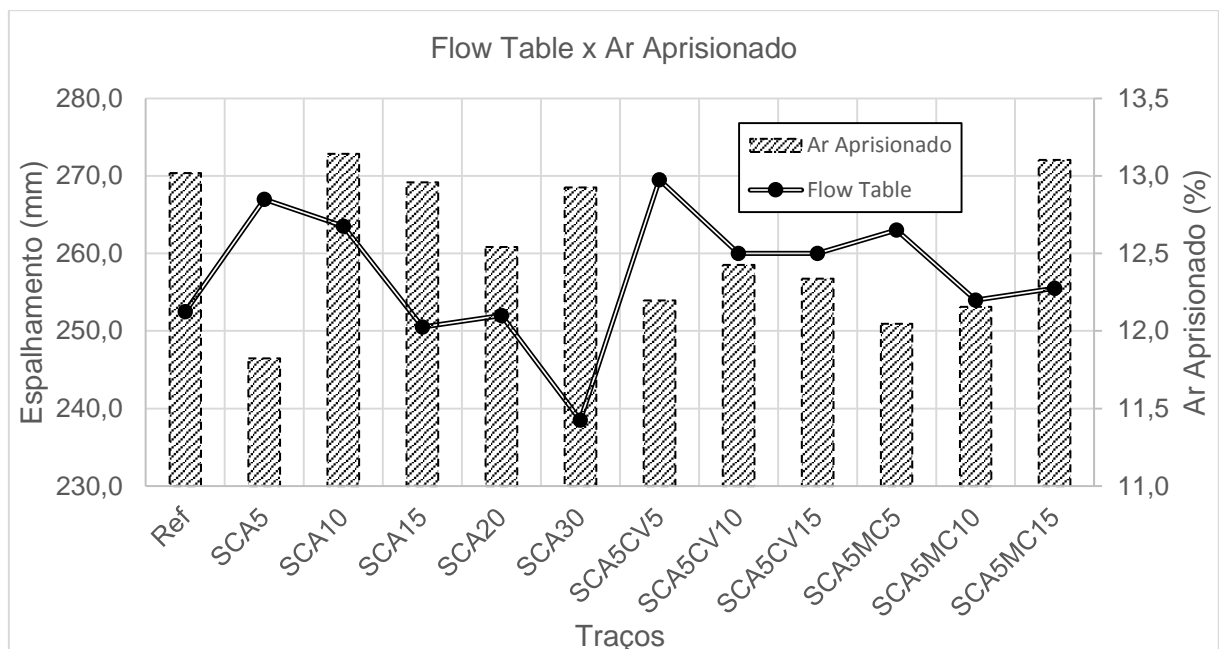
Elaboração própria.

Pode-se observar que para a substituição de 5% e 10% de SCA houve um acréscimo na consistência em relação a mistura referência, entretanto, com a substituição de SCA em proporções maiores que 5% apresentaram decréscimos de consistência até a porcentagem de 30%. Analisando as misturas de referência e 5%, observa-se que o ensaio de mesa Flow Table obteve um acréscimo de 5,7%, já no ensaio de penetração de cone teve um aumento de 20%, isso evidencia que o ensaio de Vicat modificado é mais sensível a variações de consistência.

Todas as misturas contendo 5% de SCA e cinza volante ou metacaulim apresentaram valores de espalhamento e penetração superiores aos encontrados para o traço referência, demonstrando que essas adições tendem a melhorar a sua trabalhabilidade. Além disso, a cinza volante mostrou um melhor comportamento, já que os valores se encontram mais distantes dos valores de referência. Dessa forma, para o traço com 5% de cinza volante e 5% de metacaulim, apresentaram os maiores valores de consistência, tanto para o ensaio de Vicat modificado quanto para o Flow Table. Pode-se observar que o uso do metacaulim acarretou em um resultado inferior de consistência, já que o mesmo apresenta uma superfície com maior atrito quando comparado com a cinza volante, que apresenta uma geometria esférica.

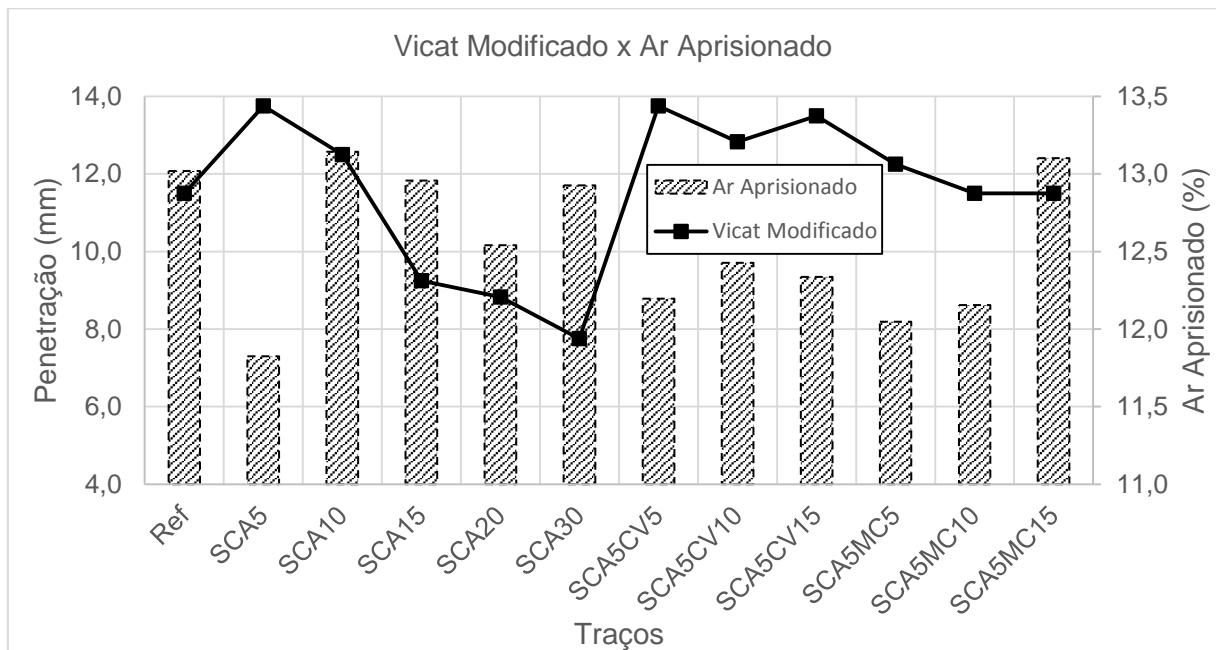
Em contrapartida, quando comparados os resultados de consistência com a porcentagem de ar aprisionado na argamassa, não foi possível descrever uma tendência no comportamento, já que com o aumento do ar aprisionado, não ocorreu o devido aumento na sua consistência; além disso, os valores não seguiram um aumento ou decréscimo em relação à proporção de substituição da adição mineral, o que confirma que para esses traços e ensaios realizados, o ar aprisionado não teve influência preponderante. Assim, observa-se no Gráfico 4 os resultados para o ensaio de mesa Flow table x Ar Aprisionado, e no Gráfico 5, os resultados para o ensaio de Vicat Modificado x Ar Aprisionado.

Gráfico 4: Gráfico obtidos através dos ensaios de mesa Flow Table e Ar Aprisionado.



Elaboração própria.

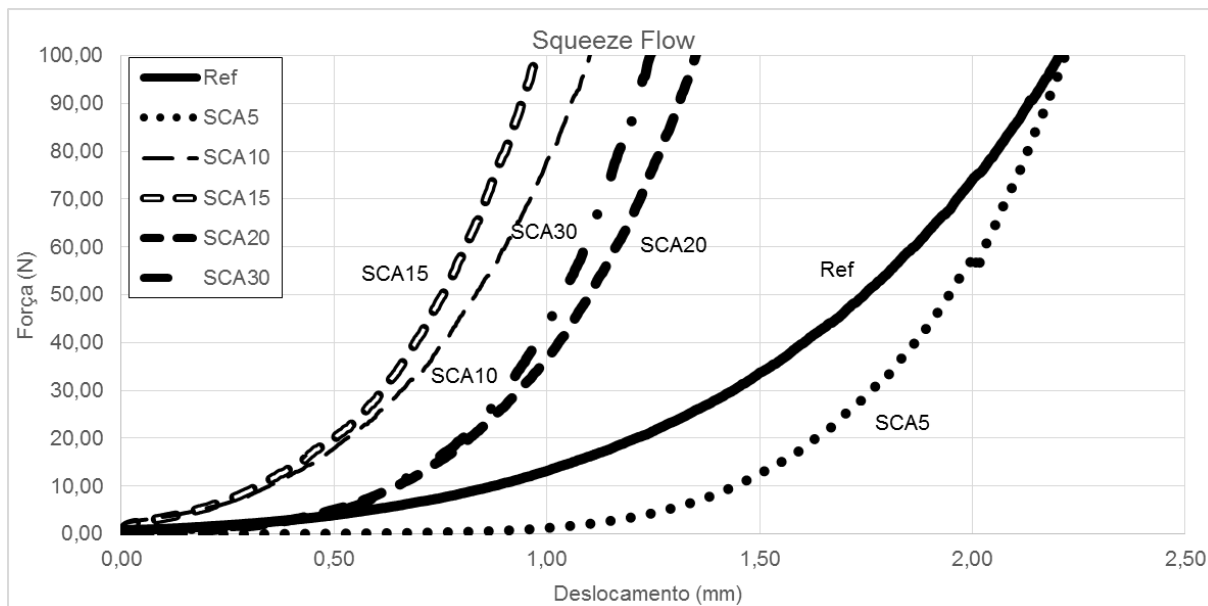
Gráfico 5: Gráfico obtidos através dos ensaios de mesa Vicat Modificado e Ar Aprisionado.



Elaboração própria.

Como apresentado anteriormente, a avaliação de argamassas somente pela sua consistência ainda é ineficiente, necessitando de ensaios mais complexos como o Squeeze Flow. Assim, como forma de facilitar a avaliação dos resultados, os gráficos obtidos com esse ensaio foram separados por tipo de substituição, sendo que os traços que possuírem melhor comportamento reológico para cada material testado foram separados e mostrados em um último gráfico, de forma a comparar os perfis para as diferentes adições minerais. Dessa forma, observa-se as curvas obtidas com o Squeeze Flow para os traços contendo substituição de SCA no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Squeeze Flow para os traços com substituição de Cimento Portland (Ref) por Sílica da Casca do Arroz (SCA).



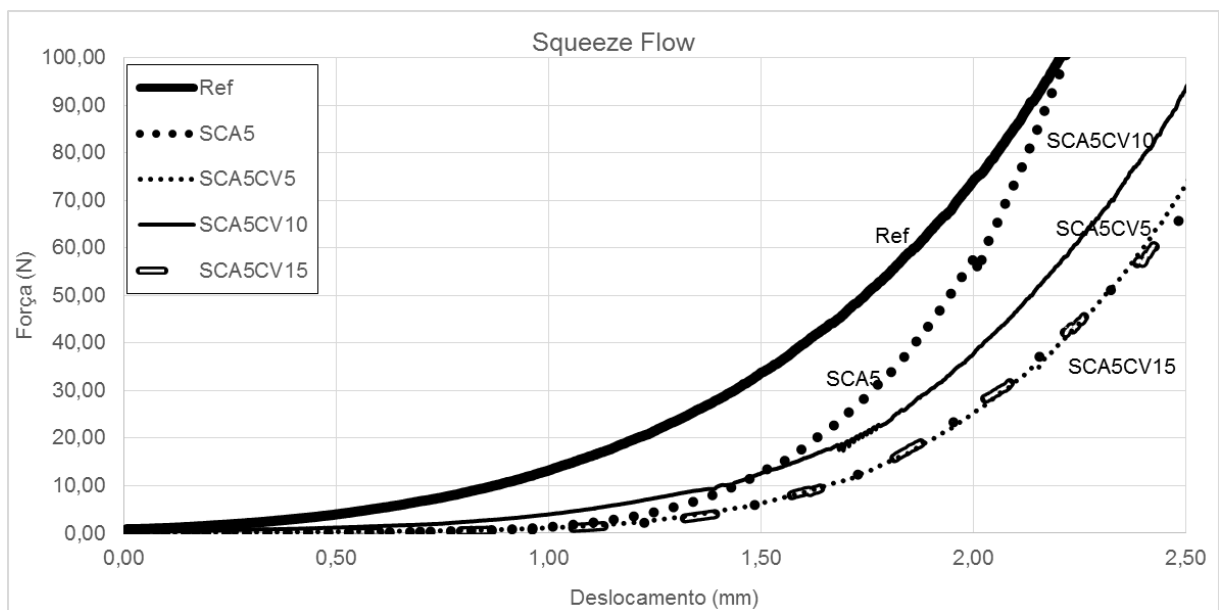
Elaboração própria.

No Gráfico 6, pode-se observar que a utilização acima de 5% de SCA dificultaria a aplicação da argamassa, já que tais substituições apresentaram perfis de plasticidade com maior rigidez, visto que o deslocamento é de aproximadamente a metade, quando comparadas com as misturas de referência e SCA5. O traço SCA5, quando comparado com o traço de referência, apresentou uma plasticidade maior, e tal fato pôde ser observado nos ensaios de consistência, mesmo apresentando um índice de empacotamento menor que a mistura Ref. Além disso, pode-se observar no Gráfico 6 que o enrijecimento por deformação da argamassa SCA5 alcança a mistura referência no deslocamento de aproximadamente 2,2mm. Ainda, o segundo estágio do gráfico mostra uma inclinação muito menor para a mistura contendo 5% de sílica, resultando uma menor viscosidade plástica. Dessa forma, tais fatores podem ser explicados devido a ação de forças superficiais, já que a mistura SCA5 apresentou um perfil com menor viscosidade plástica até que se atingiu uma força que fez com que os efeitos mássicos dos grãos prevalecessem sobre as forças superficiais.

Dessa maneira, observa-se nos Gráfico 7 e 8 os ensaios de Squeeze Flow para as misturas 5% de sílica juntamente com outras adições minerais (Cinza volante e metacaulim, respectivamente), observa-se uma melhor trabalhabilidade quando comparados os demais perfis reológicos contendo diferentes proporções, somente de

SCA. Os demais traços contendo cinza volante ou metacaulim apresentaram uma tensão de escoamento e viscosidade plástica menores, quando comparados com o traço de referência, o que possivelmente proporcionariam uma menor força para a aplicação. Quando comparados no estágio 3, os traços contendo cinza volante e metacaulim tiveram um enrijecimento por deformação mais tardio, possivelmente por um rearranjo da estrutura granular, ou variação no empacotamento da mistura.

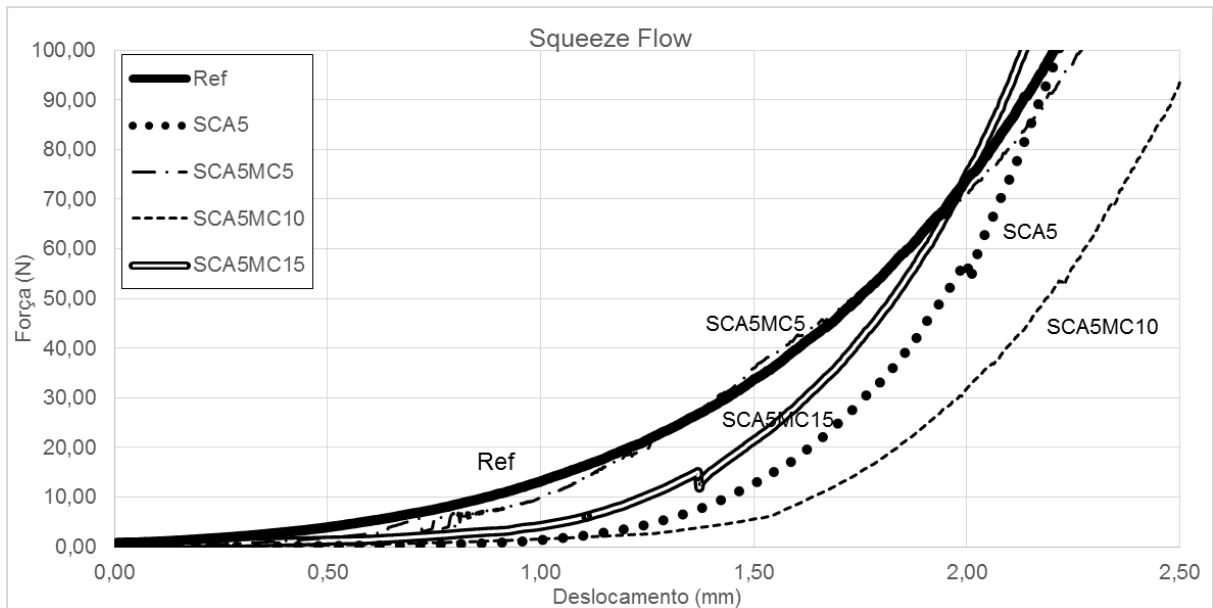
Gráfico 7: Squeeze Flow para os traços com substituição de Cimento Portland por 5% de SCA e com diferentes porcentagens de Cinza Volante.



Elaboração própria.

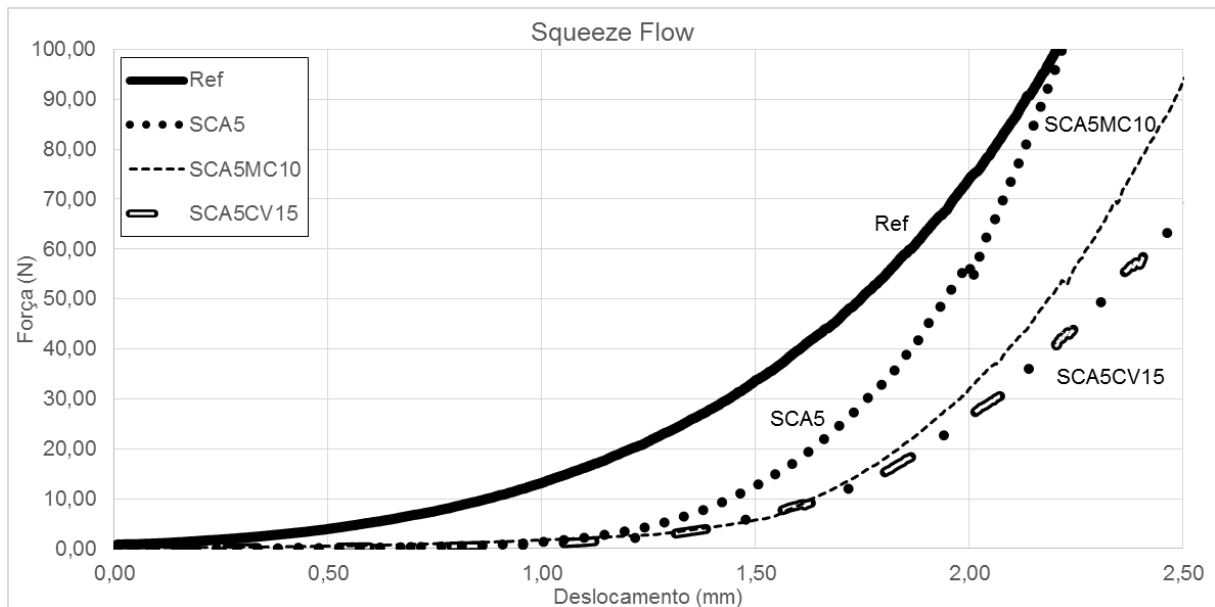
Pode-se observar que o perfil reológico do traço SCA5MC10 apresentou uma maior plasticidade, provavelmente sendo resultado das tensões superficiais causadas pela forma dos grãos juntamente com a compacidade das misturas, desse modo, as misturas que apresentaram os melhores desempenhos no que tange o ensaio de Squeeze Flow são mostradas no Gráfico 9.

Gráfico 8: Squeeze Flow para os traços com substituição Cimento Portland por 5% de SCA e com diferentes porcentagens de Metacaulim.



Elaboração própria.

Gráfico 9: Squeeze Flow para os traços com maiores plasticidades para SCA e blendas de SCA com Cinza Volante ou Metacaulim.



Elaboração própria.

Com o Gráfico 9 observa-se que dentre todas as substituições testadas para o traço Ref, a melhor plasticidade foi observada para os traços contendo 5% de sílica e 15% de cinza volante ou 10% de metacaulim. No entanto, o traço contendo

metacaulim apresentou um enrijecimento por deformação com menor carga quando comparado com a mistura contendo cinza volante. Tal fato pode ser explicado devido à forma do grão dessas adições minerais, já que a cinza volante tem sua geometria mais definida e esférica na sua maior parte, quando comparada com os grãos do metacaulim. Ainda, pode-se notar que o traço contendo somente 5% de sílica da casca do arroz obteve uma boa plasticidade mesmo quando comparado com os traços SCA5CV15 e SCA5MC10, porém, o enrijecimento por deformação foi mais acentuado quando comparado com os demais. Ademais, todos os traços apresentados no Gráfico 9 apresentaram perfis reológicos que apresentam maiores viscosidades plásticas quando comparados com o traço referência, o que demonstra que essas argamassas podem apresentar maior facilidade de aplicação, demandando menor esforço do operário e aumentando sua produtividade.

5 CONCLUSÕES

No presente estudo o objetivo foi de avaliar a influência das adições minerais de sílica de casca de arroz, cinza volante, metacaulim e blendas em substituição parcial do cimento Portland no comportamento reológico de argamassas no estado fresco. Assim, foram possíveis alcançar as seguintes conclusões.

No que se refere aos ensaios reológicos através da mesa Flow Table e penetração de cone com o aparelho de Vicat Modificado, notou-se que os ensaios apresentaram correlações entre si. Entretanto, as variações obtidas através da penetração de cone foram mais representativas, evidenciando que provavelmente é mais sensível que o ensaio utilizando a mesa Flow Table. Ainda, Vicat Modificado aparenta ser um ensaio que não necessita de grande aparelhagem e de fácil execução. Isso confirma a teoria de Cascudo (2007) que o método de Vicat Modificado pode ser um importante mecanismo para a avaliação da consistência de argamassas em obra.

Em relação à densidade da argamassa e o seu teor de ar aprisionado no estado fresco, pode-se observar que para esse traço, os efeitos mássicos dos grãos e as forças de superfície foram preponderantes sobre os efeitos causados pelos vazios deixados pelo ar aprisionado na mistura. Dessa forma, é possível respaldar o trabalho de Cardoso (2009), que em condições de cisalhamento no estado fresco, a fração fina (<100 μ m) é afetada por fenômenos de superfície e reações de hidratação.

No que diz respeito aos ensaios de Squeeze Flow, observa-se que o traço SCA5 aparentou um melhor perfil reológico que a mistura Ref, mesmo possuindo um índice de empacotamento inferior. Em contrapartida, as demais misturas somente com sílica (SCA10, SCA15, SCA20 e SCA30), apresentaram perfis reológicos com menor deslocamento, indicando maior rigidez. Em relação as adições minerais de 5% de sílica, e as blendas de 5% de sílica e 5, 10 ou 15% de cinza volante ou metacaulim, percebeu-se que as mesmas demonstraram maior plasticidade quando comparados com a mistura referência. Tais fatos podem ser melhor descritos devido a ação de forças de superfície, onde as substituições possivelmente resultaram em alterações na viscosidade plástica na argamassa, além de que, as diferenças granulométricas das adições minerais podem ter influenciado no empacotamento da mistura. Constatou-se também que há correlação entre os ensaios de consistência e o ensaio de Squeeze

Flow na maioria dos traços ensaiados, porém, em outros, a sensibilidade do mesmo aparenta mostrar diferenças não percebidas somente em ensaios de consistência.

Ao que tudo indica, a reologia no estado fresco das argamassas, podem ser melhoradas com substituições parciais das adições minerais de sílica da casca do arroz, cinza volante, metacaulim e blendas dessas. Todavia, para a utilização desses traços ainda são necessários estudos mais aprofundados na área com o objetivo de correlacionar e obter a tensão de escoamento e viscosidade plástica através de reômetros, com a resistência mecânica e principalmente à aderência delas aos diferentes substratos.

Sugestões para trabalhos futuros:

É necessário também encontrar limites máximos e mínimos para a viscosidade das argamassas, o que ainda necessita de experimentos feitos com o auxílio de um reômetro, para assim, diminuir o surgimento de patologias nas construções.

Encontrar correlações entre diferentes materiais e sua influência na reologia, conectando os efeitos mássicos e forças de superfície com o objetivo de promover incremento nas propriedades reológicas.

Analisar a influência do tempo na reologia do estado fresco das argamassas com diferentes adições minerais.

REFERÊNCIAS

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.

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.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

ASSY, Tufi Mamed, **Mecânica dos Fluidos – Fundamentos e Aplicações**. LTC, 2004. 2ª edição.

BAUER, E. Revestimentos de argamassa- características e peculiaridades. Brasília: LEM-UnB; **Sinduscon**, 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.

CASCUDO, Oswaldo et al. Controle de produção de argamassas industrializadas em obra empregando o método de penetração de cone. **2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção**, Lisboa, Portugal, 2007.

DE LARRARD, F., **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach**, Modern Concrete Technology Series, vol. 9, E&FN SPON, London, 1999, 421 pages.

DOS SANTOS JÚNIOR, Thadeu Soares et al. Argamassa para reforço estrutural com adição de metacaulim. **7º Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação (CONNEPI)**, Palmas, Brasil, 2012.

ENGMANN, Jan et al. Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, Lausanne, Switzerland, 2005.

GOMES JUNIOR, M. V. Patologia, deslocamento da argamassa de revestimento. Ilustração. 2013?. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgid8AJ/analise-estado-conservacao-uff?part=3>>. Acesso em maio, 2017.

KLIMACZEWSKI, Felipe Augusto et al. Avaliação da Utilização de Sílica da Casca de Arroz e Cinza Volante em Argamassas. **7º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, Alegrete, Brasil, 2015.

LAUN, A et al. Analytical solutions for squeeze flow with partial wall slip. **J. Non-Newtonian Fluid Mech** 1999.

MACCAFERRI. Patologia, fissuras em argamassas de revestimento, devido a retração térmica. Ilustração. 2012?. Disponível em: <http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=36&Cod=287>>. Acesso em maio, 2017.

MACHADO, José Carlos Vieira, **Reologia e Escoamento de Fluidos**. Interciência, 2002.

MARANGON, Ederli et al. **Índice de Atividade Pozolânica da Sílica de Casca de Arroz Silcca Nobre SCI Proveniente da Combustão em Leito Fluidizado [S.I.]** Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil, 2013.

MATTANA, Alécio Junior et al. Avaliação da Plasticidade de Pastas de Cal Hidratada pelo Ensaio Squeeze Flow. **11º Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA)** Porto Alegre, Brasil, 2015.

MATTANA, Alécio Júnior et al. Influência dos constituintes do revestimento de argamassa sobre as suas propriedades reológicas. **Publicatio UEPG: Ciências exatas e da terra, agrárias e engenharias. Ponta Grossa**, Brasil, 2013.

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, Woodrow Nelson Lopes, **Fenômenos de Transporte para a Engenharia**. São Carlos: Rima, 2006.

SCHEWIZER, D. et al. Rheological Lab Testing of Building Formulations. **ConChem Conference**. 1994.

SCRIVENER, k.I. KIRKPATRICK, Innovation in use and research on cementitious material. **12th International Congress of Chemistry of Cement**, Montreal, Canada, 2007.

SOARES, Everton et al. Avaliação da utilização de sílica de casca de arroz em argamassas de assentamento. **11º Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA)**. Porto Alegre, Brasil, 2015.