ELISABETE KIOKO KUDO

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE ARGAMASSAS COLANTES

São Paulo

2012

ELISABETE KIOKO KUDO

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE ARGAMASSAS COLANTES

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia**

São Paulo

2012

ELISABETE KIOKO KUDO

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE ARGAMASSAS COLANTES

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia Civil**

Orientador: Prof. Dr. Rafael G. Pileggi

São Paulo

2012

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de novembro de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Kudo, Elisabete Kioko
Caracterização reológica de argamassas colantes /
E.K.Kudo.
-- ed.rev.-- São Paulo, 2012.
140 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1. Materiais de construção (Avaliação) 2. Argamassa. Univer-
sidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Enge-
nharia de Construção Civil II. t.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica em especial ao Prof. Dr. Rafael G. Pileggi, Dr. Fabio Alonso Cardoso e Prof. Dr. Vanderley John pela motivação, discussão técnica, orientação e pelo compartilhamento do conhecimento.

À Weber Saint Gobain e em especial ao Dr. Paul Houang por acreditar na minha capacidade.

Aos meus colegas do laboratório de microestrutura da Poli - USP, Departamento Técnico da Weber Saint Gobain e Sandro B. Fernandes, os quais contribuíram nos experimentos, discussões e no apoio técnico.

Aos meus pais, meu companheiro Antonio e todos os amigos que incentivaram este trabalho.

RESUMO

As argamassas colantes são produtos constituídos por areia natural ou artificial, ligantes e aditivos químicos que cumprem uma função de adesivo para assentamento de revestimentos em pisos e paredes. Sob o ponto de vista reológico, a argamassa colante é um material multifásico formado por uma pasta que envolve agregados minerais.

Atualmente, o único teste preconizado em norma a fresco é o ensaio de deslizamento, que apesar de ter baixo custo e relativa facilidade de execução em laboratório. As grandes desvantagens desse método são: imprecisão e a baixa repetibilidade, além de ser insuficiente para efetuar uma avaliação mais completa desses produtos no estado fresco.

Assim, técnicas de caracterização reológica (*Squeeze Flow*, *Pull Out Flow* e reometria rotacional) foram especificadas e aplicadas, como alternativa tecnológica para avaliação de argamassas colantes. Porém, o potencial da configuração tradicional do ensaio de *Squeeze Flow* e a reometria rotacional foram pouco explorados neste tipo de argamassa. Neste estudo foi necessário empreender ajustes de configuração.

O objetivo desta dissertação foi o de aplicar métodos de caracterização reológica em argamassas colantes de mercado (ACI e ACIII) de certo fabricante e ACI formulada em laboratório composta por areias com morfologias diferentes que permitissem identificar suas características relevantes no estado fresco, avaliar a influência dos parâmetros experimentais do método de *Squeeze Flow* (principalmente em relação à configuração e parâmetros), avaliar a adesividade das argamassas no estado fresco e aplicar o método de reometria rotacional para avaliação das energias de mistura e reológica.

Os experimentos para avaliação das configurações e parâmetros do ensaio de *Squeeze Flow* e *Pull Out Flow* mostraram que tais métodos foram sensíveis para diferenciar as argamassas e refletiram o que, na prática, é percebido: ACIII (Argamassa Colante do Tipo III) tem maior consistência que ACI (Argamassa

Colante do Tipo I), além de mostrar que são sensíveis às diferentes taxas de deslocamento, teores de água e morfologia de agregados.

Já a reometria rotacional mostrou-se sensível para identificar e diferenciar a cinética de mistura das argamassas colantes ACI e ACIII. Os resultados indicaram que o tempo de mistura de 150 segundos foi eficiente e suficiente para homogeneizar e estabilizar as argamassas testadas, e que a argamassa do tipo ACI apresenta maior dificuldade de mistura e resulta em uma suspensão com maior viscosidade e tensão de escoamento do que a argamassa ACIII.

Por fim, a aplicação dos métodos de caracterização reológica em argamassas ACI compostas por areias com morfologias diferentes, indicou que o método de *Squeeze Flow* mostrou ser sensível para diferentes teores de água, em argamassas compostas por areia artificial. As curvas de carga de compressão da argamassa ACI com areia artificial mostraram serem superiores às formuladas argamassas com areia natural, indicando que, com a mesma proporção de insumos e teor de água (volume), as argamassas não possuem perfis reológicos similares.

Palavras-chave: *Squeeze Flow*; *Pull Out Flow*; Reometria; Caracterização Reológica; Argamassa Colante.

ABSTRACT

Adhesive mortars are products constituted of natural or artificial sand, binder (cement) and chemical additives which serve as an adhesive for laying floor and wall tiles. From the rheological point of view, the adhesive mortar is a multiphase material consisting of a paste that coats mineral aggregates. Currently, the only test done is the slip test, which has low cost and has a relatively easy execution. The disadvantage of this method is not to have a good repeatability and is not sufficient to evaluate products in fresh state. Thus, techniques of rheologic characterization (flow squeeze, pull out flow and rotational rheometry) were applied as technologic alternatives for evaluation of adhesive mortars. However, the potential of the traditional configuration of the Squeeze Flow test and rotational rheometry were not explored in this type of product due to the requirement of configuration settings. The purpose of this dissertation is to apply advanced methods for rheological characterization of adhesive mortars in order to identify important characteristics of fresh-state application; evaluation of the influence of the squeeze-flow experimental method (mainly due to configuration and parameters); applied rheometry techniques to evaluate the mixing energy; and to evaluate the adhesiveness of fresh mortars. The evaluation of the configuration and parameters of the Squeeze Flow and *Pull Out Flow* showed that the methods were sensible enough to differentiate mortars in the same way that is perceived in practice: ACIII has greater consistency than ACI, also shows that are sensitive to different rates of displacement, water content and morphology of aggregates. The mixing and rotational rheometry showed that the method is sensitive to identify and differentiate the kinetics of mixing for ACI and ACIII mortars. The results indicate that the mixing time of 150 seconds was effective to homogenize and disperse the mortars. The mixing and flow torque values are higher for ACI than for ACIII, indicating that ACI is more difficult to be mixed and has a higher viscosity and yield stress than ACIII.

Keywords: Squeeze Flow, Pull Out Flow, Rheometry, Rheological Characterization, Adhesive Mortar.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática de curva de fluxo de calor de hidratação (KUMARA, 2012).....	28
Figura 2 - Estrutura de éteres de celulose (A: MHPC, B: MHEC, C: HEC). As posições são substituíveis e arbitrárias, elas podem ser ligeiramente diferentes de uma molécula para outra (PATURAL et al., 2010).	32
Figura 3 - Modelo simplificado da formação de filme polimérico (WANG; WINNIK, 1993; PÓVOAS, 2007).	33
Figura 4 - Reômetro para argamassas: 1) geometria de mistura composta por haletas radiais montadas em espiral 2) estrutura de sustentação do motor 3) recipiente de ensaio 4) base de reação.	43
Figura 5 – Programa de rotações da reometria de mistura.	44
Figura 6 – Programa de rotações para avaliação dos ciclos de cisalhamento.	45
Figura 7 - Curvas granulométricas das argamassas ACI e ACIII, obtidas através de granulômetro a laser (Malvern MSS Mastersizer).	46
Figura 8 - Distribuição de fases das argamassas de mercado ACI e ACIII: agregados e pasta (finos + água + ar), após mistura.	47
Figura 9 – Reometria (A) ACI submetida a mistura no reômetro, teor de água de 21,5% para ACI e 32,0% para ACIII; (B) ACI submetida a mistura no reômetro com diferentes teores de água 19,4%, 21,5% e 23,7%. (C) ACIII submetida a mistura no reômetro, com diferentes teores de água teor de água de 28,8%, 32,5% e 35,2%. .	50
Figura 10 – Aplicação de ciclo de cisalhamento de 6,3 a 316,3 rpm com permanência de 5 segundos em cada rotação, em ACI (A) e ACIII (B) com teor de água de 19,4%, 21,5% e 23,7% para ACI e 28,8%, 32,0%, 35,2% para ACIII, sendo teor de água nominal de 21,5% ACI e 32,0% para ACIII.	52

Figura 11 – Aplicação de ciclo de cisalhamento de 6,3 a 316,3 rpm com permanência de 5 segundos em cada rotação, com teor de água de 21,5% para ACI e 32,0% para ACIII.	53
Figura 12 – Esquema geométrico do ensaio de compressão entre duas placas paralelas, utilizada por Steffe (1992) para obtenção de tensão de cisalhamento de alimentos (queijo cremoso) semi-sólido.	56
Figura 13 – Diagrama esquemático do ensaio de <i>Squeeze Flow</i> (MIN, ERWING e JENNINGS, 1994).	57
Figura 14 - Perfil típico de uma curva carga de compressão versus deslocamento de um ensaio de <i>Squeeze Flow</i> com controle de deformação (BETIOLI, A. M. et al, 2009; CARDOSO, 2009).	58
Figura 15 – Curva de Carga de tração <i>versus</i> tempo obtido no ensaio de <i>Squeeze Flow</i> e <i>Pull Out Flow</i> . Fonte: (COSTA, 2006).	60
Figura 16 - Curva de Carga de tração <i>versus</i> tempo obtido no ensaio de <i>Pull Out Flow</i> (BOURAS et al. 2009).	61
Figura 17 - Máquina Universal Instron 5569, componentes: 1) Travessão Superior; 2) Placa Superior (Punção); 3) Molde; e 4) Placa Inferior (200 mm).	64
Figura 18 - (A) Configuração do molde partido 50,8 mm (2 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol), (B) Configuração do molde restritivo 101,6 mm (4 Pol) e punção de 25,4 mm (1 Pol) (C) Configuração do molde restritivo 152,4 mm (6 Pol) e punção de 50,8 (2 Pol) e (D) Configuração do molde restritivo 101,6 mm (4 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol).	65
Figura 19 – Diagrama de aplicação de carga de compressão versus tempo do ensaio de <i>Squeeze Flow</i>	66
Figura 20 - Distribuição de fases das argamassas de mercado ACI e ACIII: agregados e pasta (finos + água + ar), mistura realizada de acordo com a NBR14081-2 (2012).	68
Figura 21 Sequência do ensaio de <i>Squeeze Flow</i> (compressão) e <i>Pull Out Flow</i> (Tração) utilizando molde partido de 50,8 mm (2 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol)	

A) Punção estacionado na altura de 10 mm para iniciar a compressão B) Compressão da argamassa a uma profundidade de 9 mm C) Tração e estreitamento da argamassa D) Ruptura total da argamassa.....69

Figura 22 Sequência do ensaio de *Squeeze Flow* (compressão) e *Pull Out Flow* (Tração) utilizando molde restritivo de 101,6 mm (4 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol) A) Punção estacionado na altura de 10 mm para iniciar a compressão B) Compressão da argamassa a uma profundidade de 9 mm C) Tração e estreitamento da argamassa D) Ruptura total da argamassa.....70

Figura 23 – *Squeeze Flow*: Comparativo entre duas configurações diferentes moldes partido 50,8 mm (2 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol) / Restritivo de 101,6 mm (4 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol), utilizando ACI (A) e ACIII (B), variando-se a taxa de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s e aperto até a profundidade de 9 mm.....71

Figura 24 – *Pull Out Flow*: Comparativo entre duas configurações diferentes moldes partido 50,8 mm (2 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol) / Restritivo de 101,6 mm (4 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol), utilizando ACI (A) e ACIII (B), variando-se a taxa de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s e aperto até a profundidade de 9 mm.....73

Figura 25 – *Pull Out Flow*: Sequência do ensaio, utilizando molde restritivo de 101,6 mm (4 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol), utilizando ACIII (B), teor de água de 32%, taxa de deslocamento 1 mm/s e puxada na profundidade de 9 mm.74

Figura 26 – *Squeeze Flow versus Pull Out Flow* variando-se a taxa de deslocamento 0,1, 1 e 3 mm/s e aperto até a profundidade de 9 mm.....75

Figura 27 Sequência do ensaio de *Squeeze Flow* (compressão) e *Pull Out Flow* (Tração) utilizando molde restritivo de 101,6 mm (4 Pol) e punção de 25,4 mm (1 Pol) A) Punção estacionado na altura de 10 mm para iniciar a compressão B) Compressão da argamassa a uma profundidade de 9 mm C) Tração e estreitamento da argamassa D) Ruptura total da argamassa.....76

Figura 28 Sequência do ensaio de *Squeeze Flow* (compressão) e *Pull Out Flow* (Tração) utilizando molde restritivo de 152,4 mm (6 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol) A) Punção estacionado na altura de 10 mm para iniciar a compressão B)

Compressão da argamassa a uma profundidade de 9 mm C) Tração e estreitamento da argamassa D) Ruptura total da argamassa.....76

Figura 29 - *Squeeze Flow*: Comparativo entre punções 1 pol / 2 pol ACI (A) e ACIII (B), variando-se a taxa de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, aperto até a profundidade de 9 mm e molde restritivo de 101,6 mm (4 Pol).....77

Figura 30 - *Squeeze Flow*: Comparativo entre moldes restritivos 4 Pol / 6 Pol ACI (A) e ACIII (B), variando-se a taxa de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, aperto até a profundidade de 9 mm e punção de 50,8 mm (2 Pol).79

Figura 31 - *Squeeze Flow*: Influência das taxas de deslocamento para ACI e ACIII comparativo entre ensaios realizados com diferentes taxas de deslocamento 0,05; 0,1; 1; 3; 5 mm/s, aperto até a profundidade de 9 mm.....81

Figura 32 - *Squeeze Flow*: Comparativo entre profundidades de 3, 5, 7 e 9 mm, utilizando ACI, molde restritivo de 4 (Pol) e punção de (2 Pol) e com taxa de deslocamento de 1 mm/s.82

Figura 33 - *Pull Out Flow*: Comparativo entre profundidades de 3, 5, 7 e 9 mm, utilizando ACI, molde restritivo de 4 (Pol) e punção de (2 Pol) e com taxa de deslocamento de 1 mm/s.83

Figura 34 - *Squeeze Flow*: Repetições realizadas em datas diferentes com teores de água de 21,5% para ACI e 32,0% para ACIII, aperto até a profundidade de 9 mm, com a taxa de deslocamento de 1 mm/s.....84

Figura 35 - *Pull Out Flow*: Repetições realizadas em datas diferentes com teores de água de 21,5% para ACI e 32,0% para ACIII, aperto até a profundidade de 9 mm, com a taxa de deslocamento de 1 mm/s.....84

Figura 36 - *Squeeze Flow*: Tempo de consolidação (A) (B) (C) ACI, (D) (E) (F) ACIII, diferentes taxas de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, ensaios realizados nos tempo de 25 – 240 minutos, molde restritivo de (4 Pol) e punção de (2 Pol) e aperto até a profundidade de 9 mm.86

Figura 37 - *Squeeze Flow*: Teores de água diferentes (A) (B) (C) ACI, (D) (E) (F) ACIII, diferentes taxas de deslocamento 0,1, 1 e 3 mm/s, molde restritivo de (4 Pol) e

punção de (2 Pol), ACI com teor de água de 19,4%, 21,5%, 23,7% e ACIII com teor de água de 28,8%, 32,0, 35,2% em relação à massa de argamassa seca.....	89
Figura 38 - Esquema de leitura, comprimento e largura de um agregado.	95
Figura 39 – Curvas Granulométricas dos produtos formulados com o mesmo cimento, alterando-se somente o agregado (A) perfil das areias natural e artificial (B) perfil da argamassa formulada em laboratório.	98
Figura 40 – <i>Squeeze Flow</i> : Influência do teor de água para ACI com areia natural e artificial, utilizando diferentes taxas de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, molde restritivo de (4 Pol) e punção de (2 Pol), ACI com teor de água de 19,4%, 21,5%, 23,7% em relação à massa de argamassa seca.....	100
Figura 41 – <i>Squeeze Flow</i> : ACI Areia Natural 21,5% e Artificial 23,7% com e sem finos (partículas <0,075 mm da areia), utilizando diferentes taxas de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, molde restritivo de (4 Pol) e punção de (2 Pol).....	101
Figura 42 – Curvas granulometrias das areias: Natural e Artificial com e sem finos.	104
Figura 43 - Curvas granulometrias das areias: Natural e Artificial com e sem finos, (A) Areia Artificial sem e com finos, (B) Areia Natural sem e com finos (C) Areia Natural com finos e Areia Artificial com finos (D) Areia Natural sem finos e Areia Artificial sem finos.	105
Figura 44 – Esfericidade do agregado natural e artificial utilizados nas composições das argamassas colantes, obtidas através do Camsizer para analisar o tamanho e forma das partículas por imagem dinâmica digital.	106
Figura 45 - Agregados utilizados nas formulações, obtidas em microscópio Digital Microscope KH7700 Hirox: A) Areia Artificial britada não lavada com aumento de 50 vezes; B) Areia Artificial britada não lavada com aumento de 100 vezes; C) Areia Artificial britada não lavada com aumento de 150 vezes; D) Areia Artificial britada lavada com aumento de 50 vezes; E) Areia Artificial britada lavada com aumento de 100 vezes; F) Areia Artificial britada lavada com aumento de 150 vezes; G) Areia Natural lavada com um aumento de 50 vezes; H) Areia Natural lavada com um aumento de 100 vezes I) Areia Natural lavada com um aumento de 150 vezes.....	107

Figura 46 – Mistura ACI com Areia Natural e Artificial com e sem finos (partículas <0,075 mm da areia) com diferentes teores de água de 19,4%, 21,5%, 23,7%, mistura de 300 segundos em rotação constante (126,5 rpm) com a adição controlada de água (vazão constante de 6 g/s) a partir de 30 segundos. Após a mistura, o produto ficou em repouso por mais 15 minutos em rotação baixa (12,6 rpm) para maturação.	109
Figura 47 – Aplicação de ciclo de cisalhamento de 6,3 a 316,3 rpm com permanência de 5 segundos em cada rotação, em ACI formulada com areia natural e artificial com e sem finos com teor de água de 19,4%, 21,5% e 23,7%.	111
Figura 48 – Aplicação de ciclo de cisalhamento de 6,3 a 316,3 rpm com permanência de 5 segundos em cada rotação, em ACI formulada com areia artificial e natural com e sem finos com teor de água de 21,5%.	112
Figura 49 – <i>Squeeze Flow</i> : Influência do teor de água para ACI com areia natural com e sem finos, utilizando diferentes taxas de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, molde restritivo de (4 Pol) e punção de (2 Pol), ACI com teor de água de 19,4%, 21,5%, 23,7% em relação à massa de argamassa seca.	113
Figura 50 – Reometria de mistura: Areia Natural e Artificial com e sem finos, avaliada com diferentes teores de água, mistura de 300 segundos em rotação constante (126,5 rpm) com a adição controlada de água (vazão constante de 6 g/s) a partir de 30 segundos. Após a mistura, o produto ficou em repouso por mais 15 minutos em rotação baixa (12,6 rpm) para maturação.	115
Figura 51 – <i>Squeeze Flow</i> : ACI com Areia Natural e Artificial com teor de água 21,5% com e sem finos, utilizando diferentes taxas de deslocamento 0,1, 1 e 3 mm/s, molde restritivo de (4 Pol) e punção de (2 Pol).	116
Figura 52 – Reometria de mistura: Areia Natural com teor de água 21,5% e Areia Artificial com o teor de 23,7% de água com e sem finos, mistura de 300 segundos em rotação constante (126,5 rpm) com a adição controlada de água (vazão constante de 6 g/s) a partir de 30 segundos. Após a mistura, o produto ficou em repouso por mais 15 minutos em rotação baixa (12,6 rpm) para maturação.	117

Figura 53 – <i>Squeeze Flow</i> : ACI Areia Natural 21,5% e Artificial 23, 7% com e sem finos, utilizando diferentes taxas de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, molde restritivo de (4 Pol) e punção de (2 Pol).....	118
Figura 54 - Adição da água ao pó em uma mistura de argamassa colante	127
Figura 55 - Homogeneização da argamassa colante	127
Figura 56 - Aplicação da argamassa colante com a desempenadeira dentada sobre reboco	127
Figura 57 - Impregnação da argamassa na ferramenta de trabalho (colher de pedreiro).....	127
Figura 58 - Assentamento da peça cerâmica sobre argamassa aplicada com desempenadeira.....	128
Figura 59 - Verificação da impregnação da argamassa no tardo da peça cerâmica	128
Figura 60 - Aparato para o ensaio de deslizamento.....	129
Figura 61 - Indicação dos pontos para as medidas de posição das placas	129
Figura 62 – Adesividade: Repetições realizadas com ACI e ACIII, aperto até a profundidade de 1 mm, com a taxa de deslocamento de 5 mm/s – <i>Pull Out Flow</i> tração.	140
Figura 63 – Adesividade: Repetições realizadas com ACI e ACIII, aperto até a profundidade de 1 mm, com a taxa de deslocamento de 5 mm/s – <i>Squeeze Flow</i> compressão.....	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização física das argamassas da ACI e ACIII. Agreg = teor de agregados (partículas >75 μm); Finos = teor de finos (partículas <75 μm soma dos finos do agregado+aditivos+cimento); ρ_{Agreg} = densidade real dos agregados; ρ_{Finos} = densidade real dos finos; ρ_{Arg} = densidade real da argamassa anidra; ASFinos = área superficial dos finos; Rel. a/ms = relação água / materiais secos em massa.....	45
Tabela 2 Teor de ar incorporado, determinado após a mistura e ciclos de cisalhamento, com os teores de água de 19,4%, 21,5% e 23,7% para ACI e 28,8%, 32,0%, 35,2% para ACIII, sendo teor de água nominal de 21,5% ACI e 32,0% para ACIII.	48
Tabela 3 - Equações das curvas de aplicação de faixa de taxa de cisalhamento, aplicada nos teor de água de 19,4%, 21,5% e 23,7% para ACI e 28,8%, 32,0% e 35,2% para ACIII.	53
Tabela 4 - Caracterização física das argamassas com areia Natural e Artificial. ρ_{Agreg} = densidade real dos agregados; ρ_{Cimento} = densidade real; ρ_{Arg} = densidade real da argamassa anidra; Agreg =Agregado utilizado na formulação Cimento = Cimento utilizado na formulação; Celulósico = Celulósico utilizado na formulação Rel. a/ms = relação água / materiais secos em massa.	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Argamassa Colante do Tipo I de acordo com a NBR14081-1:2012
ACIII	Argamassa Colante do Tipo III de acordo com a NBR14081-1:2012
NBR	Norma Brasileira
Poli-USP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Deslizamento médio de posição
L_i	Leitura inicial
Agreg	Teor de agregados
Finos	Teor de finos (passante da malha 0,075mm)
ρ_{Agreg}	Densidade real (Massa Específica) dos agregados
ρ_{Finos}	Densidade real (Massa Específica) dos finos
ρ_{Arg}	Densidade real (Massa Específica) da argamassa anidra
ASFinos	Área superficial dos finos
Rel. a/ms	Relação água / materiais secos em massa
μ	Média
σ	Desvio padrão
CV	Coeficiente de variação
rpm	rotação por minuto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
1.1. Contexto.....	22
1.2. Objetivo	24
1.3. Estrutura da Tese.....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1. Componentes da argamassa colante.....	26
2.1.1. Ligante – Cimento Portland.....	27
2.1.2. Agregado	29
2.1.3. Aditivos Químicos (Éteres de Celulose e Polímeros).....	31
2.1.3.1. Éteres de celulose	31
2.1.3.2. Polímeros PVA e VAE	34
3. REOMETRIA ROTACIONAL.....	37
3.1. Introdução	37
3.2. Revisão da Literatura	38
3.2.1. Mistura: dispersão e distribuição.....	38
3.2.2. Comportamento reológico.....	39
3.3. Materiais e Métodos.....	42
3.3.1. Argamassas utilizadas	42
3.3.2. Equipamento	43
3.3.3. Mistura	44
3.3.4. Ciclos de cisalhamento	44
3.3.5. Caracterização da argamassa anidra	45
3.3.6. Resultados da aplicação do método de reometria	46
3.3.6.1. Determinação do teor de fases da argamassa no estado fresco (volume)	
47	
3.3.6.2. Comportamento de mistura	48
3.3.6.3. Ciclos de cisalhamento.....	51
3.3.7. Conclusão do capítulo.....	54
4. SQUEEZE FLOW E PULL OUT FLOW.....	55

4.1.	Introdução	55
4.2.	Revisão da Literatura	56
4.2.1.	<i>Squeeze Flow</i>	56
4.2.2.	<i>Pull Out Flow</i>	59
4.3.	Materiais e Métodos.....	63
4.3.1.	Argamassas utilizadas	63
4.3.2.	Preparação das argamassas	63
4.3.3.	Equipamento e Acessórios	63
4.3.4.	Configurações.....	65
4.3.5.	Parâmetros do ensaio	66
4.3.6.	Resultados da aplicação do método de <i>Squeeze Flow</i>	67
4.3.6.1.	Determinação do teor de fases da argamassa no estado fresco (volume)	67
4.3.6.2.	Influência da configuração.....	69
4.3.6.3.	Influência do diâmetro do punção.....	75
4.3.6.4.	Influência da taxa de deslocamento	80
4.3.6.5.	Repetibilidade do método.....	82
4.3.6.6.	Influência do tempo de consolidação	85
4.3.6.7.	Influência do teor de água	88
4.3.7.	Conclusão do capítulo.....	90
4.3.7.1.	<i>Squeeze Flow</i> - Compressão	90
4.3.7.2.	<i>Pull Out Flow</i> - Tração.....	91
5.	<i>SQUEEZE FLOW, PULL OUT FLOW</i> E REOMETRIA ROTACIONAL	
	APLICADOS EM ARGAMASSAS UTILIZANDO AREIA NATURAL E ARTIFICIAL ..	93
5.1.	Introdução	93
5.2.	Revisão de Literatura	94
5.3.	Estudo de Caso 1.....	97
5.3.1.	Materiais e Métodos.....	97
5.3.2.	Caracterização de argamassa anidra	97
5.3.3.	Argamassas utilizadas - Composição das formulações	98
5.3.4.	Resultados do Caso 1	99
5.3.4.1.	Influência do teor de água nas curvas de <i>squeeze flow</i>	99
5.3.4.2.	Avaliação da aplicabilidade da argamassa pelo pedreiro (aplicador)	101

5.3.4.3. Conclusão do estudo do Caso 1.....	102
5.4. Estudo de Caso 2.....	102
5.4.1. Materiais e Métodos.....	103
5.4.1.1. Para a aplicação da reometria.....	103
5.4.1.2. Para aplicação do squeeze flow.....	103
5.4.2. Caracterização de argamassa anidra	104
5.4.3. Argamassas utilizadas - Composição das formulações.....	108
5.4.4. Resultados do Caso 2.....	108
5.4.4.1. Comportamento de Mistura	108
5.4.4.2. Ciclos de cisalhamento.....	110
5.4.4.3. Influência da morfologia nas curvas de mistura e <i>squeeze flow</i>	114
5.4.4.4. Avaliação da aplicabilidade da argamassa pelo pedreiro (aplicador)....	117
5.4.5. Conclusão do estudo do Caso 2	119
6. CONCLUSÃO GERAL	121
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	122
REFERÊNCIAS.....	123
APÊNDICE A - APLICAÇÃO DA ARGAMASSA COLANTE	127
APÊNDICE B - MÉTODO DE DESLIZAMENTO.....	129
APÊNDICE C - CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSA ANIDRA	131
APÊNDICE D – RESULTADOS DE <i>PULL OUT FLOW</i>	132
APÊNDICE E - ADESIVIDADE INSTANTÂNEA – TACK TEST.....	140

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto

As argamassas colantes são produtos que cumprem a função de adesivo para assentamento de revestimentos em pisos e paredes, tais como cerâmica, porcelanatos, granitos e mármore, geralmente aplicados sobre substratos como, concreto, cerâmica, argamassas para contra piso, *dry wall*, entre outros. Devem atender a diversos requisitos de desempenho: deslizamento (no estado fresco), resistência de aderência e tempo em aberto.

Atualmente, a avaliação em campo sobre a mistura e aplicabilidade do produto (APÊNDICE A) é efetuada de forma empírica. O aplicador (pedreiro) determina, por meios de aspectos sensoriais, a facilidade ou dificuldade de mistura, classificando a argamassa em: pesada, leve, macia, áspera, com liga, etc. Porém, estas descrições são subjetivas e não mensuram quantitativamente a aplicabilidade do produto, além do que induzem a erros de avaliação, pois cada aplicador tem uma percepção diferente sobre o produto e a definição de trabalhabilidade não é simples (BANFILL, 1993).

Do ponto de vista de mercado, o comportamento reológico das argamassas colantes é importante porque norteia a decisão de compra de um produto. As argamassas que possuem melhores comportamentos reológicos são aquelas que os aplicadores definem como adequadas para a aplicação, e que fornecem melhor produtividade e desempenho.

Na prática, o aplicador pode reduzir ou aumentar empiricamente a quantidade de água adicionada na argamassa para ajustar sua aplicação ou facilitar a mistura, adequando o comportamento do produto.

No caso da redução da água, haveria uma secagem muito rápida da argamassa, o que afetaria a interação entre argamassa fresca e substrato, causando defeito no desenvolvimento da microestrutura da argamassa e afetando as propriedades no estado endurecido (ANTUNES, 2005).

Já o aumento da relação água-cimento causa um afastamento das partículas de cimento, dificultando a consolidação (o gel de CSH se forma entre as partículas de cimento, consolidando-as). Além disso, a água em excesso não utilizada nas reações de hidratação é expulsa, o que cria pontos de fragilidade.

Hoje o único teste a fresco preconizado na norma vigente NBR14081-1 (2012) para argamassas colantes é o ensaio de deslizamento (APÊNDICE B), que tem baixo custo e difícil reprodução em laboratório. Esse ensaio é um método totalmente manual, sem qualquer nível de automação, o que compromete a sua exatidão / precisão. A sistemática e precisão da leitura também influenciam o resultado do ensaio. Analisando todas estas variáveis, pode-se afirmar que o ensaio tem uma tendência à falta de repetitividade e reprodutibilidade, em decorrência de limitações humanas e metrológicas. Costa (2006) sugere que, nesse tipo de ensaio, podem ocorrer dois modelos hipotéticos de comportamento: a) o deslizamento da placa cerâmica proveniente do escoamento da argamassa b) deslizamento da placa cerâmica na interface com a argamassa devido à viscosidade da pasta.

Neste contexto, este trabalho propõe a utilização de métodos de caracterização reológica (reometria rotacional, *Squeeze Flow* e *Pull Out Flow*) para avaliação das argamassas colantes que, para este tipo de produto, foram pouco explorados e que necessitam ajustes e adaptações.

Para avaliação do processo de mistura e comportamento reológico, serão utilizadas: a) reometria de mistura que avalia a cinética de mistura e nível de torque para que o processo de homogeneização ocorra até a quebra total dos aglomerados; b) para a avaliação do comportamento reológico (viscosidade plástica, níveis de torque e inclinação da curva de cisalhamento) e a reometria rotacional, que indicará o comportamento de fluxo da suspensão em uma faixa de taxas de cisalhamento, permitindo determinar o torque de escoamento, a inclinação da curva e o nível de torque, todos realizados no mesmo equipamento e com a mesma mistura.

Já para aplicação, espalhamento, impregnação, excesso, falta de adesividade e potencial de adesão no estado fresco, o *Squeeze Flow* e *Pull Out Flow* foram escolhidos para avaliação das condições de aplicação, devido à condição do ensaio, que avalia o espalhamento por meio do aperto da argamassa, induzindo ao escoamento radial.

1.2. Objetivo

O objetivo desta dissertação é o de caracterizar reologicamente argamassas colantes de mercado e avaliar a aplicabilidade dos métodos. Para tanto, serão necessárias duas etapas:

- 1) Identificar, desenvolver, adaptar geometrias e/ou rotinas de testes, caracterizar reologicamente argamassas colantes por meio das técnicas de *Squeeze Flow*, *Pull Out Flow* e reometria rotacional;
- 2) Avaliar o potencial de utilização das técnicas na indústria para eliminação da subjetividade da avaliação do aplicador.

1.3. Estrutura da Tese

1 - Introdução

2 - Revisão Bibliográfica

Revisão dos conceitos de parâmetros que influenciam o comportamento reológico.

3 - Reometria Rotacional

Identificação da cinética de mistura das argamassas, de maneira a quantificar a facilidade de mistura de uma composição, a adequação dos planos de rotação e o dimensionamento da batelada de mistura.

4 - *Squeeze Flow* e *Pull Out Flow*

***Squeeze Flow* e *Pull Out Flow*:** avaliação das características de espalhamento da composição, avaliação dos ajustes do diâmetro e altura da amostra, diâmetro das placas de contato, confecção do corpo-de-prova, dispositivos de porta amostra, tempo de consolidação, parâmetros e configuração do ensaio.

Avaliaram-se comparativamente os métodos utilizados em laboratório com a percepção de profissionais (pedreiros) com larga experiência na aplicação das argamassas.

5 - Aplicações dos métodos de *Squeeze Flow*, *Pull Out Flow* e reometria rotacional na caracterização de argamassas utilizando areia natural e artificial.

Após a adaptação e ajustes dos métodos, foram realizadas as avaliações em argamassas com composições de agregados de origem morfológicas diferentes.

6 - Conclusões Gerais

Referências

Apêndices

A - Aplicação da argamassa colante

B - Método de avaliação do Deslizamento

C - Caracterização de argamassa anidra

D - Resultados de *Pull out Flow*

E - Adesividade Instantânea - Tack Test

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Componentes da argamassa colante

Sob o ponto de vista reológico, a argamassa colante é um material multifásico formado por uma pasta que envolve agregados minerais. A pasta é representada pela fração reativa constituída por cimento e aditivos e pela fração inerte composta por partículas com dimensão $<0,075 \mu\text{m}$ (COSTA, 2006).

As argamassas colantes são produtos constituídos por areia natural ou artificial, ligantes e aditivos. De acordo com a norma vigente NBR 14081-1 (2012), podem ser classificadas em ACI, ACII, ACIII e ACIIIE. Neste estudo, foram selecionados dois tipos de argamassas: ACI e ACIII.

Geralmente, a argamassa do tipo ACI é recomendada para utilização em ambientes internos, para aplicação e exposição em ambiente sem ação de intempéries nem solicitações de aderência de alto desempenho ou altas temperaturas, aplicada para aderir peças de revestimentos com absorção de água superior a 0,5%. São utilizados em sua formulação éteres de celulose MHEC (metil-hidroxietil-celulose) e/ou MHPC (metil-hidroxipropil-celulose), como aditivos que promovem a retenção de água, aumentam a viscosidade e contribuem na resistência de aderência (OHAMA, 1998; BETIOLI, 2007; POVOAS, 2005; PATURAL et al., 2010;).

Já a argamassa do tipo ACIII é utilizada em ambientes externos, fachadas de edifícios, locais expostos a intempéries e com altas temperaturas como saunas e piscinas aquecidas, aplicada para aderir peças cerâmicas com baixa absorção $<0,5\%$ e que demandam um alto desempenho de adesão e flexibilidade, exigindo a necessidade de adição de polímeros vinílicos, acrílicos, entre outros, que promovem a melhoria do desempenho.

Os principais constituintes de uma argamassa colante são:

Ligante: geralmente Cimento Portland Composto

Agregados: de origem areia natural (cava / rio) ou artificial (britagem de carbonatos)

Aditivos químicos: polímeros de origem natural que são sintetizados para utilização industrial.

Porém, com a evolução do mercado e a exigência de produtos de alto desempenho, ainda podem ser utilizados outros componentes como espessantes, aceleradores de secagem, agregados leves, agentes antideslizamento, fluidificantes, entre outros. A seguir, serão demonstrados os principais constituintes de uma argamassa colante de simples composição.

2.1.1. Ligante – Cimento Portland

Matéria prima comumente utilizada como ligante em argamassas colantes. Promove aderência mecânica e representa 20 a 50% (em massa) da formulação, dependendo da solicitação e da aplicação.

Devido às reações químicas de hidratação do cimento que envolvem essencialmente fenômenos de dissolução de fases anidras e de precipitação de fases hidratadas, os materiais que possuem cimento como constituinte em uma matriz apresentam alterações de consistência em função do tempo e estes ocorrem por fenômenos físico-químicos, como aglomeração das partículas em meio aquoso, resultado das forças eletrostáticas, forças de van der Waals, alta força iônica do meio aquoso e a formação de produtos hidratados entre as partículas de cimento (BETIOLI, 2009).

Estas forças são facilmente encontradas no processo de mistura da argamassa onde o produto apresenta aglomeração intensa e geralmente apresenta resistência da dispersão.

O aumento da concentração desses íons no meio líquido reduzem as forças de repulsão de origem eletrostática entre as partículas, favorecendo a atração entre elas e a aglomeração da suspensão. Esse é o caso de suspensões aquosas contendo partículas de cimento, onde os íons de Ca^{2+} , Al^{3+} e Si^{4+} são normalmente os responsáveis pelo aumento da viscosidade aparente função do tempo (OLIVEIRA et al., 2000). Considerando um perfil de evolução exotérmica (Figura 1), a hidratação

do cimento Portland pode ser dividida em vários estágios (TAYLOR, 1990; ODLER, 1998; BETIOLI, 2007; KUMARA, 2012):

1. Período de dissolução: Durante os primeiros minutos, a alita dissolve e íons são liberados na solução dos poros, mas a reação rapidamente diminui a uma taxa baixa. Durante os primeiros minutos ocorre a dissolução do material onde íons são liberados na solução. O período de dissolução é interrompido quando ocorre determinado nível de saturação da solução, fazendo com que a reação siga para o próximo estágio.
2. Período de indução: Durante as horas seguintes a baixa atividade e evolução do aquecimento (por se tratar de reações exotérmicas de dissolução) são observadas.
3. Período de aceleração: A taxa de liberação de calor aumenta, durante várias horas, até que se atinja um pico.
4. Período de desaceleração: A taxa de evolução de calor diminui durante algumas horas, devido a redução da taxa de reação.
5. Período de hidratação lenta: Após o período de desaceleração, a velocidade de hidratação continua a um nível baixo a diminuir.

Figura 1 - Representação esquemática de curva de fluxo de calor de hidratação (KUMARA, 2012)

Para este estudo, onde os ensaios são realizados a fresco, os estágios 1 e 2 são de maior relevância e são descritos a seguir:

Estágio I: Logo no início da mistura do cimento com água, há um pico de liberação de calor, devido à dissolução completa dos íons contidos na mistura (Cálcio, Sódio, Potássio, Sulfatos entre outros). Após aproximadamente 20 minutos, inicia-se a formação do Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) sobre as partículas de cimento e os primeiros sinais de formação de etringita.

Estágio II: Forma-se um gel ao redor da partícula e as reações de dissolução cessam devido à formação de uma barreira entre as fases anidras e a solução aquosa. Este estágio é chamado de período de indução ou dormência, e normalmente tem duração de aproximadamente 30 minutos a 3 horas, terminando quando a camada de gel depositada sobre os grãos de cimento é destruída.

Estas características de início de reação são aplicáveis somente quando o cimento Portland, está sem aditivos reguladores de pega. Para argamassas colantes, o comportamento de secagem não segue este padrão de reação do cimento, devido a sua composição que geralmente leva aditivos que modificam a cinética de hidratação.

Cincotto (2008) sugere que a reologia de uma mistura depende das propriedades da suspensão e da formação de compostos cristalinos, mono ou polifásicos e, quanto maior for o encadeamento dos átomos de cada espécie química formada, o entrelaçamento/embricamento e as características do cristal, maior será a resistência.

Esta formação tem maior relevância na etapa de formação da microestrutura da mistura. Ao final do processo de consolidação, este composto formado influenciará principalmente nas características de adesão e flexibilidade.

2.1.2. Agregado

O agregado geralmente utilizado é a areia fina (distribuição de partículas < 0,6mm), que representa de 50 a 70% (em massa) da formulação de uma argamassa colante. A variedade de agregados e sua disponibilidade ocorrem de acordo com a região de extração, a natureza química, a distribuição granulométrica, a origem (natural /

artificial), tendo influência direta sobre as propriedades a fresco e endurecido das argamassas.

Areias naturais tendem a apresentar grãos arredondados, devido ao efeito de colisões múltiplas e abrasão. Areias manufaturadas são produtos de brita, o que cria grãos com distintas formas que dependem da composição da rocha matriz (SIMS, BROWN, 2005), do modo de fratura e da taxa de redução. O processo de moagem tende a produzir partículas com bordas angulares e afiadas. Este tipo de partícula angular produz um empacotamento de menor densidade, e consequentemente, rigidez inferior quando comparado com agregados mais arredondados de areias naturais (CORTES et al., 2008).

A opção por um agregado pode ter algumas origens: econômica, disponibilidade e mercadológica. A areia natural geralmente esférica confere uma característica particular no comportamento reológico da argamassa colante e avaliação do aplicador, porque proporciona uma sensação de maciez e fluidez. Já o agregado artificial pode cumprir a função de preenchimento e pode suprir as questões de desempenho, mas, por apresentar formato angular, demonstra resistência mercadológica, pois a percepção do aplicador é de um produto com consistência muito encorpada e áspera.

A areia natural apesar de ser encontrada na natureza em abundância, normalmente é extraída de cava pura ou contaminada por argila e são geralmente encontradas em jazidas ou extraídas de rios (MEHTA, MONTEIRO, 2008). Podem sofrer um processo de beneficiamento, onde a parte orgânica é retirada e o resultado é uma areia fina e limpa, que pode passar ainda por um processo de classificação para que se atinja a curva granulométrica desejada.

No caso da areia artificial, esta depende principalmente do processo de britagem de matéria prima disponível e equipamentos complexos para produção e classificação (SIMS, BROWN, 2005). Porém, seu custo é inferior ao da areia natural, devido ao tipo de processo de produção que é realizado em larga escala e em grandes volumes, chegando ao custo de aproximadamente 3 vezes menor do que a areia natural.

2.1.3. Aditivos Químicos (Éteres de Celulose e Polímeros)

Polímeros celulósicos e os látices são largamente e tradicionalmente utilizados em argamassas colantes por promoverem o aumento da viscosidade da fase aquosa, elevação da capacidade de retenção de água e alteração da cinética de hidratação do cimento. A seguir, foram reunidos os dois principais polímeros utilizados nas argamassas colantes.

2.1.3.1. Éteres de celulose

Os éteres de celulose são polímeros semissintéticos utilizados principalmente em argamassas colantes. Solubilizam-se em contato com a água e possuem fibras moleculares longas, geralmente de origem natural, como madeira ou algodão, que são modificadas por processos industriais posteriores. Éteres de celulose são comumente introduzidos na indústria de produção de argamassas, a fim de fornecer propriedades no estado fresco e endurecido. Geralmente são adicionados nas proporções de 0,2 a 0,5% (em massa) em produtos comerciais.

Estes derivados de celulose são as moléculas mais adequadas para melhorar a retenção de água e trabalhabilidade do material no estado fresco, juntamente com a adesão ao substrato. No entanto, a desvantagem destas macromoléculas na formulação é o atraso de hidratação do cimento. Este depende principalmente da estrutura química da molécula e, em particular, do grau de substituição (PATURAL et al., 2010). No dimensionamento de um produto, este tempo de atraso é considerado.

Os principais itens que interferem no processo de envoltórios das partículas de cimento são: a esterificação, o grau de polimerização, a concentração dos sais dissolvidos e a temperatura.

A retenção de água, o aumento da viscosidade e o retardo da cinética de hidratação do cimento estão relacionados com a estrutura em forma de rede e ligações

cruzadas que absorvem grandes quantidades de água, o que explica suas propriedades (KHAYAT,1998).

Pourchez (2005) sugere que os éteres de celulose melhoram significativamente as características finais da resistência interna das argamassas. Estes aditivos, por aumentarem substancialmente a capacidade de retenção de água, impedem que seja drenada muito rapidamente para o substrato. Desta forma, restando mais água no material fresco, a hidratação do cimento é favorecida, aumentando a resistência mecânica final.

Segundo Betioli (2007), as cadeias poliméricas junto com o ar incorporado inserido na fase de mistura atuam no deslizamento das partículas da argamassa, na capacidade de lubrificação, na facilidade de aplicação e na formação de cordões. Desta forma, contribui para a facilidade de espalhamento e produtividade.

A Figura 2 mostra a estrutura molecular de alguns tipos de éteres de celulose.

Figura 2 - Estrutura de éteres de celulose (A: MHPC, B: MHEC, C: HEC). As posições são substituíveis e arbitrárias, elas podem ser ligeiramente diferentes de uma molécula para outra (PATURAL et al., 2010).

A formação do filme polimérico após mistura dos aditivos com água pode ser resumida e dividida em três estágios (OHAMA, 1984; WANG, WINNIK, 1993; POVOAS, 2007): Evaporação da água com aumento da concentração de polímero; deformação e compactação das partículas dos polímeros e; interdifusão das partículas. A Figura 3 mostra o modelo simplificado da formação de filme polimérico:

Figura 3 - Modelo simplificado da formação de filme polimérico (WANG; WINNIK, 1993; PÓVOAS, 2007).

Segundo Khayat (1998) e Póvoas (2005), durante a hidratação há uma interação física onde a parte hidrofóbica dos polímeros é orientada para os poros e capilares que não estão preenchidos por água. Na evaporação, essas partículas coalescem, formando um filme.

Ainda durante o período de tempo em que a argamassa permanece espalhada sobre o substrato, aguardando a aplicação da placa cerâmica, ocorre uma perda de água de amassamento pela superfície exposta, sugerindo que a perda de água por evaporação pode levar a formação de película superficial, combinando polímeros e cimento. Portanto, para argamassas onde o teor de polímero é baixo, não é formado um filme polimérico contínuo, mas sim uma aglomeração de partículas de cimento e polímero que se aproximam devido à evaporação da água (POVOAS, 2007).

Patural et al. (2010), estudou o efeito dos diferentes éteres de celulose (MHPC, MHEC, HEC) e concluiu que, com o aumento do peso molecular, as taxas de tensão de escoamento diminuíram e quando a consistência aumentou, também

aumentou a retenção de água. Ao contrário da substituição molar (hydroxyethoxyl/hidroxipropoxilo), que teve um menor impacto sobre a retenção de água das argamassas formuladas. No entanto, a retenção de água foi melhorada para menor substituição molar do éter de celulose, ou seja, produto mais puro. O autor também ressalta que o peso molecular é o fator mais importante para o controle da retenção de água.

2.1.3.2. Polímeros PVA e VAE

Os polímeros (exceto os éteres de celulose) comumente utilizados nas argamassas colantes são o PVA (poliacetato de vinila) e o VAE (vinila acetato de etileno), normalmente adicionados na proporção de 1 a 2% em relação à composição total. Estes materiais são utilizados para promover propriedades, tais como adesão, deformação, aderência em altas temperaturas, impermeabilidade e durabilidade de argamassa de base cimentícia.

Os polímeros são geralmente classificados em três tipos: catiônicos (carga positiva), aniônicos (carga negativa) e não iônicos (sem cargas), de acordo com a carga elétrica do meio aquoso e determinado pelo tipo de surfactante utilizado durante sua produção. A classificação do polímero baseado em misturas pode ser dividida em quatro principais tipos: polímero de látex (ou dispersão de polímero); polímero em pó re-dispersível; polímero solúvel em água e polímero líquido (OHAMA, 1998).

Em geral, polímeros redispersíveis em pó (polímero comumente utilizado em argamassas) são fabricados por um processo de duas etapas. Em primeiro lugar, os monômeros passam por uma reação de polimerização em emulsão e posteriormente são borrifados para serem secados e obter o polímero em pó (processo *Spray Drying*).

Estes polímeros, em contato com cimento, retardam a cinética de hidratação, resultando no aumento no período de indução do cimento (OHAMA, 1998). Estas partículas se depositam parcialmente sobre o grão de cimento, reduzindo a taxa de dissolução das fases anidras. Suas cadeias poliméricas, junto com o ar incorporado

(efeito surfactante) na fase de mistura, atuam no deslizamento das partículas da argamassa e aumentam sua característica de lubrificação, diminuindo a viscosidade aparente. Estas características influenciam principalmente as características de deslizamento da peça cerâmica na parede e na capacidade da argamassa ter menor energia para realização da mistura.

Segundo Betioli (2007), a hidratação do cimento é afetada, também, pela interação química do cimento com os grupos funcionais presentes em alguns polímeros, como no caso do PVA onde o grupo acetato de vinila, presente na composição destes polímeros, sofre hidrólise em meio alcalino, liberando ânions acetato (CH_3COO^-). Estes interagem com os íons cálcio, diminuindo sua disponibilidade na solução, afetando a evolução da hidratação do cimento.

A retenção de água também é dependente da relação polímero/cimento e este fenômeno ocorre devido às propriedades coloidais hidrofílicas do polímero que inibe a evaporação da água devido ao efeito de vedação impermeabilizante da formação do filme (coalescência de partículas de polímero) (OHAMA, 1998, POVOAS, 2005; PATURAL et al., 2010). Desta forma, o polímero retém a água necessária para a hidratação do cimento. Esta característica é importante para inibir o fenômeno de secagem brusca, devido à perda de água da argamassa ou para um substrato com alta absorção, que poderia inibir o processo de hidratação do cimento (POVOAS, 2005).

Dependendo da relação polímero/cimento, os polímeros também são capazes de causar segregação nas argamassas, devido às propriedades coloidais, de incorporação de ar e redução de água dos surfactantes presentes na formulação. (OHAMA, 1998).

A evolução da microestrutura da argamassa com adição de polímeros, baseada na observação da hidratação do cimento por microscopia eletrônica de varredura, pode ser dividida em três etapas: (OHAMA, 1998; POVOAS; 2005):

Etapas 1 Dispersão: Quando ocorre a mistura de argamassa com a água, as partículas de polímeros ficam uniformemente dispersas na pasta. No início da hidratação do cimento, ocorre a formação de uma camada gelatinosa sobre os grãos de cimento e a saturação da água com íons dos compostos anidros. Com a

presença do agregado, o hidróxido de cálcio da fase aquosa reage com a sílica, formando uma camada de silicato de cálcio.

Etapa 2 Floculação: Com o desenvolvimento da estrutura do gel de cimento, as partículas do polímero ficam gradualmente confinadas nos poros capilares. Com o progresso da hidratação do cimento, reduz-se a água dos capilares e a floculação das partículas do polímero forma uma camada de estrutura empacotada sobre a superfície da mistura de gel de cimento / cimento anidro, aderindo também à camada de silicato de cálcio formada sobre o agregado.

Etapa 3 – Coalescência: Com o consumo da água pela hidratação do cimento, a camada de partículas do polímero coalesce em torno dos grãos de cimento e dos agregados, formando um filme, o qual se aglomera aos compostos hidratados do cimento, formando uma rede monolítica.

Imagens microscópicas de Raios-X evidenciaram que os polímeros afetaram a hidratação das fases C_3S e C_3A do cimento a partir dos primeiros minutos após a mistura. Eles retardaram a cinética de hidratação e afetaram a morfologia dos hidratos. As partículas do polímero menores do que $1\ \mu m$ de diâmetro se concentraram em torno dos grãos de C_3S durante a hidratação. (SILVA; MONTEIRO, 2006; PURCHEZ, 2005).

Estudos para avaliação da interação química entre VAE e cimento Portland, durante as primeiras horas de hidratação por análise termogravimétrica, também foram empreendidos. Segundo Betioli et al. (2009), o copolímero VAE reduziu o hidróxido de cálcio na pasta de cimento, devido à interação química entre os íons Ca^{2+} e ânions de acetato, liberado em hidrólise alcalina do VAE. Esta interação foi verificada nos primeiros 15 minutos pela falta de pico de desidratação em análise termogravimétrica até 5 e 6 horas em pastas com VAE modificada com proporções de 5% e 10%. Estes resultados mostraram que os grupos acetato de copolímero VAE sob hidrólise alcalina interagem com íons Ca^{2+} da pasta, para formar sal orgânico (acetato de cálcio). Esta interação química diminui a flexibilidade do VAE que provavelmente fornece o aumento do módulo de elasticidade dos materiais cimentícios.

3. REOMETRIA ROTACIONAL

3.1. Introdução

Através da reometria rotacional pode-se avaliar o comportamento de fluxo de fluidos e suspensões em uma ampla faixa de taxas de cisalhamento, permitindo determinar o torque de escoamento, nível de torque e a inclinação que indica a viscosidade plástica (tensão de cisalhamento / taxa de cisalhamento), contribuindo assim no controle e desenvolvimento de produtos cimentícios. Estas propriedades podem ser determinadas por meio da aplicação de cisalhamento de forma controlada, medindo-se o torque necessário.

Utilizando o mesmo princípio pode-se identificar a cinética de mistura das argamassas, de maneira a quantificar a facilidade de mistura de uma composição e, também, identificar a ação de aditivos que mudem a resistência ao fluxo do sistema. A técnica é denominada reometria de mistura e requer que o reômetro tenha potência e geometria (recipiente + raquete) adequadas para tal finalidade.

Diversos pesquisadores (ROMANO et al., 2007; CARDOSO, 2009; FRANÇA et al., 2011) utilizaram o método de reometria desenvolvido pelo Prof. Dr Rafael G. Pillegi da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (Poli-USP) tanto para avaliação do processo de mistura de argamassas de revestimentos, quanto para a avaliação do comportamento reológico pela aplicação de ciclos de cisalhamento. Porém, para argamassas colantes, o método não foi totalmente explorado.

Este capítulo demonstra a aplicação e resultados inéditos da técnica de reometria rotacional desenvolvida pelo grupo de estudos da Poli-USP, em argamassas colantes de mercado.

3.2. Revisão da Literatura

3.2.1. Mistura: dispersão e distribuição

As propriedades finais de uma argamassa são fortemente afetadas pela qualidade da mistura, que pode ser dividida em dois fenômenos principais: a dispersão e a distribuição (COLLIN, JÉZÉQUEL, 2009).

A dispersão é a quebra dos aglomerados de partículas geralmente formadas nos primeiros momentos após a adição de água e a distribuição está diretamente relacionada com a homogeneidade do produto final, correspondendo à capacidade do misturador de espalhar as partículas no interior da composição.

O processo de mistura se inicia na introdução do líquido nesta; o líquido causa uma série de eventos de aglomeração e de desaglomeração, ou seja, o material tende a se agrupar e depois se dispersar, gerando esforços resultantes (PILLEGI et al., 2001).

As partículas com grandes áreas superficiais, em geral, tendem a se agrupar, e duas forças atuam sobre estas partículas: as de *Van der Waals* e as capilares (PILLEGI et al., 2001; COLLIN, JÉZÉQUEL, 2009). Porém, quando o cisalhamento é aplicado durante a mistura, estes aglomerados se dispersam, facilitando assim, a homogeneização da mistura (PILLEGI et al., 2001).

Segundo Romano et al. (2009), esta aglomeração é responsável pela retenção de parte da água necessária para realizar a homogeneização, sendo que se a mistura não for suficiente para destruir estes aglomerados, a água fica indisponível para hidratar as partículas de cimentos e, portanto, fluidificar a mistura.

Já a homogeneização eficaz da mistura está relacionada com fatores como o tipo de misturador, o tempo de mistura (ROMANO et al., 2009, COLLIN, JÉZÉQUEL, 2009), o desenho interno do misturador (haletas e pás), o volume de material, a velocidade aplicada e o teor de água adicionada (COLLIN, JÉZÉQUEL, 2009). De acordo com Romano et al. (2009), a caracterização de uma mistura pode ser um indício da

qualidade e produtividade da argamassa em obras, pois quanto maior a energia empregada na mistura, menor a produtividade, devido aos maiores tempos de mistura ou esforços para o aplicador empregar na mistura.

FRANÇA et al. (2011), por meio da avaliação da influência do tempo de mistura nas propriedades reológicas de argamassas de revestimento, constataram que o comportamento reológico de uma argamassa deste tipo é significativamente influenciada pelo tempo de mistura, pois, em tempo de mistura curtos, observou-se o não rompimento dos aglomerados formados após a adição da água. Este cenário resultou em materiais reologicamente instáveis e menos fluídos, e demandou, assim, o aumento do tempo de mistura para que a argamassa ficasse homogênea.

Outro fator relevante na mistura é a sequência da introdução dos materiais. Antunes (2005) avaliou a influência da sequência de mistura nas propriedades reológicas de argamassas de revestimento e concluiu que a sequência de introdução de água no pó apresentava menor variabilidade no comportamento reológico. Isso porque esta sequência faz com que os componentes se dispersem melhor, aumentando a eficiência do processo, reduzindo a viscosidade da argamassa, melhorando o espalhamento e, conseqüentemente, a aderência.

3.2.2. Comportamento reológico

A reometria rotacional avalia as propriedades reológicas dos fluídos (VAN DEN BRULE; KADIJK, 1992; WINTHER et al., 1991; MALKIN, 1994; STEFFE, 1996), determina características como tensão de escoamento, viscosidade, histerese, inclinação de curvas e níveis de torque, pela aplicação de torque no fluído e medição do esforço resultante (CARDOSO, 2009).

Os equipamentos para aplicação de reometria podem operar com cisalhamento constante ou regime oscilatório. Alguns equipamentos podem funcionar com a tensão controlada, para facilitar a coleta de dados de fluência, a análise de material em baixas taxas de cisalhamento e a investigação da tensão de escoamento

(STEFFE, 1996). Estas informações são necessárias para entender a estrutura interna das misturas.

Para Schramm (2006) e Steffe (1996), ensaios podem ser realizados em equipamentos que permitem investigar o comportamento reológico sob condição de fluxo pleno e determinar o comportamento viscoelástico de certo fluido. Neste caso, o reômetro de torque é constituído por um misturador com haleta giratória para imersão na mistura. Neste reômetro a amostra é colocada dentro do recipiente a uma velocidade e tempo pré-determinados. O torque necessário para dispersar, misturar e homogeneizar a amostra é, então, medido. Desta forma, obtém-se uma curva de torque *versus* tempo.

As propriedades de fluxo de argamassa, para estarem em conformidade com o modelo de Bingham, requerem dois parâmetros: o limite de escoamento e viscosidade plástica. Estes, por sua vez, são afetados diretamente pela natureza relativa às proporções dos insumos como cimento, areia, água e aditivos adicionados na mistura (BANFILL, 1993).

A tensão de escoamento é obtida por meio da reometria rotacional, nível de torque mínimo para que o material comece a escoar. Essa tensão mínima de cisalhamento, denominada 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 (SCHRAMM, 2006; OLIVEIRA et al., 2000; BARNES, 1998).

Já a viscosidade aparente pode ser extraída a partir da curva de aplicação de taxa de cisalhamento. A viscosidade é um indicativo de coesão entre as moléculas que consistem nas lâminas adjacentes do fluido (OLIVEIRA et al., 2000; MALKIN, 1994; STEFFE, 1996). Esta característica também pode indicar a facilidade de um material escoar continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento externa. Quanto menor a viscosidade de um fluido, menor a tensão necessária para impor uma taxa de velocidade constante. A viscosidade pode ser calculada pela relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento (BANFIL, 1993; MALKIN, 1994; STEFFE, 1996; OLIVEIRA et al., 2000), de acordo com a Equação 1.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad \text{Equação 1}$$

onde: τ = tensão de cisalhamento; η = viscosidade; $\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento

Os materiais que apresentam pseudoplasticidade ou dilatância com tensão de escoamento são denominados fluidos de Bingham. Nestes, a pseudoplasticidade ocorre quando a viscosidade da suspensão diminui com o aumento da taxa (ou tensão) de cisalhamento e a dilatância quando ocorre o aumento da viscosidade do sistema com a taxa de cisalhamento (OLIVEIRA et al., 2000; MALKIN, 1994; STEFFE, 1996).

A característica de escoamento (viscosidade) do material é aplicada principalmente para as questões de transporte, pois materiais que aumentam a viscosidade com a taxa de cisalhamento podem apresentar dificuldade no bombeamento. As argamassas colantes geralmente são aplicadas manualmente e em pequenas quantidades, não utilizando, portanto, o bombeamento para a aplicação.

Por fim, a histerese avalia a homogeneidade de uma mistura. Segundo Schramm (2006), o procedimento consiste na aplicação da taxa de cisalhamento entre períodos de acréscimo e decréscimo, onde é possível se obter uma curva de subida e de descida, delimitando uma área de histerese, proporcional à energia necessária para quebrar a estrutura. Quando a rampa de subida é seguida imediatamente pela rampa de descida, a quebra total da estrutura pode não ocorrer, sendo necessária a aplicação de outros ciclos até que as curvas se sobreponham, indicando que toda estrutura foi destruída pelo cisalhamento.

Banfill (1981) avaliou o comportamento reológico de diferentes pastas de cimento, por meio de curvas de histerese e concluiu que a diferença encontrada nas curvas era dada principalmente pelo tipo de cimento, pelo aditivo químico adicionado e pela taxa de cisalhamento.

Desta forma, as informações extraídas, tanto no processo de mistura como no processo de aplicação de ciclos de cisalhamento, contribuem para o dimensionamento e o desenvolvimento de produtos que apresentem energias de mistura que proporcionem facilidade de mistura e produtividade.

3.3. Materiais e Métodos

A metodologia e equipamentos utilizados neste trabalho foram desenvolvidos pelo Prof. Dr Rafael G. Pileggi e pesquisadores da Poli-USP, sendo que somente os tempos de mistura e os patamares foram adaptados para aplicação nas argamassas colantes.

Em relação à mistura, a metodologia de ensaio iniciou-se pela inserção do pó no recipiente de ensaio e posterior acoplagem do recipiente sobre a base de reação. A mesa subiu até a imersão da haleta no pó e a mistura foi acionada. Por fim, a água foi introduzida com uma vazão controlada de 6 g/s, realizando a mistura até a homogeneização.

Já para a avaliação do comportamento reológico, utilizando a mesma argamassa que foi misturada, consistiu em aplicar a taxa de cisalhamento entre períodos de acréscimo e decréscimo (ciclos de cisalhamento), onde é possível se obter uma curva de subida e de descida para avaliação da viscosidade plástica, nível de torque, tensão de escoamento e histerese.

3.3.1. Argamassas utilizadas

Foram selecionadas e homogeneizadas em laboratório duas amostras de 300 kg de argamassas de mercado: ACI e ACIII classificadas de acordo com a NBR 14081-1 (2012).

Neste estudo, para as amostras de argamassa ACI foram utilizados os teores de água 19,4%, 21,5% e 23,7% sendo 21,5% o teor de água nominal especificado pelo fabricante. Para as amostras de argamassa ACIII foram utilizados os teores de água de 28,8%, 32,0% e 35,2%, sendo 32,0% o teor de água nominal especificado pelo fabricante.

Estes teores de água especificados pelo fabricante são baseados no desempenho em obra e em laboratório. Em campo, a argamassa deve cumprir o desafio de apresentar boa aplicabilidade, tempo suficiente para espalhamento na base e para o assentamento de peças de revestimento cerâmico e boa adesividade a fresco, para que a peça não se mova durante o assentamento. Em laboratório, as argamassas devem cumprir os requisitos de desempenho no estado endurecido preconizados na norma vigente NBR14081-1 (2012).

Considerando que o fabricante tenha cumprido estas etapas de determinação do teor de água de aplicação, este trabalho adota os dois teores de água especificados pelo fabricante e as variações deste teor que geralmente são empregadas para cobrir as flutuações de processo de fabricação.

3.3.2. Equipamento

Os ensaios foram realizados com a geometria de ensaio acoplada ao dispositivo rotacional onde são medidos os valores de torque necessários para girar a haleta. Todas as operações de controle operacional e dado foram coletadas e armazenadas pelo software do equipamento (Figura 4).

Figura 4 - Reômetro para argamassas: 1) geometria de mistura composta por haletas radiais montadas em espiral 2) estrutura de sustentação do motor 3) recipiente de ensaio 4) base de reação.

3.3.3. Mistura

Para análise da cinética da mistura, foram utilizadas bateladas de 4 kg de material anidro, submetidos à mistura por 300 segundos em rotação constante (126,5 rpm), com a adição controlada de água (vazão constante de 6 g/s) a partir de 30 segundos. Após a mistura, o produto ficou por mais 15 minutos em rotação dez vezes menor (12,7 rpm), para maturação e ação dos aditivos. Após a maturação, determinou-se o teor de ar incorporado. A Figura 5 indica a mistura utilizada.

Figura 5 – Programa de rotações da reometria de mistura.

3.3.4. Ciclos de cisalhamento

Para análise do comportamento frente ao ciclo de cisalhamento, depois da realização da mistura, foram aplicados dois ciclos completos com patamares de 6,3; 12,7; 25,3; 38,0; 63,3; 126,5; 189,8; 253,0 e 316,3 rpm, tendo permanência de 5 segundos em cada rotação, repouso de 10 minutos entre os ciclos e determinação do teor de ar incorporado. A Figura 6 indica o ciclo de cisalhamento utilizado para a reometria rotacional.

Figura 6 – Programa de rotações para avaliação dos ciclos de cisalhamento.

3.3.5. Caracterização da argamassa anidra

Cada argamassa foi caracterizada no estado anidro, com o objetivo de verificar as diferenças entre elas. Os métodos utilizados estão descritos no APÊNDICE C.

A Tabela 1 mostra os resultados das caracterizações.

Tabela 1 - Caracterização física das argamassas da ACI e ACIII. Agreg = teor de agregados (partículas >75 μm); Finos = teor de finos (partículas <75 μm soma dos finos do agregado+aditivos+cimento); ρ_{Agreg} = densidade real dos agregados; ρ_{Finos} = densidade real dos finos; ρ_{Arg} = densidade real da argamassa anidra; ASFinos = área superficial dos finos; Rel. a/ms = relação água / materiais secos em massa.

Tipo de argamassa	Agreg (%)	Finos (%)	ρ_{Agreg} (g/cm ³)	ρ_{Finos} (g/cm ³)	ρ_{Arg} (g/cm ³)	ASFinos (m ² /g)	Rel. a/ms* (%)
ACI	76,4	23,6	2,640	2,990	2,730	1,51	21,5
ACIII	52,2	47,8	2,630	3,020	2,750	1,36	32,0

* Teor de água nominal do produto especificado pelo fabricante

Para a argamassa ACI, a porcentagem de agregados é superior quando comparada à ACIII. Consequentemente, o teor de finos (partículas $<75\ \mu\text{m}$ da areia + aditivos + cimento) é superior na argamassa ACIII.

A Figura 7 mostra as distribuições granulométricas das argamassas ACI e ACIII.

Figura 7 - Curvas granulométricas das argamassas ACI e ACIII, obtidas através de granulômetro a laser (Malvern MSS Mastersizer).

Os resultados de granulometria confirmam os dados da Figura 7 onde a proporção de finos (partículas $<75\ \mu\text{m}$ da areia + aditivos + cimento) $<100\ \mu\text{m}$ é maior na ACIII do que na ACI, sendo 1 mm o tamanho máximo da areia determinado por granulômetro laser (Malvern MSS Mastersizer).

3.3.6. Resultados da aplicação do método de reometria

Os resultados de determinação do teor de fases, a análise da cinética de mistura e a análise reológica são apresentados a seguir.

3.3.6.1. Determinação do teor de fases da argamassa no estado fresco (volume)

O teor de fases indica o volume de cada componente da argamassa. Neste caso, foi separado do agregado, finos (partículas $<75\ \mu\text{m}$ da areia + aditivos + cimento) através do peneiramento, água e teor de ar incorporado, sendo este último determinado pela NBR13278 (2005). Utilizando a densidade real dos agregados, finos, água, foram calculados os volumes correspondentes. As distribuições das argamassas ACI e ACIII estão representadas na Figura 8. Estes teores de fases foram obtidos após a mistura no reômetro e cada coluna do gráfico representa a argamassa, teor de água e a fração da composição.

Figura 8 - Distribuição de fases das argamassas de mercado ACI e ACIII: agregados e pasta (finos + água + ar), após mistura.

A Tabela 2 mostra os teores de ar incorporado, determinados após a mistura e ciclos de cisalhamento.

Tabela 2 Teor de ar incorporado, determinado após a mistura e ciclos de cisalhamento, com os teores de água de 19,4%, 21,5% e 23,7% para ACI e 28,8%, 32,0%, 35,2% para ACIII, sendo teor de água nominal de 21,5% ACI e 32,0% para ACIII.

Argamassa	Teor de Água (%)	Teor de Ar Incorporado (%)		
		Mistura	Ciclo 1	Ciclo 2
ACI	19,4	20,1	19,6	20,1
	21,5	15,7	15,2	14,7
	23,7	10,1	10,1	10,1
ACIII	28,8	7,3	8,8	9,3
	32,0	5,6	6,1	6,6
	35,2	5,1	4,0	3,5

Para as argamassas ACI e ACIII, quanto maior o teor de água, menor o teor de ar incorporado. Isto ocorreu devido à redução da viscosidade e a capacidade de estabilizar as bolhas que estavam na pasta.

Após a mistura e os ciclos 1 e 2, as argamassas ACI e ACIII, não apresentaram grandes mudanças de teor de ar incorporado.

3.3.6.2. Comportamento de mistura

A Figura 9 mostra os resultados do comportamento de mistura das argamassas ACI e ACIII.

Quando a água foi introduzida nas argamassas, primeiro ocorreu o aumento do nível de torque para mistura. Em seguida, a curva atingiu o ponto de virada em que ocorreu o torque máximo e aglomeração do sistema (PILEGGI et al., 2001). A partir deste ponto, deu-se início ao decaimento da curva, ocorrendo o decréscimo do valor de torque e a tendência à estabilização do sistema (curva constante).

Segundo Pileggi et al. (2001) as forças de Van der Waals e as forças capilares, na presença de água, são as responsáveis pela coesão das partículas. No momento da introdução do líquido, quando da preparação de argamassas no processo de mistura, uma série de eventos ocorrem no sistema que, por sua vez, resultam em esforços durante esta etapa, gerando o nível de torque mais elevado.

Desta forma, o método mostrou ser sensível para diferenciar o nível de torque resultante nas argamassas ACI e ACIII, sendo que o torque resultante de virada na ACI foi superior aos torques resultantes na ACIII. Porém, o torque de estabilização entre as duas argamassas foi muito próximo quando utilizado o teor de água nominal do produto (21,5 % para ACI e 32,0% para ACIII).

Para a argamassa ACI, quando utilizado o teor de água de 19,4%, os níveis de torque de mistura foram superiores, se comparados aos outros teores de água. Para a argamassa ACIII, a ação dos aditivos químicos é mais clara, pois a virada é mais rápida e ocorre a mudança do perfil da curva.

Para a argamassa ACIII, utilizando diferentes teores de água, a diferença entre os níveis de torque não foi intenso. Isto ocorreu devido à maior presença de finos (partículas <75 µm da areia + aditivos + cimento) e também aos aditivos químicos utilizados.

O tempo necessário para que o nível de torque da mistura se estabilizasse e ficasse constante foi de aproximadamente 150 segundos. Após este período, o produto apresentou características de mistura estável, homogênea, fluída e sem material aglomerado. Apenas na argamassa ACI com o teor de água de 19,4%, foi necessário mais tempo para estabilização da mistura.

Na mistura manual, a percepção de mistura é a inversa: o ACIII apresenta maior energia de mistura e menor facilidade de homogeneização. Para explicação deste comportamento são propostas duas hipóteses:

- a) A mistura mecânica impõe um cisalhamento intenso e rompe as partículas aglomeradas, liberando a água com maior rapidez e a argamassa escoar com maior facilidade.
- b) Utilização de polímeros modificados (VAE/PVA) que, no momento da mistura com a água, faz com que a mistura não se aglomere, devido à deposição do polímero sobre o grão do cimento, reduzindo a taxa de dissolução das fases anidras, somado ao efeito do surfactante que aumentam a lubrificação e reduzem a viscosidade (OHAMA, 1998), fazendo com que a argamassa escoe com maior facilidade mesmo com quantidade superior de matriz.

Figura 9 – Reometria (A) ACI submetida a mistura no reômetro, teor de água de 21,5% para ACI e 32,0% para ACIII; (B) ACI submetida a mistura no reômetro com diferentes teores de água 19,4%, 21,5% e 23,7%. (C) ACIII submetida a mistura no reômetro, com diferentes teores de água teor de água de 28,8%, 32,5% e 35,2%.

3.3.6.3. Ciclos de cisalhamento

Os reômetros permitem a definição de parâmetros em diferentes taxas de cisalhamento, obtendo-se um perfil reológico do material. Além das características de homogeneização, outras características reológicas importantes podem ser exploradas nos gráficos de ciclos de cisalhamento como o torque de escoamento – característica relacionada à tensão de escoamento – e inclinações da curva de ciclos de cisalhamento– característica relacionada à viscosidade.

Para análise de histerese, os ciclos foram realizados duas vezes e não correram diferenças significativas entre eles, devido à eficiente dispersão da mistura realizada no primeiro ciclo. Devido à avaliação do produto em um intervalo inferior a 2 horas, não foram observados mudanças significativas com o tempo.

Quando a área da curva de aceleração e desaceleração é pequena, a mistura foi suficiente para destruir os aglomerados e a suspensão está estável, fluída e homogênea. Para ACI e ACIII, a mistura de 300 segundos em uma rotação de 126,5 rpm, quando os ciclos de cisalhamento foram aplicados, as áreas de histerese foram pequenas ou quase nulas.

A análise a seguir levou em conta somente a curva de desaceleração do ciclo de cisalhamento, devido à característica citada anteriormente.

A Figura 10 mostra os resultados das argamassas ACI e ACIII.

Figura 10 – Aplicação de ciclo de cisalhamento de 6,3 a 316,3 rpm com permanência de 5 segundos em cada rotação, em ACI (A) e ACIII (B) com teor de água de 19,4%, 21,5% e 23,7% para ACI e 28,8%, 32,0%, 35,2% para ACIII, sendo teor de água nominal de 21,5% ACI e 32,0% para ACIII.

Para o teor de água de 19,4% (ACI), o torque de escoamento (energia necessária para que o escoamento se inicie) foi superior aos outros teores. Com este teor de água, a viscosidade é maior, o que indica a dificuldade de mobilidade das partículas.

A Tabela 3 mostra as equações das curvas obtidas para cada teor de água.

Tabela 3 - Equações das curvas de aplicação de faixa de taxa de cisalhamento, aplicada nos teor de água de 19,4%, 21,5% e 23,7% para ACI e 28,8%, 32,0% e 35,2% para ACIII.

Argamassa	Teor de Água e Ar Incorporado	Equação da reta
ACI	19,4% Água 19,6 % Ar	$y = 0,0023x + 0,5048$
	21,5% Água 15,2 % Ar	$y = 0,0019x + 0,3265$
	23,7% Água 10,1% Ar	$y = 0,0016x + 0,2340$
ACIII	28,8% Água 8,8% Ar	$y = 0,0014x + 0,3335$
	32,0% Água 6,1% Ar	$y = 0,0009x + 0,2030$
	35,2% Água 4,0% Ar	$y = 0,0009x + 0,1506$

O cálculo da linha de tendência para a desaceleração indica a equação de regressão linear $y=ax+b$, onde a equivale à viscosidade plástica e b ao torque inicial de escoamento. Esta equação indica que argamassa ACI apresentou maior viscosidade, torque de escoamento e mostrou ser mais sensível aos diferentes teores de água quando aplicados os ciclos de cisalhamento em relação à argamassa ACIII.

A Figura 11 mostra o comparativo entre as curvas obtidas, para ACI e ACIII.

Figura 11 – Aplicação de ciclo de cisalhamento de 6,3 a 316,3 rpm com permanência de 5 segundos em cada rotação, com teor de água de 21,5% para ACI e 32,0% para ACIII.

A argamassa ACI apresentou níveis de torque superiores, quando comparado à ACIII indicando ter maior viscosidade. Este comportamento foi inverso ao percebido em campo: A percepção do aplicador é a de que a ACIII possui maior viscosidade do que a ACI.

Esta inversão de comportamento com a mistura mecânica pode ter ocorrido devido à composição da ACIII, a qual possui mais matriz (finos + água + ar) e aditivos químicos (polímero VAE) que melhoraram o rolamento das partículas na suspensão (BETIOLI, 2007) fazendo com que a mistura ficasse mais fluída, reduzindo o nível de torque.

Outro ponto observado e mencionado no item de mistura é a hipótese de a mistura realizada no reômetro aplicar mais cisalhamento e romper profundamente os aglomerados.

3.3.7. Conclusão do capítulo

O tempo de mistura de 150 segundos foi eficiente para homogeneizar e estabilizar as misturas das argamassas ACI e ACIII com o teor de água nominal do produto.

Para as argamassas testadas, quanto maior o teor de água, menor o teor de ar incorporado, isto ocorre devido à redução da viscosidade da pasta e a capacidade de estabilizar as bolhas que estão na pasta.

A reometria rotacional mostrou ser uma metodologia eficaz para o estudo do comportamento de mistura de argamassas colantes, eliminando, assim, a subjetividade da avaliação. A argamassa do tipo ACI apresenta maior dificuldade de mistura e resulta em uma suspensão com maior viscosidade e tensão de escoamento do que a argamassa ACIII.

4. SQUEEZE FLOW E PULL OUT FLOW

4.1. Introdução

Squeeze Flow ou escoamento por compressão axial consiste em medir o esforço necessário para comprimir um corpo-de-prova cilíndrico de uma suspensão entre duas placas paralelas.

O teste de *Squeeze Flow* é uma técnica simples para determinar o escoamento de suspensões concentradas. Sua trajetória para ensaios em materiais cimentícios foi iniciada por Min, Erwin e Jennings (1994), realizado em pastas de cimento; seguido de Toutou, Roussel e Lanos (2005), em argamassas cimentícias; e de Cardoso, Pileggi e John (2005); Antunes (2005); Silva (2006); Cardoso (2009), todos estes em argamassas de revestimento. Tais avanços culminaram na redação da NBR 15839 (2010). Por fim, Póvoas (2005) e Costa (2006) empreenderam ensaios em argamassas colantes.

A configuração comumente utilizada para argamassas de revestimento não pode ser aplicada, contudo, para a caracterização de argamassas colantes, pois estas apresentam dificuldade para serem desmoldadas devido a sua elevada adesão ao molde. Uma solução utilizada para resolver este problema nas argamassas colantes do tipo ACI e ACIII, foi a adaptação do molde dividido em quatro partes móveis, cenário em que a argamassa colante empurra os diferentes pedaços do molde ao longo do ensaio (COSTA, CINCOTTO, PILEGGI, 2005; PÓVOAS, 2005). Entretanto, o método apresentava dificuldade na moldagem e na execução do ensaio devido às partes móveis do molde, que dependendo da argamassa é arrastada antes do ensaio, não é prático para realização em larga escala.

Considerando isso tudo, este capítulo se dedica a demonstrar uma nova proposta de molde para resolver o problema de adesão e ajustes de parâmetros de configurações que foram desenvolvidos para a execução fácil e prática em laboratório.

4.2. Revisão da Literatura

4.2.1. Squeeze Flow

No caso das argamassas colantes, o método *Squeeze Flow* é o mais indicado porque simula as condições quando o material é aplicado sobre o substrato e espalhado, ocorrendo o espalhamento da argamassa em decorrência da compressão.

As condições de atrito nas interfaces do material com as placas influenciam no tipo de solicitação. A deformação predominantemente elongacional ocorre no caso do deslizamento (ou atrito baixo) e a deformação por cisalhamento é mais acentuada quando o atrito entre as placas e a pasta é elevado (escorregamento próximo de nulo) (ENGMANN, SERVAIS, BURBIDGE, 2005; MEETEN, 2004; STEFFE, 1996). O atrito na interface é geralmente alterado através do uso de lixas ou fluidos lubrificantes sobre as placas. Neste trabalho, não será utilizado outro material senão o inox, que não apresenta interferência relevante no ensaio.

Por meio da compressão da amostra entre duas placas paralelas, é possível obter perfil Figura 12 de curva carga x deslocamento (STEFFE, 1992).

Figura 12 – Esquema geométrico do ensaio de compressão entre duas placas paralelas, utilizada por Steffe (1992) para obtenção de tensão de cisalhamento de alimentos (queijo cremoso) semi-sólido.

No entanto, argamassas mais fluídas podem escoar prematuramente, devido ao fato de a altura de compressão não se manter constante. Uma solução para este escoamento é utilizar um molde restrito que inibe o escoamento livre da suspensão. Cabe salientar que o efeito parede (reação de força contrária ao molde) pode ocorrer neste tipo de configuração e ser negligenciado. Este esquema geométrico, utilizando o molde restritivo, foi adotado inicialmente pelos pesquisadores Min, Erwin e Jennings (1994), Betioli (2007) e Cardoso et al.(2008).

Meeten (2004) sugere a teoria clássica do método de *Squeeze Flow* para escoamento livre, que se resume na aplicação de uma força F aplicada no tempo $t = 0$ onde o material é apertado entre duas placas circulares de raio R , enquanto a placa de separação $h(t)$ é pressionada com uma taxa de deslocamento $V = -dh / dt$. O volume interno $\pi R^2 h$ é extrudado até o limite R que não tem nenhum efeito sobre $h(t)$.

O diagrama esquemático para o ensaio de *Squeeze Flow* antes e depois da compressão, utilizando o molde restritivo, é ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Diagrama esquemático do ensaio de *Squeeze Flow* (MIN, ERWING e JENNINGS, 1994).

Min, Erwin e Jennings (1994), Cardoso (2009) e Betioli (2007) utilizaram o *Squeeze Flow* analisando um perfil com o controle por deslocamento, sendo o gráfico expresso na forma de carga de compressão em (N) no eixo x e deslocamento em (mm) no eixo (y). Este perfil reológico é dividido em 3 estágios (Figura 14):

Figura 14 - Perfil típico de uma curva carga de compressão versus deslocamento de um ensaio de Squeeze Flow com controle de deformação (BETIOLI, A. M. et al, 2009; CARDOSO, 2009).

Primeiro estágio: A região I equivale à deformação elástica. Nesta faixa, ocorrem pequenas deformações: o material se comporta com um sólido, apresenta uma deformação elástica linear e a provável origem é a tensão de escoamento do material.

Segundo estágio: A região II equivale à deformação plástica ou fluxo viscoso. A faixa é mais extensa. Neste estágio o material pode sofrer grandes deformações sem o aumento expressivo de cargas de compressão. A aplicação do material é melhor, a compressão resulta em deformação radial e elongacional e de cisalhamento, superando as formas que mantinham o material sob comportamento elástico. Assim, o material flui por deformação plástica, dependendo das suas características.

Terceiro estágio: A região III equivale ao enrijecimento por deformação, faixa onde ocorrem grandes deformações (*strain hardening*). Ocorre, também, um aumento expressivo da carga de compressão, o que chamamos de inversão. Nesta faixa, as partículas geram forças restritivas ao fluxo devido à maior interação por embricamento, principalmente quando o material é solicitado em grandes ou baixas taxas de deslocamento. Podemos caracterizar que, nesta faixa, como as cargas de

compressão são mais altas, os materiais podem apresentar mais dificuldades de aplicação.

Outro fator importante é a consideração da força de empuxo da placa superior, uma vez que penetra na amostra. Durante o movimento de compressão da placa superior, uma força para cima é gerada pela flutuação do topo da placa que entra na amostra. A força de empuxo E (Equação 2) pode ser expressa como:

$$E = \rho Vg \quad \text{Equação 2}$$

Onde: ρ é a densidade da argamassa, V é o volume da placa superior submerso na argamassa e g é a gravidade.

Nos experimentos realizados por Min, Erwin e Jennings (1994), o efeito médio do empuxo calculado tem um impacto de aproximadamente 15% a mais na interface placa superior/pasta.

4.2.2. Pull Out Flow

Este método é executado após o ensaio de *Squeeze Flow*, no mesmo corpo-de-prova. Ele consiste em determinar, primeiro, o escoamento por compressão axial e, depois, a tração no estado fresco *Pull Out Flow* (POVOAS, JOHN, PILEGGI, 2007). O *Squeeze Flow* simula pressão exercida pelo profissional para esmagar os cordões, e a tração (puxada) *Pull Out Flow* está relacionada com a adesão da argamassa no estado fresco e com o comportamento elongacional.

A Figura 15 descreve cada etapa do ensaio de *Squeeze Flow* seguido do *Pull Out Flow*, aplicado em uma argamassa colante no estado fresco desde a identificação da carga de escoamento (N), compressão máxima, relaxação e a carga de tração máxima em relação ao tempo (s).

Figura 15 – Curva de Carga de tração versus tempo obtido no ensaio de *Squeeze Flow* e *Pull Out Flow*. Fonte: (COSTA, 2006).

Costa (2006) descreve os 3 estágios para avaliação do *Pull Out Flow* carga em função do tempo:

O estágio (I): apresenta a evolução da carga de compressão e do deslocamento correspondente. Desta curva, obtém-se a carga máxima de compressão de cada argamassa para o deslocamento máximo do pistão do equipamento. Cargas de compressão altas indicam argamassas com maior viscosidade, já que foi necessário aplicar uma carga maior para obter-se um mesmo deslocamento. Cargas de compressão mais baixas indicam argamassa com menor viscosidade.

O estágio (II): indica a relaxação da argamassa após a aplicação da carga máxima de compressão, ou seja, a acomodação do material após solicitação.

O estágio (III): mostra a adesividade da argamassa. Quanto maior a carga de adesão, maior a capacidade de a argamassa aderir à superfície do substrato ou ao tardo da placa de revestimento.

Nas argamassas colantes, esse modelo de evolução de carga de tração traduz o comportamento da adesão. Quanto maior a carga de tração no estágio III, maior o potencial de adesão no estado fresco, incluindo tempo de secagem.

Para Bouras (2009), este teste consiste em medir a evolução da força normal necessária para separar, em uma dada velocidade, duas placas entre as quais uma fina camada de amostra é comprimida e depois tracionada. Três componentes adesivos diferentes são inferidos a partir da força medida: a coesão, adesão e aderência. A Figura 16 descreve os estágios para avaliação do *Pull Out Flow*, carga de tração em função do tempo.

Figura 16 - Curva de Carga de tração versus tempo obtido no ensaio de *Pull Out Flow* (BOURAS et al. 2009)

A forma típica da força (curvas de força *versus* alongamento instantâneo) obtidos nos testes de aderência é mostrada na Figura 16. O aumento da primeira força (zona 1) passa por uma força máxima $F_{\text{máx}}$ e depois diminui (zona 2) atingindo um platô (zona 3). As divisões em zonas podem ser definidas assim:

Zona (1): da argamassa viscoelástica exhibe principalmente comportamento elástico. O pico de força determina a força adesiva do material.

Zona (2): ocorre uma ruptura irreversível e fluxo interno da amostra em direção ao centro da placa. Analisa-se então a decadência nesta zona, que permite caracterizar a ruptura dinâmica da argamassa.

Zona (3): começa assim que o processo de ruptura é concluído. O valor médio do patamar de força está relacionado à quantidade de material que permaneceu aderido sobre a placa superior. Isto dá a força de adesão da argamassa em relação à superfície do prato.

O valor do pico de força $F_{\max}$ está relacionado com a dissipação viscosa (propriedade dinâmica) e força de coesão (propriedade estática), cuja origem inclui, em especial, forças intermoleculares e capilares. Para isolar o componente de coesão, o pico de força é representado como uma função do alongamento *versus* velocidade. A força de coesão é, então, considerada como sendo o valor do pico de força quando a velocidade tende a zero.

A aplicação deste método em argamassas colantes contendo polímeros pode apresentar comportamento não esperado, devido à força de aderência em função do teor de polímero que pode ser atribuída a um eventual papel ambíguo, podendo ser este, por sua vez, desempenhado na presença de partículas sólidas. Por um lado, o polímero aumentaria a dissipação viscosa da fase líquida, levando a um aumento da adesão, mas, por outro lado, seus efeitos de lubrificação levariam à diminuição da contribuição granular à dissipação. Além disso, éteres de celulose são conhecidos por incorporarem bastante ar e terem grandes efeitos (OHAMA, 1998). A presença de bolhas de ar duas consequências: o aumento da força de adesão e das forças capilares e a diminuição da dissipação e da viscosidade da suspensão.

Para Tirumkudulu e Russel (2003) e Bouras (2009) o experimento realizado com argamassas colantes utilizando diversas dosagens de polímeros mostrou combinações complexas de cavitação e dissipações viscoelástica. Segundo Tirumkudulu e Russel (2003), os adesivos são propensos à cavitação durante os testes de tração que geram muitas regiões de baixa pressão no fluxo. A cavitação reduz drasticamente as forças de tração o que, em alguns casos, resulta em perfis de forças distintas mesmo utilizando configurações idênticas.

4.3. Materiais e Métodos

4.3.1. Argamassas utilizadas

Foram utilizadas as mesmas argamassas de mercado ACI e ACIII e teores de água descritos no capítulo 3 (Reometria Rotacional).

4.3.2. Preparação das argamassas

O material foi misturado com base na norma técnica NBR14081-2 (2012), que preconiza a introdução do pó na água, utilizando um misturador planetário com a velocidade de rotação baixa do aparelho (140 rpm) com capacidade para 5 litros. Para ACI foi utilizado o teor de água de 21,5% e, para ACIII, teor de água de 32,0% nominal, especificada pelo fabricante. Após a mistura, o produto se apresentou homogêneo sem aglomeração ou indícios de falha no processo.

4.3.3. Equipamento e Acessórios

A Figura 17 ilustra o equipamento existente no Laboratório de Microestrutura da Escola Politécnica da USP para ensaio de *Squeeze Flow*.

Figura 17 - Máquina Universal Instron 5569, componentes: 1) Travessão Superior; 2) Placa Superior (Punção); 3) Molde; e 4) Placa Inferior (200 mm).

Os ensaios foram realizados utilizando:

- Máquina universal de ensaios INSTRON (modelo 5569, capacidade 50 KN, célula de carga 1000 N);
- Gabarito (acessório para auxiliar na moldagem e centralização) e prato (ou placa inferior);
- Moldes em PVC com diâmetros de 50,8 mm (2 Pol), partido em quatro partes;
- Moldes em PVC com diâmetro de 101,6 mm (4 Pol) e 152,4 mm (6 Pol) de anel inteiro;
- Punção (placa superior em aço inox): 50,8 mm (2 Pol) e 25,4 mm (1 Pol).
- Misturador planetário Hobart, modelo N50 com capacidade para 5 litros.

4.3.4. Configurações

Os ensaios foram realizados em 4 arranjos diferentes:

Molde partido 2 Pol – punção 2 Pol (A): molde com diâmetro de 50,8 mm e altura de 10 mm partido em quatro partes e um punção (placa superior) de 50,8 mm (2 Pol);

Molde restritivo 4 Pol – punção 1 Pol (B): molde restritivo com diâmetro de 101 mm, altura de 10 mm e um punção (placa superior) com diâmetro de 25,4 mm (1 Pol);

Molde restritivo 6 Pol – punção 2 Pol (C): molde restritivo com diâmetro de 152,4 mm, altura de 10 mm e um punção (placa superior) com diâmetro de 50,8 mm (2 Pol);

Molde restritivo 4 Pol – punção 2 Pol (D): molde restritivo com diâmetro de 101,6 mm, altura de 10 mm e um punção (placa superior) com diâmetro de 50,8 mm (2 Pol);

Figura 18 - (A) Configuração do molde partido 50,8 mm (2 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol), (B) Configuração do molde restritivo 101,6 mm (4 Pol) e punção de 25,4 mm (1 Pol) (C) Configuração do molde restritivo 152,4 mm (6 Pol) e punção de 50,8 (2 Pol) e (D) Configuração do molde restritivo 101,6 mm (4 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol)

4.3.5. Parâmetros do ensaio

No intervalo de tempo entre 25 e 35 minutos após o início da mistura, as argamassas colantes foram submetidas aos ensaios de *Squeeze Flow*, com deslocamento máximo de 9 mm e diferentes taxas de deslocamento (0,05; 0,1; 1; 3 e 5 mm/s).

A Figura 19 indica o esquema de aplicação de carga de compressão.

Figura 19 – Diagrama de aplicação de carga de compressão versus tempo do ensaio de *Squeeze Flow*.

Após posicionar o punção sobre a amostra sem pré-carga, aplica-se a taxa de deslocamento até 9 mm. O punção fica, então, estacionado por 15 segundos para relaxação da amostra e, por fim, é tracionado até a ruptura da estricção.

Para avaliação do potencial de aderência a fresco, foram utilizadas as mesmas configurações, equipamentos, acessórios e parâmetros de ensaio de *Squeeze Flow* e na mesma amostra foi realizada a tração da argamassa no estado fresco ou *Pull Out Flow*.

4.3.6. Resultados da aplicação do método de *Squeeze Flow*

De acordo com os fatores de influência, os resultados da análise *Squeeze Flow* e *Pull Out Flow* são demonstrados na sequência.

4.3.6.1. Determinação do teor de fases da argamassa no estado fresco (volume)

O teor de fases indica o volume de cada componente da argamassa, o processo de mistura realizado conforme NBR14081-2 (2012) preparação das argamassas e neste caso, foram separados o agregado, os finos (partículas <75 µm da areia + aditivos + cimento), a água e o teor de ar incorporado; este último, determinado através da NBR13278 (2005). Utilizando a densidade real dos agregados, finos, água, foram calculados os volumes correspondentes.

As distribuições das argamassas ACI e ACIII estão representadas na Figura 20. A identificação das fases contribui no conhecimento de cada etapa da suspensão. Quanto maior a quantidade de matriz, maior a facilidade de mobilidade das partículas, devido ao envolvimento da matriz sobre as partículas.

Seja pela ação mecânica da mistura em altas velocidades durante a preparação ou pela utilização de aditivos tensoativos (moléculas que apresentam extremidade hidrófila polar) que possuam a finalidade específica de incorporação de ar, as argamassas podem apresentar teor de ar incorporado elevado no estado fresco. A presença do ar incorporado faz com que o comportamento das argamassas no estado fluido seja ainda mais complexo, pois, além da sua natureza reativa, o sistema nesta situação apresenta uma fase a mais. Agregados inertes imersos numa matriz fina que contém uma fase instável e que possui caráter compressível e elástico facilita o espalhamento e aumenta a coesão (CARDOSO, 2009). A Figura 20 apresenta as fases em volume de cada constituinte, considerando a média de 5 caracterizações.

A argamassa ACI apresenta teor de pasta (finos + água + ar) de 61,1% e a ACIII é mais encorpada, apresentando teor de pasta de 76,0%. Por possuir mais água e finos (parcela fina da areia + cimento + aditivos), o teor de ar incorporado é menor do que o ar determinado na ACI. Isso indica que as duas não são equivalentes e podem apresentar características de consistência diferentes (Figura 20).

Figura 20 - Distribuição de fases das argamassas de mercado ACI e ACIII: agregados e pasta (finos + água + ar), mistura realizada de acordo com a NBR14081-2 (2012).

O teor de ar incorporado exerce substancial influência no comportamento de mistura, reológico sob cisalhamento rotacional e *Squeeze Flow*, além de influenciar também nas propriedades finais das argamassas (CARDOSO, 2009). O teor de ar incorporado também afeta as características de aplicação e redução no módulo elástico. Estes são alguns dos benefícios econômicos e práticos alcançados com a geração de poros nesses materiais (ROMANO, 2007). As argamassas com baixos teores de ar incorporado possuem consistência mais encorpada e densa, que podem reduzir a produtividade de aplicação do material. Já o excesso de ar incorporado, pode afetar tanto as características reológicas, quanto e o excesso de fluidez devido ao grande número de poros ocasionando, também, a queda na resistência mecânica.

4.3.6.2. Influência da configuração

A configuração comumente utilizada para revestimento (corpo de prova livre para escoamento) não pode ser usado para argamassas colantes, devido à facilidade de a argamassa escoar que, somada à elevada adesão ao molde, apresenta dificuldade para serem desmoldadas. Para sanar estas dificuldades de moldagem, foi desenvolvido um molde capaz de manter constante o volume a ser comprimido (Figura 22).

O primeiro molde, utilizado por duas pesquisadoras, Povoas (2005) e Costa (2006), é partido em 4 partes, móvel, com o mesmo diâmetro do punção de 50,8 mm e altura de 10 mm (Figura 21) e o segundo molde, utilizado por outros dois pesquisadores, Betioli (2007) e Cardoso (2009), é contínuo, restringindo a argamassa e possui diâmetro de 101,6 mm, punção de 50,8 mm e 10 mm de altura (Figura 22).

A Figura 21 e Figura 22 mostram a compressão e tração utilizando-se os dois tipos de moldes partido (antigo) e restritivo (novo).

Figura 21 Sequência do ensaio de *Squeeze Flow* (compressão) e *Pull Out Flow* (Tração) utilizando molde partido de 50,8 mm (2 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol) A) Punção estacionado na altura de 10 mm para iniciar a compressão B) Compressão da argamassa a uma profundidade de 9 mm C) Tração e estreitamento da argamassa D) Ruptura total da argamassa

Figura 22 Sequência do ensaio de *Squeeze Flow* (compressão) e *Pull Out Flow* (Tração) utilizando molde restritivo de 101,6 mm (4 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol) A) Punção estacionado na altura de 10 mm para iniciar a compressão B) Compressão da argamassa a uma profundidade de 9 mm C) Tração e estreitamento da argamassa D) Ruptura total da argamassa

A Figura 23 mostra este comparativo que submete ao *Squeeze Flow* dois tipos de configuração e a reação das argamassas na troca do molde.

A curva carga de compressão *versus* deslocamento típico encontrado nas argamassas colantes compostas por areia natural está no estágio II, onde sofre grandes deformações, não aumenta (exponencialmente) as cargas de compressão e não ocorre a inversão, devido ao rolamento das partículas e da sua morfologia.

Quando a argamassa colante atinge o estágio de *strain hardening*, a consistência está muito pesada e de difícil aplicação, impossibilitando o espalhamento no substrato.

Para ACI, os resultados são similares nas três taxas de deslocamento utilizando o molde partido e restritivo. Observou-se, ainda, que, com o aumento da taxa de deslocamento, ocorreu o aumento de carga de compressão.

Devido ao arranjo granulométrico e a baixa característica viscosa comumente encontrada em argamassa do tipo ACIII, a argamassa escoou no molde partido,

resultando em menores cargas de compressão do que as verificadas para o molde restritivo.

Figura 23 – *Squeeze Flow*: Comparativo entre duas configurações diferentes moldes partido 50,8 mm (2 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol) / Restritivo de 101,6 mm (4 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol), utilizando ACI (A) e ACIII (B), variando-se a taxa de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s e aperto até a profundidade de 9 mm.

Utilizando o molde restritivo, os resultados de carga de compressão foram maiores em todas as taxas de deslocamento. Durante a moldagem da ACIII no molde partido, o problema de escoamento prematuro foi observado, comprometendo a condição geométrica inicial do ensaio. Assim, a ACIII não foi avaliada de forma correta.

Este escoamento prematuro está relacionado à adição de polímeros que melhoram a fluidez e escoamento do sistema, à ação do rolamento das partículas através da lubrificação, à incorporação de ar e à dispersão de surfactante.

Além de comprometer a avaliação da argamassa do tipo ACIII, quando foi utilizado, no ensaio, no molde partido, ocorreram as seguintes dificuldades de execução do ensaio:

- Movimentação das partes móveis do molde no momento do rasamento (acabamento superficial sobre a argamassa).
- Centralização do molde no momento da compressão. Risco: A máquina pode comprimir a parte superior do molde, caso não esteja alinhado com o punção.
- Interferência do arraste do molde; dependendo do tipo da argamassa, o escoamento não fica constante.

O molde restritivo mostrou-se mais adequado, pois permitiu a avaliação dos 2 tipos de argamassas da melhor forma e com execução muito mais simples, sendo mais prático para a execução do ensaio. Nesse contexto, o molde restritivo elimina esses desvios de ensaio, padronizando e facilitando a execução em larga escala.

Na sequência do ensaio de aperto, a tração foi realizada para continuar a avaliação do efeito da configuração.

A Figura 24 permitiu avaliar o perfil das curvas carga de compressão *versus* deformação da argamassa ACI, utilizando os dois tipos de configuração. Para ACI e ACIII, os resultados não são similares nas três taxas de deslocamento utilizando o molde partido e restritivo. Observou-se, também, que, com o aumento da taxa de deslocamento, ocorreu o aumento da carga de tração; ou seja, o método foi sensível para diferenciar o tipo de molde e a taxa de deslocamento.

Figura 24 – Pull Out Flow: Comparativo entre duas configurações diferentes moldes partido 50,8 mm (2 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol) / Restritivo de 101,6 mm (4 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol), utilizando ACI (A) e ACIII (B), variando-se a taxa de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s e aperto até a profundidade de 9 mm.

Devido ao molde restritivo, a ACIII obteve resultados que foram maiores em todas as taxas de deslocamento. Isto ocorreu devido ao efeito do empuxo que, no molde restritivo, ocorre com maior intensidade já que no molde partido a argamassa escorre prematuramente antes da compressão, reduzindo as forças de empuxo pelo fato de o corpo de prova estar livre.

Dada a baixa representatividade do empuxo, sendo menor de 1% em relação ao valor de tração (N), o empuxo não foi considerado no cálculo de carga de tração total.

Para o ensaio de tração, o *Pull Out Flow* em condições ideais, o estado de consolidação não se iniciou. Isso se mostrou como reflexo do ensaio de *Squeeze Flow*, o qual caracteriza a viscosidade elongacional, avalia a reologia e o comportamento do fluxo. A Figura 25 mostra a sequência do teste de *Pull Out Flow*, até o início da ruptura do fluxo.

Figura 25 – *Pull Out Flow*: Sequência do ensaio, utilizando molde restritivo de 101,6 mm (4 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol), utilizando ACIII (B), teor de água de 32%, taxa de deslocamento 1 mm/s e puxada na profundidade de 9 mm.

A Figura 26 descreve o comportamento das argamassas no ensaio de aperto e tração.

Figura 26 – *Squeeze Flow versus Pull Out Flow* variando-se a taxa de deslocamento 0,1, 1 e 3 mm/s e aperto até a profundidade de 9 mm.

A Figura 26 permitiu mostrar que a correção entre o ensaio de *Pull Out Flow* e *Squeeze Flow* é alta, tanto para ACI, como para ACIII. A relação entre os métodos é de aproximadamente 2 vezes. O potencial do ensaio pode ser melhor explorado em condições onde a argamassa fique exposta ao ar, ocorrendo assim a perda da água por evaporação e propiciando condições para que a consolidação da mistura ocorra.

Os resultados do *Pull Out Flow* estão disponíveis no APÊNDICE D.

4.3.6.3. Influência do diâmetro do punção

Min, Erwin e Jennings (1994) sugerem que o efeito de uma força repulsiva da parede do molde poderia ser negligenciado em uma relação diâmetro / punção quando esta relação fosse superior que 1,7. Estas forças de repulsão são causadas pelo efeito “parede” durante a compressão.

O efeito “parede” foi estudado para que se conhecesse esta interferência e as forças de repulsão causadas no momento da compressão. Este comportamento está apresentado nos ensaios de compressão e tração utilizando-se a relação 101,6 mm (4 Pol) do molde restritivo para 25,4 mm (1 Pol) do punção Figura 27, e a sequência

para a relação 152,4 mm (6 Pol) do molde restritivo para 50,8 mm (2 Pol) do punção, mostrado na Figura 28.

Figura 27 Sequência do ensaio de *Squeeze Flow* (compressão) e *Pull Out Flow* (Tração) utilizando molde restritivo de 101,6 mm (4 Pol) e punção de 25,4 mm (1 Pol) A) Punção estacionado na altura de 10 mm para iniciar a compressão B) Compressão da argamassa a uma profundidade de 9 mm C) Tração e estreitamento da argamassa D) Ruptura total da argamassa

Figura 28 Sequência do ensaio de *Squeeze Flow* (compressão) e *Pull Out Flow* (Tração) utilizando molde restritivo de 152,4 mm (6 Pol) e punção de 50,8 mm (2 Pol) A) Punção estacionado na altura de 10 mm para iniciar a compressão B) Compressão da argamassa a uma profundidade de 9 mm C) Tração e estreitamento da argamassa D) Ruptura total da argamassa

Para determinar a melhor relação dos diâmetros de punção (placa superior) em relação à restrição do corpo-de-prova sob o comportamento reológico nas argamassas ACI e ACIII, fixou-se a configuração utilizando-se o molde restritivo de 101,6 mm (4 Pol), comprimindo a argamassa com dois tipos diferentes de punção 25,4 mm (1 Pol) e 50,8 mm (2 Pol) de diâmetro. A Figura 29 mostra as curvas de compressão.

Figura 29 - *Squeeze Flow*: Comparativo entre punções 1 pol / 2 pol ACI (A) e ACIII (B), variando-se a taxa de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, aperto até a profundidade de 9 mm e molde restritivo de 101,6 mm (4 Pol).

O punção com o diâmetro de 50,8 mm (2 Pol) mostrou ser mais sensível para diferenciar taxas de deslocamento em argamassas ACI e ACIII, quando comparado com o punção de 25,4 mm (1 Pol). Isso ocorre porque a área do punção é maior e a tensão de cisalhamento tem maior influência.

Utilizando qualquer das configurações, não foi observado o transbordamento da amostra devido ao confinamento. Porém, quando utilizamos o molde de 101,6 mm (4 Pol), uma ligeira elevação e impregnação da amostra no punção no momento da compressão foi notada.

Outro estudo complementar foi realizado com um molde restritivo de 152,4 mm (6 Pol), para verificar se o aumento da tensão no punção estava relacionado com o acúmulo e arraste de material na extremidade do punção ou o efeito parede era independente do volume.

Utilizando a relação 1:4 ou 1:3 (punção / molde), quase não se diferenciaram as cargas de compressão e foram menores que a relação 1:2, indicando que, quanto maior a restrição, maior a carga de compressão.

A Figura 30 mostra os perfis das curvas realizados com os moldes de 101,6 mm (4 Pol) e 152,4 mm (6 Pol).

Baseado neste estudo foi evidenciado que a melhor opção diâmetro / punção é 2,0; sendo a relação 101,6 mm (4 Pol) do molde restritivo para 50,8 mm (2 Pol) do punção adotada para todos os experimentos.

Figura 30 - *Squeeze Flow*: Comparativo entre moldes restritivos 4 Pol / 6 Pol ACI (A) e ACIII (B), variando-se a taxa de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, aperto até a profundidade de 9 mm e punção de 50,8 mm (2 Pol).

4.3.6.4. Influência da taxa de deslocamento

A ausência de finos (partículas $<75\ \mu\text{m}$ da areia + aditivos + cimento), na argamassa acarreta dificuldade na movimentação dos agregados, mas sua presença em excesso pode até diminuir a fluidez, devido à quantidade de água livre para afastamento das partículas que se reduz com o aumento da área superficial sobre o volume da composição.

Dependendo do formato das partículas, em especial as que possuem baixa esfericidade, elas podem se orientar de acordo com a taxa de cisalhamento aplicada, em baixas taxas de cisalhamento. As partículas 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, ou ainda, dificultando a movimentação relativa entre as partículas, o que origina um efeito dilatante da suspensão. A distribuição estreita do tamanho das partículas e forças de repulsão podem também favorecer a dilatância (OLIVEIRA et al., 2000).

Foi avaliada a influência da taxa de deslocamento para o conhecimento do comportamento da argamassa colante ACI e ACIII, bem como a verificação da ocorrência de separação de fases na região central do corpo-de-prova, que em altas taxas de deslocamento tenderiam a apresentar o escoamento plástico com segregação da argamassa.

A Figura 31 apresenta os perfis das curvas de carga de compressão *versus* deformação da argamassa, utilizando a configuração com molde restritivo de 101,6 mm (4 Pol) e punção 50,8 mm (2 Pol), com ampla variação da faixa de taxa de deslocamento (0,05; 0,1; 1; 3; 5 mm/s). Considerando 0,05 mm/s e 0,1mm/s taxas de deslocamentos baixas, 1 mm/s e 3 mm/s taxas médias e 5 mm/s alta. Esta última também é a velocidade máxima da máquina universal. Outro ponto de referência foram os trabalhos de outros pesquisadores como Cardoso (2009), Povoas (2005) e Costa (2006) para que fosse possível comparar os resultados e comportamentos.

Figura 31 - Squeeze Flow: Influência das taxas de deslocamento para ACI e ACIII comparativo entre ensaios realizados com diferentes taxas de deslocamento 0,05; 0,1; 1; 3; 5 mm/s, aperto até a profundidade de 9 mm.

As tendências das curvas de carga de compressão *versus* deslocamento, com a utilização de diferentes taxas de deslocamento, foram as mesmas para ACI e ACIII. As cargas de compressão necessárias para efetuar a deformação do material aumentaram com a taxa de deslocamento, ao contrário do comportamento das argamassas de revestimento, que tem redução da carga de compressão à medida que se aumenta a taxa de deslocamento, devido à incidência de segregação de fases.

Diferentemente das argamassas de revestimento, as argamassas colantes são menos suscetíveis à segregação do que as demais, em função da menor extensão granulométrica e do aditivo retentor de água/modificador de viscosidade normalmente utilizado (COSTA, 2006).

A argamassa ACIII apresentou cargas de compressão maiores do que ACI. Dessa forma, o ensaio de *Squeeze Flow* mostrou-se sensível para diferenciar as argamassas e refletiu o que na prática é percebido: ACIII tem maior consistência que ACI.

4.3.6.5. Repetibilidade do método

A influência da profundidade de aperto e repetições dos ensaios é mostrada nas Figura 32. Neste caso, se a carga de compressão fosse constante ao longo das profundidades do molde e se apresentasse a mesma tendência, determinaria a melhor profundidade de aperto do punção e determinaria, também, se as repetições eram reprodutivas.

Figura 32 - *Squeeze Flow*: Comparativo entre profundidades de 3, 5, 7 e 9 mm, utilizando ACI, molde restritivo de 4 (Pol) e punção de (2 Pol) e com taxa de deslocamento de 1 mm/s.

Existe uma tendência de que, quanto maior for a profundidade de aperto, maior será a carga de compressão. Para as profundidades de 3, 5, 7 e 9 mm, a tendência da curva foi similar. Portanto, foi adotado que, para todos os ensaios, o deslocamento máximo seria de 9 mm, pois indica a curva reológica mais ampla.

Ao longo dos testes, ao se atingir a profundidade de 9 mm, onde o produto está mais propenso a apresentar separação de fases e encontra-se a região onde o embricamento das partículas é mais intenso, as cargas de compressão são mais aleatórias.

Na tração (Figura 33), a tendência foi similar: quanto maior a profundidade de aperto, maior a resposta ao empuxo no retorno.

Figura 33 - *Pull Out Flow*: Comparativo entre profundidades de 3, 5, 7 e 9 mm, utilizando ACI, molde restritivo de 4 (Pol) e punção de (2 Pol) e com taxa de deslocamento de 1 mm/s.

Na profundidade de 9 mm, a tendência da curva de carga de tração foi diferente das outras profundidades, apresentando um formato de pico. Esta característica foi amplamente observada quando se utilizou esta profundidade com o molde restritivo.

Para verificação de repetitividade, foram agrupados os ensaios realizados durante a pesquisa (Figura 34 e Figura 35).

Figura 34 - *Squeeze Flow*: Repetições realizadas em datas diferentes com teores de água de 21,5% para ACI e 32,0% para ACIII, aperto até a profundidade de 9 mm, com a taxa de deslocamento de 1 mm/s.

Figura 35 - *Pull Out Flow*: Repetições realizadas em datas diferentes com teores de água de 21,5% para ACI e 32,0% para ACIII, aperto até a profundidade de 9 mm, com a taxa de deslocamento de 1 mm/s.

Para ACI e para ACIII, as curvas apresentaram as mesmas tendências e foram similares, indicando que o método não apresenta características aleatórias. Este mesmo efeito foi observado em outras taxas de deslocamento (0,1 mm/s e 3 mm/s).

Na tração (Figura 35), o ensaio mostra que há boa sobreposição, indicando que o método tem potencial a ser explorado, tanto para análise da adesividade, quanto da adesão e da coesão. Mesmo com as variações inerentes do ensaio, pode-se afirmar que as curvas de carga de tração da ACI e ACIII não possuem diferenças significativas.

4.3.6.6. Influência do tempo de consolidação

O tempo de consolidação do material foi avaliado. Tratou-se de observar as alterações de consistência em função das reações químicas de hidratação do cimento. Foram utilizadas três taxas de deslocamento 0,1, 1 e 3 mm/s, utilizando ACI e ACIII submetidas ao ensaio de *Squeeze Flow* no intervalo de 25 a 240 minutos de hidratação da argamassa e molde restritivo de 101,6 mm (4Pol) e punção 50,8 mm (2 Pol).

Os tempos foram adotados nesta sequência, devido à indicação do tempo de utilização da argamassa de até 150 minutos após a mistura. A Figura 36 mostra o comportamento da argamassa utilizando as três velocidades ao longo do tempo.

Figura 36 - Squeeze Flow: Tempo de consolidação (A) (B) (C) ACI, (D) (E) (F) ACIII, diferentes taxas de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, ensaios realizados nos tempo de 25 – 240 minutos, molde restritivo de (4 Pol) e punção de (2 Pol) e aperto até a profundidade de 9 mm.

Para a argamassa ACI, no tempo entre 230 e 240 minutos, a curva de carga de compressão inicia o aumento da carga de compressão à medida que se aumenta o tempo, indicando que o método foi sensível para detectar o início da consolidação do produto. Na prática, também foi observado ligeiro aumento de consistência e a aglomeração da argamassa.

A consolidação é o início do endurecimento do produto, que, devido às reações químicas de hidratação do cimento que envolvem dissolução das fases anidras na matriz, apresenta alterações de consistência em função de tempo (TAYLOR, 1990; ODLER, 1998; BETIOLI, 2007; MEHTA, MONTEIRO, 2008).

Para a argamassa ACIII, não se pode afirmar que o produto apresentou consolidação, não ocorrendo de forma crescente ao longo do tempo. Nos dois pontos seguintes de leitura no intervalo de 50-65 min e 115-125 minutos, ocorreram quedas nas cargas de compressão e posteriormente, em 235 e 245 minutos, a carga de compressão retornou aos patamares de 25-35 minutos. Não foi possível, portanto, afirmar que, em 240 minutos, o produto apresentou indícios de consolidação.

Segundo Ohama (1998), a retenção de água dependente da relação polímero-cimento e este fenômeno ocorre por causa das propriedades coloidais hidrofílicas do polímero, que inibe a evaporação da água devido ao efeito de vedação impermeável da formação do filme (coalescência de partículas de polímero). Assim, a água necessária para a hidratação do cimento é retida. Esta característica é importante para inibir o fenômeno de secagem rápida, por evaporação ou por perda de água para um substrato com alta absorção.

Nenhuma amostra atingiu o estágio 3, que equivale ao enrijecimento por deformação ou inversão, faixa onde ocorrem grandes deformações (*strain hardening*), indicando que a consolidação tenha sido iniciada.

Betioli (2007), evidenciou que matrizes com polímero MHEC apresentaram uma taxa de consolidação menor comparada a uma de referência sem polímero. Isso se dá porque o polímero MHEC aumenta a viscosidade da fase aquosa, reduzindo a aglomeração entre as matrizes. Este aumento da viscosidade na suspensão reduz a separação de fases e lubrifica o contato entre os grãos de cimento, quando solicitados, sob escoamento, por compressão axial.

Foi adotada a sistemática de se repetirem os ensaios nos intervalos de 25-35 minutos e de 50-65 minutos, no intuito de observar se as tendências de curvas seriam confirmadas na repetição sequencial.

A origem provável para que o início da consolidação não tenha sido evidenciado é sua composição com éteres e polímeros e também o fato de as amostras terem ficado em um recipiente coberto, impedindo a exposição direta da argamassa ao ar e não sendo submetida à ação da absorção do substrato, fazendo que a água não fosse evaporada com maior intensidade.

4.3.6.7. Influência do teor de água

A consistência do sistema, além de estar relacionada à proporção de éteres e polímeros/cimento, está relacionada diretamente com a introdução de água na composição, pois esta contribui na lubrificação da suspensão. Quando se coloca menos água na mistura, é perceptível o aumento da consistência que, conseqüentemente, no ensaio de *Squeeze Flow*, é transformada em um aumento de carga de compressão. Quando se adiciona mais água na suspensão, a lubrificação aumenta, a argamassa fica mais fluída e as cargas de compressão são reduzidas.

A sensibilidade do ensaio quando a amostra é misturada com diferentes teores de água foi avaliada. A adição de água para correção da consistência é comum e detectar sua adição ou redução é importante, devido ao controle do ensaio, conforme mostrado na Figura 37.

Figura 37 - *Squeeze Flow*: Teores de água diferentes (A) (B) (C) ACI, (D) (E) (F) ACIII, diferentes taxas de deslocamento 0,1, 1 e 3 mm/s, molde restritivo de (4 Pol) e punção de (2 Pol), ACI com teor de água de 19,4%, 21,5%, 23,7% e ACIII com teor de água de 28,8%, 32,0, 35,2% em relação à massa de argamassa seca.

Com a redução de água as cargas de compressão para a ACI e ACIII aumentaram, indicando que o produto respondeu à redução da mobilidade da suspensão. Já quando foi aumentado o teor de água no sistema, a lubrificação da suspensão aumentou e as cargas de compressão foram menores, devido ao aumento da fluidez.

Os éteres de celulose formam um gel, aumentando a viscosidade da fase aquosa, por meio dos fenômenos de adsorção e associação. Em altas concentrações, pode ocorrer o entrelaçamento entre as cadeias que, sob baixas tensões de cisalhamento, causam um aumento na viscosidade aparente. O aumento na viscosidade confere à fase líquida uma capacidade de manter em suspensão as partículas de cimento e agregado, reduzindo o risco de segregação e exsudação. Quando o aumento na viscosidade da fase aquosa for considerado excessivo para determinada aplicação, aditivos dispersantes ou um aumento na relação água/cimento podem ser necessários para aumentar a fluidez dos materiais (BETIOLI, 2007).

4.3.7. Conclusão do capítulo

4.3.7.1. Squeeze Flow - Compressão

A argamassa ACI apresentou resultados similares nas três taxas de deslocamento, utilizando os moldes partido e restritivo. Porém, a ACIII não foi avaliada de maneira adequada com o molde partido devido ao escoamento antes de iniciar o teste, resultando em menores cargas de compressão. Além do problema para avaliar a ACIII, o molde partido apresentou diversas dificuldades operacionais. Portanto, o molde restritivo mostrou-se mais adequado, pois permitiu a avaliação dos dois tipos de argamassas com execução muito mais simples, sendo mais prático para execução de ensaios em larga escala.

Para ACI e ACIII, as tendências das curvas de carga de compressão *versus* deslocamento, com a utilização de diferentes taxas de deslocamento, foram as mesmas. As cargas de compressão necessárias para efetuar a deformação do material aumentaram com a taxa de deslocamento, ao contrário do comportamento das argamassas de revestimento que é causado pela segregação de fases, fenômeno que provavelmente não ocorre nos produtos colantes devido às características de suas formulações.

O punção com o diâmetro de 50,8 mm (2 Pol) mostrou ser mais sensível para diferenciar taxas de deslocamento nas argamassas ACI e ACIII, quando comparado com o punção de 25,4 mm (1 Pol) e o teste mostrou que, quanto maior a restrição, maior a carga de compressão.

Para as amostras testadas, o ensaio foi sensível para diferenciar teores de água com faixa de variação de 19,4% a 23,7% para ACI e 28,8% a 35,2% para ACIII, porém a ACI mostrou maior diferença.

O ensaio mostrou sensibilidade para análise da consolidação. Para a argamassa ACI, a tendência foi o aumento da carga de compressão à medida que se aumenta o tempo, para a argamassa ACIII não se pode afirmar que o produto apresentou consolidação.

A argamassa ACIII apresentou cargas de compressão maiores do que ACI. Desta forma, o ensaio de *Squeeze Flow* mostrou-se sensível para diferenciar as argamassas e refletiu o que, na prática, é percebido: ACIII tem maior consistência que ACI.

O *Squeeze Flow* mostrou ser um método repetitivo, versátil, que avalia o fluxo de uma suspensão, traduzindo a percepção do aplicador. O método mostrou que tem potencial de utilização na indústria e execução em larga escala para eliminação da subjetividade da avaliação do aplicador.

4.3.7.2. Pull Out Flow - Tração

ACI e ACIII apresentaram curvas de carga de tração diferentes nas três taxas de deslocamento, utilizando os moldes partido e restritivo. As cargas de tração utilizando o molde restritivo foram maiores do que as cargas de tração de compressão utilizando o molde partido.

As tendências das curvas de carga de tração *versus* deslocamento, com a utilização de diferentes taxas de deslocamento, foram as mesmas. As cargas de tração

necessárias para efetuar a tração do material aumentaram com a taxa de deslocamento.

O punção com o diâmetro de 50,8 mm (2 Pol) mostrou ser mais sensível para diferenciar taxas de deslocamento em argamassas diferentes, quando comparado com o punção de 25,4 mm (1 Pol).

O ensaio foi sensível para diferenciar teores de água com faixa de variação de 19,4% a 23,7%. A argamassa ACI mostra, porém, melhor definição.

Para ACI e ACIII, não se pode afirmar que, com 240 minutos, ocorreu a consolidação dos produtos. Devido ao confinamento da argamassa dentro de um recipiente não absorvente e coberto, a secagem não ocorreu conforme observado em campo, que normalmente apresenta secagem em 90 minutos.

O ensaio de *Pull Out Flow* mostrou-se ser uma ferramenta importante para avaliar o potencial de adesão a fresco.

5. SQUEEZE FLOW, PULL OUT FLOW E REOMETRIA ROTACIONAL APLICADOS EM ARGAMASSAS UTILIZANDO AREIA NATURAL E ARTIFICIAL

5.1. Introdução

Conhecer e medir a interferência da morfologia dos agregados em composições de argamassas colantes não é uma prática corrente. Muitas vezes, a granulometria realizada por peneiramento simples por agitação, pode apresentar curvas granulométricas (retido em cada malha) quase equivalentes. Porém, a morfologia dos agregados pode ser diferente. Esta diferença pode afetar diretamente o comportamento reológico dos produtos e percepção dos aplicadores.

Atualmente, a avaliação em campo sobre a mistura e a aplicabilidade dos produtos compostos por areia natural ou artificial é efetuada também de forma empírica. O aplicador sente a diferença dos produtos, mas as descrições são subjetivas e não mensuram quantitativamente, além de induzirem a erros de avaliação, pois cada aplicador tem uma percepção diferente sobre os produtos.

Dependendo da sua origem, morfologia, porosidade, absorção, distribuição granulométrica e densidade, os agregados podem conferir diversas propriedades às argamassas, como aspecto superficial / acabamento, consistência, deslizamento, compacidade, ancoragem e resistência mecânica. Neste estudo, será abordado somente o efeito da morfologia das areias e seus efeitos.

A seguir, mostra-se a caracterização dos agregados (natural e artificial). Em um primeiro momento, foram formuladas em laboratório ACI com areia natural e outra com areia artificial para verificar o efeito da morfologia e se o método era sensível para diferenciar as composições.

Em um segundo momento foi aprofundado o estudo e isolou-se o fator morfologia, considerando os finos (partículas <0,075 mm da areia). Foi coletada uma quantidade de agregado da mesma jazida, com uma pequena diferença de produção. Os finos

foram separados através da peneira de 0,075 mm (somente areia) e este procedimento também foi realizado na areia natural. Resultando em quatro frações distintas: areia natural com e sem finos e areia artificial com e sem finos.

5.2. Revisão de Literatura

A forma e a textura das partículas de areia esmagadas podem conduzir a melhorias na resistência a compressão devido a um melhor travamento entre as partículas. No entanto, o agregado miúdo angular produz uma argamassa com menor trabalhabilidade do que areias esféricas para o mesmo teor de água, ou o mesmo volume de pasta de cimento. A adição de água é frequentemente incorporada em misturas de cimento para melhorar a trabalhabilidade. O maior teor de água traz, porém, como consequência, a redução da resistência, mesmo com o aumento do cisalhamento entre as partículas.

Oliveira et al. (2000) sugere que a morfologia é um fator que pode interferir na condição de empacotamento das partículas. Quanto mais afastada do formato esférico for a partícula, menor é a densidade de empacotamento de uma distribuição. Este fenômeno ocorre devido à fricção interparticular, que se dá pelo contato das superfícies irregulares. O efeito é aumentado quanto menor for o tamanho da partícula irregular e isto se deve a uma maior área superficial específica.

Desta forma, a área superficial das partículas finas é determinada pelo tamanho e, principalmente, pela morfologia e pela textura destas, influenciando no teor de água e também de aditivos consumidos em suspensões, na retenção de água da argamassa e, no caso de materiais reativos, na cinética das reações (CARDOSO, 2009).

As características do formato da partícula podem afetar a consistência e a resistência da argamassa. Os principais parâmetros que descrevem o formato das partículas são a esfericidade e a relação de forma. Estes, por sua vez, dependem principalmente da origem, do local de extração e da natureza (SIMS, BROWN, 2005).

A redução na densidade de empacotamento, não é afetada quando as misturas de partículas possuem baixas concentrações de partículas não esféricas. A diminuição da densidade, que resulta em maior porosidade, ocorre à medida que se aumenta a concentração de partículas não esféricas, sendo, então, destruída a estrutura de empacotamento. Isto ocorre principalmente quando as partículas apresentam tamanhos similares. O efeito da fricção e da irregularidade na forma das partículas pode gerar estruturas que jamais possuirão o máximo empacotamento (OLIVEIRA et al. 2000).

A morfologia é importante e pode ser avaliada por 2 parâmetros, esfericidade e b/l (razão de aspecto) e indica a capacidade de mobilidade das partículas dentro de uma suspensão. Quanto mais o agregado for esférico, maior será a capacidade de rolamento das partículas. Ela é definida como o grau em que a forma de uma partícula se aproxima da forma esférica. A comparação de partículas de formas variadas com uma esfera pode ser efetuada considerando a área da superfície, o volume e as razões entre os eixos ortogonais. A Figura 38 ilustra as informações que podem ser extraídas de um agregado para o cálculo da esfericidade.

Figura 38 - Esquema de leitura, comprimento e largura de um agregado.

x_min: mínimo dos máximos diâmetros

x_area: diâmetro da esfera com a mesma área

Fe_max: máximo diâmetro

A partir destas dimensões, é possível calcular a esfericidade e relação da forma, segundo as seguintes equações:

$$E = \frac{4\pi A}{p^2} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: E= esfericidade; A = área; p=perímetro

$$b/l = \frac{X_c \min}{X_{Fe} \max} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: b/l = relação da forma; $x_c \min$: mínimo dos máximos diâmetros; $F_e \max$: máximo diâmetro.

As partículas interferem na reologia de uma argamassa, dependendo da quantidade e tamanho. Quanto maior a irregularidade da partícula, maior será a viscosidade, devido à fricção entre as partículas que surgem a partir de superfícies irregulares. Para partículas alongadas e rugosas, geralmente encontradas nos agregados artificiais, a tendência é dificultar o fluxo pelo embricamento das partículas. Já para partículas arredondadas, característica geralmente encontrada em agregados naturais de sílica, percebe-se que o fluxo é facilitado, pois são menos alongadas (COSTA, 2006; OLIVEIRA et al. 2000).

No experimento realizado em reômetro rotacional por Westerholma et al. (2007), utilizando agregado natural e artificial, com a areia artificial, ocorreu o aumento da tensão de escoamento e viscosidade plástica. O aumento foi atribuído ao formato do agregado (morfologia) e ao fato de a areia artificial ter mais finos (partículas <0,075 mm da areia) que a natural, ter uma área superfície específica maior e ter uma superfície irregular, aumentando a necessidade de inclusão de água para que a argamassa fosse aplicável. Esta quantidade de finos também contribui para o aumento da viscosidade plástica, pois diminuiu o atrito entre partículas.

Esteves et al. (2010), quando realizou estudos para medir os efeitos de agregados com partículas finas, constatou que as características reológicas são sensivelmente afetadas. Para uma mesma consistência foi necessária o ajuste da mistura utilizando aditivos para melhorar o escoamento. As partículas no intervalo de 75 a 1000 μm , e abaixo desta faixa, interferem no mecanismo de fixação da água e escoamento da mistura. Abaixo deste range, resultam em forças de fricção que vem do equilíbrio entre as forças gravitacionais e de flutuação.

5.3. Estudo de Caso 1

Este estudo foi realizado para se conhecer, em um primeiro momento, somente o efeito da morfologia, sem considerar o efeito dos finos (partículas <0,075 mm da areia) e a verificação do método em relação à sensibilidade para diferenciação das composições. Os experimentos foram realizados substituindo 1:1 em massa (areia natural / areia artificial) nas formulações de argamassas colantes.

5.3.1. Materiais e Métodos

O material foi misturado com base na norma técnica NBR14081-2 (2012), que preconiza a introdução do pó na água, utilizando um misturador planetário com a velocidade de rotação baixa do aparelho (140 rpm) com capacidade para 5 litros. Para as argamassas ACI com areia natural e artificial ambas foram misturadas com o teor de água de 21,5%.

A configuração utilizada *de Squeeze Flow* foi punção de 50,8 mm (2 Pol), molde restritivo de 101,6 mm (4 Pol), aplicando-se três diferentes taxas de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, e aperto até a profundidade de 9 mm, realizado em máquina universal que permitiu taxa de deslocamento controlado.

5.3.2. Caracterização de argamassa anidra

Foram coletadas duas amostras de areia natural e artificial, ambas com finos (partículas <0,075 mm da areia). A Figura 39 mostra as curvas das areias utilizadas neste experimento e a argamassa formulada.

Figura 39 – Curvas Granulométricas dos produtos formulados com o mesmo cimento, alterando-se somente o agregado (A) perfil das areias natural e artificial (B) perfil da argamassa formulada em laboratório.

A curva granulométrica da areia natural tem uma frequência mais acentuada do que a areia artificial, principalmente na proporção de finos entre 100 e 1000 μm, sendo 1 mm o tamanho máximo do grão determinado por granulometria laser (Malvern MSS Mastersizer).

5.3.3. Argamassas utilizadas - Composição das formulações

Partindo de uma formulação de argamassa ACI e da massa específica do agregado natural foram dosadas, em laboratório, duas argamassas com proporções

equivalentes em volume de cimento, areia fina e éter de celulose MHEC (mercado), de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização física das argamassas com areia Natural e Artificial. ρ_{Agreg} = densidade real dos agregados; ρ_{Cimento} = densidade real; ρ_{Arg} = densidade real da argamassa anidra; Agreg = Agregado utilizado na formulação Cimento = Cimento utilizado na formulação; Celulósico = Celulósico utilizado na formulação Rel. a/ms = relação água / materiais secos em massa.

Areia	ρ_{Agreg} (g/cm ³)	ρ_{Cimento} (g/cm ³)	ρ_{Arg} (g/cm ³)	Agreg (%)	Cimento (%)	Celulósico*	Rel. a/ms (%)
Natural	2,635	3,050	2,580	75,0	25,0	0,25	21,5
Artificial	2,710	3,050	2,590	75,5	24,5	0,25	21,5

*MHEC

5.3.4. Resultados do Caso 1

De acordo com os fatores de influência, os resultados da análise do *Squeeze Flow* e *Pull Out Flow* são mostrados na sequência.

5.3.4.1. Influência do teor de água nas curvas de *squeeze flow*

A Figura 40 mostra as curvas de compressão das argamassas compostas por areia artificial com finos (partículas <0,075 mm da areia), obtidas através do *Squeeze Flow*. As curvas de carga de compressão da ACI com areia artificial foram superiores às formuladas com areia natural, indicando que, com a mesma proporção de insumos e teor de água (volume), as argamassas não possuem perfis reológicos similares.

Com a redução de água para 19,4% na ACI, as cargas de compressão aumentaram, indicando que o produto respondeu à redução da mobilidade da suspensão. Já quando foi aumentado o teor de água para 23,7% no sistema, a lubrificação da suspensão aumentou e as cargas de compressão foram menores, devido ao

aumento da fluidez. O método mostrou ser sensível para diferentes teores de água em argamassas compostas por areia artificial.

Figura 40 – *Squeeze Flow*: Influência do teor de água para ACI com areia natural e artificial, utilizando diferentes taxas de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, molde restritivo de (4 Pol) e punção de (2 Pol), ACI com teor de água de 19,4%, 21,5%, 23,7% em relação à massa de argamassa seca.

5.3.4.2. Avaliação da aplicabilidade da argamassa pelo pedreiro (aplicador)

Foi realizado um teste de campo, para comparar a sensibilidade do *Squeeze Flow* versus a percepção do aplicador, onde foram entregues duas amostras de argamassa sem identificação e solicitado para ao aplicador determinar a água de trabalho.

Os resultados apresentaram o teor de água de 21,5% para a areia natural e 23,5% para a areia artificial. Para a argamassa com areia artificial, o aplicador colocou mais água para conseguir uma consistência de trabalho. A Figura 41 apresenta as curvas para as argamassas formuladas.

Figura 41 – *Squeeze Flow*: ACI Areia Natural 21,5% e Artificial 23,7% com e sem finos (partículas <0,075 mm da areia), utilizando diferentes taxas de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, molde restritivo de (4 Pol) e punção de (2 Pol).

5.3.4.3. Conclusão do estudo do Caso 1

As curvas de carga de compressão da ACI com areia artificial foram superiores às formuladas com areia natural, indicando que, com a mesma proporção de insumos e teor de água (volume), as argamassas não possuem perfis reológicos similares.

O método de *Squeeze Flow* mostrou ser sensível para diferentes teores de água em argamassas compostas por areia artificial.

Já o método de *Pull Out Flow* mostrou que, quando a argamassa não tem um teor de água suficiente para molhar totalmente os agregados, as curvas apresentam distúrbios e fluxos descontínuos (APÊNDICE D).

Mesmo com a correção da água feita pelo aplicador, o produto mostrou que tem curvas reológicas diferentes quando composto por areia de morfologias diferentes. O aplicador tem a percepção de que as argamassas compostas por areia artificial apresentam um embricamento superior do que argamassas compostas por areia natural, principalmente quando a camada de aplicação é mais fina. O método mostrou ser capaz de indicar e traduzir esta percepção, por meio da diferença das curvas de carga de compressão.

5.4. Estudo de Caso 2

Neste segundo estudo de caso, foi identificado que o método de avaliação precisava ser melhorado, pelo que se isolou o fator morfologia, considerando os finos (partículas <0,075 mm da areia). Outros métodos complementares também foram aplicados, como esfericidade dos agregados, reometria de mistura e aplicação de ciclos de cisalhamento. Foi coletada uma quantidade de agregado da mesma jazida, com uma pequena diferença de produção, mas normal em produção de areia artificial. Os finos foram separados através da peneira de 0,075 mm e este procedimento também foi realizado na areia natural. Como resultado, obtiveram-se

quatro frações distintas: areia natural com finos e sem finos e areia artificial com e sem finos.

5.4.1. Materiais e Métodos

5.4.1.1. Para a aplicação da reometria

Para análise da cinética da mistura, foi utilizado o reomêtro da Poli-USP, utilizadas bateladas de 4 kg de material anidro, submetidos à mistura por 300 segundos em rotação constante (126,5 rpm), com a adição controlada de água (vazão constante de 6 g/s) a partir de 30 segundos. Após a mistura, o produto ficou por mais 15 minutos em rotação dez vezes menor (12,7 rpm), para maturação e ação dos aditivos. Após a maturação, determinou-se o teor de ar incorporado.

Para análise do comportamento frente ao ciclo de cisalhamento, depois da realização da mistura, foram aplicados dois ciclos completos com patamares de 6,3; 12,7; 25,3; 38,0; 63,3; 126,5; 189,8; 253,0 e 316,3 rpm, tendo permanência de 5 segundos em cada rotação, repouso de 10 minutos entre os ciclos e determinação do teor de ar incorporado.

5.4.1.2. Para aplicação do squeeze flow

O material foi misturado com base na norma técnica NBR14081-2 (2012), que preconiza a introdução do pó na água, utilizando um misturador planetário com a velocidade de rotação baixa do aparelho (140 rpm) com capacidade para 5 litros. Para as argamassas ACI com areia natural e artificial ambas foram misturadas com o teor de água de 21,5%.

A configuração utilizada de *Squeeze Flow* foi punção de 50,8 mm (2 Pol), molde restritivo de 101,6 mm (4 Pol), aplicando-se três diferentes taxas de deslocamento

0,1; 1 e 3 mm/s, e aperto até a profundidade de 9 mm, realizado em máquina universal que permitiu taxa de deslocamento controlado.

5.4.2. Caracterização de argamassa anidra

Foram coletadas duas amostras de areia: natural e artificial, ambas com partículas abaixo de 0,075mm. A Figura 42 apresenta as curvas das areias, com e sem finos (partículas <0,075 mm da areia), utilizadas neste estudo, bem como a argamassa formulada.

Figura 42 – Curvas granulométricas das areias: Natural e Artificial com e sem finos.

As curvas granulométricas das areias naturais possuem maior frequência na faixa de 100 a 1000μm. Devido à retirada dos finos, as curvas das areias com finos possuem menor concentração nesta faixa.

Figura 43 - Curvas granulométrias das areias: Natural e Artificial com e sem finos, (A) Areia Artificial sem e com finos, (B) Areia Natural sem e com finos (C) Areia Natural com finos e Areia Artificial com finos (D) Areia Natural sem finos e Areia Artificial sem finos.

A curva granulométrica da areia natural tem uma concentração mais acentuada que a areia artificial. Nesta curva, a proporção de finos <100 μm é maior na areia natural do que na areia artificial, sendo 1 mm o tamanho máximo do grão determinado por granulometria laser.

A Figura 44 indica a esfericidade do agregado natural e artificial utilizados nas composições de ACI.

Figura 44 – Esfericidade do agregado natural e artificial utilizados nas composições das argamassas colantes, obtidas através do Camsizer para analisar o tamanho e forma das partículas por imagem dinâmica digital.

Quanto mais próximo o agregado ficar com a esfericidade próximo a 1, mais será esférico (Figura 44). As areias natural e artificial foram caracterizadas em um analisador de tamanho e forma de partículas por imagem dinâmica digital (Camsizer), que permite análises de formas e tamanho de partículas com rapidez e precisão para materiais secos e pós numa escala de 30 μm à 30 mm, com capacidade para leitura de 60 imagens por segundo com uma resolução correspondente a mais de 45 megapixels por segundo.

Na areia natural, a esfericidade é muito mais intensa a partir do diâmetro de partícula de 0,15 mm. Quanto maior o valor da esfericidade, mais redondo e sem cantos é o agregado. Para a areia artificial, a partir deste diâmetro, a esfericidade decresce. Através do peneiramento realizado por laser, não se pode avaliar a diferença de morfologia dos agregados.

A relação b/l considera largura mínima do agregado; quanto maior a relação, maior a esfericidade. A Figura 44 mostra que os agregados não são equivalentes e que a areia natural tem maior relação b/l quando comparado à areia artificial.

A Figura 45 ilustra a morfologia do agregado natural e artificial, ambos utilizados nas composições de ACI.

Figura 45 - Agregados utilizados nas formulações, obtidas em microscópio Digital Microscope KH7700 Hirox: A) Areia Artificial britada não lavada com aumento de 50 vezes; B) Areia Artificial britada não lavada com aumento de 100 vezes; C) Areia Artificial britada não lavada com aumento de 150 vezes; D) Areia Artificial britada lavada com aumento de 50 vezes; E) Areia Artificial britada lavada com aumento de 100 vezes; F) Areia Artificial britada lavada com aumento de 150 vezes; G) Areia Natural lavada com um aumento de 50 vezes; H) Areia Natural lavada com um aumento de 100 vezes; I) Areia Natural lavada com um aumento de 150 vezes

Em (A), (B) e (C), a areia artificial apresenta partículas que possuem muitos finos presos à sua estrutura.

Em (D), (E) e (F), após a lavagem do agregado artificial em água corrente, foi possível observar o agregado sem finos impregnado e o formato lamelar.

Em (G), (H) e (I), pode-se observar o formato arredondado da areia de origem natural, sílica, extraído de cava.

5.4.3. Argamassas utilizadas - Composição das formulações

Foi utilizada a mesma formulação básica de ACI. As argamassas foram dosadas em laboratório, com proporção equivalente em volume de cimento, areia e éter de celulose MHEC.

5.4.4. Resultados do Caso 2

5.4.4.1. Comportamento de Mistura

A Figura 46 mostra as curvas de torque *versus* rotação, para a argamassa formulada com os quatro tipos de areia, agrupadas pelo teor de água utilizado.

Para o teor de água de 19,4%, a argamassa composta por areia artificial apresentou dificuldade de mistura e torque superior em relação à composição com areia natural com este mesmo teor de água (Figura 46). As argamassas compostas por areia artificial apresentaram maior torque para conclusão da mistura.

O método mostrou ser sensível para diferenciar os torques empregados na mistura. Independente do tipo de areia, verificou-se que quanto maior teor de água, menor o torque para mistura.

Figura 46 – Mistura ACI com Areia Natural e Artificial com e sem finos (partículas <0,075 mm da areia) com diferentes teores de água de 19,4%, 21,5%, 23,7%, mistura de 300 segundos em rotação constante (126,5 rpm) com a adição controlada de água (vazão constante de 6 g/s) a partir de 30 segundos. Após a mistura, o produto ficou em repouso por mais 15 minutos em rotação baixa (12,6 rpm) para maturação.

O torque resultante mais intenso foi encontrado na argamassa composta por areia artificial com teor de água de 19,4%. Este teor mostrou também, na prática, que não tem boa mistura, é muito consistente, de difícil homogeneização e, conseqüentemente, com características de espalhamento ruim.

Pode-se afirmar, ainda, que, se alguma argamassa colante possuir esta cinética, não será uma argamassa de fácil mistura, principalmente se for manual, contexto em que a introdução da água não tem a mesma dinâmica que na mistura mecânica.

5.4.4.2. Ciclos de cisalhamento

A Figura 47 mostra os resultados do comportamento do ciclo de cisalhamento da argamassa ACI, formulada com areia natural com e sem finos (partículas $<0,075$ mm da areia).

Para argamassa ACI formulada com areia natural, quando os ciclos de cisalhamento foram aplicados, as áreas de histerese foram pequenas ou quase nulas.

Para a análise da curva de torque *versus* velocidade, foi adotada somente a curva de desaceleração do ciclo de cisalhamento devido à característica citada anteriormente.

A Figura 47 mostra que, somente para o teor de água de 19,4%, a argamassa ACI, formulada com areia natural com e sem finos, o torque de escoamento e inclinação da curva foram superiores, quando comparado com os outros teores. Para a aplicação dos ciclos, independente de finos presentes ou não, a diferença de torque resultante e inclinação são similares.

Figura 47 – Aplicação de ciclo de cisalhamento de 6,3 a 316,3 rpm com permanência de 5 segundos em cada rotação, em ACI formulada com areia natural e artificial com e sem finos com teor de água de 19,4%, 21,5% e 23,7%.

Para a argamassa ACI, formulada com a areia natural, com todos os teores de água, o torque resultante para a mistura foi inferior a 1,5 Nm.

De acordo com a Figura 47, os torques resultantes foram maiores nas argamassas com areia artificial. No entanto, independentemente dos finos estarem presentes ou não, as inclinações das curvas *versus* rotação apresentaram comportamentos similares.

Segundo Westerholma et al. (2007), utilizando agregado natural e artificial, a areia artificial, ocorre o aumento da tensão de escoamento e viscosidade plástica devido ao formato do agregado (morfologia) e ao fato de a areia artificial ter mais finos que a natural.

Para o teor de água de 19,4%, o torque resultante (>2,0 Nm) foi superior, quando comparado aos outros teores. Já a inclinação da curva foi também a mais acentuada, indicando que a argamassa estava com maior viscosidade.

Observou-se que a mistura com as argamassas com areia artificial produziram produtos menos densos. De acordo com Oliveira et al (2000), além do efeito de fricção que as partículas menos esféricas produzem, ainda possivelmente nunca alcançarão o máximo de empacotamento, devido à condição geométrica.

A Figura 48 mostra o ciclo de cisalhamento das argamassas ACI com areia natural e artificial, utilizando o teor de água de 21,5%.

Figura 48 – Aplicação de ciclo de cisalhamento de 6,3 a 316,3 rpm com permanência de 5 segundos em cada rotação, em ACI formulada com areia artificial e natural com e sem finos com teor de água de 21,5%.

Nota-se que com o mesmo teor de água, as argamassas compostas por areia artificial apresentaram maior viscosidade plástica quando comparadas com a argamassa com areia natural. Segundo Costa (2006) e Oliveira et al. (2000), as partículas tem relevante interferência na reologia de uma argamassa, dependendo da quantidade e tamanho. Quanto maior a irregularidade da partícula, maior será a viscosidade, devido à fricção entre as partículas que surgem a partir de superfícies irregulares.

A Figura 49 mostra as cargas de compressão das argamassas formuladas com areia natural e artificial com e sem finos, submetidas ao ensaio de *Squeeze Flow*.

Figura 49 – Squeeze Flow: Influência do teor de água para ACI com areia natural com e sem finos, utilizando diferentes taxas de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, molde restritivo de (4 Pol) e punção de (2 Pol), ACI com teor de água de 19,4%, 21,5%, 23,7% em relação à massa de argamassa seca.

Em relação aos teores de água de 19,4%, o aplicador indica que o produto é muito consistente e apresenta dificuldade de mistura em campo, sem ajuda de misturador mecânico. Portanto, podemos afirmar que, se a argamassa colante possuir um

torque superior a 2,0 Nm, provavelmente o produto não poderá ser misturado manualmente em campo.

As cargas de compressão com areia artificial foram superiores às formuladas com areia natural, indicando que, com a mesma proporção de insumos e teor de água (volume), as argamassas não possuem tendência de curvas de cargas de compressão similares.

As partículas alongadas e rugosas, geralmente encontradas nos agregados artificiais, tendem a dificultar o fluxo pelo embricamento das partículas (COSTA, 2006; OLIVEIRA et al. 2000). Já para partículas arredondadas, característica geralmente encontrada em agregados naturais, percebeu-se que o fluxo é facilitado, pois são menos alongadas.

As curvas de cargas de compressão indicam que os finos possuem grande influência no comportamento reológico das argamassas com areia natural e artificial. As argamassas compostas de areia com finos, seja natural ou artificial, possuem cargas de compressão superiores. Somente a argamassa composta por areia artificial com e sem finos com o teor de água de 23,7% apresentou curva de carga de compressão com diferença sutil.

5.4.4.3. Influência da morfologia nas curvas de mistura e *squeeze flow*

Na Figura 50, são apresentadas as curvas de reometria das misturas com areia natural e artificial, com e sem finos, e com teor de água de 19,4%, 21,5% e 23,7%.

Figura 50 – Reometria de mistura: Areia Natural e Artificial com e sem finos, avaliada com diferentes teores de água, mistura de 300 segundos em rotação constante (126,5 rpm) com a adição controlada de água (vazão constante de 6 g/s) a partir de 30 segundos. Após a mistura, o produto ficou em repouso por mais 15 minutos em rotação baixa (12,6 rpm) para maturação.

Com a areia artificial, a presença ou não de finos não apresentou diferenças significativas nas características da curva de mistura. Os níveis de torque da argamassa ACI, com areia artificial com e sem, foram superiores aos níveis de torque da argamassa ACI, com areia natural com e sem finos.

Isolando a variável morfologia (Figura 51), em que se avaliou a argamassa composta de areia natural e artificial sem finos, as curvas de carga de compressão do ensaio de *Squeeze Flow* não têm a mesma tendência. As cargas de compressão das argamassas com areia artificial são superiores às cargas de compressão das curvas das argamassas com areia natural, quando utilizado o mesmo teor de água, principalmente nas taxas de deslocamento de 1 e 3 mm/s. Este fato simula com maior precisão o movimento de espalhamento.

Figura 51 – Squeeze Flow: ACI com Areia Natural e Artificial com teor de água 21,5% com e sem finos, utilizando diferentes taxas de deslocamento 0,1, 1 e 3 mm/s, molde restritivo de (4 Pol) e punção de (2 Pol).

Na argamassa ACI, com a areia artificial com finos, a inversão da curva ocorreu em aproximadamente 8 mm.

Com mesmo teor de água e composição em volume, as argamassas compostas de areia, com e sem finos não possuem curvas de cargas de compressão similares, indicando que existe a influência da morfologia do agregado.

5.4.4.4. Avaliação da aplicabilidade da argamassa pelo pedreiro (aplicador)

Na avaliação em campo, foi entregue ao aplicador uma argamassa sem identificação e solicitado que ele determinasse a água de trabalho, visando a verificar a sensibilidade da mistura *versus* a percepção do aplicador. Este indicou um teor de água de 21,5% com areia natural e 23,5% com areia artificial, sendo estes teores considerados bons para mistura e aplicação.

Quando a argamassa foi composta por areia artificial e natural com finos, com o teor de água superior para a areia artificial, a fração de finos contribuiu para a redução da energia de mistura (Figura 52).

Figura 52 – Reometria de mistura: Areia Natural com teor de água 21,5% e Areia Artificial com o teor de 23,7% de água com e sem finos, mistura de 300 segundos em rotação constante (126,5 rpm) com a adição controlada de água (vazão constante de 6 g/s) a partir de 30 segundos. Após a mistura, o produto ficou em repouso por mais 15 minutos em rotação baixa (12,6 rpm) para maturação.

A Figura 52 mostra que, para argamassa com areia artificial, o torque resultante empregado para mistura é ligeiramente superior, mesmo com a adequação do teor de água. Neste caso, da argamassa composta com finos, a parcela de partículas menores contribuiu para lubrificar o sistema, consumindo menos energia.

Segundo Westerholma et al. (2007), devido a areia artificial possuir maior área de superfície específica e ter uma superfície irregular, aumenta-se a necessidade de inclusão de água para que a argamassa seja aplicável. Esta quantidade de finos também contribui para o aumento da viscosidade plástica, pois diminuiu o atrito entre partículas.

Na Figura 53, comparou-se a sensibilidade do *Squeeze Flow* versus a percepção do aplicador novamente, e o aplicador indicou teor de água de 21,5% com areia natural e 23,5% com areia artificial. Para a argamassa com areia artificial, o aplicador colocou mais água para conseguir uma consistência de trabalho.

Figura 53 – *Squeeze Flow*: ACI Areia Natural 21,5% e Artificial 23,7% com e sem finos, utilizando diferentes taxas de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, molde restritivo de (4 Pol) e punção de (2 Pol).

Para a argamassa ACI, formulada com areia artificial com finos e teor de água de 23,7%, as curvas de carga de compressão são muito similares até 7 mm; no final da curva, porém, indica a inversão.

A curva granulométrica da areia artificial com finos, dosada na ACI na mesma proporção em volume da areia natural, apresentou a curva reológica similar na velocidade de 0,1 mm/s. Na prática, podemos afirmar que em baixa velocidade (0,1 mm/s) a diferença entre os produtos seria imperceptível.

No entanto, para uma aplicação de uma argamassa colante a velocidade de arraste do produto com a desempenadeira a velocidade é mais alta. Nesta velocidade alta (3mm/s), observa-se que após a profundidade de 7 mm o produto apresenta uma inversão de perfil, o que na prática representaria a sensação da argamassa com menos maciez para espalhamento.

Quando comparamos as curvas de carga de compressão da argamassa formulada com areia artificial e natural sem finos, não podemos afirmar que a água proporcionou mobilidade suficiente para compensar a diferença entre as curvas. A fração dos finos mostrou-se importante na composição de uma argamassa, pois ela contribui para amenizar o efeito da morfologia, fazendo com que a mistura tenha uma curva de carga mais contínua.

Para as argamassas formuladas sem finos, as curvas de cargas de compressão indicam que não são similares, mesmo com a correção de água do aplicador.

5.4.5. Conclusão do estudo do Caso 2

Para argamassa com areia artificial, a energia empregada para mistura (obtida na reometria de mistura) é superior mesmo com o acerto do teor de água indicado pelo aplicador. Neste caso, a argamassa composta com finos (partículas <0,075 mm da areia), a parcela de partículas menores contribuiu para lubrificar o sistema, consumindo menos energia e gerando uma sensação em campo de que a argamassa com areia artificial é um pouco mais difícil para misturar.

As curvas de compressão obtidas no *Squeeze Flow* indicam que os finos, possuem grande influência no comportamento reológico das argamassas com areia natural e artificial. As argamassas compostas com areia com finos sejam natural ou artificial, possuem cargas de compressão superiores.

Com mesmo teor de água e composição em volume, as argamassas compostas de areia, com e sem finos, não possuem curvas de cargas de compressão *versus* deslocamento nos ensaios de *Squeeze Flow* similares, indicando que existe a influência da morfologia do agregado.

Neste segundo estudo de caso, a argamassa formulada com areia artificial com finos, quando foi introduzido o teor de água de 23,7%, apresentou curvas de carga de compressão do *Squeeze Flow* são similares até 7 mm. O final da curva, contudo, indica inversão. A principal indicação da diferença entre as argamassas está na inversão do final da curva de carga de compressão. A diferença que o aplicador sente quando arrasta a desempenadeira é indicada nesta inversão da curva de carga de compressão. Para desenvolvimento de argamassas, quanto mais a curva da areia artificial estiver próxima à curva da areia natural, menor será esta percepção do aplicador.

Desta forma, os métodos indicados, os parâmetros e as configurações estudados no processo deste estudo mostraram ter ótima aplicabilidade para análise da morfologia e caracterização de argamassas colantes.

6. CONCLUSÃO GERAL

Os três métodos (*Squeeze Flow*, *pull out flow* e reometria) mostraram ótima aplicabilidade para caracterização da morfologia de agregados e mostraram ser inovadoras ferramentas para análise reológica de argamassas colantes, eliminando subjetividade da avaliação do aplicador.

Para a avaliação da reometria de mistura e rotacional (ciclos de cisalhamento) em argamassas colantes, o melhor parâmetro de ensaio é misturar por 150 segundos em uma rotação de 126,5 rpm e um tempo de maturação de 15 minutos em rotação baixa e 12,6 rpm com adição de água com vazão constante de 6 g/s, colocando a água no pó. Para ciclos, patamares de 5 segundos no range de 6,3 a 316,3 rpm, com um intervalo de 10 minutos entre ciclos para determinação do teor de ar incorporado.

Por meio da reometria de mistura e rotacional, foi possível identificar e diferenciar a cinética de mistura das argamassas colantes. O tempo estabelecido para a mistura de 150 segundos mostrou ser suficiente para homogeneizar os produtos. As argamassas colantes escolhidas são de fácil introdução de água no sistema e tem rápida estabilização.

Após o estudo e adaptação do método para execução em larga escala, a melhor configuração para execução do ensaio *Squeeze Flow* e *pull out flow* para caracterização de argamassas é aquela utilizando o punção de 50,8 mm (2 Pol), molde restritivo de 101,6 mm (4 Pol), aplicando-se três diferentes taxas de deslocamento 0,1; 1 e 3 mm/s, e aperto até a profundidade de 9 mm, realizado em máquina universal que permita taxa de deslocamento controlado.

No método de *Squeeze Flow* aplicado em argamassas colantes, quando reavaliados os ajustes do diâmetro e altura da amostra, o diâmetro das placas de contato e configuração do ensaio, a confecção do corpo-de-prova, os dispositivos de porta amostra, a geometria e configuração dos equipamentos, proporcionou-se a avaliação de características como: consolidação, adição de diferentes teores de água e diferentes tipos de morfologia de agregados.

O método de *Squeeze Flow*, além de ser um método de fácil execução, também apresentou boa repetitividade para execução em larga escala, facilmente aplicável na indústria. A adaptação do método utilizando molde restritivo insere grande avanço para aplicação do método em argamassas que não possuem tensão de escoamento suficiente para serem avaliadas no estado livre para escoamento.

Utilizando a mesma configuração desenvolvida no *Squeeze Flow*, o método de *Pull Out Flow* mostrou ser um método em potencial para avaliação da adesão, adesividade e coesão das argamassas colantes. O método é sensível para diferenciar os tipos de argamassas e tem potencial para ser aplicado, também, em outras áreas com a avaliação do tempo em aberto.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Recomenda-se a realização dos seguintes estudos para continuidade da compreensão das características reológicas de produtos cimentícios:

- Aplicação o ensaio de *Pull Out Flow* para entendimento do mecanismo de tempo em aberto de argamassas colantes;
- Continuar o estudar a influência da morfologia dos agregados utilizados em argamassas.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, R.P.N.; JOHN; V.M.; PILEGGI, R.G. **Influência da sequência de mistura nas propriedades reológicas de argamassas avaliadas por squeeze-flow**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. 6ª Florianópolis, 2005.
- ANTUNES, R.P.N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. Tese (Doutorado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- BANFILL P.F.G.; SAUNDERS D.C. **On the viscometric examination of cement pastes**. Cement and Concrete Research. V11. P363-370. 1981.
- BARNES, H. A. **The yield stress a review or everything flows**. Construction and Building Materials. Volume 81, Pages 133 - 178. Março 1998.
- BETIOLI, A. **Influência dos polímeros MHEC e EVA na consolidação de pastas cimentícias**. 2007. 190p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2007.
- BETIOLI, A. M.; JOHN V.M.; PHILIPPE, J.; PILEGGI, R.G. **Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnica P. G.s complementares**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 37-48, out./dez. 2009.
- BETIOLI A.M.; HOPPE FILHO J.; CINCOTTO M.A.; GLEIZE P.J.P.; PILEGGI R.G. **Chemical interaction between EVA and Portland cement hydration at early-age**. Construction and Building Materials. Volume 23, Issue 11, Pages 3332–3336. November 2009.
- CARDOSO, FÁBIO; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Caracterização Reológica de Argamassas pelo Método de Squeeze Flow**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. 6ª Florianópolis, 23 e 25 de maio de 2005. p.121-143.
- CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. 2009. 158p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- CINCOTTO, M. A. **Notas de aula PCC5042 - Aglomerantes de Argamassas e Concretos** – (2008).
- COLLIN, V.; JÉZÉQUEL P. H. **Mixing of concrete or mortars: Distributive aspects**. Cement and Concrete Research. V.39. p678 – 686. 2009
- COSTA, MARIENNE R. M. M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetro reológicos**. São Paulo, 2006. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- COSTA, M. R. M. M.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado e o seu comportamento reológico**. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas,VI, In: Anais, ANTAC, Florianópolis, p 382-

394, 2005.

CORTES, D. D.; KIM, H. K.; PALOMINO, A. M.; SANTAMARINA, J.C. **Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands**. Cement and Concrete Research, 38, p. 1142-47, 2008.

ESTEVEZ L. P.; CACHIM P.B.; FERREIRA V.M. **Effect of fine aggregate on the rheology properties of high performance cement-silica systems**. Construction and Building Materials Construction and Building Materials 24. 640–649. 2010.

ENGMANN, J.;SERVAIS C.; BURBIDGE A.S. **Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review**. J. Non-Newtonian Fluid Mech. 132 1–27p 2005.

FERNANDES, H. C. **Estimativa da energia de lançamento de argamassas projetadas por spray a ar comprimido**. São Paulo, 2007 Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FRANÇA, M.; CARDOSO, F.; PILEGGI, R. **Influência do tempo de mistura nas propriedades reológicas de argamassas**. In: IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2011, Belo Horizonte. Anais Eletrônicos do IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2011.

HOPPE F^o, J.; CARDOSO, F.A.; CINCOTTO, M.A.; PILEGGI, R.G. **Técnicas de caracterização reológica de argamassas**. Aceito para publicação revista eletrônica E-MAT, 2007.

KHAYAT, Kamal H. **Viscosity-Enhancing Admixtures for Cement-Based Materials - An Overview**. Cement and Concrete Composites, v.20, p.171-188. 1998.

KUMARA A.; BISHNOIB S.; SCRIVENER, K. L. **Modelling early age hydration kinetics of alite**. Cement and Concrete Research Volume 42, Issue 7, Pages 903–918, July 2012.

LAVELLE, J. A. **Acrylic látex-modified Portland Cement**. ACI Materials Journal, v 85, n 1, p 41-48, 1988.

MALKIN, A. Y. **Rheology Fundamentals**. ChemTec Publishing. Ontario. Canada. 1994.

MEETEN, G.H. **Squeeze flow of soft solids between rough surfaces**. Rheological Acta, v.43, p.6-16. 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. Ibracon. São Paulo, 2008, 673p.

MIN B.H.; ERWIN L.; JENNINGS H.M. **Rheological behavior of fresh cement paste as measured by Squeeze Flow**. Journal of Material Science, v29, p. 1374–1381. 1994.

OHAMA, Y.; **Polymer-based Admixtures**. Journal Cement and Concrete Composites 20. 1998 189-212p.

OLIVERIA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas – Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico**. São Paulo, Fazendo Arte, 2000, 224p.

ODLER, I. **Hydration, setting and hardening of Portland cement**. In: Hewlett, P.C. (Ed.). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4ed. London: Arnold, 1998, Cap.6, p.241-297.

PATURAL L.; MARCHAL P.; GOVIN A.; GROSSEAU P.; RUOT B. DEVÈS O. **Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars**. *Cement and Concrete Research* 41. 46–55. 2010.

PILEGGI, R. G.; STUDART, A. R.; PANDOLFELLI, V. C. **How mixing affects the rheology of refractory castables**, Part 1, Part2. *American Ceramic Society Bulletin*, Estados Unidos, v. 80, n. 6, p. 27-42, 2001.

PILEGGI. R.G. **Notas de aula PCC 5101 - Reologia de Suspensões Reativas Aplicadas à Construção Civil** – (2009).

PILEGGI. R.G. **Notas de aula PCC 5101 - Reologia de Suspensões Reativas Aplicadas à Construção Civil** – (2009).

POVOAS, Y. V.; V.M.JOHN; M.A. CINCOTTO. **Influência da perda de água por evaporação na resistência à aderência entre argamassa colante e placa cerâmica**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v2, n2, p 7-18. abr/jun2002.

PÓVOAS, Y.V. **Avaliação da formação de "película" na argamassa colante e sua influência na adesão**. 2005. 159p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

POVOAS, Y. V.; V.M.JOHN. **Avaliação da formação de “película” na argamassa colante**. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Civil; BT/PCC/430*. 2006.

POURCHEZ, J., et al. **HPMC and HEMC influence on cement hydration**. *Cement and Concrete Research*, v.36, p.288-294. 2005

ROMANO, R. C. O.; CARDOSO, F. A.; MENDES, T. M.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Impacto do uso de incorporador de ar nas propriedades reológicas de argamassas**. In: VII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2007, Recife. *Anais Eletrônicos do VII Simpósio Brasileiro De Tecnologia De Argamassas*, 2007.

SCHRAMM, G. **Reologia e Reometria Fundamento Teóricos e Práticos**. São Paulo, Artliber Editora, 2006, 232p.

SIMS I.; BROWN B. *Concrete Aggregates. Lea's chemistry of cement and concrete*. Fourth Edition. Edited by Peter C. Hewlett. 2005.

SILVA, D.A.; MONTEIRO, P.J.M. **The influence of polymers on the hydration of portland cement phases analyzed by soft X-ray transmission microscopy**. *Cement and Concrete Research*, v.36, p.1501-1507. 2006.

SEABRA, M.P; LABRINCHA J.A; FERREIRA, V.M. **Rheological behaviour of hydraulic lime-based mortars.** Journal Construction and Building Materials 27. p. 1735–1741. 2007.

SOBOTKA Z. **Rheology of Materials and Engineering Structures.** Elsevier. New York, USA, 1984. 548p.

STEFF, JAMES F. **Rheological Methods in Food Process Engineering.** 2 Ed. East Lansing USA. Freeman Press, 1996. 428p.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** Londres: Academic Press Limited, 1990.

TIRUMKUDULU, M.; RUSSEL, W. B. **Measuring the “tack” of waterborne adhesives.** The Society of Rheology, Inc. Pages 1399-1415. 2003

TOUTOU, Z.; ROUSSEL, N.; LANOS, C. **The squeezing test: a tool to identify firm cement-based material’s rheological behaviour and evaluate their extrusion ability.** Journal Construction and Building Materials 35. p. 1891– 1899. 2005.

VAN DEN BRULE B.H.A.A.; KADIJK S.E. **A simple constant-stress rheometer.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 43. P127-139. 1992

WANG, Y.; WINNIK M.A. **Polymer diffusion across interfaces in latex films.** Journal of Physical Chemistry, v.97, n.11, p.2507-15, 1993.

WAZER, J. R.; LYONS, J. W.; KIM, K. Y.; COLWELL, R. E. **Viscosity and Flow Measurement – A Laboratory Handbook of Rheology.** Interscience Publishers. New York, London and Sydney, 1966. 406p.

WINTHER G.; LARSSON I. KRAMER O. **A Non-Rotational Universal Rheometer. Part II. Experimental Procedures and Results.** Journal of Polymer Testing v10. P263-277. 1991

WESTERHOLMA M.; LAGERBLADA B.; SILFWERBRANDA J.; FORSSBERGB E. **Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars.** Cement and Concrete Composites. Volume 30. Issue 4. Pages 274–282. 2007.

YANG M.; JENNINGS H.M. **Influences of Mixing Methods on the Microstructure and Rheological Behavior of Cement Paste.** Advanced Cement Based Materials, 2, 70-78. 1995.

APÊNDICE A - APLICAÇÃO DA ARGAMASSA COLANTE

Etapa 1 Mistura: O processo de aplicação se inicia pela mistura da argamassa que predominantemente é manual, dificultando a homogeneidade e a dispersão de todos os seus constituintes como mostrado nas Figura 54 e Figura 55. O aplicador introduz a água no pó e realiza a homogeneização utilizando uma colher de pedreiro ou enxada.

Figura 54 - Adição da água ao pó em uma mistura de argamassa colante

Figura 55 - Homogeneização da argamassa colante

Etapa 2 Aplicação: Após a mistura completa do produto o profissional aplica uma pequena quantidade sobre o substrato, Figura 56, com o auxílio da desempenadeira (ferramenta de aplicação metálica). Nesse momento a argamassa precisa apresentar uma consistência leve, por conta da taxa de cisalhamento que vai ser submetida, para que possa ser espalhada sobre o substrato.

Figura 56 - Aplicação da argamassa colante com a desempenadeira dentada sobre reboco

Figura 57 - Impregnação da argamassa na ferramenta de trabalho (colher de pedreiro)

A quantidade de material que fica impregnado na ferramenta também é avaliada (Figura 57). Materiais extremamente adesivos dificultam a aplicação, pois em vez do produto aderir ao substrato, fica aderido na ferramenta, reduzindo a produtividade. É importante ressaltar o fato de que, se a argamassa não apresentar uma consistência viscosa, o entendimento é de não aderência.

Figura 58 - Assentamento da peça cerâmica sobre argamassa aplicada com desempenadeira

Figura 59 - Verificação da impregnação da argamassa no tardo da peça cerâmica

Após o espalhamento da argamassa no substrato, o aplicador coloca as peças (Figura 58) e exerce uma pressão para o esmagamento dos cordões. Uma boa cobertura da peça do revestimento cerâmico (Figura 59) indica a adesividade a fresco.

APÊNDICE B - MÉTODO DE DESLIZAMENTO

Originado na norma europeia para caracterização de argamassas colantes, o ensaio de deslizamento é o único método a fresco preconizado na norma brasileira vigente. Este método determina a resistência ao deslocamento de uma placa assentada, como por exemplo, o deslocamento vertical de um azulejo após ser fixado em uma parede com argamassa.

Este consiste na aplicação de uma porção de argamassa sobre uma placa de concreto desempenada (substrato padrão) na posição horizontal. Após 2 minutos são colocadas 3 peças de porcelanato (corpos-de-prova) no sentido transversal ao aplicado e colocam-se pesos de 50 N sobre as peças por 30 segundos. A Figura 60 apresenta o aparato para o ensaio de acordo com a NBR 14081-5 (2012).

Após 30 segundos, retiram-se os pesos e realizam-se medições iniciais da distância (L_i) em relação à borda da placa em dois pontos distintos de cada peça de porcelanato. Levanta-se a placa substrato e após 20 minutos, com cuidado, coloca-se a placa na posição horizontal novamente. Em cada peça, realizam-se duas novas medidas finais da distância (L_f). A Figura 61 mostra a indicação do local para a leitura das medidas.

Sistema de leitura

Figura 60 - Aparato para o ensaio de deslizamento

Figura 61 - Indicação dos pontos para as medidas de posição das placas

Calcula-se o deslizamento médio de posição (L) das três placas como a média dos 6 deslizamentos ($L_f - L_i$) apurados no ensaio mediante a seguinte fórmula:

$$L = \frac{\Sigma(L_f - L_i)}{6} \quad \text{Equação 4}$$

Expressasse o resultado L em milímetros, com aproximação da primeira decimal, caso L seja superior a 0,7 mm; a argamassa é considerada não conforme.

Nesse tipo de ensaio a amplitude dos resultados pode ter diversas origens como: diferenças no controle de condições de temperatura e umidade no local de ensaio; corte do corpo-de-prova do porcelanato e verificação do peso; diferenças entre corpos-de-prova como: fabricante, peso, superfície e absorção; perpendicularidade do aparato para acomodação da placa substrato padrão; nivelamento da bancada; planicidade da desempenadeira e tamanho dos dentes (6x6x6 mm); impregnação do tardo (superfície de aplicação) do corpo-de-prova após grande quantidade de ensaios (aproximadamente 10); limpeza e secagem dos corpos-de-prova; interferência da rugosidade e planicidade dos substratos e quantidade de argamassa entre cordões.

APÊNDICE C - CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSA ANIDRA

Ensaio realizados:

Determinação dos teores de finos e agregados: 2 amostras de 300 g de material foram peneiradas em malha 200 (75 μm) por 30 minutos em peneirador automático tipo “Ro-Tap”. Os materiais passantes (finos < 75 μm) e retidas (agregados > 75 μm) foram pesados.

Distribuição granulométrica: foi utilizado o granulômetro a laser (Malvern MSS Mastersizer). Os finos foram dispersos em álcool, enquanto os agregados mais grossos foram ensaiados dispersos em ar para a realização do ensaio.

Massa específica: foi determinada através do picnômetro de gás Hélio (MultiPycnometer – Quantachrome Instruments)

Superfície específica: foi determinada através da adsorção de gases, utilizando a técnica de BET (Brunauer, Emmett, Teller) e gás nitrogênio (Micromeritics ASAP 2010).

Determinação da forma das partículas: foi utilizado um analisador de tamanho e forma de partículas por imagem dinâmica digital (CAMSIZER).

Influência do diâmetro do molde

Influência da taxa de deslocamento

Influência do tempo de consolidação

Influência do teor de água

Caso 1 - Curvas de tração para ACI com areia natural com e sem finos.

Caso 2 - Curvas de tração para ACI com areia natural com e sem finos.

Caso 2 - Curvas de tração para ACI com areia artificial com e sem finos.

APÊNDICE E - ADESIVIDADE INSTANTÂNEA – TACK TEST

Em uma tentativa de desenvolver alternativa para medir a adesividade, foi testado o ensaio de *Pull Out Flow*, introduzindo o punção somente 1 mm na amostra com uma taxa de deslocamento de 5 mm/s.

Figura 62 – Adesividade: Repetições realizadas com ACI e ACIII, aperto até a profundidade de 1 mm, com a taxa de deslocamento de 5 mm/s – *Pull Out Flow* tração.

De acordo com a Figura 62, o método não foi sensível para diferenciar a adesividade da ACI e ACIII, indicando que 1 mm de profundidade pode não ser suficiente para impregnar no punção a ponto de conseguir medir qual a força de adesão da argamassa. Outros substratos do punção (cerâmica, lixa etc.) não foram testados, portanto não podemos avaliar todo o potencial do método.

As cargas de compressão também foram avaliadas, conforme mostradas na Figura 63:

Figura 63 – Adesividade: Repetições realizadas com ACI e ACIII, aperto até a profundidade de 1 mm, com a taxa de deslocamento de 5 mm/s – *Squeeze Flow* compressão.

Para as cargas de compressão o arranjo não refletiu uma diferença significativa entre as Argamassas ACI e ACIII. As curvas das cargas de compressão da ACIII foram menores que na ACI, não refletindo a percepção do aplicador. As curvas ficaram sobrepostas, não evidenciando a diferença de adesividade entre as argamassas.

Utilizando a taxa de deslocamento para compressão e tração de 5 mm/s com profundidade de 1 mm não foi possível diferenciar as argamassas ACI e ACIII, o teste mostrou que os parâmetros precisam ser ajustados. O teste de tack necessita ser melhor estudado para explorar todo o seu potencial.