FÁBIO ALONSO CARDOSO

MÉTODO DE FORMULAÇÃO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO BASEADO EM DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA E COMPORTAMENTO REOLÓGICO

SÃO PAULO
2009

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica

Departamento de Engenharia
de Construção Civil - PCC

FÁBIO ALONSO CARDOSO

MÉTODO DE FORMULAÇÃO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO BASEADO EM DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA E COMPORTAMENTO REOLÓGICO

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

SÃO PAULO
2009

FÁBIO ALONSO CARDOSO

MÉTODO DE FORMULAÇÃO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO BASEADO EM DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA E COMPORTAMENTO REOLÓGICO

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Associado Vanderley Moacyr John

SÃO PAULO
2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Cardoso, Fábio Alonso
Método de formulação de argamassas de revestimento ba - seado em distribuição granulométrica e comportamento reoló- / gico / F.A. Cardoso. -- São Paulo, 2009.
138p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1. Argamassa (Revestimentos) 2. Reologia 3. Granulometria I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II. t.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Carmen e Fernando e aos meus irmãos Ana Paula e Nando por todo o apoio e carinho.

Meus sinceros agradecimentos ao professor Vanderley John pela orientação e ensinamentos no doutorado e ao professor Rafael Pileggi pela confiança e inúmeras contribuições para minha formação profissional e pessoal.

Agradeço ao César Romano pelo companheirismo no laboratório e, sobretudo, amizade. Ao amigo Thiago Mendes pela extensa e cuidadosa caracterização das argamassas. Ao Mário Takeashi pelo apoio nos ensaios e organização do laboratório. Aos colegas do Laboratório de Microestrutura Waleska, Eliane, Daniel e Brunoro, pela indispensável ajuda durante a aplicação das argamassas. Aos alunos de iniciação científica Fábio e Márcia pelo cuidado na realização dos ensaios. Aos colegas de pós-graduação Cléber, Rui, Flávio, Bruno e Heloísa pelas discussões dos mais variados assuntos.

À Engrácia Bartuciotti pelo constante auxílio administrativo. A Patrícia, Rogério e Edson pelo socorro em assuntos de informática. Adilson, Reginaldo, Thalita e Renata pela ajuda nos ensaios nos laboratórios do Departamento.

À professora Maria Alba pelas aulas de pós-graduação e discussões técnicas. À professora Mércia Barros pela colaboração no estudo da aplicação das argamassas.

Muito obrigado ao Fábio Campora, CONSITRA e indústrias parceiras (Votomassa e Cimpor) no consórcio pela imensa colaboração ao desenvolvimento do projeto.

Ao Paul Houang (Weber) por providenciar os produtos europeus.

À FAPESP pelo suporte financeiro.

RESUMO

O desempenho final das argamassas depende das matérias-primas e de suas proporções na formulação, pois estas determinam o comportamento do material na etapa de aplicação e a microestrutura final do material endurecido. Entre as patologias de revestimentos, a falha de aderência é um dos fenômenos mais freqüentes, sendo originada pela incompatibilidade entre o comportamento reológico da argamassa e a energia de lançamento utilizada, resultando em defeitos na interface argamassa substrato. A adequação das características reológicas das argamassas às solicitações envolvidas na aplicação fornece condições de processamento mais favoráveis para a obtenção das máximas propriedades finais do revestimento. Assim, o objetivo do trabalho é desenvolver critérios de formulação, baseados nas características das matérias-primas, nos modelos de empacotamento de partículas e nos comportamentos reológicos, de modo a obter um método de formulação de argamassas.

O método de squeeze-flow foi desenvolvido com sucesso para avaliação reológica de argamassas, sendo as principais variáveis experimentais foram estudadas, assim como o efeito do tipo de mistura no comportamento reológico. Procedimento para quantificação da segregação pasta-agregado foi criado, tendo em vista o intenso efeito que este fenômeno exerce sobre o comportamento reológico em squeeze-flow, especialmente em baixas velocidades. Foi ainda comprovado que o squeeze-flow tem boa relação com a percepção do pedreiro, principalmente, nas etapas de lançamento e aperto. Diversas argamassas nacionais e européias foram caracterizadas, resultando em um mapeamento das características de formulação, do comportamento reológico e das propriedades no estado endurecido. Através da aplicação de conceitos de empacotamento e distância de separação de partículas, foi verificado que a otimização do empacotamento de agregados permite um melhor aproveitamento da pasta para promover argamassas com comportamento reológico mais adequado à aplicação ou com menor consumo de finos e água. As correlações estabelecidas entre as características no estado fluido e as propriedades no estado endurecido permitem prever o comportamento das propriedades no estado endurecido com boa confiabilidade. Por fim, são descritas diretrizes sistemáticas para a formulação de argamassas considerando requisitos de desempenho tanto no estado fresco quanto no endurecido.

FORMULATION METHOD FOR RENDERING MORTARS BASED ON PARTICLE SIZE DISTRIBUTION AND RHEOLOGICAL BEHAVIOR

ABSTRACT

The in-use performance of rendering mortars depends on the raw materials features and their content in the formulation, since they have major influence on the material behavior during emplacement, as well as, on its final properties. Adherence failure is one of the most frequent problems of this class of building materials, caused by the incompatibility between rheological behavior and the application process, generating mortar/substrate interface flaws. A rheological behavior more suitable to the application demands, provides appropriate conditions to obtain maximum final rendering properties. Therefore, the main goal of this work is to develop mix-design parameters based on raw materials features, particle packing models and rheological behavior, in order to create a mix-design method for mortars.

Squeeze-flow technique was successfully adapted for the rheological evaluation of rendering mortars, and the most important experimental parameters were studied. The method is sensitive enough to measure rheological changes as a function of the mixing process applied. Considering that phase segregation plays an important role on the rheological behavior of concentrated suspensions especially at low speeds, a method was developed to measure paste-aggregate segregation. It was also established that the squeeze-flow agrees well with the worker's perception during manual emplacement. Several Brazilian and European products were evaluated, and significant differences were determined on the formulation features, rheological behavior and hardened properties. Using models of particle packing and particle distance, it was verified that optimized packing of aggregates enhances rheological behavior and can also allow the reduction of water and fine particles consumption. The experimental relationships established between fresh characteristics, rheological behavior and final properties can be used to predict hardened features and properties with fair confidence. Lastly, mix-design suggestions are made considering both fresh and hardened performance.

SUMÁRIO

1 Introdução 1

1.1 Contexto 1

1.2 Objetivo 2

1.3 Estrutura da Tese 3

2 Técnicas de caracterização reológica 5

2.1 Conceitos Básicos de Reologia 5

2.2 Modelo Microestrutural – Reológico de Argamassas 6

2.3 Técnicas de Caracterização Reológica de argamassas 7

2.3.1 Dropping-ball 8

2.3.2 Mesa de Consistência (Flow-table) 9

2.3.3 Reômetros 11

2.3.4 Squeeze-flow 13

3 Desenvolvimento do método squeeze-flow 17

3.1 Objetivo 17

3.2 Equipamentos e acessórios 17

3.3 Parâmetros de ensaio 19

3.3.1 Controle do teste 19

3.3.2 Configuração 19

3.3.3 Grau de deformação e taxa de deslocamento 20

3.4 Procedimento experimental 20

3.5 Tratamento de dados 22

3.6 Análise e interpretação de resultados 23

3.7 Exemplos de Avaliação de argamassa de revestimento 25

3.7.1 Influência do teor de água e tempo de consolidação 25

3.7.2 Influência do teor de ar incorporado 28

3.7.3 Influência da taxa de deslocamento 29

3.7.4 Determinação da segregação 31

3.7.5 Influência da relação D/h 34

3.7.6 Influência da rugosidade das placas 35

3.8 Squeeze-flow x métodos tradicionais 37

3.9 Determinação de parâmetros reológicos 40

3.10 Conclusões do capítulo 41

4 Caracterização física de argamassas do mercado 42

4.1 Objetivo 42

4.2 Materiais 42

4.3 Métodos de análise 43

4.4 Resultados 43

4.5 Conclusões do capítulo 50

5 Comportamento de mistura de argamassas 51

5.1 Objetivos 51

5.2 Fundamentos teóricos 51

5.3 Influência do tipo de mistura no comportamento reológico de argamassas avaliado por squeeze-flow 54

5.3.1 Experimental 54

5.3.2 Teor de ar 55

5.3.3 Squeeze-flow 56

5.4 Determinação da energia de mistura por reometria rotacional 61

5.4.1 Experimental 61

5.4.2 Resultados 62

5.5 Conclusões do capítulo 66

6 Caracterização reológica de argamassas do mercado 68
6.1 Objetivos 68
6.2 Avaliação reológica por reometria rotacional 68
6.2.1 Experimental 68
6.2.2 Resultados 69
6.3 Avaliação reológica por squeeze-flow 72
6.3.1 Experimental 72
6.3.2 Resultados 73
6.4 Conclusões do capítulo 84
7 Conceitos de empacotamento e distância de separação de partículas 85
7.1 Objetivo 85
7.2 Fundamentos teóricos 85
7.2.1 Empacotamento de partículas 85
7.2.2 Distância de separação de partículas: IPS e MPT 86
7.3 Resultados 88
7.4 Conclusões do capítulo 93
8 Propriedades no estado endurecido de argamassas do mercado 95
8.1 Objetivo 95
8.2 Experimental 95
8.2.1 Mistura 95
8.2.2 Cura 95
8.2.3 Porosidade 96
8.2.4 Módulo de elasticidade 96
8.2.5 Resistência à tração 96
8.2.6 Permeabilidade ao ar 96
8.3 Resultados 97
8.3.1 Porosidade 97

8.3.2 Módulo de elasticidade 98
8.3.3 Resistência à tração 99
8.3.4 Permeabilidade 100
8.4 Conclusões do capítulo 102
9 Avaliação da aplicabilidade de argamassas por pedreiros 103
9.1 Objetivo 103
9.2 Experimental 103
9.2.1 Materiais 103
9.2.2 Mistura 104
9.2.3 Pedreiros 104
9.2.4 Avaliação empírica 104
9.2.5 Ensaios 104
9.3 Resultados 105
9.4 Conclusões do capítulo 109
10 Diretrizes de formulação 110
11 Conclusões 113
Referências 115
Apêndice A 121
Apêndice B 123
Apêndice C 128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação esquemática da mesa de fluidez ou consistência. Dinicial = diâmetro inferior do molde cônico; Dfinal = diâmetro médio da argamassa após o espalhamento. 10

Figura 2.2 - Ilustração esquemática de duas argamassas distintas com comportamento de fluidos de Bingham (BANFILL, 2005). 10

Figura 2.3 - Exemplo de perfil de curvas reológicas obtidas através dos reômetros (HOPPE et al., 2007). 12

Figura 2.4 - Reômetros comercializados para caracterização reológica de argamassas. 12

Figura 2.5 - Configuração de squeeze-flow utilizada para avaliação de pastas fluidas (CARDOSO et al., 2009). (1) Punção ou placa superior; (2) Molde restritivo; (3) Pasta de gesso; (4) Base ou placa inferior. 14

Figura 2.6 - Representação esquemática das condições inicial e final do teste de squeeze-flow na configuração de área constante. D = diâmetro do punção (placa superior) = diâmetro da amostra; h0 = altura inicial da amostra; h = altura da amostra variável em função do deslocamento do punção superior. 15

Figura 2.7 - Configuração de squeeze-flow denominada volume constante. Exemplo das linhas de fluxo para as condições de escorregamento na interface - escorregamento nulo (atrito infinito) e escorregamento livre (atrito nulo). 15

Figura 3.1 - Máquina universal de ensaios marca INSTRON (modelo 5569, capacidade 50kN, célula de carga utilizada 1000N). 18

Figura 3.2 - Conjunto de ferramentas necessárias para moldagem das amostras para o ensaio de squeeze-flow. (1) Gabarito; (2) Prato ou placa inferior; (3) Anel para moldagem 101mm de diâmetro; (4) Punção ou placa superior 101mm de diâmetro; (5) Anel para moldagem 50,8mm de diâmetro; (6) Punção 50,8mm de diâmetro; (7) Amostra 101mm de diâmetro moldada e centralizada; (8) Espátula. 18

Figura 3.3 - Geometria utilizada nos ensaios de squeeze-flow em argamassas de revestimento. Dimensões da amostra de argamassa: (a) Diâmetro inicial = 50,8mm, altura inicial = 10 mm; (b) Altura final = 7,5mm; (c) Diâmetro inicial = 101 mm, altura inicial = 10mm; (D) Altura final = 7,5 mm. 20

Figura 3.4 - (a) preenchimento do molde com quantidade excessiva de argamassa e acomodamento da argamassa evitando a compactação; (b) nivelamento da amostra através de razamento com a espátula; (c) retirada da metade do gabarito; (d) retirada do molde e amostra está centralizada e pronta para ser ensaiada._____21

Figura 3.5 - Exemplo de ajuste matemático de uma curva experimental de squeeze-flow que apresenta oscilação na carga causada pelo fluxo descontínuo de uma argamassa de revestimento ensaiada a 0,1mm/s._____23

Figura 3.6 - Perfil típico de carga vs. deslocamento de um ensaio de squeeze-flow realizado com deslocamento controlado. Estágio I: pequeno deslocamento - deformação elástica; estágio II: deslocamento intermediário - deformação plástica e/ou fluxo viscoso; estágio III: grande deslocamento - enrijecimento por deformação (strain-hardening)._____24

Figura 3.7 - Influência do teor de água e tempo de consolidação no comportamento reológico de uma argamassa de revestimento (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005)._____26

Figura 3.8 - Imagem da argamassa com 13% de água testada 60 minutos após a mistura. Presença de trincas evidenciando a perda de coesão e capacidade de deformação plástica.__27

Figura 3.9 - Curvas de carga vs. deslocamento obtidas por squeeze-flow das argamassas com 15% de água, sem e com a adição de 1% de incorporador de ar. As amostras com 15 e 60 minutos após mistura foram submetidas à deformação de 2,5mm em taxa de 0,01mm/s (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005)._____29

Figura 3.10 - Influência da velocidade de deslocamento no comportamento reológico. (a) argamassa de revestimento com 13% de água. (b) 15% de água. As amostras foram ensaiadas 15 minutos após a mistura com velocidades de 0,01, 0,1 e 1mm/s. Diâmetro 50,8mm. Altura 10mm (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005)._____30

Figura 3.11 - Resultados de squeeze-flow das argamassas Alfa e H realizados em diferentes velocidades. Diâmetro amostra = 50,8mm; Altura inicial = 10mm._____32

Figura 3.12 - Divisão do corpo-de-prova em regiões para a quantificação da separação de fases. A linha pontilhada externa representa o diâmetro inicial da amostra (D_0); a região interna (cinza clara) é denominada Centro (D_C=0.5D0) e a parte exterior (cinza escura) é a Borda, entre o Centro e o diâmetro final da amostra (D_F)._____33

Figura 3.13 - Resultados de segregação de fases das argamassas Alfa e H após ensaios de squeeze-flow realizados em diferentes velocidades. (a) Diferença relativa (% em massa); (b) Diferença específica (%massa/mm)._____33

Figura 3.14 - Squeeze-flow da argamassa Alfa ensaiada com diâmetros e velocidades distintos. AC50 – diâmetro 50,8mm; AC100 – diâmetro 101mm; Altura das amostras 10mm._____34

Figura 3.15 - Squeeze-flow da argamassa H ensaiada com diâmetros e velocidades distintos. AC50 – diâmetro 50,8mm; AC100 – diâmetro 101mm; Altura das amostras 10mm._____35

Figura 3.16 - Resultados de squeeze-flow da argamassa Alfa na configuração AC50 ensaiadas 15 minutos após a mistura. Os gráficos (a), (b) e (c) fixam a rugosidade e mostram o efeito da velocidade de ensaio em suas curvas. Os gráficos (d), (e) e (f) exibem essas mesmas curvas, mas fixando a velocidade e evidenciando a influência da rugosidade. Lisa = placas metálicas cromadas lisas; Fina = lixa adesiva e impermeável de carbeto de silício com 35μm de rugosidade; Grossa = lixa similar com rugosidade de 524μm._____36

Figura 3.17 - Separação de fases após testes de squeeze-flow da argamassa Alfa ensaiada com diâmetro de 50,8mm (AC50). (a) Diferença relativa do teor de água em massa entre as regiões Centro e Borda. (b) Diferença específica = diferença relativa em % / deformação aplicada em mm._____37

Figura 3.18 - Resultados obtidos pelos ensaios de *dropping-ball* (a) e mesa de consistência (b) nas argamassas com 13% e 15% em peso de água, com e sem a presença do aditivo incorporador de ar (siglas CI e SI respectivamente). Índice de consistência = $D_{final} - D_{inicial}$. _____38

Figura 3.19 - Resultados obtidos pelos ensaios de *dropping-ball* (índice de penetração), mesa de consistência e squeeze-flow de duas argamassas industrializadas distintas denominadas 1 e 2. (a) Foto da argamassa 1 antes dos impactos no teste de consistência; (b) Foto da argamassa 2 antes dos impactos no teste de consistência; (c) Foto do espalhamento da argamassa 1 após os impactos no teste de consistência, valores de consistência e índice de penetração são indicados; (d) Foto do espalhamento da argamassa 2 após os impactos no teste de consistência, valores de consistência e índice de penetração são indicados; (e) Resultados de squeeze-flow da argamassa 1, ensaiada 15 e 60 minutos após a mistura; (f) Resultados de squeeze-flow da argamassa 2, ensaiada 15 e 60 minutos após a mistura._____39

Figura 4.1 - Distribuição granulométrica discreta das argamassas. Frequência (% volume) vs. diâmetro de partícula (μm). O teor de vazios teórico (porosidade em %) deixado pelo empacotamento dos agregados é indicado ao lado de cada legenda. Os produtos estão dispostos em ordem crescente de porosidade teórica do empacotamento dos agregados nos gráficos (a), (b) e (c)._____47

Figura 4.2 - Distribuição granulométrica discreta das argamassas. Frequência (% volume) vs. diâmetro de partícula (□m). O teor de vazios teórico (porosidade em %) deixado pelo empacotamento dos agregados é indicado ao lado de cada legenda. Os produtos estão dispostos em ordem crescente de porosidade teórica do empacotamento dos agregados nos gráficos (a) e (b), seguindo a seqüência da Figura 4.1._____47

Figura 4.3 - Exemplos de imagens, obtidas com lupa estereoscópica, dos agregados de alguns dos produtos estudados (C, D, F, I, K e R). Barra de referência igual a 5mm._____49

Figura 5.1 - Representação esquemática das camadas adsorvidas de ligação e das pontes líquidas de ligação entre duas partículas (laranja) imersas num meio líquido (azul). Azul claro – líquido de recobrimento da superfície e afastamento das partículas; Azul escuro – líquido de preenchimento dos vazios (PILEGGI, 2001)._____53

Figura 5.2 - Teor de ar incorporado nas argamassas frescas em função do tipo de mistura aplicado. Argamassas dispostas em ordem crescente de ar incorporado resultante da mistura MecAF._____56

Figura 5.3 - Resultados de carga vs. deslocamento obtidos por squeeze-flow das argamassas E (a, b, c) e K (d, e, f) em função do tipo de mistura aplicado: Manual, Norma e MecAF.____57

Figura 5.4 - Resultados de carga vs. deslocamento obtidos por squeeze-flow das argamassas H (a, b, c) e I (d, e, f) em função do tipo de mistura aplicado: Manual, Norma e MecAF. __58

Figura 5.5 - Resultados de carga vs. deslocamento obtidos por squeeze-flow das argamassas C (a, b, c) e M (d, e, f) em função do tipo de mistura aplicado: Manual, Norma e MecAF.____59

Figura 5.6 - Resumo dos resultados de squeeze-flow em função do tipo de mistura aplicado. (a) Manual; (b) Norma; (c) MecAF. São plotados os valores de carga máxima em 2,5mm ou os valores de deslocamento máximo a 1000N das 3 repetições realizadas cada argamassa.__60

Figura 5.7 - Reômetro para argamassas, destacando seus componentes: 1) torre superior; 2) dispositivo rotacional; 3) base de reação e console; 4) elevador; 5) recipiente de ensaio; 6) Geometria de mistura e ensaio composta por haletas radiais montadas em espiral._____62

Figura 5.8 - Curvas de mistura das argamassas testadas no reômetro rotacional. (a) Produtos com energia de mistura abaixo de 550N.m.s. (b) Produtos com energia de mistura acima de 550N.m.s. A energia de mistura é calculada como a área embaixo da curva entre 30 e 250 segundos._____63

Figura 5.9 - (a) Energia de mistura e (b) torque máximo das argamassas ensaiadas no reômetro rotacional._____64

Figura 5.10 - (a) Energia de mistura e (b) torque máximo em função da área superficial das argamassas (Tabela 4.1)._____66

Figura 5.11 - (a) Energia de mistura e (b) torque máximo das argamassas em função do teor de ar obtido através de mistura em argamassadeira com procedimento MecAF (Figura 6.2)._____66

Figura 6.1 - Programa de rotações do teste de ciclo de cisalhamento._____69

Figura 6.2 - Curvas torque vs. rotação dos testes de ciclo de cisalhamento. Apenas as curvas de aceleração são demonstradas para facilitar a visualização._____70

Figura 6.3 - Torque de escoamento em função da área superficial das argamassas._____71

Figura 6.4 - Torque de escoamento em função do teor de ar das argamassas._____72

Figura 6.5 - Distribuição de fases das argamassas nacionais no estado fluido: Agregados e Pasta (Finos + Água + Ar). A distribuição de fases média é indicada._____75

Figura 6.6 - Distribuição de fases das argamassas européias no estado fluido: Agregados e Pasta (Finos + Água + Ar). A distribuição de fases média é indicada._____75

Figura 6.7 - Resultados de squeeze-flow das argamassas brasileiras ensaiadas em três velocidades distintas: (a) 0,1mm/s; (b)1mm/s; (c) 3mm/s. São plotados apenas os valores de carga em 2,5mm de deslocamento e de carga máxima._____77

Figura 6.8 - Aumento de deslocamento máximo das argamassas brasileiras testadas a 1 e 3mm/s em relação ao deslocamento obtido a 0,1mm/s. (a) Escala total; (b) Ampliação da região de grande deslocamento._____79

Figura 6.9 - Resultados de squeeze-flow das argamassas européias ensaiadas em três velocidades distintas: (a) 0,1mm/s; (b)1mm/s; (c) 3mm/s. São plotados apenas os valores de carga em 2,5mm de deslocamento e de carga máxima. Os resultados dos produtos F e Q (nacionais) são também demonstrados como referência para comparação._____80

Figura 6.10 - Aumento de deslocamento máximo das argamassas européias testadas a 1 e 3mm/s em relação ao deslocamento obtido a 0,1mm/s._____81

Figura 6.11 - Deslocamento máximo no squeeze-flow a 0,1mm/s em função da relação água / materiais secos em massa._____82

Figura 6.12 - Deslocamento máximo no squeeze-flow a 0,1mm/s em função do teor de ar das argamassas frescas._____82

Figura 6.13 - Deslocamento máximo no squeeze-flow a 0,1mm/s em função do teor de água + ar das argamassas frescas._____83

Figura 6.14 - Deslocamento máximo no squeeze-flow a 0,1mm/s em função do teor de pasta (finos + água + ar) das argamassas frescas._____83

Figura 7.1 – Ilustração esquemática: (a) Partículas em contato; (b) Partículas separadas por uma distância D em decorrência da adição de fluido em volume suficiente para recobrir a superfície, preencher os vazios deixados pelo empacotamento e, então, afastá-las (PILEGGI, 2001)._____86

Figura 7.2 - Porosidade teórica do empacotamento dos agregados nas argamassas._____89

Figura 7.3 - Redução da porosidade teórica do sistema em relação à do empacotamento de agregados._____90

Figura 7.4 - Relação entre as cargas de squeeze-flow em 2,5mm de deformação (obtidas a 0,1, 1 e 3mm/s) com os valores de MPT das argamassas fluidas._____91

Figura 7.5 - Relação entre o deslocamento máximo no squeeze-flow e os valores de MPT das argamassas fluidas. (a) 0,1mm/s; (b) 1mm/s; (c) 3mm/s._____92

Figura 8.1 - (a) Permeâmetro para argamassas e concretos (PCC-USP): 1 – Porta-amostras para argamassas; 2 – Porta-amostras para concreto; 3 – Manômetro com filtro; 4 – Medidor de

temperatura; 5 – Display de medida de pressão; 6 – Bolhômetro para medida de vazão. (b) Ilustração esquemática do equipamento: P_e – pressão de entrada; P_s – pressão de saída.____97

Figura 8.2 - Porosidade total das argamassas endurecidas em função do teor de água + ar das argamassas no estado fluido. Média dos coeficientes de variação igual a 2%._____98

Figura 8.3 - Módulo de elasticidade em função da porosidade total das argamassas endurecidas. Média dos coeficientes de variação igual a 4%._____99

Figura 8.4 – Resistência à tração por compressão diametral em função da porosidade total das argamassas endurecidas. Média dos coeficientes de variação igual a 14%._____100

Figura 8.5 - Constantes de permeabilidade (a) k_1 e (b) k_2 em função da porosidade total das argamassas. Média dos coeficientes de variação igual a 17% para k_1 e 34% para k_2._____101

Figura 9.1 - (a) Visão geral dos 5 pórticos prontos para serem utilizados. (b) Detalhes do pórtico com chapisco aplicado._____105

Figura 9.2 - Teor de fases em volume das argamassas frescas._____ 106

Figura 9.3 - Resultados de squeeze-flow das argamassas ensaiadas em três velocidades distintas: (a) 0,1mm/s; (b)1mm/s; (c) 3mm/s._____107

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características da argamassa no estado fresco. * AIA = Aditivo incorporador de ar._____**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.1 - Características físicas das argamassas brasileiras no estado anidro. Agreg = teor de agregados em volume; Finos = teor de finos em volume; ρArg = densidade real da argamassa anidra; ρAgreg = densidade real dos agregados; ρFinos = densidade real dos finos; AS Finos = área superficial dos finos; AS Arg = área superficial da argamassa; Água/ms = relação água / materiais secos em massa._____**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.2 - Características físicas das argamassas européias no estado anidro. greg = teor de agregados em volume; Finos = teor de finos em volume; rArg = densidade real da argamassa anidra; rAgreg = densidade real dos agregados; rFinos = densidade real dos finos; AS Finos = área superficial dos finos; AS Arg = área superficial da argamassa; Água/ms = relação água / materiais secos em massa._____**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 6.1 - Densidade aparente e distribuição de fases das argamassas nacionais no estado fluido. Agreg = teor de agregados em volume; Pasta = Finos + Água + Ar em volume; DA = densidade aparente._____**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 6.2 - Densidade aparente e distribuição de fases das argamassas européias no estado fluido. Agreg = teor de agregados em volume; Pasta = Finos + Água + Ar em volume; DA = densidade aparente._____**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 9.1 - Resumo da avaliação empírica das argamassas pelos 3 pedreiros, exibindo com detalhamento os quesitos referentes à etapa de aplicação. Códigos de classificação: ✕= Ruim; ☐ = Regular; ☺ = Boa; ❿ = Ótima._____**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 9.2 - Resumo da avaliação empírica das argamassas considerando todas as etapas avaliadas. Códigos de classificação: ✕= Ruim; ☐ = Regular; ☺ = Boa; ❿ = Ótima._____**Erro! Indicador não definido.**

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

As argamassas de revestimento recobrem paredes, pisos e tetos com funções niveladora, estética (fornecendo acabamento adequado), colaborando para o conforto termo-acústico e, também, para a estanqueidade do sistema de vedação. Desta forma, os requisitos de desempenho em uso das argamassas estão relacionados às propriedades finais no estado endurecido, como a porosidade, as resistências mecânica e de aderência, o módulo elástico e a permeabilidade, parâmetros importantes para promover maior durabilidade e conforto das edificações.

O desenvolvimento microestrutural das argamassas tem início no processo de mistura com água, sendo definidos os estados iniciais de homogeneidade, dispersão das partículas e do teor de ar incorporado do material fluido. Essas características têm grande influência no comportamento reológico das argamassas, sendo este de fundamental importância para possibilitar uma aplicação produtiva e, principalmente, minimizar os defeitos de moldagem.

Entre as patologias de revestimentos, a falha de aderência é um dos fenômenos mais freqüentes e graves, causando prejuízos financeiros (e de imagem) a fabricantes de insumos, construtores e usuários, restringindo a utilização dos produtos e oferecendo risco à população. Essas falhas são causadas por defeitos na interface substrato / argamassa, originados durante a aplicação do material fresco contra o substrato (ANTUNES, 2005). Quando o comportamento reológico da argamassa não é adequado à energia de lançamento utilizada, são criados vazios na região da interface que permanecem após o endurecimento, reduzindo a área de contato e, conseqüentemente, a aderência entre o revestimento e a base (ANTUNES, 2005). Portanto, a adequação das características reológicas das argamassas às solicitações envolvidas na aplicação (seja manual ou mecânica) fornece condições de processamento mais favoráveis para a obtenção das máximas propriedades finais do revestimento.

Tais propriedades máximas possíveis são determinadas pelas características da formulação ou dosagem (composição química, granulometria, teor de água, aditivos e adições, etc), geralmente constituídas por areia, cimento, cal hidratada e água, podendo conter adições minerais e/ou aditivos orgânicos (plastificante, lubrificante, incorporador de ar, etc.).

A abordagem de formulação tradicionalmente utilizada foca prioritariamente as propriedades finais (monitorando parâmetros que as definem, como a relação água/cimento) e

o custo do produto (GOMES; NEVES, 2002; SELMO, 1989), considerando de uma forma secundária aspectos como a distribuição granulométrica e o comportamento do material no estado fluido (avaliado apenas pela consistência normal). Entretanto, a utilização de novos materiais – como tipos de cimento com diferentes adições em elevados teores, utilização de areia britada, aditivos orgânicos –, a necessidade de incorporar os conceitos de sustentabilidade no produto argamassa – através da utilização de resíduos de mineração, construção e demolição, redução do consumo de cimento –, aliados a maior exigência quanto ao ritmo construtivo e à produtividade da mão-de-obra, fizeram necessário o desenvolvimento de critérios sistemáticos e métodos confiáveis para a caracterização e formulação e das argamassas.

A criação em 2004 do CONSITRA – Consórcio Setorial para Inovação em Tecnologia de Revestimentos de Argamassa – refletiu essa necessidade. O Consórcio (do qual a presente pesquisa faz parte) formado pela união entre a indústria (ABAI, ABCP), o consumidor (SINDUSCON SP) e a academia (Escola Politécnica da USP e Universidade Federal de Goiás), visa o desenvolvimento de novas tecnologias em revestimentos de argamassa caracterizadas por confiabilidade, produtividade, e custo compatível com o mercado nacional, aumentando a qualidade e durabilidade de edifícios e obras de infra-estrutura através da melhoria no próprio desempenho das argamassas (CONSITRA, 2004).

Neste contexto, a presente tese de doutorado contempla o conceito de formulação granulométrico-reológico, utilizando as características físicas das matérias-primas e conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para ajustar a formulação às diferentes exigências reológicas e de propriedades finais, através da combinação das matérias-primas de forma controlada e eficiente. Para isso, técnicas precisas e confiáveis de caracterização física das matérias-primas e reológica das argamassas são utilizadas e desenvolvidas (quando necessário), visto que são imprescindíveis para o desenvolvimento do método.

1.2 OBJETIVO

Esta tese de doutorado encontra-se inserida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil e Urbana da Escola Politécnica (PCC – USP) e tem como principal objetivo **desenvolver um método para formulação de argamassas de revestimento com base em conceitos de empacotamento de partículas e critérios reológicos**, considerando às exigências de desempenho no estado endurecido e de custo.

Para tanto são necessários como objetivos intermediários:

(a) adequação de técnicas precisas para a caracterização reológica de argamassas durante mistura e aplicação;

(b) avaliação dos produtos do mercado quanto às características físicas das formulações, ao desempenho nos estados fresco (comportamento reológico) e endurecido (propriedades finais);

(c) definição de critérios reológicos através da avaliação da aplicabilidade de argamassas por pedreiros e sua co-relação com as características de formulação e comportamento reológico.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

- Capítulo 1 – **Introdução**
- Capítulo 2 – **Técnicas de caracterização reológica**
  Revisão dos conceitos básicos de reologia, modelo micoestrutural-reológico de argamassas e técnicas de caracterização reológica.
- Capítulo 3 – **Desenvolvimento do método squeeze-flow**
  Descrição da metodologia desenvolvida para a utilização da técnica na avaliação de argamassas de revestimento. Determinação da influência dos parâmetros experimentais. Comparação com métodos tradicionais.
- Capítulo 4 – **Caracterização física de argamassas do mercado**
  Seleção e detalhada caracterização física no estado anidro do conjunto de produtos do mercado avaliado nos capítulos seguintes.
- Capítulo 5 – C**omportamento de mistura**
  Avaliação do efeito do tipo de mistura realizada em laboratório no comportamento de squeeze-flow das argamassas. Determinação da energia de mistura através de reometria rotacional. Escolha do procedimento de mistura utilizado nos Capítulos 6 e 8.
- Capítulo 6 – **Caracterização reológica de argamassas do mercado**
  Avaliação reológica por squeeze-flow e reometria rotacional do conjunto de argamassas de revestimento estudado.
- Capítulo 7 – C**onceitos de empacotamento e distância de separação de partículas**

Revisão dos conceitos. Determinação da porosidade de empacotamento no estado anidro e das distâncias entre as partículas dos produtos selecionados no estado fresco. Interpretação dos comportamentos reológicos em função de tais parâmetros.

- Capítulo 8 – P**ropriedades no estado endurecido de produtos do mercado**
  Determinação da porosidade, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral e permeabilidade do conjunto de argamassas avaliado. Relação entre propriedades no estado endurecido e as características das argamassas no estado fresco.

- Capítulo 9 – **Avaliação da aplicabilidade de argamassas por pedreiros**
  Aplicação ($\approx 1m^2$) de argamassas com comportamentos reológicos distintos por 3 pedreiros. Avaliação empírica através de questionário padronizado. Determinação de critérios reológicos através da associação da percepção dos pedreiros com os resultados de squeeze-flow.

- Capítulo 10 – **Diretrizes de formulação**
  Diretrizes de formulação baseadas no conhecimento gerado ao longo da pesquisa.

- Capítulo 11 – **Conclusões**

- **Bibliografia**

- Apêndices
  A – Fotos dos agregados
  B – Curvas de squeeze-flow das argamassas do mercado
  C – Dados da avaliação da aplicabilidade por pedreiros

2 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

Na estrutura da tese, este capítulo visa apresentar os conceitos básicos de reologia e o modelo microestrutural das argamassas no estado fresco o qual será utilizado no decorrer da pesquisa. Revisa de forma crítica os principais métodos reológicos utilizados em argamassas, considerando a importância de medir corretamente o comportamento das mesmas para o presente trabalho, uma vez que as diretrizes de formulação serão, em parte, baseadas nas características reológicas julgadas adequadas para cada situação.

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE REOLOGIA

Reologia (rheos = fluir, logos = estudo) é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, avaliando as relações entre a tensão de cisalhamento aplicada, e a deformação em determinado período de tempo (GLATTHOR; SCHWEIZER, 1994). Assim, o comportamento reológico dos materiais é representado por relações entre o fluxo ou deformação com as forças a que são submetidos.

A viscosidade de um fluido é uma constante que relaciona a taxa com a tensão de cisalhamento, conforme segue

$$\tau = F/A = \eta\gamma$$

F= força; A = área; τ = tensão de cisalhamento (N/m^2 = Pa); γ = taxa de cisalhamento (s^{-1}); η = viscosidade (Pa.s).

No caso da reologia de suspensões, as partículas sólidas no meio de um fluido perturbam as linhas de fluxo aumentando a resistência do sistema ao escoamento, ou seja, elevando a viscosidade (OLIVEIRA et al., 2000). As características reológicas das suspensões são afetadas por diversos fatores, entre eles: concentração volumétrica de sólidos, características do meio líquido, temperatura, tempo decorrido desde o início da mistura (especialmente no caso de suspensões reativas), características físicas das partículas (distribuição granulométrica, densidade, morfologia, área superficial e rugosidade) e tipo de interação das partículas no meio (estado de dispersão) (OLIVEIRA et al., 2000).

Como resultado, em composições com altas concentrações de partículas, como no caso das argamassas, estas passam a interagir mais intensamente, fazendo que a reologia do sistema desvie do modelo ideal de Newton para comportamentos não-lineares, como:

- Pseudoplástico - a viscosidade da suspensão diminui com o aumento da taxa (ou tensão) de cisalhamento;
- Dilatante - aumento da viscosidade do sistema com a taxa de cisalhamento. É um comportamento típico de suspensões concentradas;

Adicionalmente, as suspensões podem apresentar uma tensão mínima necessária para que se inicie o fluxo, ou seja, uma tensão de escoamento. Quando solicitados por tensões abaixo da de escoamento, os materiais comportam-se como sólidos rígidos (GLATTHOR; SCHWEIZER, 1994; OLIVEIRA et al., 2000; PILEGGI, 2001). Os materiais que apresentam pseudoplasticidade ou dilatância com tensão de escoamento são denominados fluidos de Bingham. Ainda, o comportamento dos materiais pode depender da história ou tempo de cisalhamento, apresentando tixotropia (redução da viscosidade aparente em função do tempo quando a suspensão está sob cisalhamento constante) ou reopexia (aumento da viscosidade em função do tempo de cisalhamento).

2.2 MODELO MICROESTRUTURAL – REOLÓGICO DE ARGAMASSAS

Sob esta ótica as argamassas podem ser descritas, de modo simplificado, como suspensões bifásicas concentradas compostas por uma fração "grossa" inerte (areia), com partículas entre 100μm e 2mm aproximadamente, e uma pasta reativa de água e "finos", geralmente, cimento e cal, conforme a ilustração na Figura 2.1.

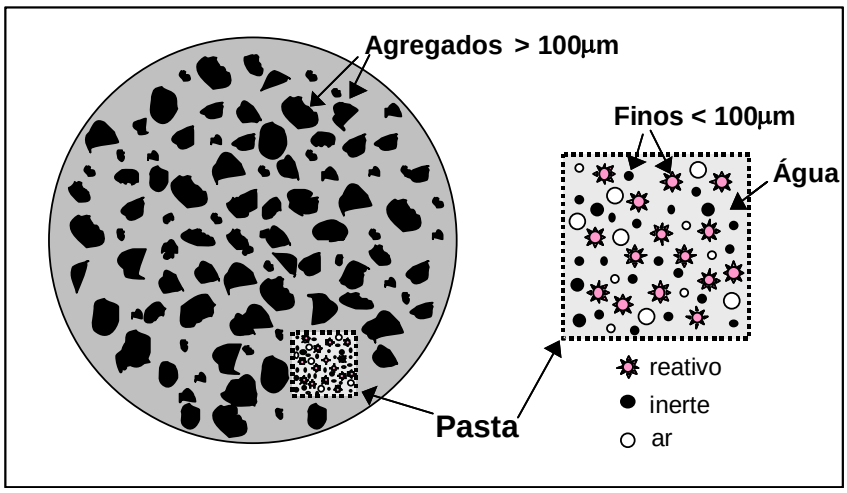


Figura 2.1 - Ilustração esquemática da microestrutura de uma argamassa no estado fresco.

Em condições de cisalhamento no estado fresco, a fração das partículas grosseiras é predominantemente sujeita a fenômenos mássicos (atrito e impacto), enquanto a fração fina

(<100μm) é afetada por fenômenos de superfície e reações de hidratação. Devido, principalmente, à reação do cimento com a água, e também à secagem, as argamassas passam de um estado fluido para o de sólido elástico (estado endurecido). Durante este período o comportamento reológico do material se modifica em função dos diversos fenômenos envolvidos, como dissolução, aglomeração, precipitação de fases hidratadas ligantes, alterações no pH e ação de eventuais aditivos (dispersantes, retardadores, etc). Assim, uma argamassa pode ser definida como um material cujas propriedades são determinadas pela interação do conjunto de grãos grossos imersos na matriz fluida e reativa.

Através de uma abordagem mais detalhada, verifica-se que as argamassas são, de fato, produtos com características multifásicas, pois muitas formulações apresentam pozzolanas, filler (finos inertes), fibras (naturais ou sintéticas) e teores consideráveis de ar incorporado. Deste modo, tendem a apresentar comportamento reológico complexo não somente devido à natureza multifásica e reativa, mas também devido às diversas solicitações a que são submetidas nas etapas de preparo (mistura) e aplicação (lançamento e acabamento).

De forma geral, uma argamassa deve apresentar idealmente um comportamento pseudoplástico para facilitar espalhamento, nivelamento e acabamento, mas com elevada viscosidade ou uma considerável tensão de escoamento para manter-se estável após as etapas citadas. Contudo, a generalização do comportamento ideal para argamassas é limitada considerando que cada método de aplicação e finalidade pode requerer características particulares do material.

2.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE ARGAMASSAS

Em contraste à complexidade dos comportamentos reológicos que as argamassas podem apresentar, estas são tradicionalmente caracterizadas por ensaios simples como a mesa de fluidez, o método do dropping-ball e os penetrômetros. Estes ensaios avaliam a consistência do material de acordo com o conceito de trabalhabilidade, havendo níveis de consistência pré-estabelecidos que permitem a aplicação. Existem ainda outros tipos de teste como flow cone test, plastômetro de Voss, Vane test e Gtec Test (HOPPE et al., 2007).

O American Concrete Institute (ACI 116R-00, 73) define a trabalhabilidade como: “a propriedade de um concreto ou argamassa no estado fresco que determina a facilidade com que estes podem ser misturados, aplicados, consolidados e acabados a uma condição homogênea”. Outras entidades ainda incluem o grau de resistência à segregação das fases do

sistema (KOEHLER; FOWLER, 2003). O conceito de trabalhabilidade é de certa forma relativo, pois depende não somente das propriedades do material (argamassa ou concreto), mas também da forma de aplicação e do método de avaliação.

Os testes reológicos podem ser classificados como estáticos e dinâmicos (KOEHLER; FOWLER, 2003). Nos testes dinâmicos a energia é fornecida ao material através de ações como vibração, impacto ou cisalhamento. Já os testes estáticos, baseiam-se apenas no fluxo do material sobre seu próprio peso.

2.3.1 Dropping-ball

Este método de caracterização é baseado na queda livre de uma esfera (onde o tamanho e peso da esfera e a altura da queda são padronizados) sobre uma argamassa moldada em um cilindro metálico, Figura . Os resultados são expressos na forma de índice de penetração, não utilizando unidades fundamentais. É um ensaio geralmente relacionado à tensão de escoamento do material, mas deve-se levar em conta que existe a influência do impacto da bola no material e que a densidade da argamassa influi bastante na medida (como no caso de materiais com ar incorporado). Há também a possibilidade de determinado material, sob a taxa de cisalhamento imposta, não permitir ou permitir minimamente a penetração da esfera, por apresentar alta viscosidade, ou seja, por ter comportamento dilatante, sua caracterização através desta técnica a inviabiliza por baixa fluidez, porém ao manuseá-la, em taxas de cisalhamento inferiores à do ensaio, seu comportamento reológico torna-a propícia para determinadas aplicações. A presença de fibra na argamassa pode distorcer o índice de penetração em virtude de minimizar a penetração da esfera pela formação de uma “rede” que dissipa a energia por deformação elástica no volume da amostra (HOPPE et al., 2007). Além disso, no caso de sedimentação da fase grossa a medida é comprometida. Norma relacionada: Inglaterra – BS 4551.

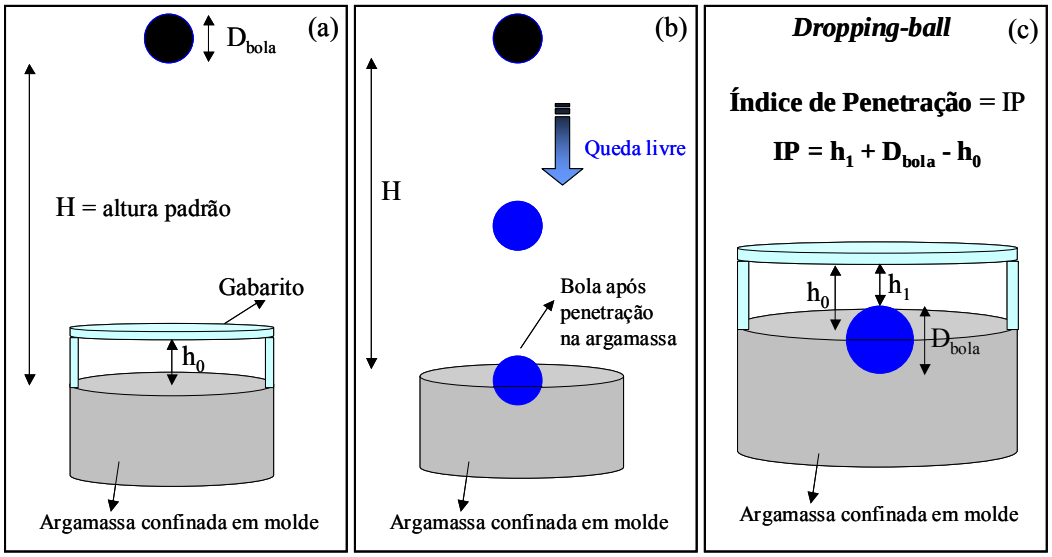


Figura 2.2 - Ilustração esquemática do teste Dropping-ball. Queda livre de uma esfera a partir de uma altura padrão.

2.3.2 Mesa de Consistência (Flow-table)

O teste consiste em medir o espalhamento horizontal de uma argamassa moldada na forma de um cone padrão, onde o material é submetido a sucessivos impactos após a retirada do cone, Figura 2.1. Existem algumas variações do teste, mudando principalmente o número e freqüência de impactos. O método apresenta a vantagem de ser dinâmico, assim, considerando também a viscosidade do sistema e não só a tensão de escoamento; além disso, avalia qualitativamente a tendência à segregação de fases no sistema, em decorrência da aplicação de energia (impactos). Entretanto, os resultados obtidos não dissociam a contribuição de cada um dos parâmetros reológicos (viscosidade e tensão de escoamento), e são apresentados quantitativamente na forma de índice de consistência ou porcentagem de espalhamento e não em termos de unidades reológicas fundamentai (KOEHLER; FOWLER, 2003). Outra desvantagem do método quando utilizado para caracterização de argamassas é que não reproduz as condições de aplicação práticas do material (lançamento com alto impacto seguido de espalhamento sob intenso cisalhamento). Normas relacionadas: Alemanha - DIN 1048, Europa – EN 12350-5, NBR – 13276. Porém, mais importante que descrever as limitações do ensaio é o fato que a correlação usualmente aceita entre a trabalhabilidade e a consistência é incompleta (CAVANI; ANTUNES; JOHN, 1997). Uma vez que as argamassas que os profissionais pedreiros consideram com boa trabalhabilidade dependem do teor de ar

incorporado na argamassa e não do valor de consistência em si (CAVANI; ANTUNES; JOHN, 1997).

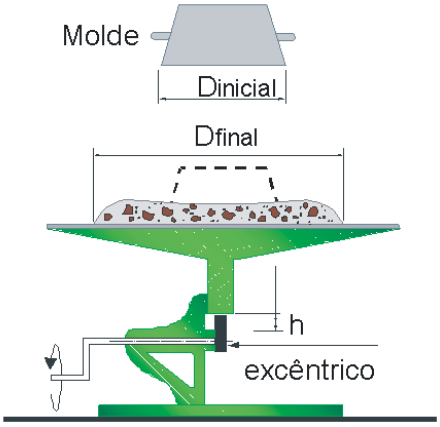


Figura 2.1 - Representação esquemática da mesa de fluidez ou consistência. Dinicial = diâmetro inferior do molde cônico; Dfinal = diâmetro médio da argamassa após o espalhamento.

Considerando duas argamassas, A e B, como fluidos de Bingham, conforme ilustrado na Figura 2.2, observa-se que A apresenta tensão de escoamento maior e viscosidade plástica (inclinação da reta tensão vs. taxa de cisalhamento) menor do que o material B. Após iniciado o fluxo, em taxas de cisalhamento menores do que x, a argamassa A é mais consistente do que B, isto é, requer maior tensão de cisalhamento. Entretanto, para taxas maiores do que x ocorre uma inversão de comportamento, sendo que a argamassa A flui mais facilmente do que a argamassa B.

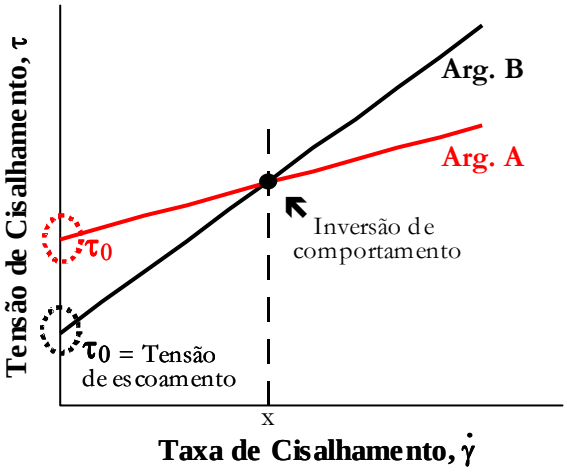


Figura 2.2 - Ilustração esquemática de duas argamassas distintas com comportamento de fluidos de Bingham (BANFILL, 2005).

Os referidos ensaios do tipo monoponto são de baixo custo e de fácil execução. Mas, considerando a natureza multifásica e reativa das argamassas, as limitações dos ensaios e as solicitações extremas de cisalhamento em situações práticas a que estas são submetidas, estes

métodos são insuficientes para efetuar uma avaliação mais completa da natureza reológica das mesmas. Não é possível que o comportamento complexo de um material seja descrito por um único valor de medida, mas sim por um perfil reológico medido com precisão e, preferencialmente, simulando as solicitações práticas reais, visto que o comportamento pode variar em função das características da solicitação, como tensão e taxa de cisalhamento e restrição do material.

Sendo assim, a avaliação das argamassas por ensaios do tipo monoponto é limitada (BANFILL, 1991, 2005), podendo acarretar em decisões equivocadas quanto a parâmetros de formulação e aplicabilidade dos materiais, especialmente se a avaliação for efetuada em taxa muito diferente da solicitação real a qual o material é submetido na prática.

Observa-se como prática usual que a quantidade de água adicionada nas argamassas seja ajustada pelo pedreiro de acordo com avaliação visual e baseada na experiência, ou que seja definida por uma faixa de consistência padronizada que o material deve apresentar. Neste último caso, a água é adicionada até que a consistência padrão (definida pela mesa de fluidez) seja atingida. A carência de água pode prejudicar a homogeneização e a moldabilidade da argamassa, assim gerando defeitos no revestimento. Por outro lado, a adição em excesso pode levar à separação de fases por sedimentação, resultando em um material sujeito a grandes retrações e com microestrutura heterogênea e altos níveis de porosidade após endurecimento. Portanto, a utilização de teores de água determinados através de métodos de caracterização não adequados pode causar uma ocorrência maior de patologia nos revestimentos no estado endurecido.

2.3.3 Reômetros

Para superar tais limitações dos ensaios monoponto a utilização de técnicas de reometria faz-se necessária para a avaliação do comportamento reológico das argamassas (BANFILL, 1991, 2005). Os reômetros são equipamentos dedicados à avaliação de propriedades reológicas de fluidos, suspensões, argamassas e concretos. Determinam parâmetros como viscosidade e tensão de escoamento através de dois princípios básicos de funcionamento: (1) aplicação de torque ao fluido ou suspensão e medida do cisalhamento resultante ou (2) o cisalhamento aplicado é controlado sendo avaliado o torque necessário para tal (PILEGGI, 2001). Ao impor-se à argamassa velocidades angulares de cisalhamento controladas (taxas de cisalhamento) têm-se como retorno a resistência oferecida pelo material

ao seu escoamento, ou seja, a tensão de cisalhamento, que é correlacionada com a viscosidade da argamassa, Figura 2.3.

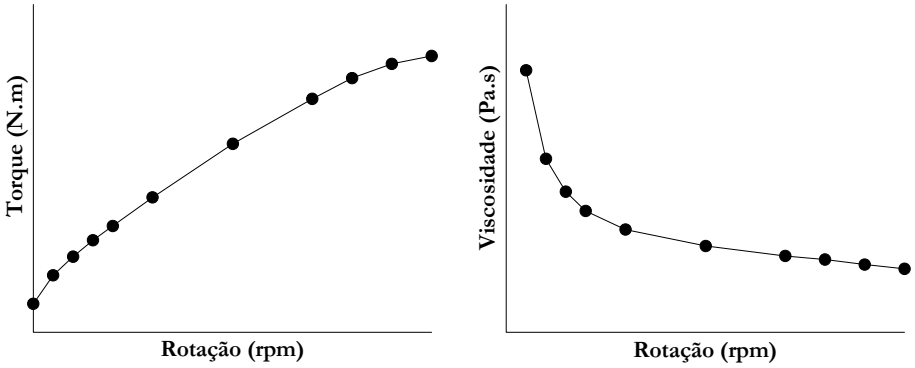


Figura 2.3 - Exemplo de perfil de curvas reológicas obtidas através dos reômetros (HOPPE et al., 2007).

A disponibilidade comercial de reômetros pode ser exemplificada pelo Viscosímetro BML, Viskomat e RheoCAD, conforme ilustrado na Figura 2.4.

O viscosímetro BML é um equipamento robusto com geometria do tipo coaxial, capaz de mensurar as características reológicas tanto de pastas como de concretos (BROWER; FERRARIS, 2003).

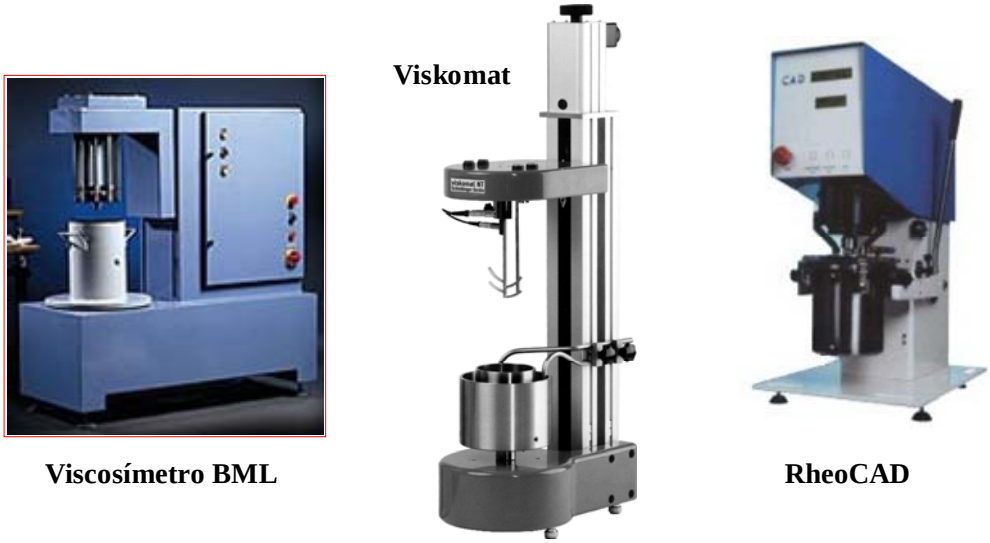


Figura 2.4 - Reômetros comercializados para caracterização reológica de argamassas.

Já o Viskomat, de estrutura mais simples e com menor capacidade de torque, é um equipamento de movimento rotacional axial que demanda menor volume de amostra para ensaio (≈400ml), e permite a utilização de geometria para pastas e argamassas. Entretanto, por sua maior precisão e menor capacidade de torque é indicado para argamassas mais fluidas e com diâmetro de partícula máximo em torno de 3mm. Além disso, como é o recipiente que

contém o material que gira a possibilidade de segregação dos agregados radialmente é elevada em argamassas com pastas pouco viscosas, neste caso comprometendo a medida

O RheoCAD tem capacidade de ensaiar volumes entre 50 e 2500 ml de argamassa, com rotações de até 300 rpm. É um equipamento bastante versátil com precisão para mensurar argamassas com baixa viscosidade e também argamassas com alta tensão de escoamento.

As geometrias de ensaio usualmente empregadas eventualmente podem não satisfazer requisitos fundamentais dos ensaios reológicos, como o não deslizamento entre o fluido e a superfície dos elementos de cisalhamento (PILEGGI, 2001) ou que o material mantenha-se homogêneo. No caso da caracterização de argamassas essa é uma questão bastante relevante, pois devido muitas vezes essas apresentam natureza plástica ou alta tendência à segregação, podendo ocorrer problemas de deslizamento e perda de contato entre a massa e a ferramenta que aplica o cisalhamento ou induzindo segregação entre pasta e agregados.

As limitações nos níveis de torque máximo (tensão de cisalhamento), que restringem a faixa de consistência que os poucos equipamentos disponíveis no mercado internacional são capazes de medir, aliadas ao alto custo desses produtos, fazem que os reômetros rotacionais para argamassas sejam utilizados de maneira discreta apenas em laboratórios de universidades e centros de pesquisa. De maneira geral, cada equipamento associado às geometrias possíveis de serem utilizadas terá vantagens e desvantagens na avaliação de diferentes tipos de argamassa e situação prática a ser simulada.

2.3.4 Squeeze-flow

Neste contexto o squeeze-flow, o qual consiste em comprimir uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas, surge como uma alternativa para a avaliação do comportamento reológico de argamassas e outros materiais de construção. A técnica é amplamente utilizada para a caracterização dos mais diversos tipos de pastas incluindo alimentos, cosméticos, materiais cerâmicos e compósitos poliméricos (BANFILL, 2006; ENGMANN; SERVAIS; BURBIDGE, 2005; ÖSKAN et al., 1999). A vasta gama de aplicação da técnica deve-se ao fato desta não apresentar alguns dos problemas mais comuns dos ensaios reológicos, como a perda de contato entre material e o elemento cisalhante ou o entrelaçamento de fibras no mesmo, o entupimento de capilares e as restrições por capacidade de torque.

Estudo pioneiro em materiais de construção (MIN; ERWIN; JENNINGS, 1994)

utilizou squeeze-flow para a caracterização de pastas de cimento, verificando as alterações reológicas decorrentes da consolidação do ligante. Entretanto, a utilização do método para a caracterização de argamassas foi desenvolvido como parte inicial desta pesquisa (como descrito no capítulo a seguir).

Recentemente o método foi utilizado para avaliação do efeito de polímeros em pastas cimentíceas (PILEGGI et al., 2007) e, também, do comportamento reológico de diferentes pastas de gesso (CARDOSO et al., 2009a). Para fluidos sem tensão de escoamento suficiente para manter a geometria desejada, como nos casos citados a configuração utilizada inclui um molde restritivo, conforme exemplificado na Figura 2.5.

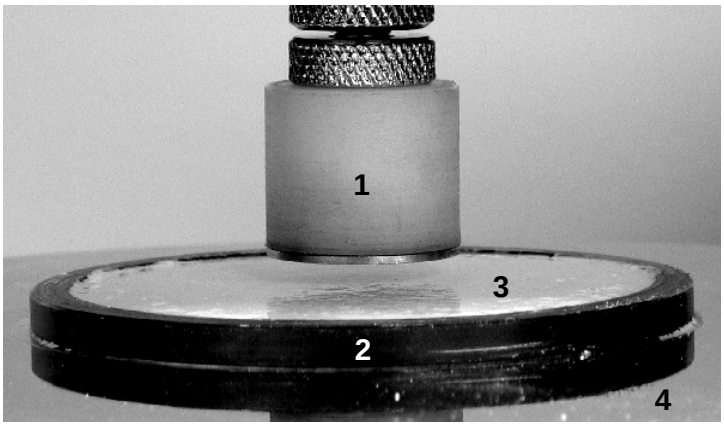


Figura 2.5 - Configuração de squeeze-flow utilizada para avaliação de pastas fluidas (CARDOSO et al., 2009). (1) Punção ou placa superior; (2) Molde restritivo; (3) Pasta de gesso; (4) Base ou placa inferior.

A configuração experimental demonstrada na Figura 2.6 consiste em aplicar a compressão através de uma placa superior (punção) cujo diâmetro é igual ao diâmetro inicial da amostra, sobre uma placa inferior (base) com diâmetro maior. Neste caso a área do material sendo solicitada permanece constante e o material se espalha para fora da área de atuação das placas (CAMPANELLA; PELEG, 1987; ENGMANN; SERVAIS; BURBIDGE, 2005; MEETEN, 2000; MIN; ERWIN; JENNINGS, 1994; ÖZKAN et al., 1999; STEFFE, 1996).

Entretanto, para utilização de tal configuração é necessário que o material apresente tensão de escoamento suficiente para manter sua forma após desmoldado (como a maioria das argamassas).

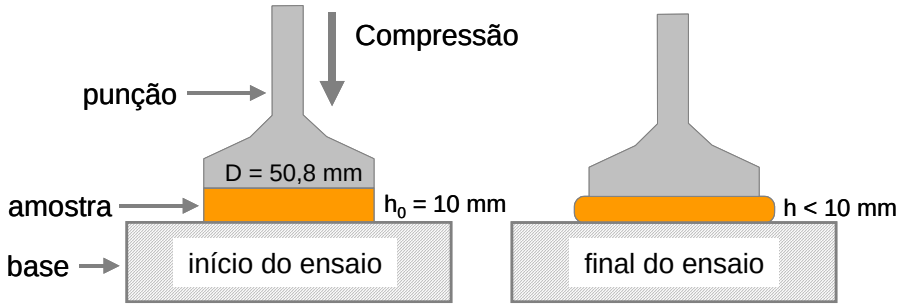


Figura 2.6 - Representação esquemática das condições inicial e final do teste de squeeze-flow na configuração de área constante. D = diâmetro do punção (placa superior) = diâmetro da amostra; h_0 = altura inicial da amostra; h = altura da amostra variável em função do deslocamento do punção superior.

Existe outra configuração experimental também muito utilizada, na qual o diâmetro da amostra é menor do que o diâmetro das placas (Figura 2.7), mantendo o volume de material sendo testado constante, mas a área de contato entre o material e as placas é variável (CAMPANELLA; PELEG, 1987; ENGMANN; SERVAIS; BURBIDGE, 2005; MEETEN, 2000; MIN; ERWIN; JENNINGS, 1994; ÖZKAN et al., 1999; STEFFE, 1996). Esta configuração é interessante para a observação do tipo de solicitação gerada através do perfil de deformação das laterais da amostra. Pode também ser útil para analisar a compactação e compressibilidade de argamassas, principalmente de produtos com elevados níveis de ar incorporado.

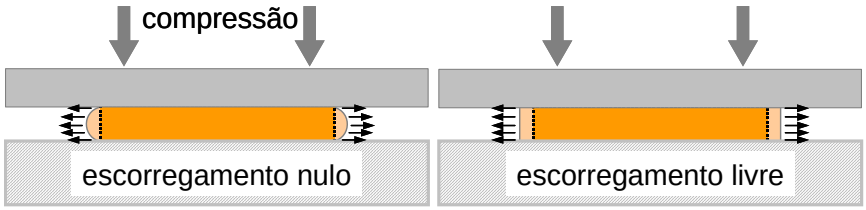


Figura 2.7 - Configuração de squeeze-flow denominada volume constante. Exemplo das linhas de fluxo para as condições de escorregamento na interface - escorregamento nulo (atrito infinito) e escorregamento livre (atrito nulo).

Como na aplicação da argamassa, esta deve ser espalhada sobre uma superfície, a configuração de ensaio ilustrada na Figura 2.6 parece ser mais adequada. A área sob carregamento permanece constante, mas a área submetida aos fenômenos de escorregamento e atrito entre a base e a amostra é variável. Esta é, portanto, uma configuração que se assemelha mais com a aplicação prática das argamassas e facilita o cálculo dos níveis de tensão.

As condições de contorno nas interfaces do material com as placas alteram o perfil de deformação no interior da amostra e a área de contato entre placas e amostra. Solicitações do material predominantemente de deformação elongacional ocorrem no caso do deslizamento

(ou atrito nulo) e a deformação por cisalhamento é mais acentuada quando o atrito entre as placas e a pasta é elevado (escorregamento nulo), Figura 2.7 (ENGMANN; SERVAIS; BURBIDGE, 2005; MEETEN, 2000; ÖZKAN et al., 1999; STEFFE, 1996). A relação entre o diâmetro (D) e a altura (h) da amostra também influencia o tipo de solicitação gerada. Quanto maior a relação D/h, maior a tendência de cisalhamento do material (ENGMANN; SERVAIS; BURBIDGE, 2005; STEFFE, 1996). Na prática, geralmente, verifica-se nos experimentos uma situação intermediária, com ambos os tipos de deformação presentes.

Além de ser capaz de avaliar materiais com qualquer nível de consistência, a técnica é especialmente interessante para caracterização de argamassas, pois a mudança geométrica inerente ao ensaio simula condições do processamento desses materiais como nas etapas de espalhamento, nivelamento e acabamento. Essa particular característica do squeeze-flow amplia seu potencial de utilização também para a previsão do comportamento reológico de concretos, visto que estes são compostos por argamassa e agregados graúdos e, durante o processamento no estado fresco, a argamassa presente é constantemente comprimida e cisalhada entre os agregados.

Outro aspecto relevante refere-se ao potencial da ampla utilização da técnica, visto que esta dispensa o uso de reômetros especializados, pois pode ser facilmente implementada em equipamentos do tipo máquina universal de ensaios (prensas). Tais equipamentos são comumente utilizados em universidades, centros de pesquisa e desenvolvimento e, também, em laboratórios das indústrias destinados ao controle de qualidade.

3 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO SQUEEZE-FLOW

O squeeze-flow é amplamente empregado nas mais diversas áreas, todavia a aplicação da técnica para a avaliação confiável de argamassas requer a adequação das variáveis experimentais do teste, das ferramentas utilizadas, do procedimento de moldagem, das particularidades dos materiais testados, métodos de análise e interpretação dos resultados e da simulação de situações práticas.

3.1 OBJETIVO

Este capítulo detalha o desenvolvimento da técnica aplicada a argamassas, culminando com a definição das condições de ensaio de squeeze-flow usadas no restante da tese.

3.2 EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS

- Máquina universal de ensaios – equipamento com controle de deslocamento e, preferencialmente, com células de carga disponíveis que sejam capazes de medir ampla faixa de carga com precisão (sugestão de 0 a 5000N ou 500kg). Deve ser verificado o nivelamento da máquina e, também, o paralelismo entre a travessa móvel e a base do equipamento, conforme indicado na Figura 2.1.
- Base – base de aço robusta devidamente fixada e nivelada com o equipamento (Figura 2.1).
- Placa inferior – pratos de aço com 20cm de diâmetro e superfície cromada (Figura 2.2). Geometria adequada na face inferior para encaixe na base.
- Placa superior – punção em aço inox com 101 ou 50,8mm de diâmetro e com encaixe adequado para ser fixado na célula de carga (Figura 2.2).
- Gabaritos – acessórios plásticos para auxiliar na moldagem garantindo a centralização da amostra na placa inferior (Figura 2.2).
- Moldes – anéis de plástico com controle de dimensões e paralelismo (101 ou 50,8mm de diâmetro interno e 10mm de altura) (Figura 2.2).

- Espátula – espátula metálica ou plástica para preencher o molde e razar a amostra. A espátula deve ser maior do que o diâmetro do molde para garantir o nivelamento durante o razamento.

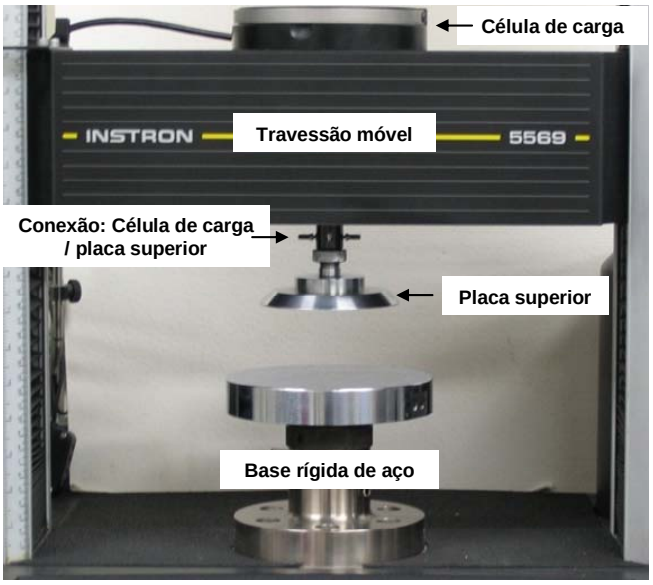


Figura 2.1 - Máquina universal de ensaios marca INSTRON (modelo 5569, capacidade 50kN, célula de carga utilizada 1000N).

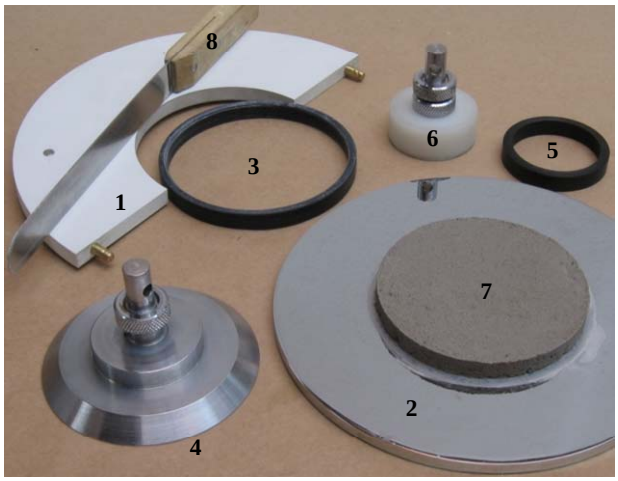


Figura 2.2 - Conjunto de ferramentas necessárias para moldagem das amostras para o ensaio de squeeze-flow. (1) Gabarito; (2) Prato ou placa inferior; (3) Anel para moldagem 101mm de diâmetro; (4) Punção ou placa superior 101mm de diâmetro; (5) Anel para moldagem 50,8mm de diâmetro; (6) Punção 50,8mm de diâmetro; (7) Amostra 101mm de diâmetro moldada e centralizada; (8) Espátula.

3.3 PARÂMETROS DE ENSAIO

3.3.1 Controle do teste

O *squeeze-flow* consiste na compressão de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas, como demonstrado no capítulo anterior. Assim como na reometria rotacional, o ensaio pode ser realizado com controle por força ou por deslocamento. No primeiro caso uma determinada força é aplicada ao material e a deformação resultante é registrada, enquanto no segundo caso o material é submetido a um deslocamento efetuado com velocidade constante e a força é medida. Foi adotado o controle por deslocamento, pois simula melhor a aplicação das argamassas de revestimento. No caso de argamassas de assentamento, é mais adequado o controle por carga, simulando o peso do bloco ou tijolo.

3.3.2 Configuração

A configuração geométrica utilizada para a avaliação de argamassas de revestimento consiste em amostra com 10mm de altura e 50,8 ou 101mm de diâmetro, conforme ilustrado na Figura 2.3.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 2.3 - Geometria utilizada nos ensaios de squeeze-flow em argamassas de revestimento. Dimensões da amostra de argamassa: (a) Diâmetro inicial = 50,8mm, altura inicial = 10 mm; (b) Altura final = 7,5mm; (c) Diâmetro inicial = 101 mm, altura inicial = 10mm; (D) Altura final = 7,5 mm.

A possibilidade de variação das dimensões utilizadas no ensaio visa atender determinadas situações. Dependendo das dimensões das maiores unidades constituintes, neste caso os agregados, é indicado o aumento da altura da amostra, minimizando questões de efeitos geométricos de parede. Por outro lado, a utilização desta configuração com diâmetro menor (50,8mm) pode ser necessária para se obter níveis de cargas compatíveis com o equipamento disponível e com a faixa de precisão ótima da célula de carga. Além disso, a redução do diâmetro da amostra pode ser necessária visando uma logística factível em relação à quantidade de material utilizado e praticidade na preparação. Cabe ressaltar que como as solicitações geradas na amostra dependem da geometria de ensaio, é recomendável que não sejam realizadas comparações diretas entre amostras ensaiadas com geometrias distintas, conforme será discutido no decorrer do capítulo.

3.3.3 Grau de deformação e taxa de deslocamento

O método permite a variação da velocidade de deslocamento e também do nível de deformação imposta. Recomenda-se a velocidade de deslocamento entre 0,1 e 3mm/s ou maior, por ser uma faixa da ordem em que, provavelmente, os fenômenos em situações práticas ocorrem e, também, por ser facilmente realizada pela grande maioria dos equipamentos do tipo máquina universal de ensaios. A deformação imposta deve ser a maior possível, para que o comportamento do material seja avaliado em ampla faixa. No caso de argamassas de revestimento, que geralmente possuem grãos com diâmetro máximo de aproximadamente 1,2mm, moldadas com 10mm de altura recomenda-se uma deformação de 9mm. Nesta situação a amostra será submetida a uma compressão até a dimensão aproximada dos agregados, restando no final do ensaio praticamente apenas uma camada de agregados.

3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Imediatamente após a mistura moldar a amostra de argamassa sobre a placa inferior totalmente limpa (isenta de poeira, gordura ou umidade) utilizando o molde (anel de plástico) e o gabarito. Utilizando a espátula despejar um volume excessivo de material dentro do

molde, acomodar a massa gentilmente para promover preenchimento uniforme (Figura 2.4a), visando evitar a compactação do material. Razar / nivelar a superfície com a espátula para garantir um bom acabamento superficial (Figura 2.4b), pois a placa superior deve tocar perfeitamente o material antes do início do ensaio. Retirar uma das metades do gabarito (a outra permanece para garantir a centralização da amostra, Figura 2.4c) e em seguida retira o anel de plástico cuidadosamente para não alterar a geometria da amostra (Figura 2.4d).

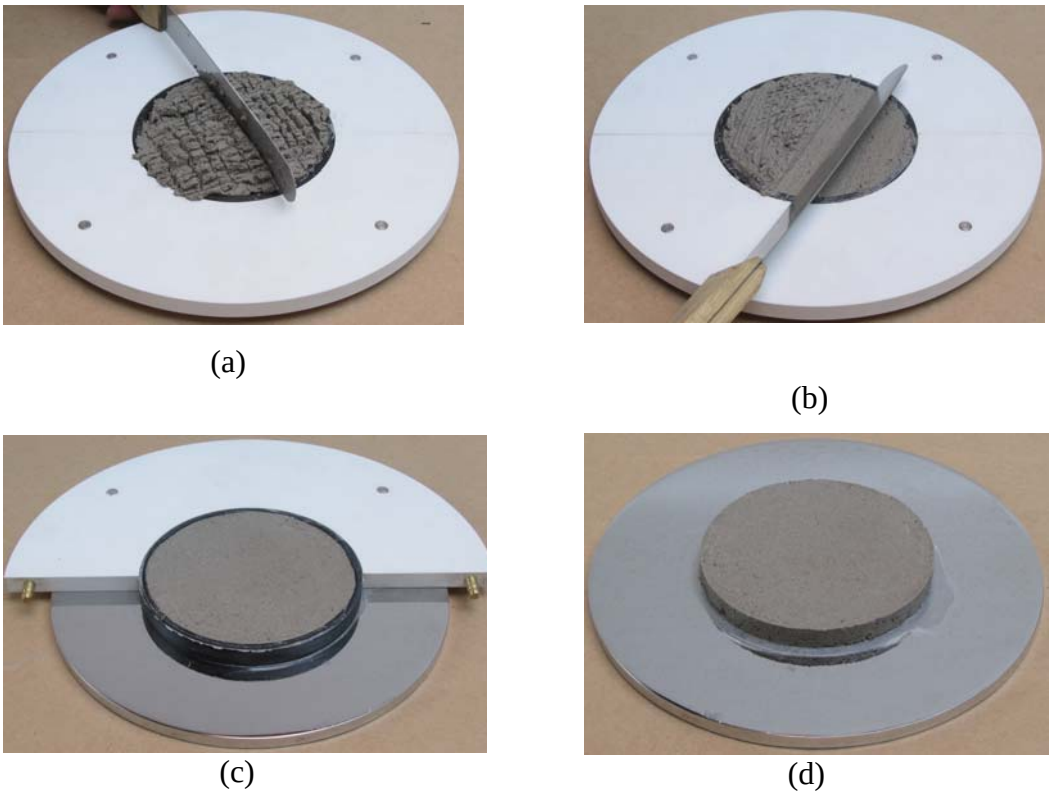


Figura 2.4 - (a) preenchimento do molde com quantidade excessiva de argamassa e acomodamento da argamassa evitando a compactação; (b) nivelamento da amostra através de razamento com a espátula; (c) retirada da metade do gabarito; (d) retirada do molde e amostra está centralizada e pronta para ser ensaiada.

O método de squeeze-flow apresenta elevada sensibilidade e repetibilidade, entretanto as possíveis variações estão relacionadas com falhas no procedimento experimental. As falhas mais comuns ocorrem durante a moldagem das amostras e o encosto antes do início do ensaio. Durante a moldagem deve-se procurar obter uma superfície lisa e plana, evitando a compactação da amostra exagerada da amostra. A desmoldagem deve ser realizada com cuidado para não ocorrer descentralização da amostra nem deformação durante a retirada do molde e do gabarito. No caso de argamassas pouco fluidas, a moldagem deve ser ainda mais cuidadosa, em pequenas porções espalhando uniformemente a massa na área do molde visando o completo preenchimento do mesmo.

Após iniciado os testes de squeeze-flow o operador deve observar o ensaio verificando e registrando a ocorrência de fenômenos separação de fases (exsudação), fluxo descontínuo do material e até a emissão de sons (geralmente causada pelo atrito entre agregados e/ou agregados e a placa). No final do teste, após a retirada da amostra do equipamento, o operador pode ainda verificar qualitativamente a intensidade de separação de fases através de uma avaliação táctil da argamassa ensaiada.

3.5 TRATAMENTO DE DADOS

Os resultados dos testes de squeeze-flow são expressos de maneira simples e direta, como gráficos de carga vs. deslocamento ou tensão vs. deslocamento. No caso da escolha dos gráficos de tensão, basta dividir as cargas de compressão registradas pela área da placa superior (punção).

Entretanto, algumas argamassas têm um comportamento particular durante os ensaios, resultando em gráficos com variações de carga como demonstrado na Figura 2.5. Geralmente para argamassas que resultam em níveis de consistência intermediários quando ensaiadas com dimensões de 10mm de altura e 101mm de diâmetro em taxa de 0,1mm/s, é comum a ocorrência destas variações de carga. Isto ocorre devido ao fluxo descontínuo do material durante o espalhamento radial. Neste processo algumas argamassas fluem e depois param, sendo que quando param de fluir a carga sobe e depois cai repentinamente quando estas se espalham radialmente em extensão significativa, sendo facilmente perceptível ao observador. Este fenômeno está relacionado ao atrito entre as placas e a argamassa e, também, aos mecanismos internos de deformação e fluxo do material principalmente quando a separação de fases atua aumentando a concentração localizada de agregados e o atrito na região central (explicado no decorrer do capítulo). Quando o atrito entre as placas e a argamassa é maior do que o atrito interno da argamassa, esta sofre cisalhamento interno para acomodar a redução da altura, porém sem espalhamento radial significativo. Por outro lado, quando o atrito interno é maior do que o atrito entre a massa e as placas, a argamassa. A ocorrência repetitiva desses fenômenos resulta na oscilação de carga exemplificada na Figura 2.5 para uma argamassa de revestimento industrializada.

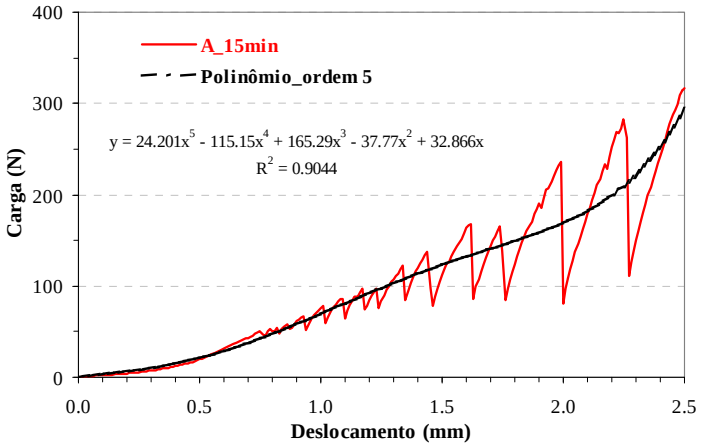


Figura 2.5 - Exemplo de ajuste matemático de uma curva experimental de squeeze-flow que apresenta oscilação na carga causada pelo fluxo descontínuo de uma argamassa de revestimento ensaiada a 0,1mm/s.

A ocorrência destas oscilações por si só já é uma informação que o teste fornece sobre o comportamento do material sendo avaliado, sugerindo a ocorrência de altos níveis de cisalhamento interno no material. Entretanto, para facilitar a utilização dos dados visando à comparação com outros resultados e à observação do perfil médio da curva, é necessário o tratamento dos dados a fim de se obter uma curva isenta de oscilações.

A suavização da curva pode ser realizada em software do tipo Microsoft Office Excel ou similar, através da adição de uma linha de tendência do tipo polinomial com intersecção igual a zero. A curva de suavização escolhida deve ser a que melhor se ajuste a curva experimental, sendo que no exemplo da Figura 2.5 a função polinomial escolhida foi de grau 5. Em algumas situações a curva de suavização com maior valor de R^2 pode não ser adequada se representar um comportamento que não tenha um sentido físico. Por exemplo, se a curva ajustada indica carga nula (para valores de deslocamento maiores do que zero) ou valores de carga negativos (o que neste caso indicaria equivocadamente tração na amostra).

3.6 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

O perfil típico obtido de um ensaio de squeeze-flow com controle por deslocamento expresso na forma de carga vs. deslocamento apresenta 3 regiões bem definidas (CAMPANELLA; PELEG, 1987; MIN; ERWIN; JENNINGS, 1994), conforme demonstrado na Figura 2.6.

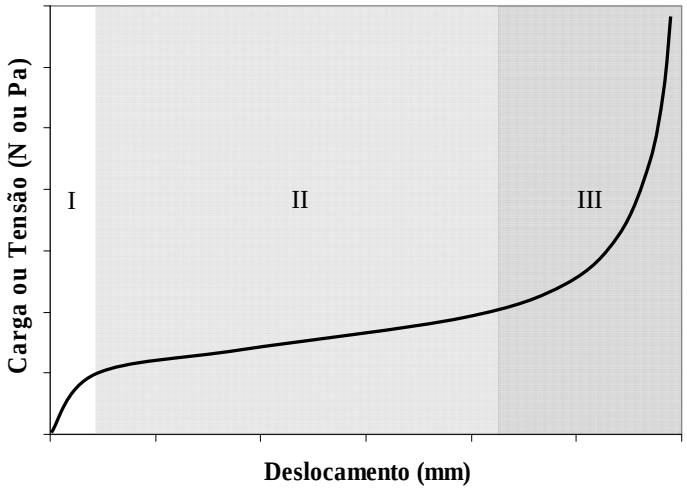


Figura 2.6 - Perfil típico de carga vs. deslocamento de um ensaio de squeeze-flow realizado com deslocamento controlado. Estágio I: pequeno deslocamento - deformação elástica; estágio II: deslocamento intermediário - deformação plástica e/ou fluxo viscoso; estágio III: grande deslocamento - enrijecimento por deformação (strain hardening).

No primeiro estágio, em pequenas deformações, o material comporta-se como um sólido, apresentando deformação elástica linear e está relacionado provavelmente à tensão de escoamento do material.

No estágio seguinte (II), em deslocamentos intermediários, a compressão resulta em deformação radial elongacional e de cisalhamento superando as forças que mantinham o material sob comportamento elástico e, assim, o mesmo flui por deformação plástica e/ou viscosa dependendo das suas características. Nesta etapa o material é capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo da força necessária para o deslocamento, que é um comportamento que favorece a produtividade na aplicação de argamassas.

Já no terceiro estágio, em grandes deformações, ocorre um aumento expressivo (exponencial) da carga necessária para prosseguir a deformação do material. A aproximação das partículas ou de outros constituintes de um sistema submetido a grandes deformações gera forças restritivas ao fluxo devido à maior interação por embricamento ou entrelaçamento (no caso de fibras) das unidades móveis. Consequentemente, as forças de atrito são predominantes nessa situação. No caso de das argamassas, ainda existe uma grande tendência à separação de fases, devido a sua natureza multifásica, principalmente em condições de grandes deslocamentos e baixas velocidades (ENGMANN; SERVAIS; BURBIDGE, 2005; TOUTOU; ROUSSEL; LANOS, 2005). Este terceiro estágio é caracterizado por um comportamento em que procedimentos de aplicação e acabamento do material tendem a ser dificultados, devido às altas cargas envolvidas.

É importante ressaltar que a faixa de deslocamento e a intensidade dos estágios variam de acordo com a composição dos materiais (teores de água e de ar, dimensões mínima e máxima das partículas, presença de aditivos) e também com a configuração de ensaio utilizada.

Portanto, a análise uma curva carga ou tensão vs. deslocamento possibilita a compreensão do comportamento reológico da argamassa em diferentes situações durante sua aplicação, partindo de uma condição estacionária representando o material em repouso, até um elevado nível de deformação, cisalhamento e restrição geométrica durante a aplicação.

3.7 EXEMPLOS DE AVALIAÇÃO DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

Os ensaios em argamassas de revestimento exemplificados neste item foram realizados visando avaliar a influência de fatores intrínsecos do material (teor de água, ar incorporado e tempo de consolidação) e extrínsecos, principalmente inerentes ao ensaio, como a taxa de deslocamento (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005). Uma argamassa industrializada do mercado com teores de água de 13 e 15% em massa foi submetida a deslocamento de 2,5mm em taxas de 0,01, 0,1 e 1mm/s de acordo com configuração Figura 2.3a. Numa das formulações com 15% de água foi adicionado 1% em massa de incorporador de ar e os resultados de densidade aparente e teor de ar são demonstrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Características da argamassa no estado fresco. * AIA = Aditivo incorporador de ar.

Teor de água (%)	AIA* (%)	Densidade aparente (g/cm³)	Teor de ar (%)
13	0	2.09	7.4
15	0	1.96	11.4
15	0.01	1.79	19.0

3.7.1 Influência do teor de água e tempo de consolidação

Comparando-se o perfil da curva da argamassa preparada com 13 % de água após 15 minutos (Figura 2.7) com o comportamento típico ilustrado na Figura 2.6, pode-se inferir que a região secundária da curva é praticamente inexistente. Após o curto estágio inicial de comportamento elástico a resistência ao fluxo imposta pelo material eleva-se intensamente

com o aumento do deslocamento, caracterizando a região de enrijecimento por deformação (estágio III). Este comportamento pode ser explicado pelo atrito entre as partículas do sistema, visto que a argamassa apresentou uma aparência seca, refletindo falta de água para recobrir efetivamente todas as unidades da composição. Assim, os agregados, que representam a maior parte do sistema, estavam relativamente próximos e, ainda, separados por uma pasta aparentemente viscosa, incapaz de facilitar o fluxo entre eles e manter a coesão do material.

No período de 60 minutos após a mistura, há aumento da viscosidade da pasta e conseqüente redução da sua capacidade plástica de manter a coesão do material e de lubrificação entre os agregados. Há redução das cargas necessárias para deformação do material decorrentes do rompimento do mesmo devido à perda de coesão, conforme ilustrado na Figura 2.8. Neste período a pasta sofre secagem e fenômenos de coagulação devido à ocorrência das reações iniciais da pega do cimento, como dissolução do material anidro, aumento de pH, aumento da força iônica do meio e precipitação de Etringita e formação do gel de C-S-H, não havendo tempo suficiente para uma considerável formação de fases hidratadas ligantes (OLIVEIRA et al., 2000; SCRIVENER, 1989).

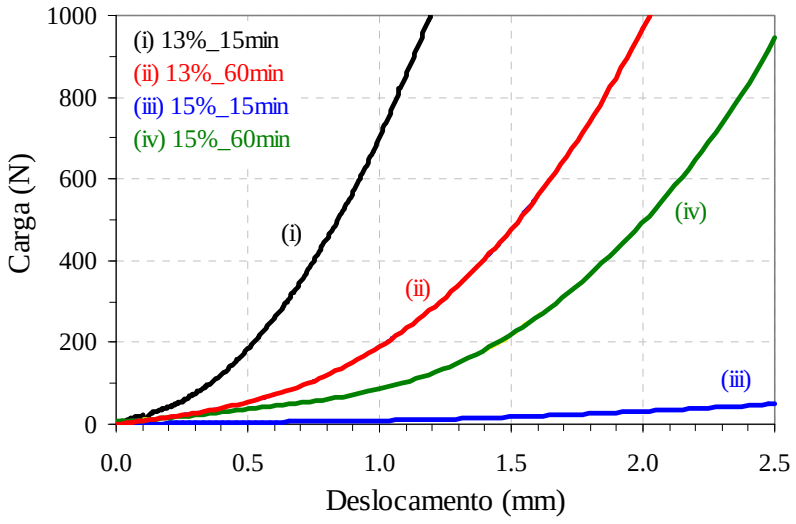


Figura 2.7 - Influência do teor de água e tempo de consolidação no comportamento reológico de uma argamassa de revestimento (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005).

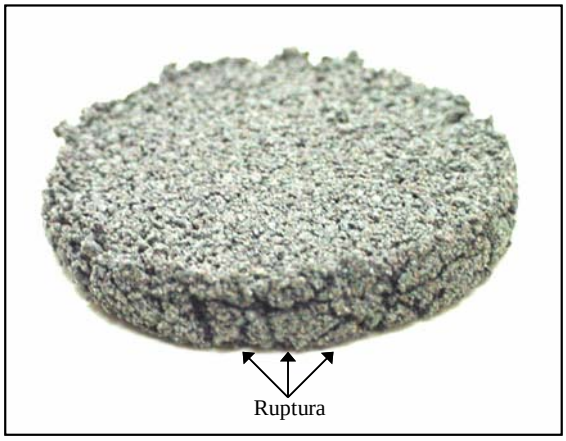


Figura 2.8 - Imagem da argamassa com 13% de água testada 60 minutos após a mistura. Presença de trincas evidenciando a perda de coesão e capacidade de deformação plástica.

O aumento do teor de água para 15% inverteu o comportamento da composição, visto que a pasta resultante certamente propiciou uma distância interpartículas maior tornando-se menos viscosa e facilitando o escorregamento relativo dos agregados. O atrito entre os agregados neste caso é menor, pois o aumento da quantidade de água não só altera as características da pasta, como também fornece mais líquido para recobrir a superfície dos agregados elevando a distância de separação entre os mesmos. Como resultado, as curvas (iii e iv) apresentaram estágio de deformação plástica e fluxo viscoso considerável. Em maiores deformações o enrijecimento típico do terceiro estágio é bem menos intenso do que o observado para a composição com 13% de água, resultando em cargas finais bastante inferiores. O aumento de 2% no teor de água reduziu 10 vezes a carga necessária para a mesma deformação de 1,5mm.

A simples variação no teor de água alterou as características reológicas do material radicalmente, pois não só o perfil das curvas foi modificado, mas também o comportamento da pasta decorrente da sua reatividade em função do tempo. Contrariamente ao observado para a composição com 13% de água, a argamassa com maior teor de água sofreu um real aumento da consistência (viscosidade e tensão de escoamento) devido à ação do cimento. Em pequenas deformações as diferenças nas cargas medidas pelo equipamento não foram muito significativas entre as amostras ensaiadas com até 1 hora. Em deformações intermediárias e, principalmente grandes, as diferenças tornam-se mais marcantes. Com o passar do tempo o material tornou-se mais coeso, resultado das alterações sofridas pela pasta.

A argamassa com 13% de água provavelmente apresentaria dificuldades na aderência e no espalhamento após lançamento, pois apresenta estágio II (deformação plástica/fluxo viscoso) quase inexistente e enrijecimento por deformação (estágio III) bastante intenso. Por

outro lado, a argamassa com 15% de água apresenta um comportamento mais plástico (estágio II mais extenso) e com enrijecimento pouco intenso, sendo provavelmente mais adequada à aplicação.

3.7.2 Influência do teor de ar incorporado

As argamassas podem apresentar considerável teor de ar incorporado no estado fresco, seja pela ação mecânica da mistura em altas velocidades durante a preparação ou pela utilização de aditivos tensoativos (moléculas apresentam uma extremidade hidrofílica polar e a outra hidrófoba apolar), com a finalidade específica de incorporar ar.

A presença de ar faz 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 que possui caráter compressível e elástico, facilitando o espalhamento e aumentando a coesão.

A Figura 2.9 demonstra a influência do teor de ar incorporado na argamassa com 15% de água no comportamento medido por squeeze-flow. São demonstrados os resultados das amostras ensaiadas 15 e 60 minutos após a mistura, sem e com o aditivo incorporador de ar (siglas SI e CI, respectivamente). Fica claro que o aumento do teor de ar de 11,4 para 19% altera o comportamento reológico da argamassa, pois o perfil das curvas obtidas é bastante modificado, principalmente em relação aos estágios II e III. A presença de ar no sistema faz que o enrijecimento por deformação seja discreto ou quase inexistente, reduzindo drasticamente as cargas necessárias para deformação do material. Assim, a argamassa com alto teor de ar apresenta comportamento predominantemente plástico para os níveis de deformação impostos. As bolhas de ar aumentam o volume ocupado pela pasta e reduzem sua resistência, promovendo facilidade do fluxo da própria pasta e, também, do escorregamento dos agregados.

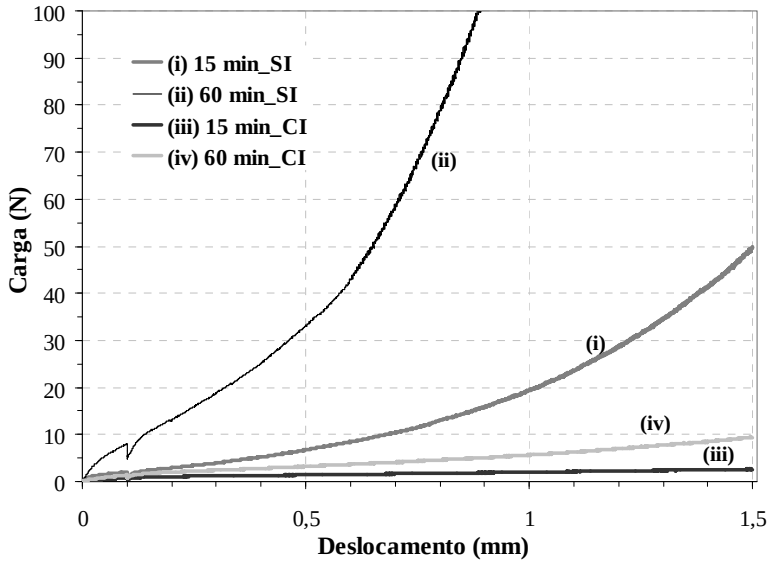


Figura 2.9 - Curvas de carga vs. deslocamento obtidas por squeeze-flow das argamassas com 15% de água, sem e com a adição de 1% de incorporador de ar. As amostras com 15 e 60 minutos após mistura foram submetidas à deformação de 2,5mm em taxa de 0,01mm/s (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005).

3.7.3 Influência da taxa de deslocamento

A Figura 2.10 ilustra o efeito da variação da taxa de deslocamento em 0,01, 0,1 e 1 mm/s nas argamassas com 13% e 15% de água sem aditivo incorporador de ar. Observa-se que a tendência das curvas de carga versus deslocamento com a utilização de diferentes taxas é oposta nas argamassas com teores de água distintos. Enquanto na composição com 13% de água as cargas necessárias para efetuar a deformação do material aumentam com a taxa utilizada, na argamassa com teor de água de 15% ocorre o inverso, ou seja, as cargas diminuem com o aumento da taxa.

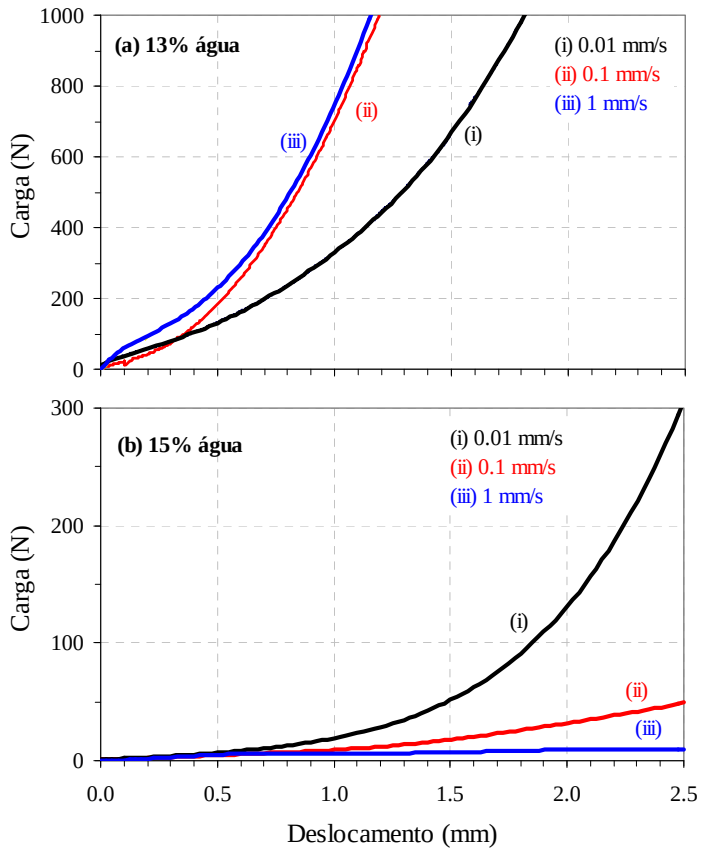


Figura 2.10 - Influência da velocidade de deslocamento no comportamento reológico. (a) argamassa de revestimento com 13% de água. (b) 15% de água. As amostras foram ensaiadas 15 minutos após a mistura com velocidades de 0,01, 0,1 e 1mm/s. Diâmetro 50,8mm. Altura 10mm (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005).

Devido à menor distância de separação dos agregados e da maior viscosidade da pasta é coerente que a composição com menor teor de água apresente este comportamento do similar ao dilatante em técnica rotacional. Sob esta ótica, a argamassa com 15% de água mostrou um comportamento do tipo pseudoplástico. Entretanto, para a interpretação dos resultados de squeeze-flow em materiais altamente concentrados e heterogêneos como as argamassas, é necessário considerar o efeito da separação de fases, visto que a fase fluida pode percolar através da estrutura formada pelo empacotamento das partículas, como observado em pastas cerâmicas (KOLENDA et al., 2003) e suspensões de esferas poliméricas rígidas (d_{50} = 80-120 μm) em fluidos Newtonianos e pseudoplásticos (COLLOMB; CHAARI; CHAOUCHE, 2004; DELHAYE; POITOU; CHAOUCHE, 2000). Nesta pesquisa o material em questão é mais complexo, pois as argamassas são suspensões concentradas compostas por agregados (100-2000μm) imersos em uma pasta fluida. Que por sua vez também é uma suspensão concentrada de partículas inertes (filler) e reativas (ligantes) na faixa de 0.1-100 μm e ainda com a presença de quantidade considerável de bolhas de ar.

A movimentação relativa da pasta e dos agregados devido a gradientes de pressão durante o ensaio causa variações localizadas na fração volumétrica de sólidos, aumentando o cisalhamento localizado (shear banding) e podendo levar à ruptura do material (ENGMANN; SERVAIS; BURBIDGE, 2005; KOLENDA et al., 2003; TOUTOU; ROUSSEL; LANOS, 2005). A capacidade de movimentação relativa fluido – sólido depende da velocidade de deslocamento no teste, da viscosidade da pasta e da permeabilidade da estrutura granular. Em baixas taxas de deslocamento este efeito é intenso, uma vez que a fase fluida tem tempo para percorrer a amostra e segregar dos agregados. Se o teste é realizado rapidamente não há tempo suficiente para o fluido percorrer grandes distâncias em relação ao sólido, conseqüentemente o material comporta-se como um fluido homogêneo necessitando de menores cargas para ser deformado (COLLOMB; CHAARI; CHAOUCHE, 2004; KOLENDA et al., 2003).

3.7.4 Determinação da segregação

A quantificação da segregação causada pela deformação durante o teste é de significativa importância para interpretação do comportamento reológico avaliado por squeeze-flow e, também, para avaliar a suscetibilidade à segregação de diferentes produtos. Em aplicações práticas, a segregação de fases ocorrida no estado fresco pode causar patologias como manchas e fissuras após o endurecimento, devido a gradientes significativos de propriedades entre regiões do revestimento decorrentes de heterogeneidade microestrutural.

Para comprovar que a redução das cargas de squeeze-flow em função da velocidade de deslocamento é de fato causada pela separação de fases, foi desenvolvido método para quantificação da segregação causada pelo ensaio reológico. Duas argamassas denominadas Alfa (6,2% ar) e H (15,6% ar) (caracterização consta do Capítulo 4) foram ensaiadas em 3 velocidades distintas (0,1, 1 e 3mm/s), conforme demonstrado na Figura 2.11. Verifica-se que a argamassa Alfa é mais consistente do que H, atingindo a tensões máxima (500kPa – equivalente a 1000N de carga) em deslocamentos significativamente menores do que H. Além disso, o efeito da velocidade é mais intenso na primeira do que na segunda, visto que as diferenças nas curvas das diferentes velocidades da argamassa H só são perceptíveis em aproximadamente 8mm de deformação, indicando que até este ponto a separação de fases provavelmente não exerce nenhuma influência no fluxo.

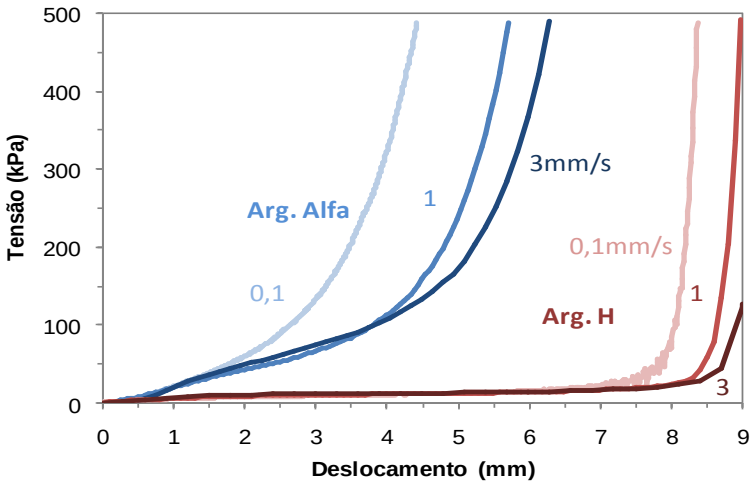


Figura 2.11 - Resultados de squeeze-flow das argamassas Alfa e H realizados em diferentes velocidades. Diâmetro amostra = 50,8mm; Altura inicial = 10mm.

Após os ensaios, as amostras deformadas ainda sobre os pratos inferiores foram separadas em 2 regiões, Figura 2.12. Denominou-se Centro o material contido, após o teste, em um raio igual à metade do raio original da amostra, e de Borda o restante. Tais regiões dos corpos ensaiados foram pesadas antes e depois secagem em forno microondas por 15 minutos. Calcula-se o teor de água no Centro (t_{centro}), na Borda (t_{borda}) e na amostra (t_{total}). Pela diferença da perda entre as regiões obtém-se a diferença absoluta que, dividida pela perda total, gera um valor a diferença relativa ($D_{relativa}$) do teor de água nas diferentes regiões da amostra (Eq. 3.1). Considerando que a separação de fases ocorre apenas entre a pasta e os agregados (visto que a segregação finos-água também pode ocorrer na pasta), deste modo a diferença relativa do teor de água entre as regiões reflete as diferenças nos teores de pasta. Entretanto, como cada ensaio pode atingir uma deformação máxima (h_o-h_F) distinta (h_o= altura inicial da amostra; h_F= altura final da amostra), é interessante calcular a diferença específica ($D_{específica}$), que á a diferença relativa dividida pela deformação atingida (Eq. 3.2)

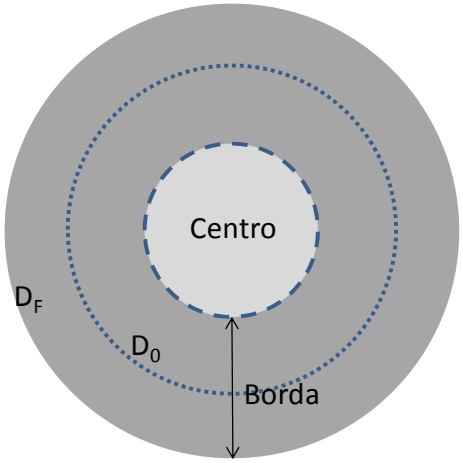


Figura 2.12 - Divisão do corpo-de-prova em regiões para a quantificação da separação de fases. A linha pontilhada externa representa o diâmetro inicial da amostra (D_0); a região interna (cinza clara) é denominada Centro (D_C=0.5D_0) e a parte exterior (cinza escura) é a Borda, entre o Centro e o diâmetro final da amostra (D_F).

$$D_{relativa} = \frac{t_{centro} - t_{borda}}{t_{total}} \quad \text{(\% em massa)} \tag{3.1}$$

$$D_{específica} = \frac{D_{relativa}}{h_0 - h_F} \quad \text{(\%/mm)} \tag{3.2}$$

Os resultados de segregação pasta-agregados, demonstrados na Figura 2.13, estão de acordo com a teoria e os resultados experimentais obtidos para outros materiais citados no item 2.7.3. De fato, em maiores velocidades a segregação é menor, visto que o material deforma-se de maneira mais homogênea por não haver muito tempo para migração da pasta através dos agregados.

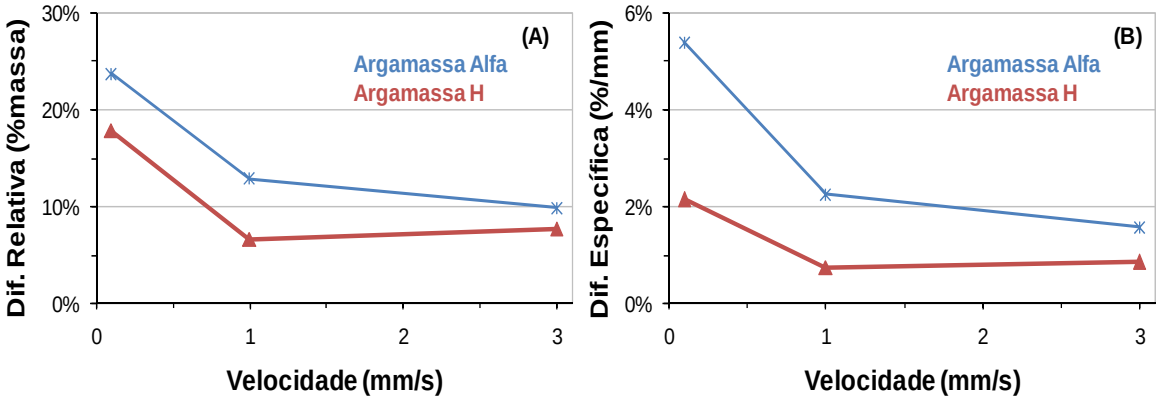


Figura 2.13 - Resultados de segregação de fases das argamassas Alfa e H após ensaios de squeeze-flow realizados em diferentes velocidades. (a) Diferença relativa (% em massa); (b) Diferença específica (%massa/mm).

Porém, como citado anteriormente, a tendência à segregação depende das características da argamassa (principalmente da viscosidade da pasta e permeabilidade da

estrutura de agregados) e por esta razão a segregação é distinta nos dois materiais. A argamassa Alfa é bem mais suscetível à segregação do que o produto H, especialmente em menores taxas, que são mais agressivas neste sentido, sendo o maior teor de ar da última uma das razões para este comportamento.

3.7.5 Influência da relação D/h

O efeito da relação D/h foi avaliado mantendo-se a altura de 10mm das amostras e utilizando diâmetros de 50,8mm (área constante - AC50) e 101mm (AC100), conforme Figura 2.3. As argamassas Alfa e H foram ensaiadas em ambas as dimensões em duas velocidades diferentes, conforme resultados na Figura 2.14 e na Figura 2.15, respectivamente

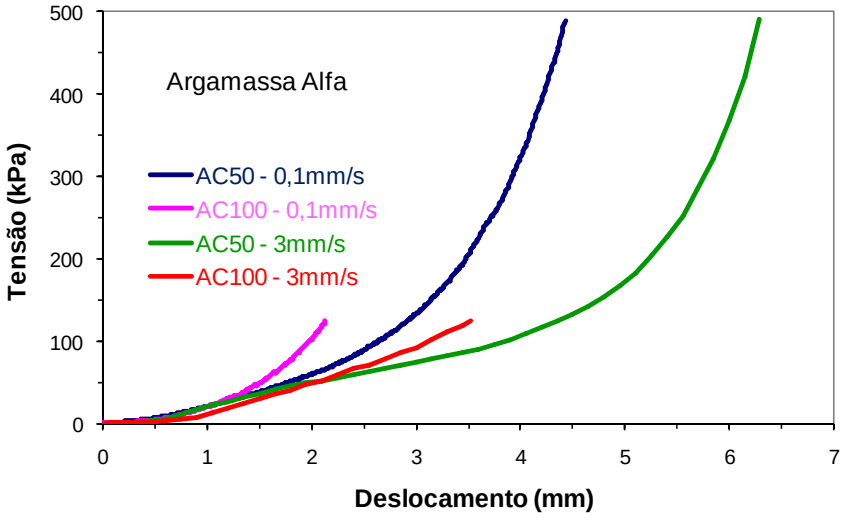


Figura 2.14 - Squeeze-flow da argamassa Alfa ensaiada com diâmetros e velocidades distintos. AC50 – diâmetro 50,8mm; AC100 – diâmetro 101mm; Altura das amostras 10mm.

Verifica-se que em ambas as argamassas a relação de maior D/h (AC100) resulta é em maiores tensões para um mesmo valor de deslocamento, comprovando uma maior tendência ao cisalhamento. Entretanto, esse comportamento foi bem mais expressivo para o material Alfa do que na argamassa H, sugerindo que o efeito deste parâmetro experimental pode ter intensidades diferentes de acordo com as características do material testado. Resultados de separação de fases de Alfa (não demonstrados), também indicam que neste material o aumento em D/h causa maior segregação.

Uma das principais implicações decorrentes é a impossibilidade de comparação entre resultados de ensaios realizados com mesma altura, mas diâmetros diferentes, visto que o nível de cisalhamento e as tensões resultantes tendem a aumentar em função da relação D/h.

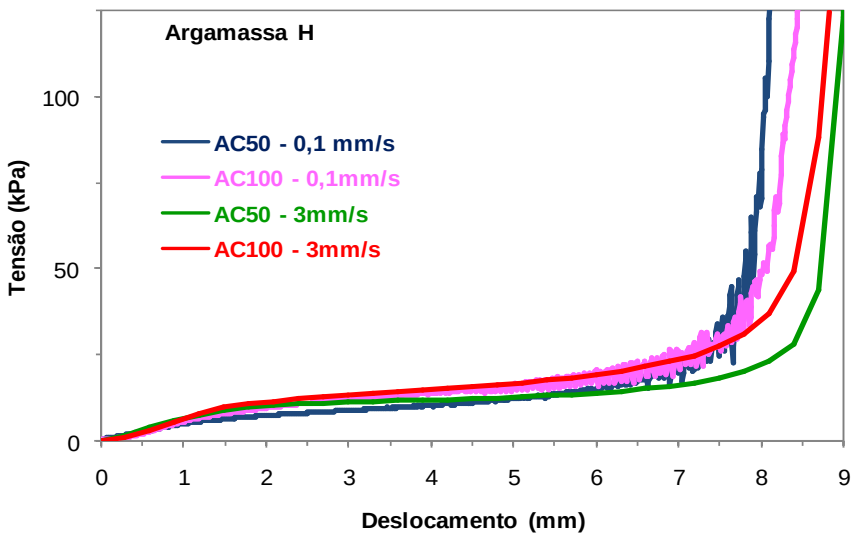


Figura 2.15 - Squeeze-flow da argamassa H ensaiada com diâmetros e velocidades distintos. AC50 – diâmetro 50,8mm; AC100 – diâmetro 101mm; Altura das amostras 10mm.

3.7.6 Influência da rugosidade das placas

Estudos recentes realizados em materiais com comportamentos bastante conhecidos (DELHAYE; POITOU; CHAOUCHE, 2000; ESTELLÉ et al., 2006; ESTELLÉ; LANOS, 2007) indicam que as solicitações geradas nas amostras durante os ensaios de squeeze-flow dependem da combinação das características dos materiais com diversos fatores experimentais como: configuração utilizada, rugosidade das placas, taxa de deslocamento e grau de deformação (h/h_0). Dentre esses a rugosidade das placas é importante no caso de argamassas, pois na prática as condições de rugosidade das bases (bloco cerâmicos, concreto, chapisco, etc) e das ferramentas podem variar bastante. Tal variável foi investigada mais detalhadamente (CARDOSO et al., 2008; LOFRANO et al., 2009), sendo a seguir exemplificado um dos principais resultados obtidos para a argamassa Alfa.

O efeito da velocidade para cada rugosidade das placas pode ser observado nos gráficos (a), (b) e (c) da Figura 2.16. De forma similar, os gráficos (d), (e) e (f) da mesma figura revelam o efeito da rugosidade em cada velocidade de deformação utilizada. A condição lisa foi a que resultou em maiores deformações, sendo que o distanciamento em relação às curvas dos ensaios com lixas aumentou com a velocidade. O emprego das lixas tende a criar maior cisalhamento interno da argamassa dificultando o fluxo e, para esta argamassa, a lixa fina causou maior dificuldade do que a lixa grossa a 0.1 e 3 mm/s, mas em 1mm/s as curvas foram praticamente iguais.

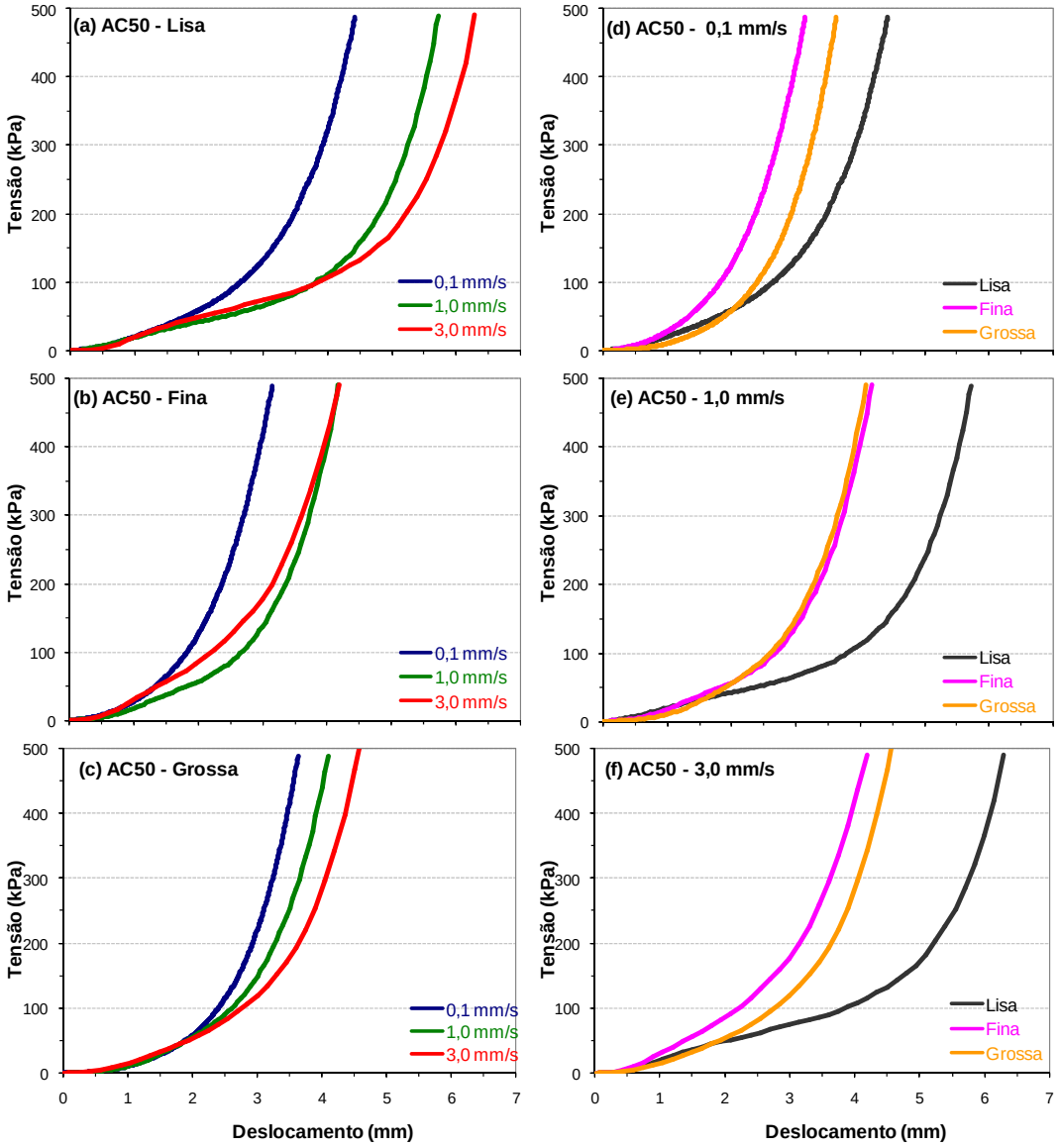


Figura 2.16 - Resultados de squeeze-flow da argamassa Alfa na configuração AC50 ensaiadas 15 minutos após a mistura. Os gráficos (a), (b) e (c) fixam a rugosidade e mostram o efeito da velocidade de ensaio em suas curvas. Os gráficos (d), (e) e (f) exibem essas mesmas curvas, mas fixando a velocidade e evidenciando a influência da rugosidade. Lisa = placas metálicas cromadas lisas; Fina = lixa adesiva e impermeável de carbeto de silício com 35μm de rugosidade; Grossa = lixa similar com rugosidade de 524μm.

O efeito da rugosidade na separação de fases, quantificada através do método descrito anteriormente, é demonstrado na Figura 2.17. Os gráficos (a) e (b) indicam os valores de diferença relativa e diferença específica, respectivamente. A utilização das lixas aumenta consideravelmente a separação de fases, mantendo este efeito mesmo em maiores velocidades de deslocamento. Em primeira análise, o conjunto de resultados sugere que o aumento do cisalhamento vem acompanhado da segregação.

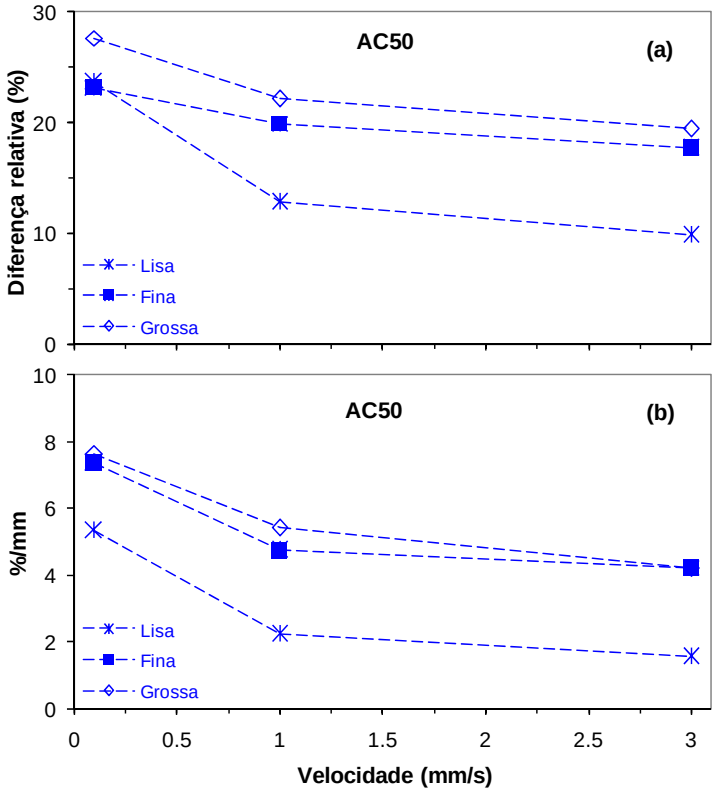


Figura 2.17 - Separação de fases após testes de squeeze-flow da argamassa Alfa ensaiada com diâmetro de 50,8mm (AC50). (a) Diferença relativa do teor de água em massa entre as regiões Centro e Borda. (b) Diferença específica = diferença relativa em % / deformação aplicada em mm.

3.8 SQUEEZE-FLOW X MÉTODOS TRADICIONAIS

As grandes diferenças reológicas entre as composições, verificadas através do squeeze-flow nas Figuras 3.7, 3.9 e 3.10, não foram detectadas pelos métodos tradicionalmente utilizados, conforme demonstrado na Figura 2.18. Por exemplo, a argamassa com 13% de água sem incorporador de ar, que apresentou perda de coesão com o decorrer do tempo após a mistura e comportamento dilatante com a variação da taxa, não conseguiu ser avaliada pelo dropping-ball e pelo ensaio de consistência, visto que em ambos os casos os índices obtidos estão próximos de zero.

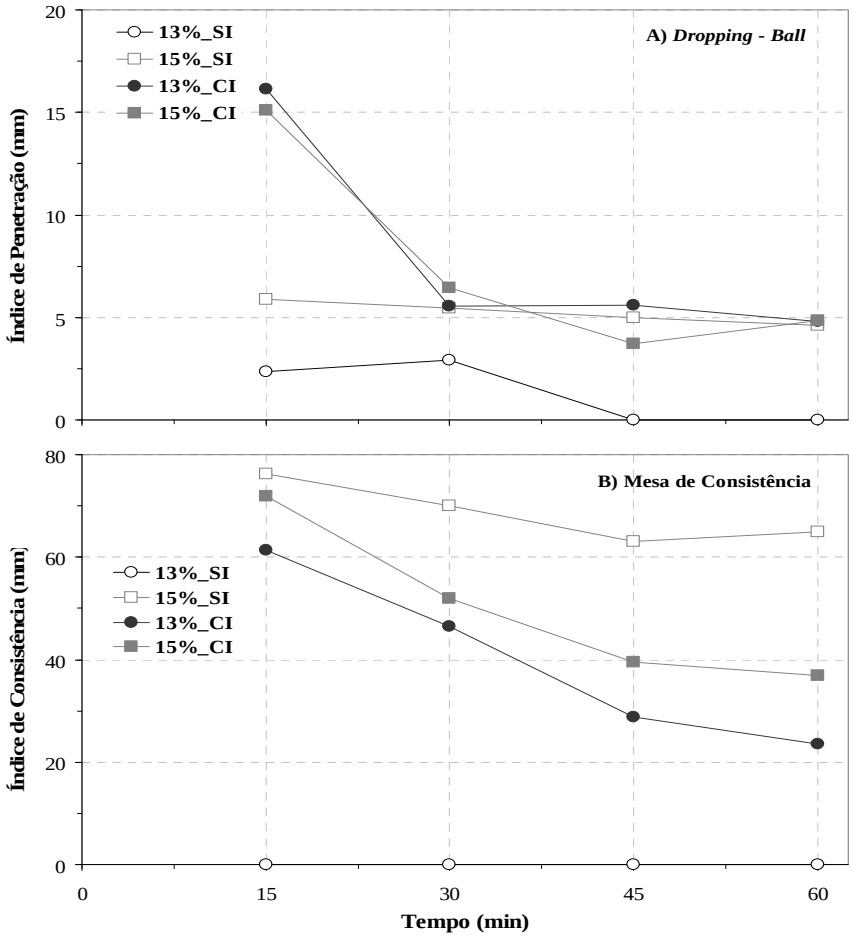
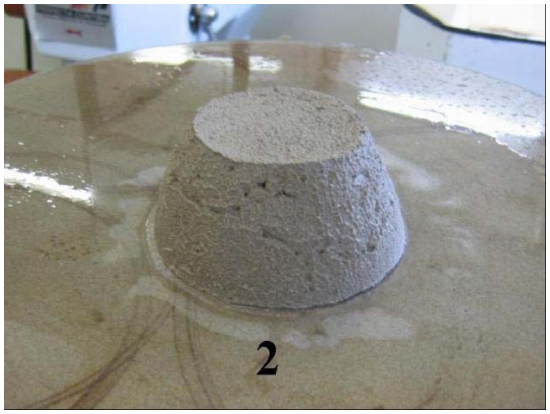


Figura 2.18 - Resultados obtidos pelos ensaios de dropping-ball (a) e mesa de consistência (b) nas argamassas com 13% e 15% em peso de água, com e sem a presença do aditivo incorporador de ar (siglas CI e SI respectivamente). Índice de consistência = Dfinal – Dinicial.

Em relação ao efeito da incorporação de ar nas argamassas, o teste de dropping-ball ainda que limitado conseguiu determinar coerentemente (no tempo de 15 minutos) que as composições com aditivo incorporador de ar são mais plásticas, requerendo menos esforço para seu fluxo (de acordo com o squeeze-flow). Já o ensaio de mesa de consistência apresentou resultado contrário, indicando que a argamassa com 15% de água seja mais fluida e menos consistente do que as composições com teor elevado de ar incorporado, devido à forte influência do ar.

Durante outra avaliação de 2 argamassas industrializadas (aqui denominadas 1 e 2, mas que no Capítulo 4 são codificadas K e J) através dos métodos tradicionais e do squeeze-flow (Figura 2.19), ficou evidenciado que as avaliações do comportamento reológico devem ser realizada visando simular as solicitações reais que os materiais encontram na prática.

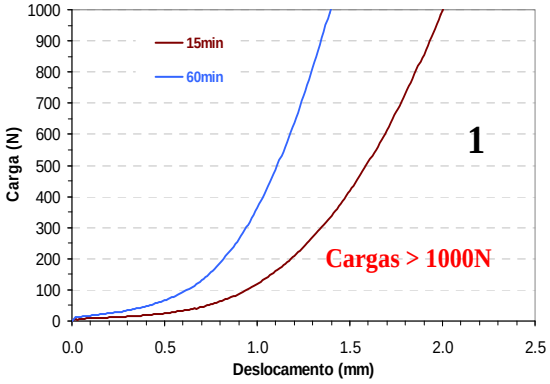
(a)



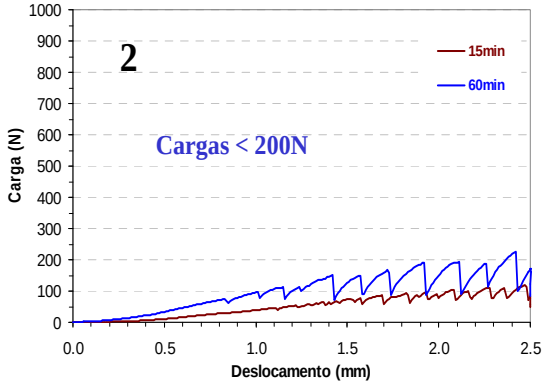
(b)

(c)

(d)



(e)



(f)

Figura 2.19 - Resultados obtidos pelos ensaios de dropping-ball (índice de penetração), mesa de consistência e squeeze-flow de duas argamassas industrializadas distintas denominadas 1 e 2. (a) Foto da argamassa 1 antes dos impactos no teste de consistência; (b) Foto da argamassa 2 antes dos impactos no teste de consistência; (c) Foto do espalhamento da argamassa 1 após os impactos no teste de consistência, valores de consistência e índice de penetração são indicados; (d) Foto do espalhamento da argamassa 2 após os impactos no teste de consistência, valores de consistência e índice de penetração são indicados; (e) Resultados de squeeze-flow da argamassa 1, ensaiada 15 e 60 minutos após a mistura; (f) Resultados de squeeze-flow da argamassa 2, ensaiada 15 e 60 minutos após a mistura.

Conforme Figura 2.19a e 3.17c a argamassa 1 que apresentou espalhamento muito grande na mesa de consistência e um índice de consistência considerado como aceito para

aplicação, durante o fluxo no ensaio de squeeze-flow este material não conseguiu ser deformado até 2,5mm, sendo que os testes foram interrompidos no limite da célula de carga utilizada (Figura 23e). Já argamassa 2, que apresentou consistência e índice de penetração menores do que o produto 1, fluiu com facilidade quando solicitada no squeeze-flow (Figuras 3.17 b, d e f). A argamassa 1 possui uma pasta pouco viscosa, não fornecendo coesão e nem lubrificação ao sistema. Durante o movimento com mudança geométrica e confinamento em uma direção, o atrito entre os agregados é intenso e ocorre grande separação de fases, dificultando a deformação da argamassa 1. Já a composição 2 apresenta uma pasta em quantidade e com características reológicas adequadas para manter a coesão do sistema, lubrificando e mantendo os agregados distantes, resultando em uma argamassa de fácil espalhamento.

3.9 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS REOLÓGICOS

As analises dos resultados de squeeze-flow em termos de carga e deslocamento fornecem informações importantes em relação às características de fluxo dos materiais. O método permite ainda a determinação de parâmetros fundamentais reológicos como viscosidade e tensão de escoamento.

Para a determinação precisa da tensão de escoamento pode-se utilizar o teste controlado por carga ou tensão como proposto por (MEETEN, 2000). Como esta está relacionada ao início do fluxo do material, as condições de contorno nas interfaces material-placa não são tão relevantes.

Por outro lado, no cálculo da viscosidade é necessário assumir um tipo de solicitação (elongacional ou cisalhamento) para aplicar o modelo de fluxo adequado utilizando os dados de tensão, alturas inicial e instantânea da amostra e a taxa de deslocamento (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2007; STEFFE, 1996). Como visto anteriormente, o tipo de fluxo é influenciado por parâmetros do teste (geometria, rugosidade), características do material e da interação entre este e as placas (ENGMANN; SERVAIS; BURBIDGE, 2005; STEFFE, 1996) e, na prática, ambas as solicitações ocorrem. Além disso, os modelos de viscosidade elongacional ou cisalhante são válidos para fluxos homogêneos, o que no caso das argamassas ocorre apenas em determinadas situações.

Desta forma, na tese optou-se por analisar os resultados de squeeze-flow na forma de carga ou tensão em função do deslocamento, pois independente do número ou unidade

utilizada esta é a resposta dos materiais frente às solicitações impostas. A determinação da viscosidade elongacional de argamassas é tratada em outra publicação (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2007).

3.10 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O conhecimento gerado nesta etapa da pesquisa fornece base para a utilização do método para avaliação de argamassas de forma adequada e segura. Além do desenvolvimento experimental do teste e da forma de análise dos resultados, imprescindíveis para o sucesso da pesquisa, simultaneamente foram obtidas informações importantes para compreender os fenômenos que governam o fluxo das argamassas sob squeeze-flow.

Através deste capítulo foram definidos os parâmetros de ensaio que serão utilizados no decorrer da pesquisa. A geometria de amostra com 10mm de altura e 101mm de diâmetro foi escolhida, pois utiliza uma quantidade maior de material aumentando a representatividade do teste e reduzindo o efeito de possíveis falhas de moldagem. A maior relação D/h favorece solicitações mais agressivas, com maior incidência de cisalhamento. Três velocidades de deslocamento serão adotadas, 0,1, 1 e 3mm/s, de forma a ampliar a faixa de taxas de solicitação impostas e, também, condições para ocorrência de separação de fases. As placas lisas foram escolhidas por facilitarem a logística dos testes e, principalmente, porque a introdução de mais uma variável com grande impacto no comportamento (e ainda não totalmente compreendida) poderia comprometer o objetivo do Capítulo 6 que é a comparação entre o comportamento reológico de diferentes argamassas.

O método de quantificação da separação de fases em argamassas desenvolvido é inédito e efetivo, provando o efeito da segregação sobre o comportamento reológico e sendo capaz de comparar a suscetibilidade de diferentes materiais em relação a este fenômeno.

Adicionalmente, os avanços decorrentes dos esforços desta parte do trabalho colaboraram para a utilização do método em argamassas de revestimento por outros pesquisadores (ANTUNES, 2005; SILVA, 2006), em argamassas colantes (COSTA; CINCOTTO; PILEGGI, 2005; PÓVOAS, 2005) e, no âmbito do CONSITRA, para a implementação do mesmo em outras universidades e em centros de pesquisa na área de construção.

4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE ARGAMASSAS DO MERCADO

Este é um capítulo importante da pesquisa, pois é realizada caracterização do conjunto de produtos de revestimento selecionado como base para desenvolvimento do método de formulação, foco da tese. Todas os resultados e discussões realizadas nos Capítulos 5 (Comportamento de mistura), 6 (Avaliação reológica), 7 (Empacotamento e distância de partículas) e 8 (Propriedades no estado endurecido) são referentes às argamassas caracterizadas no presente capítulo.

4.1 OBJETIVO

O principal objetivo desta etapa do projeto é a criação de um banco de dados das formulações, através da caracterização física de um grupo significativo de argamassas.

4.2 MATERIAIS

Considerando a grande extensão territorial do Brasil, o produto argamassa tende a apresentar diferenças significativas de desempenho em função do uso de práticas tecnológicas locais e da diversidade de matérias-primas utilizadas, resultam em uma gama argamassas aplicadas por todo o Brasil. Além disso, as diferenças climáticas entre regiões trazem demandas diferentes em relação ao comportamento do material enquanto fluido.

Contando com o auxílio indispensável do CONSITRA foram selecionados 25 produtos de revestimento, codificados de A até Delta, provenientes das regiões Sul, Sudeste e Nordeste do país. Em virtude do apoio de parceiros industriais e da FAPESP, foram incorporadas mais 7 argamassas européias (Eur1 a Eur7) produzidas em Portugal, Reino Unido e Escandinávia. Os 32 produtos, incluindo argamassas de revestimento interno e/ou externo e alguns do tipo múltiplo-uso (revestimento com diferentes funções ou assentamento e revestimento) aplicadas manualmente e/ou por projeção mecânica, formam um conjunto amplo e significativo para o desenvolvimento do método de formulação.

4.3 MÉTODOS DE ANÁLISE

- Determinação dos teores de finos e agregados - 2 amostras de 500g de material foram peneiradas em malha 200 (75µm) por 30 minutos em equipamento do tipo “Ro-Tap”. As partículas passantes (finos < 75µm) e retidas (agregados > 75µm) foram pesadas, sendo que as últimas foram posteriormente lavadas e secas para precisa determinação dos teores de cada fração. A média das duas determinações foi utilizada;

Após 24h em estufa a 110°C, os materiais foram submetidos aos seguintes ensaios:

- Peneiramento e lavagem para determinação de teor de finos (Dp < 100µm) e agregados;
- Picnometria de gás Hélio (MultiPycnometer – Quantachrome Instruments) para determinação da densidade real (massa específica) de cada fração;
- Distribuição granulométrica por difração de raios Laser (Malvern MSS Mastersizer). Os finos foram dispersos em álcool, enquanto os agregados foram ensaiados dispersos em ar;
- Determinação da área superficial BET dos finos (Micromeritics ASAP 2010) por adsorção de gás Nitrogênio;
- Avaliação de morfologia e textura dos agregados através de lupa estereoscópica acoplada à câmera fotográfica (AxionCam HRc – Zeiss) com utilização de luz refletida.

4.4 RESULTADOS

Na Tabela 4.1 constam os teores de agregados e finos presentes nas argamassas nacionais, a densidade real das mesmas e das frações que as compõem, a área superficial e o teor de água para mistura. Os valores médio, máximo e mínimo para cada característica são também demonstrados.

Os diferentes produtos apresentam volume de agregados na faixa de 60,2 e 83,9% e de finos entre 16,1 e 39,8%, representando formulações bastante diferentes. A densidade real (massa específica) de cada argamassa é resultado das densidades e dos teores dos agregados e finos presentes em cada formulação, variando entre 2,47 e 2,86 g/cm^3 em função de diferenças na composição (tipo e teor de agregados, cimento e adições). A densidade dos agregados varia entre 2,58 e 2,82 g/cm^3 em função da natureza mineralógica e a presença de eventual porosidade fechada nas partículas. O conhecimento desta característica é importante durante a formulação do produto, visto que quanto maior a diferença de densidade entre as

fases (agregados e pasta) maior a tendência à segregação. Além disso, a densidade dos agregados também tem influencia expressiva no módulo de elasticidade das argamassas endurecidas.

Tabela 4.1 - Características físicas das argamassas brasileiras no estado anidro. Agreg = teor de agregados em volume; Finos = teor de finos em volume; ρ Arg = densidade real da argamassa anidra; ρ Agreg = densidade real dos agregados; ρ Finos = densidade real dos finos; AS Finos = área superficial dos finos; AS Arg = área superficial da argamassa; Água/ms = relação água / materiais secos em massa.

Argamassa	**Agreg** (%v)	**Finos** (%v)	**ρ Arg** (g/cm^3)	**ρ Agreg** (g/cm^3)	**ρ Finos** (g/cm^3)	**AS Finos** (m^2/g)	**AS Arg** (m^2/g)	**Água/ms** (g/g)
A	71,6	28,4	2,78	2,67	3,06	1,41	0,40	0,15
C	68,5	31,5	2,72	2,75	2,65	1,91	0,60	0,16
D	66,8	33,2	2,65	2,68	2,60	1,78	0,59	0,16
E	80,2	19,8	2,59	2,60	2,57	7,46	1,48	0,18
F	62,9	37,1	2,72	2,79	2,62	1,19	0,44	0,17
G	80,2	19,8	2,68	2,58	3,09	2,46	0,49	0,15
H	60,2	39,8	2,85	2,82	2,90	1,57	0,62	0,17
I	62,3	37,7	2,86	2,75	3,05	2,14	0,81	0,19
J	76,1	23,9	2,82	2,71	3,19	1,40	0,33	0,17
K	71,6	28,4	2,47	2,58	2,19	5,05	1,43	0,18
M	75,3	24,7	2,67	2,61	2,96	0,87	0,22	0,14
N	76,6	23,4	2,74	2,76	2,89	2,38	0,56	0,18
O	76,7	23,3	2,56	2,63	2,99	2,87	0,67	0,20
P	66,9	33,1	2,69	2,59	2,88	4,10	1,36	0,16
Q	81,7	18,3	2,71	2,64	3,01	4,39	0,81	0,14
R	74,2	25,8	2,70	2,65	2,85	2,69	0,69	0,14
S	83,9	16,1	2,72	2,58	3,43	4,04	0,65	0,17
T	74,4	25,6	2,62	2,58	2,74	2,00	0,51	0,16
V	77,9	22,1	2,81	2,72	3,13	1,34	0,30	0,17
X	77,5	22,5	2,79	2,73	3,00	1,42	0,32	0,15
Z	76,0	24,0	2,79	2,76	2,88	1,14	0,27	0,17
ALFA	67,8	32,2	2,57	2,60	2,47	6,35	2,04	0,16
BETA	78,4	21,6	2,81	2,76	2,93	1,64	0,35	0,16
GAMA	69,9	30,1	2,73	2,70	2,80	1,27	0,38	0,17
DELTA	78,0	22,0	2,76	2,73	2,87	1,52	0,33	0,15
Média	***73,4***	***26,6***	***2,71***	***2,68***	***2,87***	***2,58***	***0,67***	***0,16***
Máximo	*83,9*	*39,8*	*2,86*	*2,82*	*3,43*	*7,46*	*2,04*	*0,20*
Mínimo	*60,2*	*16,1*	*2,47*	*2,58*	*2,19*	*0,87*	*0,22*	*0,14*

A densidade da fração fina, por sua vez, varia ente 2,19 e 3,43 g/cm^3, com valor médio igual a 2,85 g/cm^3, visto que a maioria dos finos dos diversos produtos é, provavelmente, composta por cimento (com densidade de aproximadamente 3,1 g/cm^3). As possíveis adições presentes nos finos como cal hidratada (2,2g/cm^3), calcário (2,7g/cm^3), cinza volante (2,6-2,8g/cm^3) e argilominerais são responsáveis pelo desvio da densidade em relação ao valor típico do cimento, sendo que os materiais citados apresentam massa específica inferior. Apenas a argamassa S (3,43g/cm^3) apresentou valor muito superior ao típico do cimento.

A área superficial das partículas finas é determinada pelo tamanho e, principalmente, morfologia e textura das mesmas, 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. Os finos dos produtos testados apresentaram valores bastante variáveis. A maioria menor que $2m^2/g$, mas com alguns produtos com área intermediária (2-$3m^2/g$) e outros, como E, K, P, Q, S e Alfa, apresentaram área superficial mais elevada chegando a $7m^2/g$. Tal faixa de variação sugere que a maioria das formulações tenha pouca adição de cal (material notoriamente de elevada área superficial[1]) e, por outro lado, poucos produtos com maior quantidade deste material ou com a presença de argilomineral de elevada área. A área superficial da argamassa como um todo pode ser definida como a área superficial dos finos ponderada pela fração volumétrica destes no sistema, uma vez que a contribuição dos agregados pode ser desprezada devido ao baixo valor comparado com o dos finos. O teor de água para mistura (conforme indicado pelos fabricantes) variou entre 14 e 20% em peso, sendo o valor típico em torno de 16%.

A Tabela 4.2 demonstra os resultados da caracterização física, de forma similar à Tabela 4.1, mas para os produtos europeus. Os valores médios das características são muito similares para os dois grupos, com destaque apenas para a densidade dos finos nos produtos europeus que é significativamente menor do que a média brasileira.

Tabela 4.2 - Características físicas das argamassas européias no estado anidro. Agreg = teor de agregados em volume; Finos = teor de finos em volume; ρ Arg = densidade real da argamassa anidra; ρ Agreg = densidade real dos agregados; ρ Finos = densidade real dos finos; AS Finos = área superficial dos finos; AS Arg = área superficial da argamassa; Água/ms = relação água / materiais secos em massa.

Argamassa	**Agreg** (%v)	**Finos** (%v)	**ρ Arg** (g/cm^3)	**ρ Agreg** (g/cm^3)	**ρ Finos** (g/cm^3)	**AS Finos** (m^2/g)	**AS Arg** (m^2/g)	**Água/ms** (g/g)
Eur1	73,1	26,9	2,67	2,68	2,64	2,04	0,55	0,16
Eur2	74,2	25,8	2,71	2,63	2,94	1,63	0,42	0,16
Eur3	64,2	35,8	2,66	2,60	2,76	1,10	0,40	0,21
Eur4	71,1	28,9	2,68	2,68	2,68	1,71	0,49	0,18
Eur5	76,0	24,0	2,74	2,77	2,65	3,84	0,92	0,16
Eur6	78,6	21,4	2,60	2,61	2,59	2,74	0,59	0,18
Eur7	68,5	31,5	2,61	2,69	2,45	4,56	1,43	0,24
Média	***72,2***	***27,8***	***2,67***	***2,66***	***2,67***	***2,52***	***0,69***	***0,18***
Máximo	*78,6*	*35,8*	*2,74*	*2,77*	*2,94*	*4,56*	*1,43*	*0,24*
Mínimo	*64,2*	*21,4*	*2,60*	*2,60*	*2,45*	*1,10*	*0,40*	*0,16*

[1] Valores típicos de área superficial: Cimento ≅ 0.7 – 1.8 m^2/g; Cal hidratada CHI ≅ 15 m^2/g; CHIII ≅ 10 m^2/g.

As distribuições granulométricas discretas das argamassas estudadas são ilustradas na Figura 4.1 e na Figura 4.2. Infelizmente, devido a problemas operacionais as granulometrias dos produtos Eur3 a Eur7 não foram corretamente medidas e, portanto, não são consideradas.

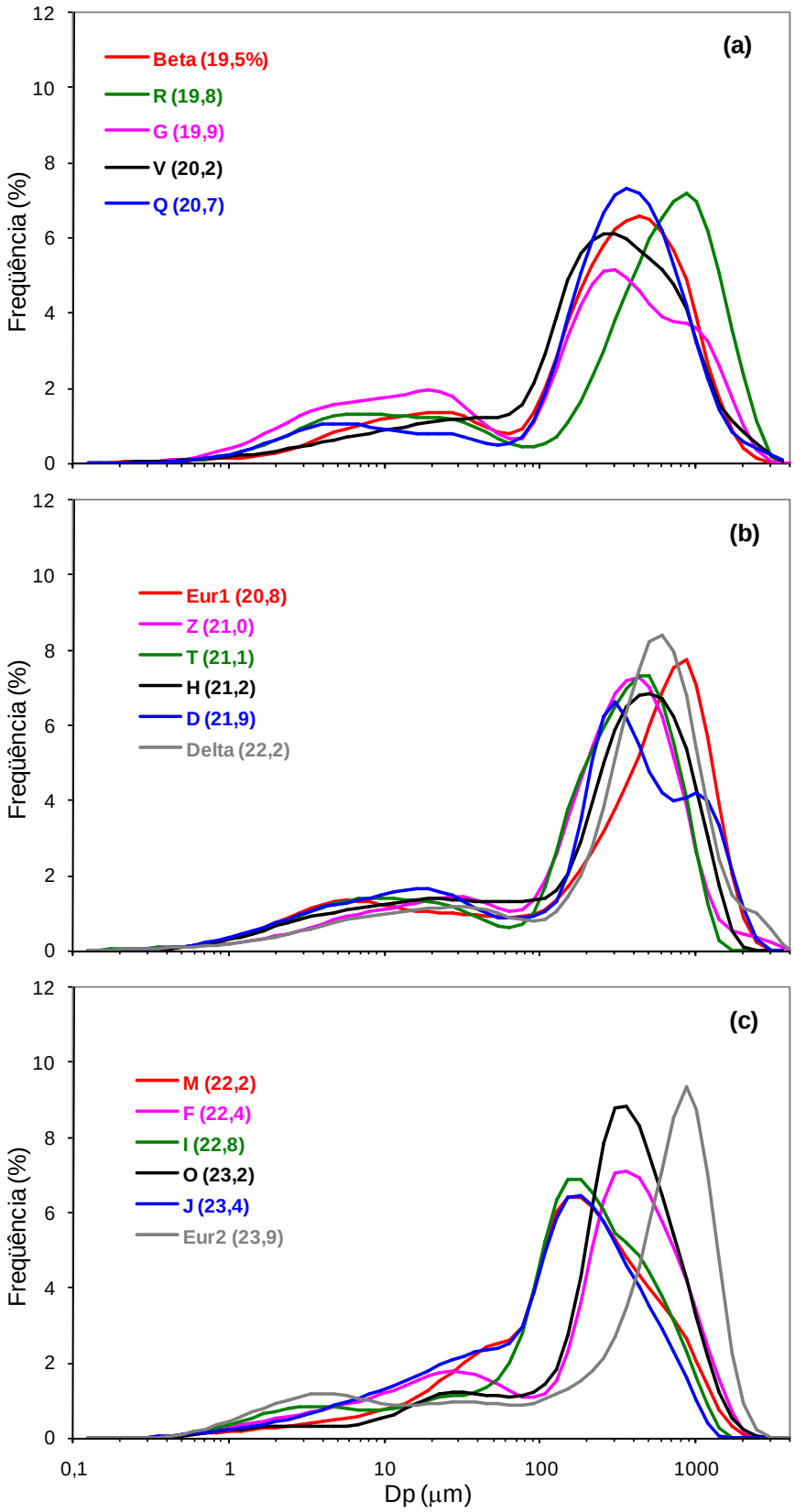


Figura 4.1 - Distribuição granulométrica discreta das argamassas. Frequência (% volume) vs. diâmetro de partícula (μm). O teor de vazios teórico (porosidade em %) deixado pelo empacotamento dos agregados é indicado ao lado de cada legenda. Os produtos estão dispostos em ordem crescente de porosidade teórica do empacotamento dos agregados nos gráficos (a), (b) e (c).

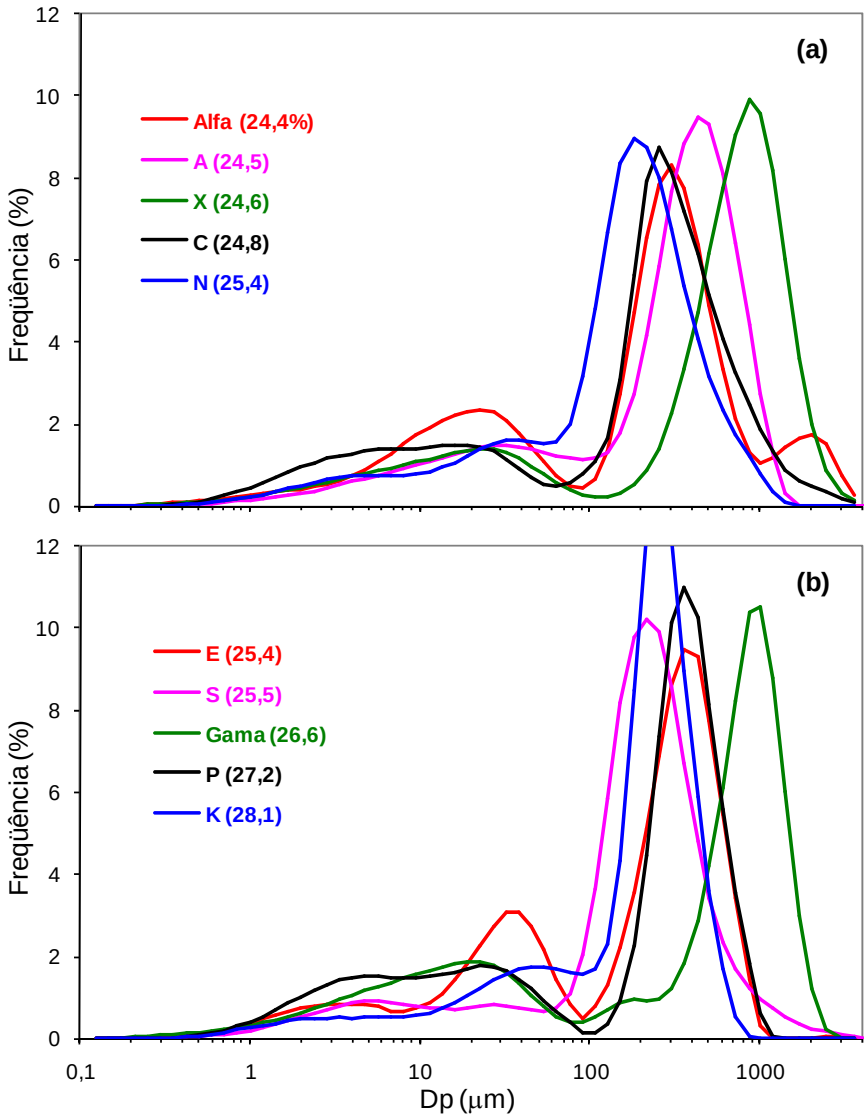


Figura 4.2 - Distribuição granulométrica discreta das argamassas. Frequência (% volume) vs. diâmetro de partícula (μm). O teor de vazios teórico (porosidade em %) deixado pelo empacotamento dos agregados é indicado ao lado de cada legenda. Os produtos estão dispostos em ordem crescente de porosidade teórica do empacotamento dos agregados nos gráficos (a) e (b), seguindo a seqüência da Figura 4.1.

Em virtude da elevada quantidade de argamassas, são utilizados 5 gráficos separados para demonstrar as granulometrias, visando reduzir o número de curvas em cada um e facilitar a visualização das mesmas. Os produtos estão dispostos nos gráficos em ordem crescente de porosidade teórica do empacotamento dos agregados, uma vez que esses valores associados às distribuições serão de fundamental importância nas discussões do Capítulo 7, onde é explicado o significado dos valores e, também, como são calculados.

De forma geral, observa-se que a intensidade dos picos na região dos agregados (>100μm) aumenta na Figura 4.1 (do gráfico a para c) e segue a mesma lógica na Figura 4.2. Ou seja, os materiais da Figura 4.1a apresentam distribuição de agregados bem aberta e com

menor freqüência, enquanto na Figura 4.2b, as distribuições dos agregados são estreitas e muito intensas. Ainda sobre a distribuição dos agregados, podemos apontar a notória característica bimodal desta fração nas argamassas G, D e Alfa. Nos produtos M, I, J e N a curva dos agregados praticamente se sobrepõe a fração fina, não havendo “gap” entre elas devido à grande porcentagem de areia com partículas próximas ou mesmo abaixo de 100μm. Por outro lado, nas argamassas R, Eur2, X e Gama há um grande distanciamento dos picos de distribuição dos agregados e dos finos. As implicações das referidas características são oportunamente discutidas no Capítulo 7.

A distribuição dos finos nas argamassas é bem variável e, como são demonstradas as distribuições granulométricas das argamassas completas a escala é grande não permitindo uma visualização otimizada da parte fina. Destacam-se por apresentarem maior volume de partículas abaixo de 10μm os finos das argamassas G, C e P, enquanto os finos dos produtos Alfa e E apresentam um pico bastante intenso entre 10 e 100μm.

Além da distribuição granulométrica e da densidade, outra característica dos agregados com significativa influência sobre o empacotamento das partículas e, consequentemente, sobre o comportamento reológico e propriedades finais de argamassas e concretos é a morfologia (CORTES et al., 2008; PILEGGI, 2001; QUIROGA; FOWLER, 2004). Na Figura 4.3 são exibidas as imagens, obtidas através de lupa estereoscópica, dos agregados de algumas argamassas escolhidas para exemplificarem as principais características observadas nos 18 produtos submetidos à análise ótica. As argamassas C e R apresentam agregados de naturezas distintas, pois se observa grãos com características de rocha britada, bem como, partículas esféricas e lisas como as de areia natural de quartzo. Já os agregados do produto D apresentam tamanhos bastante variados, morfologia regular arredondada, textura lisa e aparência translúcida, sendo provavelmente areia natural de quartzo. Por outro lado, os agregados da argamassa F apresentam morfologia irregular com baixa esfericidade e arestas angulares, coloração escura e opaca e textura rugosa. De acordo com as características descritas, pode-se dizer que são provavelmente rocha calcária britada. Os agregados encontrados na argamassa I possuem coloração clara, com formato irregular e arestas angulosas, com textura aparentemente mais rugosa. Enquanto na argamassa K, os agregados consistem em partículas pequenas com tamanho uniforme e com morfologia relativamente regular.

No Apêndice A são demonstradas as imagens das outras 12 argamassas que tiveram imagens de seus agregados registradas.

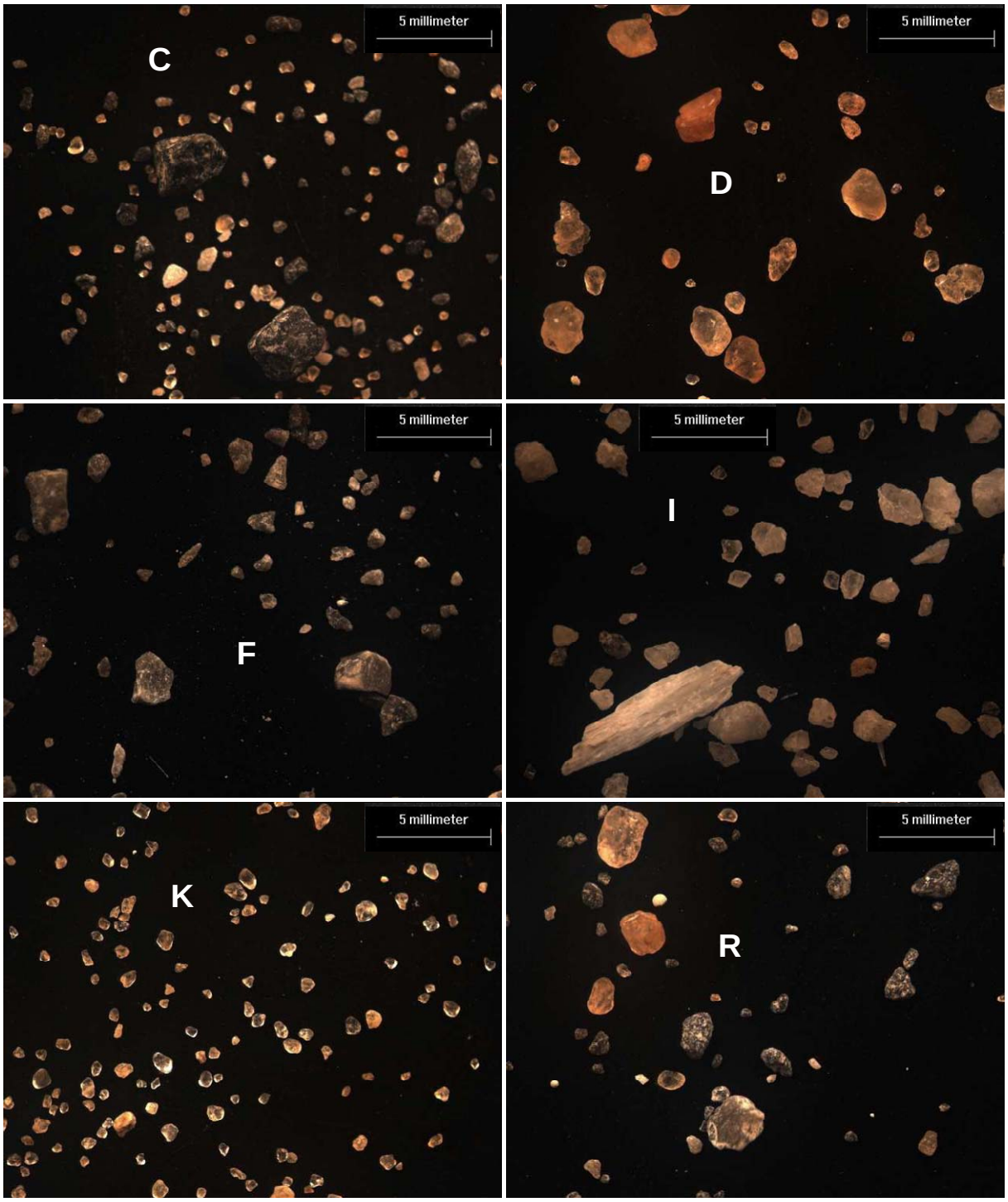


Figura 4.3 - Exemplos de imagens, obtidas com lupa estereoscópica, dos agregados de alguns dos produtos estudados (C, D, F, I, K e R). Barra de referência igual a 5mm.

4.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

No contexto da tese, o amplo banco de dados criado é de suma importância para o desenvolvimento do método de formulação, aumentando a abrangência e representatividade

dos avanços obtidos no trabalho. Os dados serão utilizados para cálculo de diversos parâmetros e interpretação dos resultados obtidos nos capítulos a seguir.

No Capítulo 5 os resultados de caracterização são relacionados com a suscetibilidade das argamassas ao processo de mistura e como este afeta o comportamento reológico das mesmas. Nos capítulos 6 e 7 são primordiais para o cálculo do teor de fases no estado fresco e para a aplicação dos conceitos de empacotamento e distância de separação de partículas e, conseqüente, interpretação do comportamento reológico das argamassas em função de tais parâmetros. No Capítulo 8, são relacionados às propriedades dos produtos no estado endurecido. Por fim, são referenciados no Capítulo 10 nas diretrizes de formulação.

Os resultados da caracterização apresentados são, mesmo que isoladamente, importantes tanto para o mercado, quanto para a academia, pois permitem inferir sobre as formulações, traçando o perfil físico dos produtos disponíveis no mercado nacional (CARDOSO et al., 2009b) e, ainda, de alguns exemplares europeus.

5 COMPORTAMENTO DE MISTURA DE ARGAMASSAS

Apesar da aparente simplicidade operacional do preparo das argamassas, a mistura é uma etapa fundamental do processamento, sendo o ponto de partida para o desenvolvimento microestrutural do revestimento. No contexto do projeto, este capítulo visa determinar as condições experimentais de mistura em laboratório para as próximas etapas, uma vez que o comportamento reológico e as propriedades no estado endurecido (critérios de desempenho do material considerados no método de formulação) são certamente influenciados pela etapa de preparação. Procura também relacionar as características das formulações com o comportamento de mistura e indicar eventuais implicações tecnológicas.

5.1 OBJETIVOS

Avaliação do comportamento de mistura de argamassas: (1) determinação da influência do tipo de mistura nas características no estado fresco e no comportamento reológico avaliado por squeeze-flow e (2) quantificação da energia de mistura através de reometria rotacional.

5.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A mistura de um sistema particulado descontínuo com um fluido visa transformá-los em um sistema homogêneo e contínuo. Partículas finas têm uma grande tendência à aglomeração devido às forças de van der Walls e, também, às forças capilares na presença de água (PILEGGI, 2001; PILEGGI et al., 2001). Uma das funções do processo de mistura é a quebra destes aglomerados, pois além de facilitar a homogeneização dos materiais, a redução do tamanho das unidades móveis causa grande influência no comportamento reológico. Sistemas contendo unidades móveis menores movimentam-se mais facilmente, resultando em suspensões com baixa viscosidade (OLIVEIRA et al., 2000 ; PILEGGI et al., 2001). Este fato foi observado em pastas de cimento (WILLIAMS; SAAK; JENNINGS, 1999; YANG; JENNINGS, 1995), argamassas (BANFILL, 1991) e também em concretos (PILEGGI, 2001; PILEGGI et al., 2001), promovendo o fluxo e resultando em materiais mais facilmente aplicáveis. Em muitas situações é recomendável o uso de aditivos para promover a dispersão e

estabilização de suspensões, visto que muitos minerais e óxidos sintéticos utilizados na indústria têm forte tendência à aglomeração em sistemas aquosos. Nestes casos, a quebra dos aglomerados durante a mistura expõe a área superficial das partículas finas à ação estabilizante dos dispersantes, potencializando seu efeito (PILEGGI, 2001; PILEGGI et al., 2001).

A individualização das partículas é também fundamental para as propriedades no estado endurecido, pois o desenvolvimento da microestrutura é decorrente de reações dos ligantes, e a maior exposição de área reativa permite um melhor aproveitamento desses materiais na composição. Um processo de mistura eficiente permite a obtenção de propriedades melhores e mais homogêneas, ou ainda a redução nos teores dos onerosos aglomerantes.

Na prática vários tipos de mistura são utilizados no processamento de argamassas: mistura manual realizada com enxada, em betoneiras, em misturadores mecânicos de eixo horizontal ou argamassadeiras de eixo vertical. São também utilizados modernos sistemas integrados e automatizados de armazenagem, transporte e mistura. Como conseqüência, os produtos são submetidos a uma ampla faixa de eficiência de mistura, pois certamente cada um dos processos fornece níveis de energia bastante distintos. Considerando-se os amplamente utilizados misturadores mecânicos, pode-se dizer que a energia de mistura é influenciada por características da composição como: concentração de sólidos e distribuição granulométrica. E também por variáveis do processo como: tipo de misturador, velocidade de rotação, tempo de mistura, seqüência de adição dos materiais e forma de adição de água.

Utilizando um reômetro rotacional capaz de quantificar a energia efetivamente transmitida ao sistema durante a mistura, (PILEGGI, 2001; PILEGGI et al., 2001) demonstraram que em concretos refratários a forma de adição de água altera significativamente o processo e o comportamento reológico resultante. A adição de água de forma fracionada faz com que a resistência do sistema ao cisalhamento aumente consideravelmente, devido ao surgimento de forças capilares durante o tempo de mistura com teor de água inferior ao teor de água da virada. Esta é a quantidade de água suficiente para recobrir todas as partículas e preencher os vazios da distribuição, ponto no qual as forças capilares são máximas e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento também (PILEGGI, 2001; PILEGGI et al., 2001). Qualquer quantidade a mais de água do que o teor da virada causa a redução repentina das forças capilares, bem como, da resistência ao cisalhamento da suspensão, conforme demonstrado na Figura 5.1. Após o ponto de virada na

mistura, o sistema passa a se comportar como um fluido homogêneo. Durante período antes da virada, altos níveis de energia de cisalhamento são fornecidos à pasta aglomerada, tanto pelo próprio atrito interno da matriz, quanto pela movimentação dos agregados através do efeito de "moinho de bolas" (WILLIAMS; SAAK; JENNINGS, 1999). Os autores (PILEGGI, 2001; PILEGGI et al., 2001) citam a obtenção de concretos mais fluídos e estáveis através da adição de água de forma fracionada.

Quando os materiais são misturados de uma só vez com o teor total de água do sistema (como no procedimento de mistura da norma de argamassas NBR 13276), o ponto de virada da composição ocorre apenas em função da distribuição do líquido no meio, sendo que as forças capilares resultantes são de baixa intensidade e rapidamente extintas. Como conseqüência, a energia fornecida ao sistema para desaglomerar a matriz é pequena, resultando em níveis de torque na virada baixos, baixa eficiência do processo e concretos instáveis e com menor fluidez (PILEGGI, 2001; PILEGGI et al., 2001).

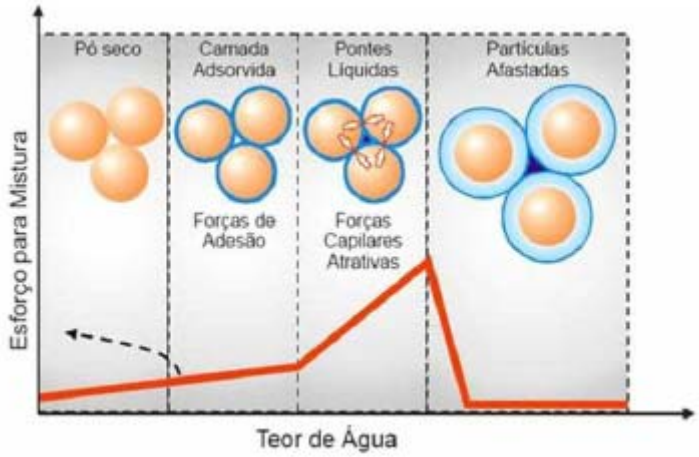


Figura 5.1 - Representação esquemática das camadas adsorvidas de ligação e das pontes líquidas de ligação entre duas partículas (laranja) imersas num meio líquido (azul). Azul claro – líquido de recobrimento da superfície e afastamento das partículas; Azul escuro – líquido de preenchimento dos vazios (PILEGGI, 2001a).

Na presença de aditivos incorporadores de ar o cenário torna-se ainda mais complexo, pois, neste caso, o processo de mistura não só influencia o estado de homogeneização e dispersão das partículas, mas também determina o teor de ar resultante na argamassa fresca. Como o teor de ar incorporado altera fortemente as características reológicas das argamassas (BANFILL, 1991; CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005; STRUBLE; JIANG, 2004) e, também, tem impacto significativo no revestimento endurecido, o processo de mistura torna-se ainda mais importante.

5.3 INFLUÊNCIA DO TIPO DE MISTURA NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS AVALIADO POR SQUEEZE-FLOW

Trabalho de (ANTUNES; JOHN; PILEGGI, 2005) demonstrou que comportamento de uma composição de argamassa no ensaio de squeeze-flow em função da forma de adição de água na mistura foi variável. Amostras provenientes de bateladas com adição do pó na água apresentaram maiores cargas para serem deformadas e maior variabilidade nos resultados, do que aquelas preparadas através da adição gradual da água no pó.

Na presente pesquisa, 14 argamassas são preparadas em laboratório através de métodos distintos de mistura (manual ou mecânica e variando a forma de adição de água) e as características no estado fresco e comportamento de squeeze-flow resultantes são avaliados.

5.3.1 Experimental

Mistura

Bateladas de 2kg de cada argamassa foram preparadas com teor de água recomendado pelo fabricante, seguindo três procedimentos de mistura distintos:

- **Manual** – mistura manual realizada por diferentes operadores (alunos de pós-graduação em Eng. Civil, engenheiros e técnicos de empresas produtoras de argamassas, funcionários de laboratórios de ensaios técnicos na área de construção) sem definição do procedimento de adição de água e tempo de mistura;
- **Norma** – mistura mecânica em argamassadeira de laboratório (Hobart N50) de acordo com a norma NBR 13276, que consiste em: (1) adição de toda a água na cuba, (2) vertimento da argamassa anidra na cuba; (3) mistura na velocidade I do equipamento por 60 segundos com interrupção para revolver a argamassa com espátula;
- **Mecânica AF** – mistura mecânica em argamassadeira de laboratório com adição de água de maneira fracionada: (1) vertimento da argamassa anidra na cuba, (2) adição em fluxo contínuo de metade do teor de água em 40 segundos com misturador na velocidade I, (3) mistura por mais 20 segundos, (4) adição em fluxo contínuo da outra metade do teor de água por 40 segundos com misturador na velocidade I, (5) mistura por mais 20 segundos. Tempo total de mistura igual a 2 minutos. Tempo de mistura com o teor de água total igual a 20 segundos.

Avaliação das argamassas no estado fresco

- Densidade aparente e teor de ar incorporado (NBR 13278);
- Squeeze-flow em amostras de 10mm de altura e 101m de diâmetro (conforme Figura 3.3c), realizado 15 minutos após a mistura com deslocamento de 2,5mm e velocidade de 0,1mm/s. Equipamento INSTRON 5569 com célula de carga de 1kN.

No intuito de obter uma avaliação mais representativa, os procedimentos descritos acima são repetidos 3 vezes para cada tipo de mistura, ou seja, no total são 9 bateladas de cada argamassa (3 para cada tipo de mistura) com realização dos ensaios descritos. Os resultados de densidade aparente, teor de ar incorporado, são calculados através da média dos valores obtidos entre as 3 repetições para cada tipo de mistura.

5.3.2 Teor de ar

Os produtos apresentaram ampla faixa de teor de ar incorporado medido imediatamente após a mistura. Argamassas K, E e P com teor abaixo de 7%, grupo intermediário com valores entre 10 e 20% (I, H, O), e a maior parte dos materiais com valores acima dos 20%.

De maneira geral a mistura manual produz argamassas com menor teor de ar incorporado em relação às bateladas produzidas pelas misturas mecânicas, conforme a Figura 5.2. A incorporação de ar é afetada pelo tipo e teor de aditivo, pela dispersão da pasta e do aditivo na composição, pela turbulência causada pelo processo de mistura para incorporar as bolhas de ar e pelas características reológicas da pasta (viscosidade e tensão de escoamento) para garantir a estabilidade das bolhas (STRUBLE; JIANG, 2004). Desta forma, as diferenças observadas nos teores de ar entre as composições são resultantes da combinação das características de cada produto com o processo de mistura aplicado.

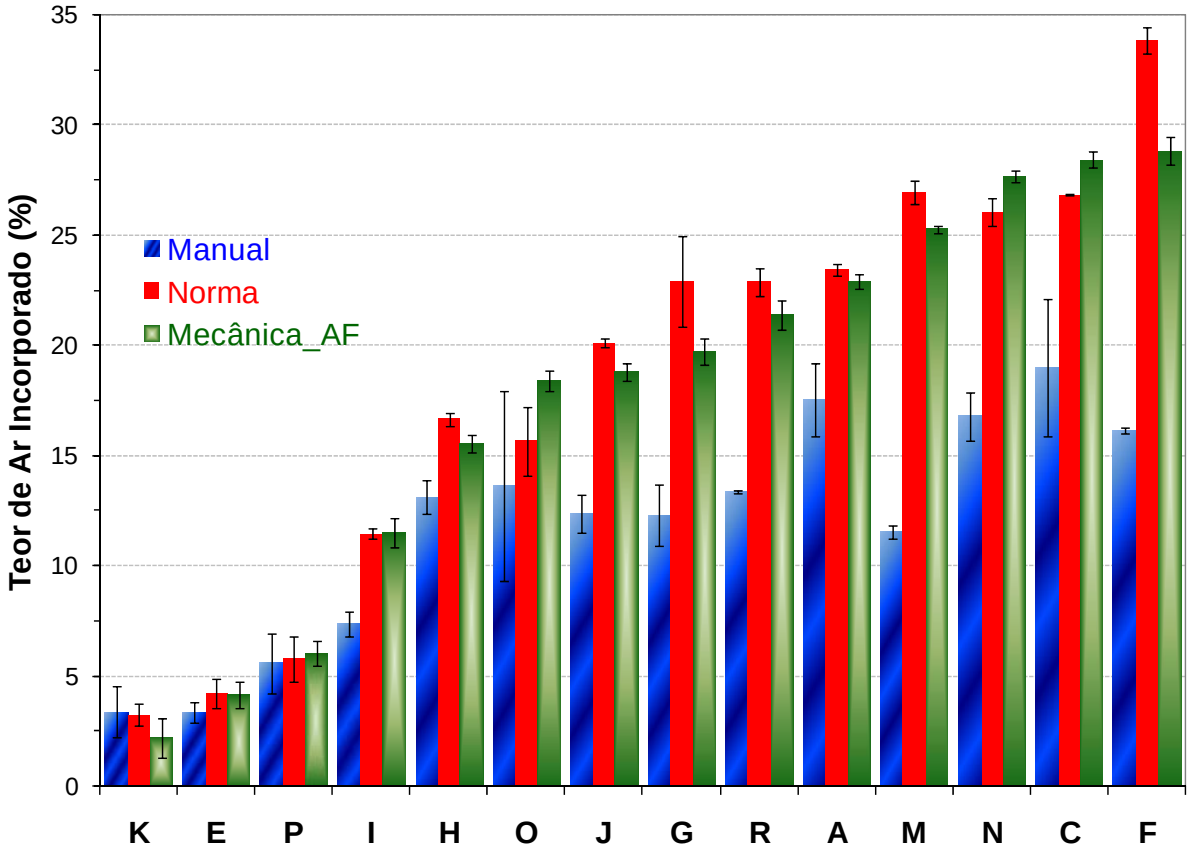


Figura 5.2 - Teor de ar incorporado nas argamassas frescas em função do tipo de mistura aplicado. Argamassas dispostas em ordem crescente de ar incorporado resultante da mistura MecAF.

5.3.3 Squeeze-flow

Devido ao grande número de dados, foram escolhidos os resultados de algumas argamassas para exemplificar os comportamentos verificados. Em todos os materiais testados, a mistura Manual resultou em maiores cargas para deformar as amostras, inclusive com maior variação entre as bateladas do mesmo tipo de mistura (exemplos nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5), visto que é uma mistura de baixa energia e não padronizada.

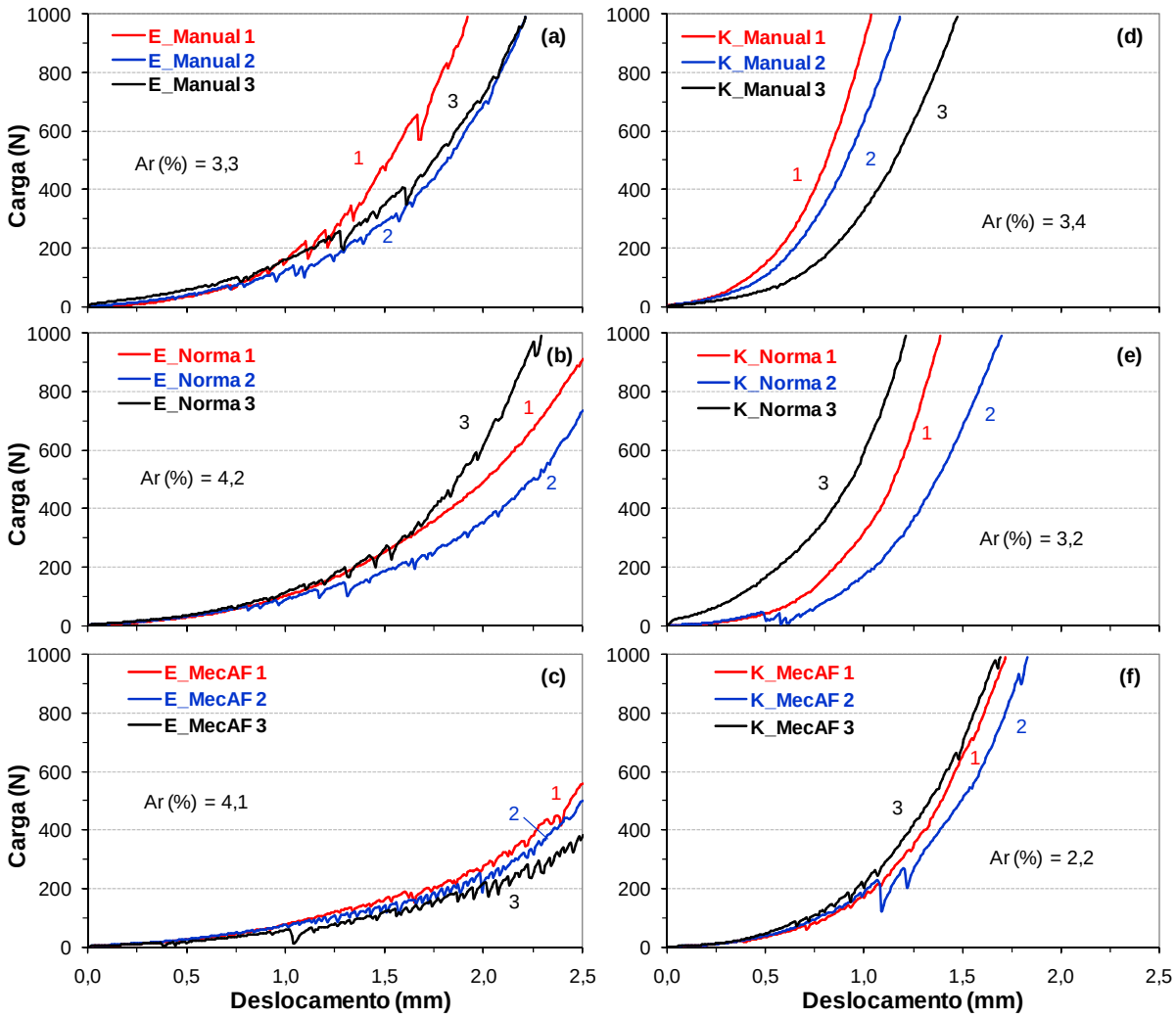


Figura 5.3 - Resultados de carga vs. deslocamento obtidos por squeeze-flow das argamassas E (a, b, c) e K (d, e, f) em função do tipo de mistura aplicado: Manual, Norma e MecAF.

Uma mistura de baixa energia não destrói os aglomerados e nem distribui a água de maneira uniforme, produzindo um material heterogêneo. Essa heterogeneidade é manifestada, principalmente, quando o material é solicitado durante o fluxo no ensaio de squeeze-flow, sendo necessárias cargas maiores para deformar as argamassas e causando variação deste esforço. Na prática, pode resultar em uma argamassa mais difícil de ser aplicada, com variação no comportamento reológico ou evolução microestrutural heterogênea.

Quando misturados mecanicamente a energia fornecida é maior e padronizada (até certo ponto), resultando em argamassas mais homogêneas e dispersas e, na grande maioria dos casos com maior teor de ar e menores cargas de squeeze-flow.

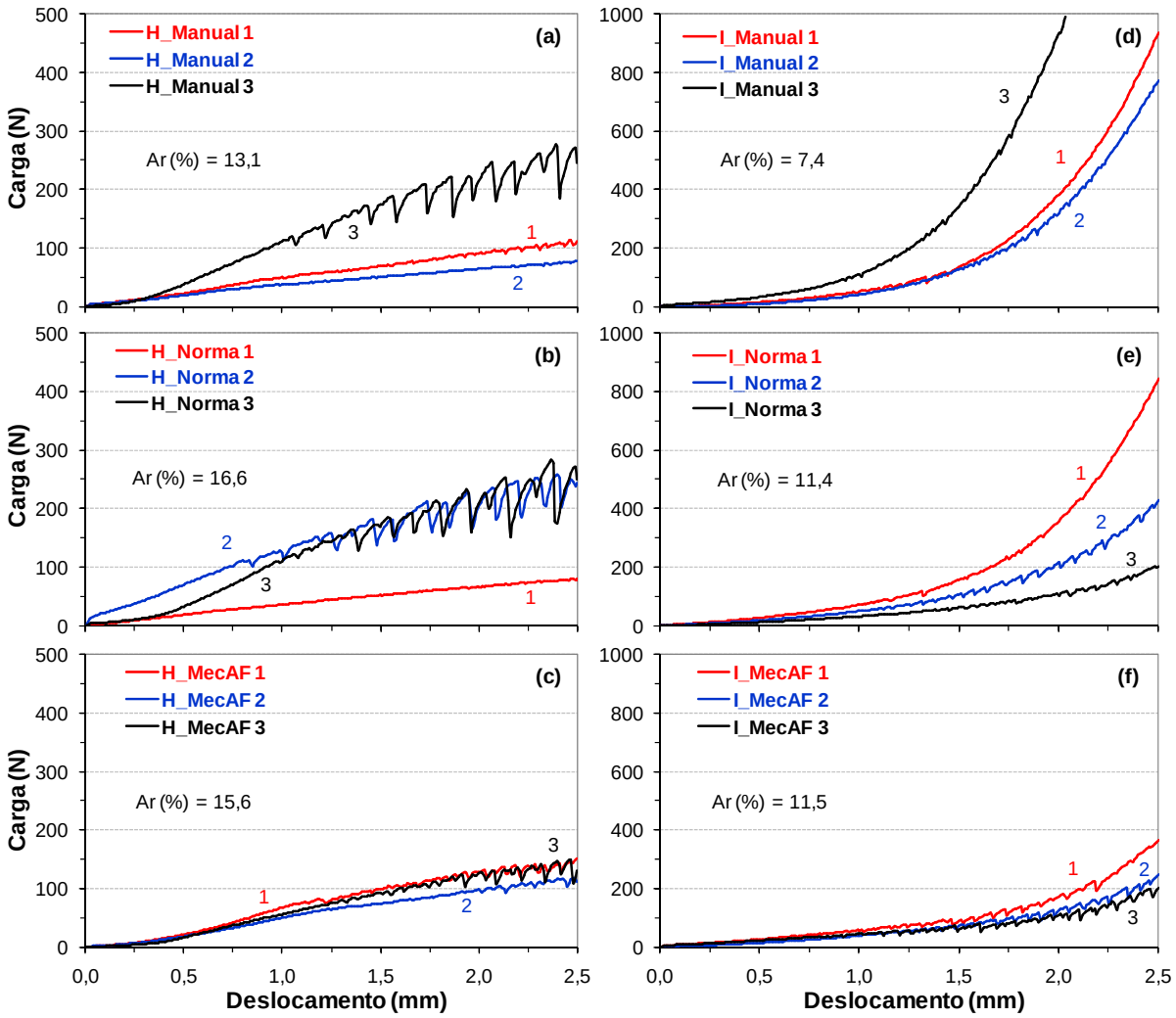


Figura 5.4 - Resultados de carga vs. deslocamento obtidos por squeeze-flow das argamassas H (a, b, c) e I (d, e, f) em função do tipo de mistura aplicado: Manual, Norma e MecAF.

Avaliando o efeito da forma de adição de água na mistura mecânica, verifica-se que para as argamassas E e K de baixo teor de ar (exemplo na Figura 5.3) e H, I e O de médio teor (exemplo na Figura 5.4) de ar, o procedimento MecAf aumentou ainda mais a eficiência da mistura. Isso é comprovado pelas menores cargas de squeeze-flow obtidas e, também, pela maior repetibilidade entre bateladas, visto que o processo forneceu mais energia para desaglomeração e homogeneização das argamassas. Nos casos exemplificados, os teores de ar das bateladas preparadas pelo procedimento MecAF foram iguais ou menores do que os da Norma, reforçando que a maior eficiência da mistura foi a causa para o comportamento reológico mais fluido das amostras MecAF.

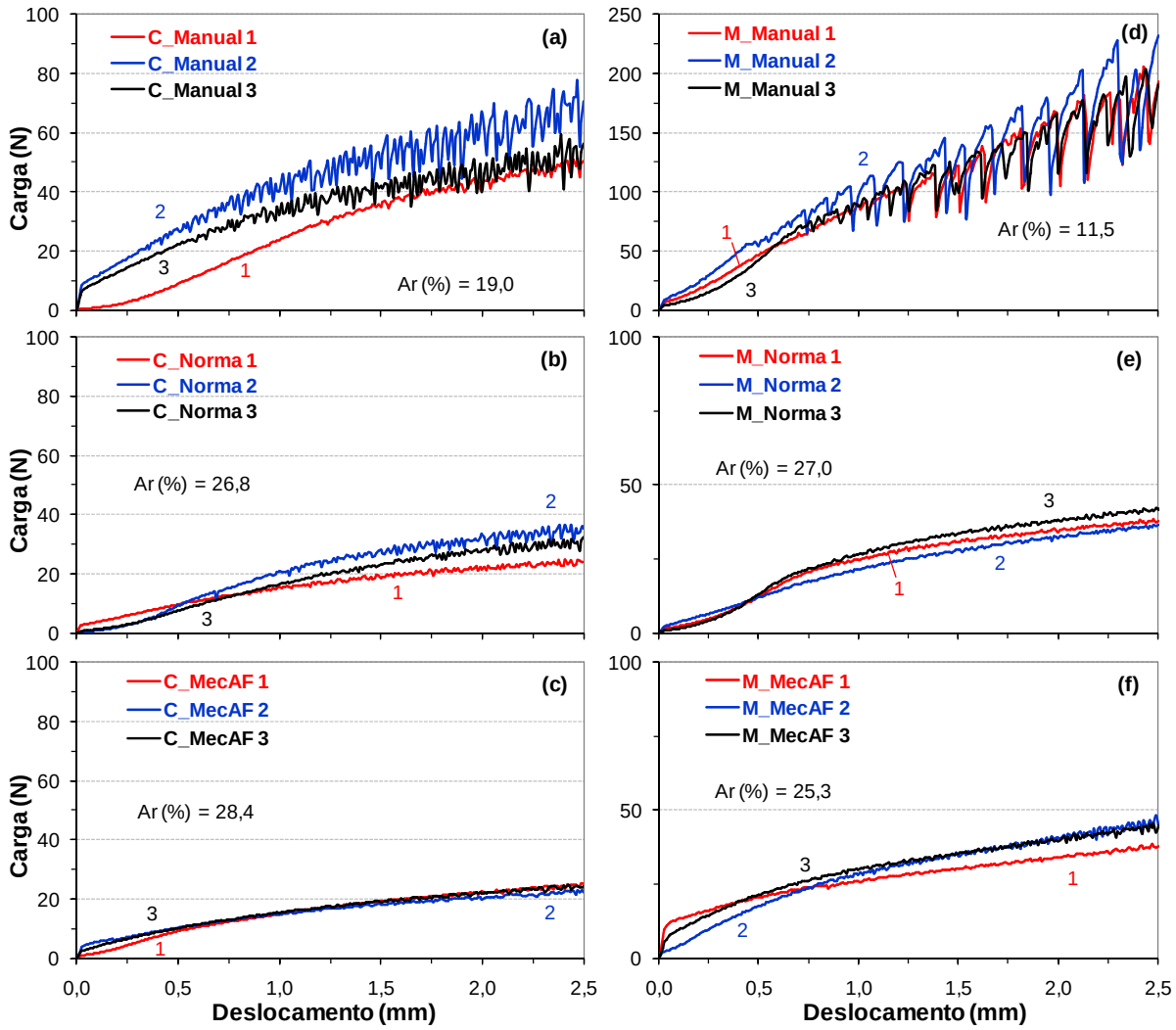


Figura 5.5 - Resultados de carga vs. deslocamento obtidos por squeeze-flow das argamassas C (a, b, c) e M (d, e, f) em função do tipo de mistura aplicado: Manual, Norma e MecAF.

Nas argamassas com elevado teor de ar (J, R, G, A, N, C, M e F), exemplificadas por C e M na Figura 5.5, a forma de adição de água não teve influencia perceptível no comportamento reológico avaliado por squeeze-flow, uma vez que os níveis de carga são muito similares e praticamente não ocorre variação entre curvas de bateladas diferentes (o mesmo ocorrendo com o produto P).

Contudo, isto não significa que a desaglomeração e homogeneização não foram mais efetivas quando os materiais foram preparados pelo procedimento MecAf em relação a Norma. É provável que não tenham sido identificadas diferenças devido à influência dos altos teores de ar no comportamento dos sistemas. Eventuais aglomerados de partículas finas na pasta que, geralmente, causam perturbações perceptíveis no fluxo, podem ter o efeito amenizado ou encoberto em decorrência dos teores elevados de ar, da sua característica compressiva e capacidade de afastamento dos agregados. Assim, o fluxo do sistema (avaliado

por squeeze-flow) fica menos sensível ao estado de dispersão das partículas finas da pasta. Outra possibilidade é a atuação dos aditivos incorporadores de ar como dispersantes (RIXOM; MAILVAGANAM, 1999), facilitando a dispersão dos finos.

A Figura 5.6 fornece uma visão geral do resumo dos resultados de squeeze-flow discutidos neste item.

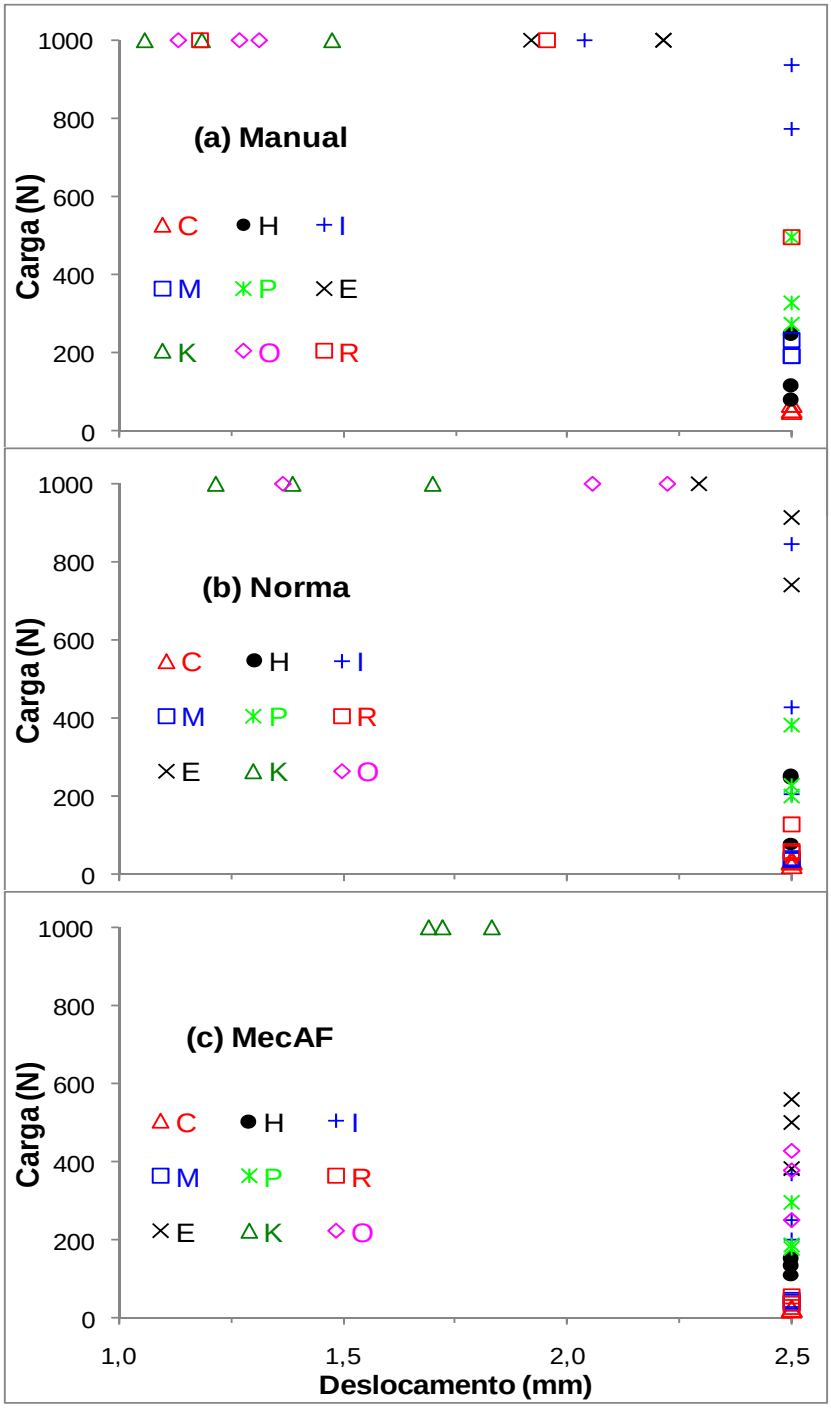


Figura 5.6 - Resumo dos resultados de squeeze-flow em função do tipo de mistura aplicado. (a) Manual; (b) Norma; (c) MecAF. São plotados os valores de carga máxima em 2,5mm ou os valores de deslocamento máximo a 1000N das 3 repetições realizadas cada argamassa.

No gráfico (a), referente à mistura Manual, muitas argamassas atingiram 1000N antes do deslocamento máximo (2,5mm) previsto no programa de ensaio e, mesmo os produtos com cargas menores, apresentaram variações significativas entre bateladas. Com a utilização da mistura Norma (b), os valores de carga são menores (ou atingem maiores deformações), mas a falta de repetibilidade ainda pode ser observada. Em (c) a adição de água de forma fracionada promoveu materiais mais fluidos e com menor variação entre bateladas.

5.4 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE MISTURA POR REOMETRIA ROTACIONAL

A técnica de reometria rotacional foi utilizada para medir o comportamento de mistura das argamassas do mercado.

5.4.1 Experimental

Reômetro rotacional para argamassas e concretos

O reômetro rotacional, desenvolvido no (PCC-USP), para caracterização do comportamento de mistura e da natureza reológica sob fluxo turbulento de argamassas e concretos foi utilizado neste projeto, Figura 5.7.

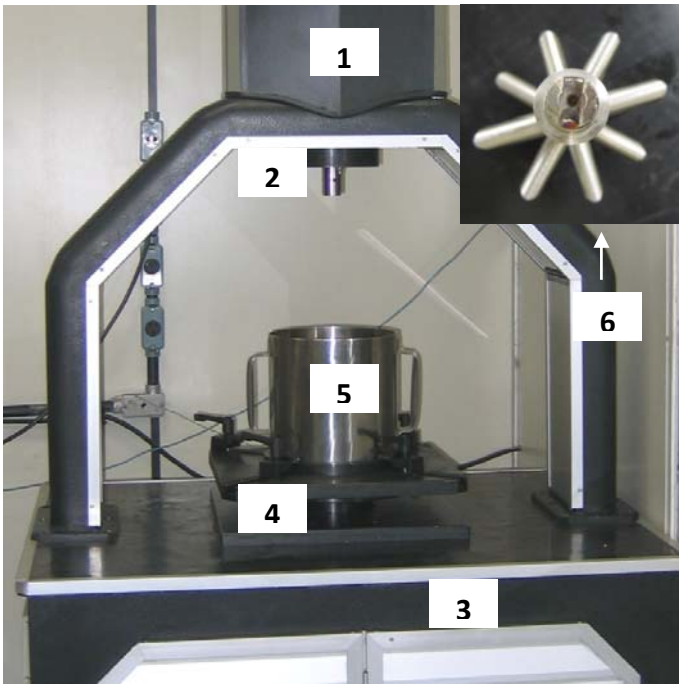


Figura 5.7 - Reômetro para argamassas, destacando seus componentes: 1) torre superior; 2) dispositivo rotacional; 3) base de reação e console; 4) elevador; 5) recipiente de ensaio; 6) Geometria de mistura e ensaio composta por haletas radiais montadas em espiral.

Os ensaios são realizados com a geometria de ensaio (6) acoplada no dispositivo rotacional (1), são medidos os valores de torque necessários para girar a geometria de ensaio com haletas (6) em função das diferentes rotações que podem ser empregadas. Todas as operações de controle operacional, coleta e armazenamento de dados são feitas através de software de controle.

Procedimento

Bateladas de 4kg de material anidro foram submetidas à mistura por 5 minutos em rotação constante (500rpm) com a adição controlada de água (vazão constante de 6g/s) a partir de 60 segundos.

5.4.2 Resultados

Na Figura 5.8 são demonstradas as curvas de mistura obtidas no reômetro rotacional. São parâmetros importantes de serem avaliados o torque máximo atingido, torque final, tempo para atingir torque constante e a área sob a curva. Esta última é um indicativo da energia consumida no processo. Todas as argamassas foram ensaiadas até 360 segundos de mistura, mas para o cálculo de energia foi padronizada a área sob a curva entre 30 e 250 segundos.

De acordo com o processo descrito na Figura 5.1, os níveis de torque aumentam em função do aumento das forças capilares com a constante adição de água, até que no teor de água do ponto de virada essas forças diminuem significativamente e os níveis de torque caem. Entretanto, como é comum a utilização de aditivos incorporadores de ar, o processo ainda é mais complexo em argamassas, visto que as bolhas são incorporadas simultaneamente à dispersão e homogeneização das partículas. Desta forma, o conceito de “virada” fica parcialmente comprometido, uma vez que o ar afasta os agregados diminuindo o atrito e, conseqüentemente, o torque. Tornando a interpretação dos resultados em argamassas mais complexa.

As argamassas apresentaram comportamentos variados, sendo que na Figura 5.8a são ilustradas as curvas de mistura torque abaixo de 6N.m e energia de mistura inferior a 550N.m.s, conforme a Figura 5.9. A curva da argamassa G é a que mais se destaca das outras

no gráfico, sendo a mistura que exigiu o menor esforço do equipamento (torque máximo 4,5N.m; energia de mistura 290N.m.s).

Na Figura 5.8b são demonstradas os resultados das argamassas que demandaram maior energia de mistura. Não só o torque máximo é mais elevado, mas os valores finais, em muitos casos, permanecem elevados mesmo após 300s de mistura, como nas argamassas P e S.

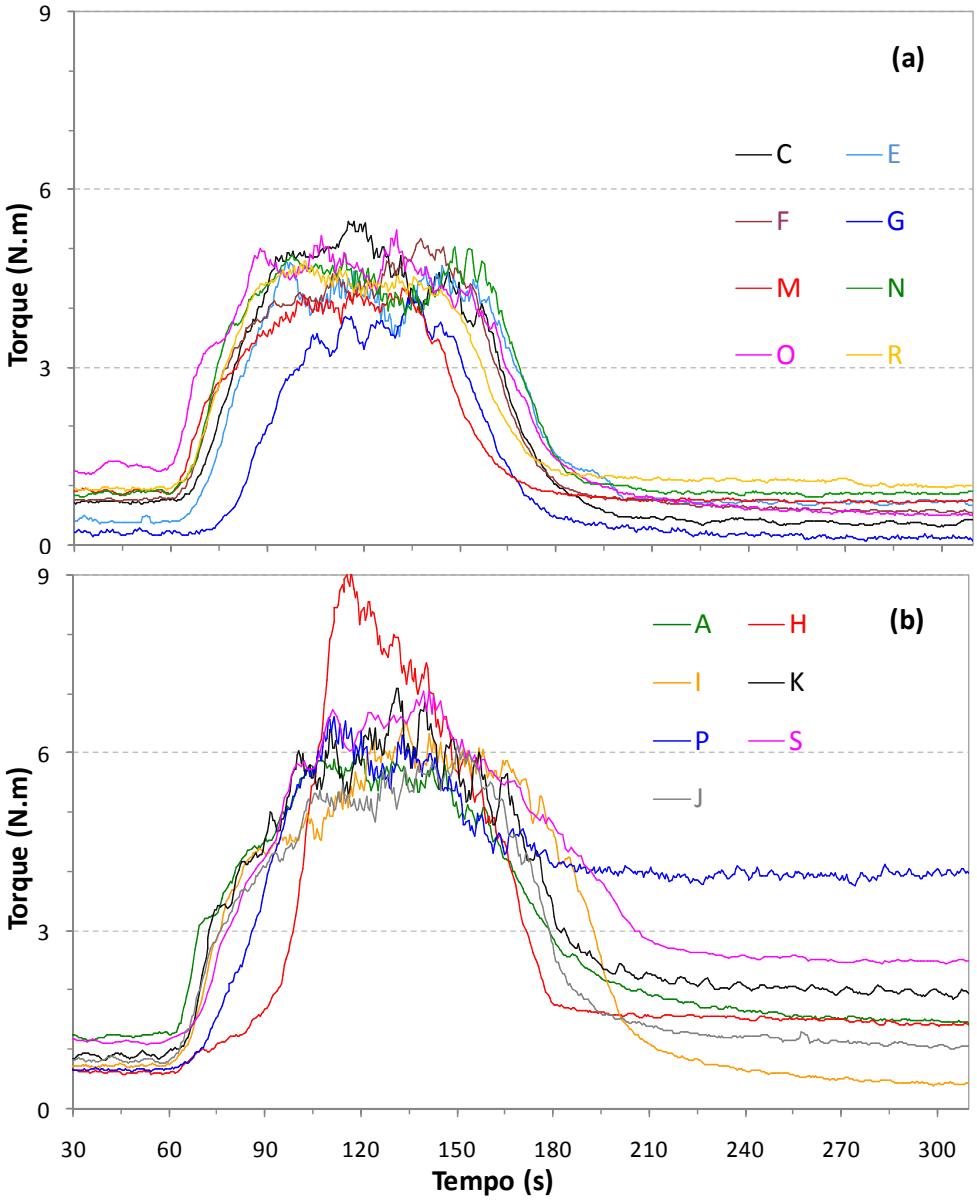


Figura 5.8 - Curvas de mistura das argamassas testadas no reômetro rotacional. (a) Produtos com energia de mistura abaixo de 550N.m.s. (b) Produtos com energia de mistura acima de 550N.m.s. A energia de mistura é calculada como a área embaixo da curva entre 30 e 250 segundos.

Vale destacar o comportamento diferenciado da argamassa H, começando pelo maior tempo para molhamento das partículas, conforme indicado pelo aumento “atrasado” do torque em relação aos demais produtos. Entretanto, após este período o aumento no torque foi

bastante intenso, atingindo o maior valor entre todas as argamassas avaliadas. Por fim, a queda de foi igualmente intensa, indicando a estabilização da mistura (redução e estabilização do torque) em tempo curto.

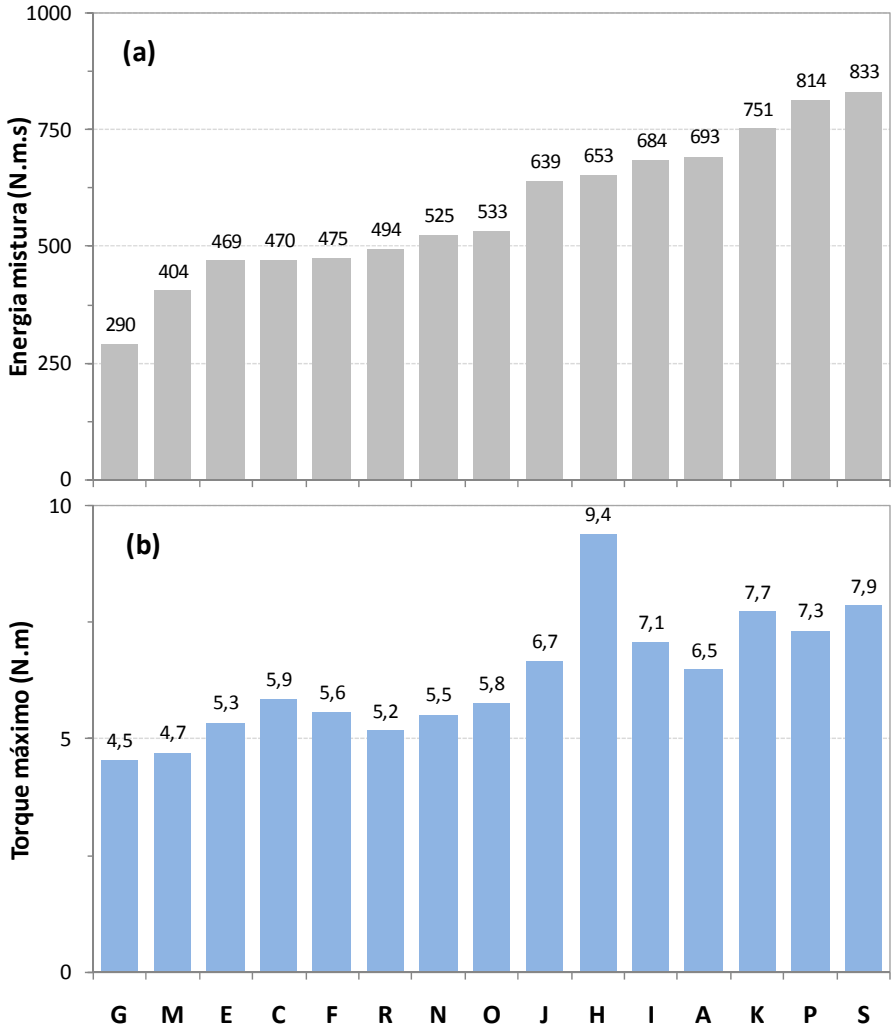


Figura 5.9 - (a) Energia de mistura e (b) torque máximo das argamassas ensaiadas no reômetro rotacional.

Sabe-se que a área superficial exerce grande influência durante a mistura, visto que o torque para a virada apresentou uma relação direta e linear em função dessa característica nos concretos refratários (PILEGGI, 2001). Os resultados de energia de mistura e torque máximo (Figura 5.9) em função da área superficial das argamassas são ilustrados na Figura 5.10. Contudo, não se observa uma relação clara entre os parâmetros medidos na mistura e a área superficial das argamassas devido ao efeito do ar incorporado no sistema.

Infelizmente os teores de ar não foram registrados após mistura das argamassas no reômetro. Mas, utilizando os valores obtidos através da mistura seguindo o procedimento MecAF demonstrados na Figura 5.2, é possível inferir que o teor de ar tem significativa

influencia nos comportamentos de mistura medidos. A Figura 5.11 revela que a energia de mistura (a) e o torque máximo (b) são inversamente proporcionais ao teor de ar incorporado.

É importante lembrar que aditivos eventualmente presentes nas formulações não são considerados nas discussões, visto que não são conhecidas as informações referentes aos aditivos. Mas é provável que aditivos como hidrofugantes e modificadores de viscosidade (e sua interação com incorporadores de ar) entre outros causem alterações no comportamento de mistura das argamassas.

As conclusões obtidas através dos ensaios de squeeze-flow nas argamassas preparadas com diferentes procedimentos de mistura estão de acordo com as medidas efetuadas no reômetro rotacional. As argamassas com elevado teor de ar e menos sensíveis à mistura de acordo com o squeeze-flow, foram as que necessitaram de menores torques e energia. Similarmente, as argamassas mais sensíveis ao procedimento de mistura foram as que resultaram em níveis altos de torque máximo e elevada energia de mistura.

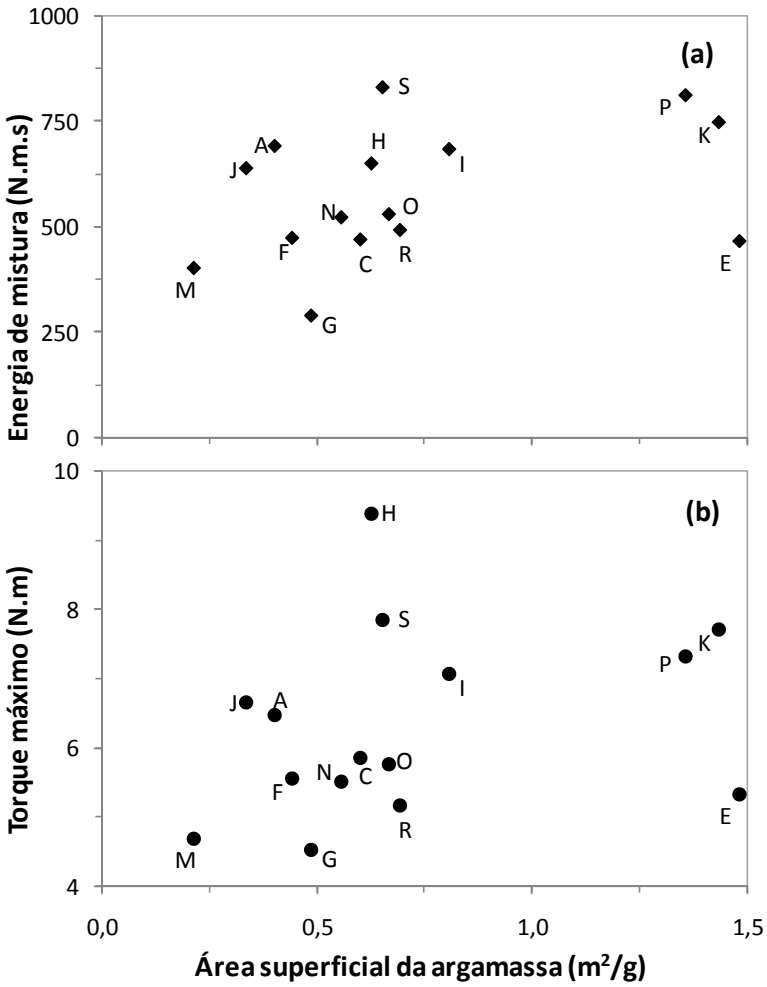


Figura 5.10 - (a) Energia de mistura e (b) torque máximo em função da área superficial das argamassas (Tabela 4.1).

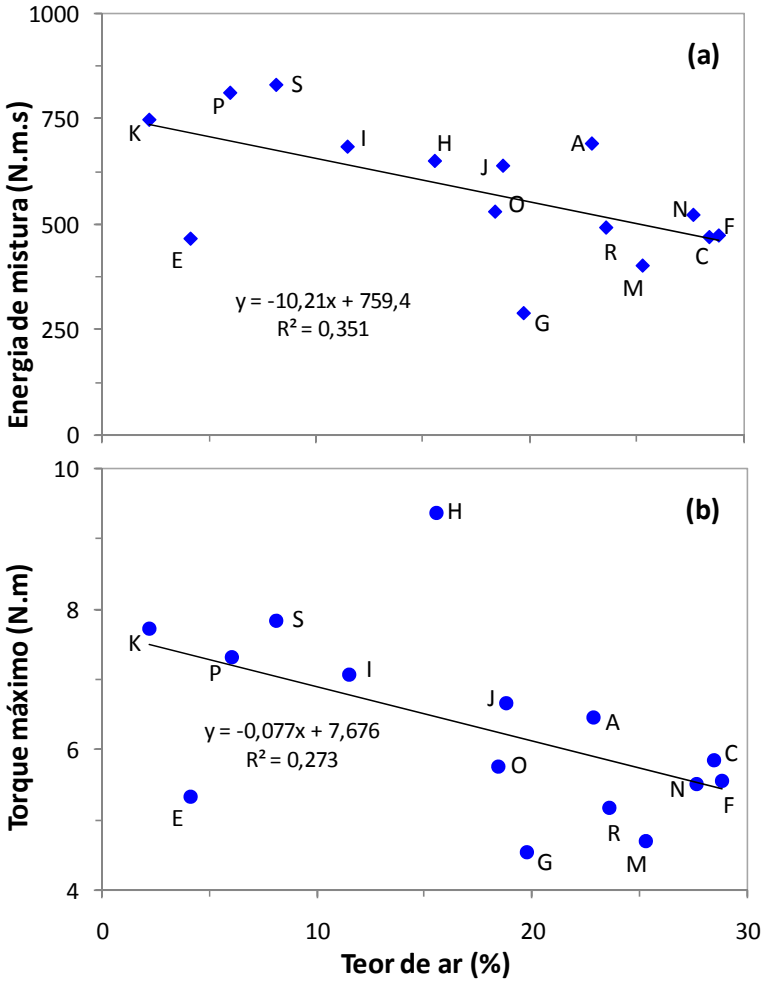


Figura 5.11 - (a) Energia de mistura e (b) torque máximo das argamassas em função do teor de ar obtido através de mistura em argamassadeira com procedimento MecAF (Figura 5.2).

5.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O método de squeeze-flow é capaz de identificar alterações decorrentes do processo de mistura. Os resultados indicam que a metodologia prescrita na norma é pouco eficiente para a mistura de argamassas em laboratório, visto que alterações no comportamento reológico e baixa repetibilidade entre bateladas foram observadas. A adição de água de forma fracionada é uma solução simples para melhorar a eficiência do processo e, por isso, o procedimento MecAF é adotado para mistura das argamassas avaliadas nos capítulos seguintes da tese.

A técnica de reometria rotacional é uma importante ferramenta para o desenvolvimento e controle de formulações. Através dela foi verificado que os produtos do

mercado apresentam comportamento de mistura variado e muito influenciado pelo teor de ar das argamassas. Os métodos de avaliação mostraram-se complementares e, se utilizados em conjunto, permitem uma caracterização ampla, contemplando situações desde o processo de mistura até a aplicação.

Já do ponto de vista tecnológico, o comportamento de mistura tem impacto nos laboratórios de controle de qualidade e desenvolvimento e, principalmente, nos canteiros de obra. As diferenças de energia de mistura e torque máximo podem ser consideradas na especificação do misturador e do procedimento de preparação adequados a cada composição. Tais implicações devem também ser consideradas nos critérios para formulação dos produtos.

6 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE ARGAMASSAS DO MERCADO

O comportamento reológico das argamassas é um dos focos principais do trabalho, pois é um dos critérios empregados para o desenvolvimento do método de formulação. Os produtos (nacionais e europeus) caracterizados no Capítulo 4 são avaliados reologicamente na presente etapa.

6.1 OBJETIVOS

Determinar o comportamento reológico das argamassas por reometria rotacional e squeeze-flow. Associar o comportamento reológico com as características dos produtos no estado fluido.

6.2 AVALIAÇÃO REOLÓGICA POR REOMETRIA ROTACIONAL

A utilização da reometria rotacional visa avaliar o comportamento reológico em condições variáveis de cisalhamento e turbulência do sistema. Situações encontradas não só na mistura das argamassas, mas também nos processos de transporte e bombeamento (no caso de argamassas projetadas).

6.2.1 Experimental

Imediatamente após o processo de mistura no reômetro rotacional descrito no Capítulo 5 (item 5.4.1), as argamassas foram submetidas ao teste de ciclo de cisalhamento efetuado no mesmo equipamento. O procedimento consiste em impor ao material diferentes velocidades de rotação (50 a 1250rpm) em patamares de 20 segundos, primeiro acelerando e depois desacelerando, conforme Figura 6.1. São utilizados os valores de torque no final de cada patamar para a criação das curvas de torque contra rotação consideradas na análise.

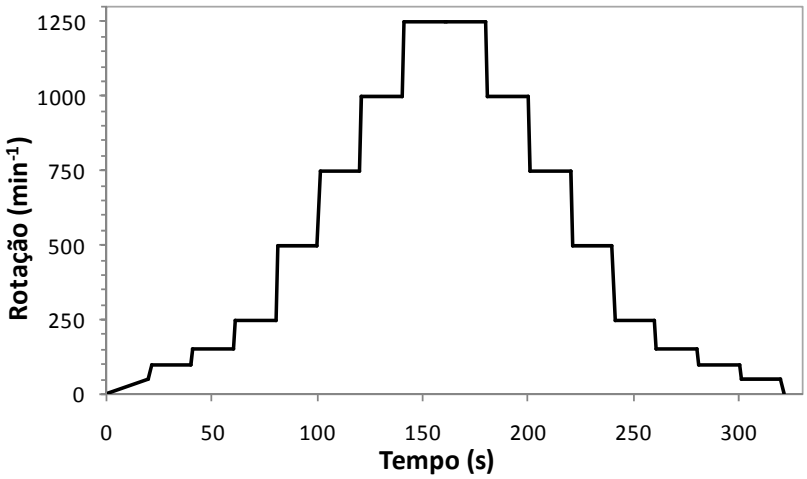


Figura 6.1 - Programa de rotações do teste de ciclo de cisalhamento.

6.2.2 Resultados

A Figura 6.2 apresenta os resultados de reometria das argamassas testadas. Devido ao grande número de resultados, apenas as curvas de aceleração são demonstradas e dois gráficos são utilizados para facilitar a visualização.

A extrapolação das curvas para rotação nula fornece um indicativo indireto da tensão de escoamento das composições. Com exceção das argamassas K, P e S (com valores em torno de 5N.m), todos os produtos apresentaram torque de escoamento (equivalente da tensão de escoamento) entre 0,5 e 2N.m.

Este parâmetro reológico, que representa a tensão necessária para iniciar o fluxo de um fluido em repouso, tem relevância em situações práticas, pois exerce grande influência na espessura de camada que pode ser aplicada e durante o processo de bombeamento. Um valor mínimo é requerido para evitar segregação, mas se muito elevado pode dificultar o transporte na tubulação através da formação do chamado “plug-flow” (entupimento no fim da linha devido à queda de pressão).

Em suspensões a tensão de escoamento é originada pela aglomeração das partículas formando uma rede tridimensional rígida pelo sistema (OLIVEIRA et al., 2000), o que no

caso das argamassas ocorre na pasta. Analisando os resultados de torque de escoamento em função da área superficial das argamassas, como demonstrado na Figura 6.3, não é possível identificar uma relação consistente entre os dois parâmetros.

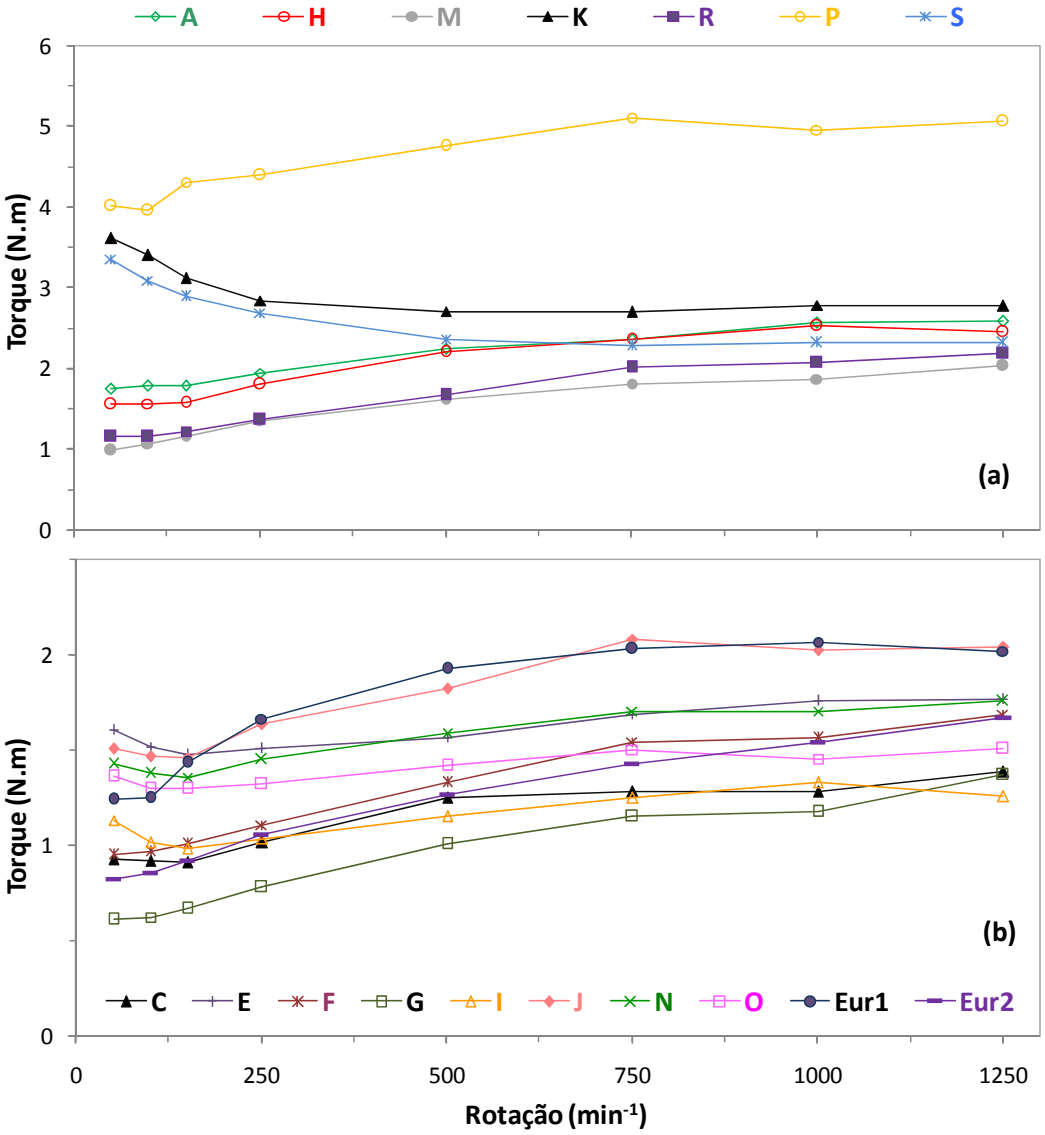


Figura 6.2 - Curvas torque vs. rotação dos testes de ciclo de cisalhamento. Apenas as curvas de aceleração são demonstradas para facilitar a visualização.

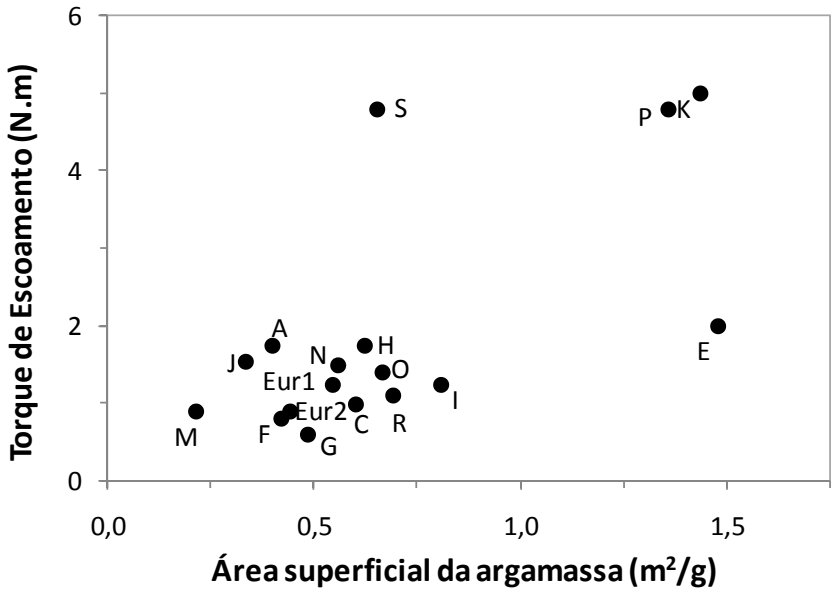


Figura 6.3 - Torque de escoamento em função da área superficial das argamassas.

Utilizando os teores de ar das argamassas quando misturadas através do procedimento de mistura MecAF (Figura 5.2) foi verificado o efeito do ar na tensão de escoamento das argamassas. A Figura 6.4 mostra duas populações bem definidas, uma com baixo teor de ar apresentando alta tensão de escoamento (com exceção do produto E), enquanto as demais, com teor de ar acima de 10%, apresentaram valores de torque de escoamento baixos.

Em relação ao fluxo, os resultados indicam materiais com comportamento do tipo pseudoplástico (suave curvatura para baixo) com tensão de escoamento. Algumas argamassas apresentaram níveis de torque mais elevados (gráfico a), enquanto a maioria apresentou níveis de torque menores. As argamassas K e S foram as únicas em que o torque diminui com o aumento da rotação. Uma possível causa para tal resultado é a perda de coesão do material com o aumento da velocidade, fazendo que os esforços não sejam transferidos de uma região para outra no sistema.

Nos ensaios reológicos rotacionais com varredura de rotação, em geral a própria medida afeta o comportamento do material, pois a história de cisalhamento modifica a estrutura do fluido. Em argamassas é ainda mais problemático uma vez que os patamares de cisalhamento podem alterar as condições de dispersão e homogeneidade do sistema e, principalmente, o teor de ar. Com a geometria e programa utilizados neste estudo, a incorporação de ar é muito intensa (baseado em resultados não demonstrados das argamassas Alfa, Beta, Gama e Delta) e tem grande influência nos resultados obtidos. Portanto, o programa de rotações utilizado não é o mais adequado para avaliação de argamassas de

revestimento. É recomendável a aplicação apenas da aceleração (ou desaceleração) e em patamares curtos a fim de evitar a incorporação excessiva de ar.

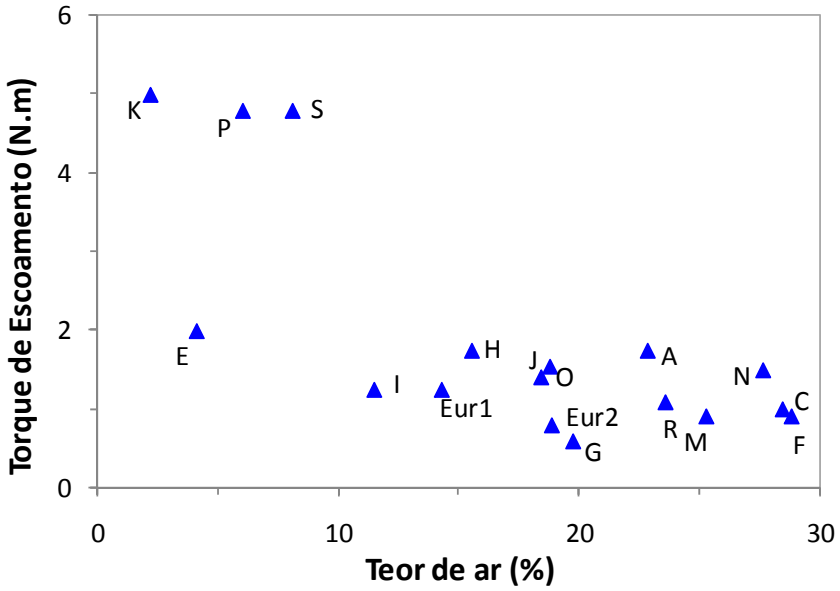


Figura 6.4 - Torque de escoamento em função do teor de ar das argamassas.

6.3 AVALIAÇÃO REOLÓGICA POR SQUEEZE-FLOW

Nesta etapa todas as argamassas descritas no Capítulo 4 foram avaliadas por squeeze-flow. Procurou-se ampliar o deslocamento máximo e as velocidades utilizadas, para uma caracterização mais efetiva.

6.3.1 Experimental

Nesta etapa foram avaliados 32 produtos de revestimento. Os materiais foram preparados em argamassadeira de laboratório (com teor de água recomendado pelo fabricante) seguindo o procedimento com adição de água de forma fracionada descrito no Capítulo 5 (item 5.3.1). Foram determinados a densidade aparente e o teor de ar incorporado das argamassas frescas.

Os testes de squeeze-flow foram realizados com a mesma configuração e no mesmo equipamento descritos no item 5.3.1. Entretanto, nos ensaios discutidos a seguir o deslocamento máximo imposto é de 9mm e três velocidades distintas são empregadas (0,1, 1 e 3mm/s).

6.3.2 Resultados

As Tabelas Tabela 6.1 e Tabela 6.2 listam a distribuição de fases e densidade aparente no estado fresco dos produtos nacionais e europeus, respectivamente. Em ambos os grupos de produtos observa-se uma faixa ampla de densidade aparente, decorrente da densidade real dos materiais e dos teores de água e ar presentes nas composições. No caso de materiais aplicados manualmente, a densidade aparente determina o "peso" da argamassa que o aplicador sente no lançamento, podendo ter relevância sobre a produtividade do mesmo.

Tabela 6.1 - Densidade aparente e distribuição de fases das argamassas nacionais no estado fluido. Agreg = teor de agregados em volume; Pasta = Finos + Água + Ar em volume; DA = densidade aparente.

Argamassa	**Agreg** (%v)	**Finos** (%v)	**Água** (%v)	**Ar** (%v)	**Pasta** (%v)	**DA** (g/cm^3)
A	39,0	15,5	22,7	22,9	61,0	1,74
C	35,9	16,5	22,8	24,8	64,1	1,65
D	38,3	19,1	24,3	18,3	61,7	1,77
E	52,9	13,1	30,8	3,3	47,1	2,02
F	30,0	17,7	22,1	30,3	70,0	1,52
G	45,0	11,1	22,6	21,3	55,0	1,73
H	35,0	23,1	27,4	14,5	65,0	1,93
I	33,8	22,9	31,1	12,2	66,2	1,87
J	42,4	13,3	26,3	18,1	57,6	1,83
K	48,7	19,3	30,2	1,8	51,3	2,00
M	39,3	14,6	20,8	25,3	60,7	1,65
N	37,9	11,6	24,9	25,6	62,1	1,63
O	42,2	12,8	27,6	17,4	57,8	1,85
P	41,6	20,6	26,8	11,1	58,4	1,92
Q	54,7	12,3	24,5	8,5	45,3	2,06
R	43,7	15,2	22,3	18,9	56,3	1,82
S	52,4	10,1	28,9	8,6	47,6	1,99
T	47,1	16,2	26,6	10,0	52,9	1,93
V	40,4	11,5	24,2	24,0	59,6	1,73
X	42,2	12,3	22,2	23,4	57,8	1,74
Z	38,8	12,3	24,5	24,4	61,2	1,67
ALFA	45,3	21,5	27,1	6,2	54,7	1,99
BETA	42,5	11,7	24,0	21,8	57,5	1,76
GAMA	35,9	15,5	23,6	25,1	64,1	1,64
DELTA	41,4	11,7	22,0	24,9	58,6	1,69
Média	***41,9***	***15,2***	***25,2***	***17,7***	***58,1***	***1,80***
Máximo	*54,7*	*23,1*	*31,1*	*30,3*	*70,0*	*2,06*
Mínimo	*30,0*	*10,1*	*20,8*	*1,8*	*45,3*	*1,52*

Tabela 6.2 - Densidade aparente e distribuição de fases das argamassas européias no estado fluido. Agreg = teor de agregados em volume; Pasta = Finos + Água + Ar em volume; DA = densidade aparente.

Argamassa	Agreg (%v)	Finos (%v)	Água (%v)	Ar (%v)	Pasta (%v)	DA (g/cm^3)
Eur1	44,3	16,3	25,9	13,6	55,7	1,87
Eur2	42,0	14,6	24,5	18,9	58,0	1,78
Eur3	33,3	18,6	29,0	19,1	66,7	1,67
Eur4	39,3	15,9	26,6	18,1	60,7	1,75
Eur5	50,0	15,8	28,8	5,5	50,0	2,09
Eur6	47,5	13,0	28,3	11,2	52,5	1,86
Eur7	38,9	17,9	35,6	7,6	61,1	1,84
Média	***42,2***	***16,0***	***28,40***	***13,4***	***57,8***	***1,84***
Máximo	*50,0*	*18,6*	*35,6*	*19,1*	*66,7*	*2,09*
Mínimo	*33,3*	*13,0*	*24,5*	*5,5*	*50,0*	*1,67*

Os valores médios de distribuição de fases traçam o perfil do produto nacional no estado fresco, sendo que a média dos exemplares europeus foi similar à nacional. Apenas os teores de água e ar foram um pouco diferentes, sendo este último 4% maior na média brasileira. Nenhum dos materiais europeus incorporou mais de 20% de ar, enquanto praticamente metade das argamassas brasileiras apresentou valores superiores a 20%.

Os valores de distribuição de fases são demonstrados também na forma de gráfico para auxiliar na análise, sendo as argamassas ordenadas em função crescente de teor de ar, conforme Figura 6.5 (argamassas nacionais) e Figura 6.6 (argamassas européias).

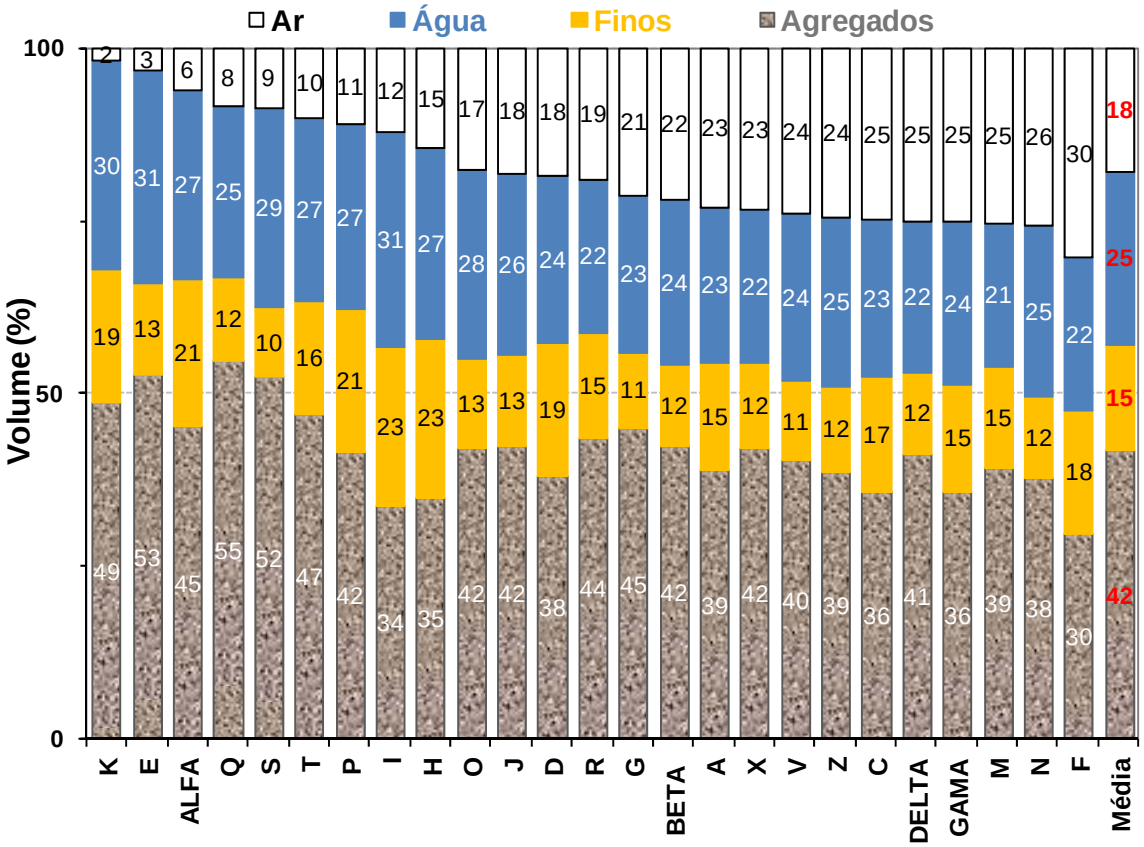


Figura 6.5 - Distribuição de fases das argamassas nacionais no estado fluido: Agregados e Pasta (Finos + Água + Ar). A distribuição de fases média é indicada.

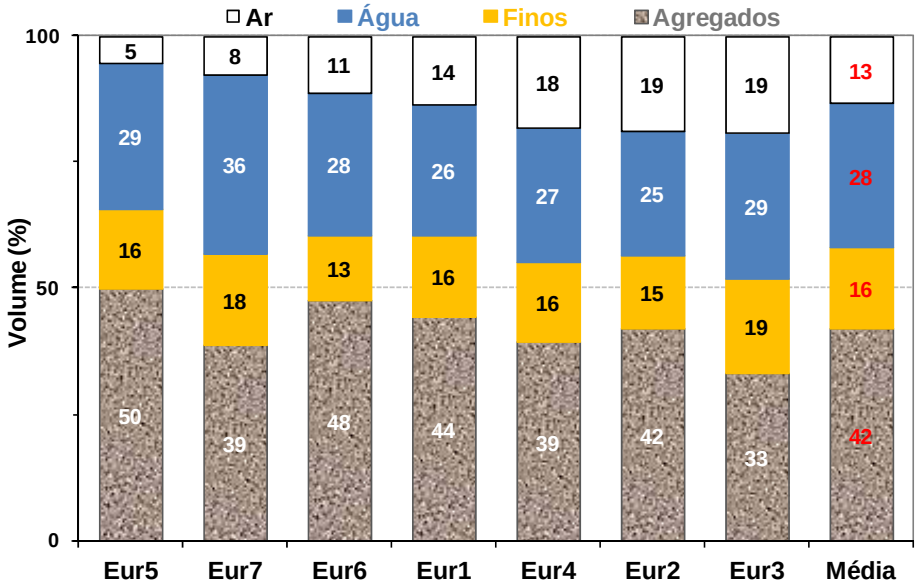


Figura 6.6 - Distribuição de fases das argamassas européias no estado fluido: Agregados e Pasta (Finos + Água + Ar). A distribuição de fases média é indicada.

Os resultados de squeeze-flow das argamassas nacionais são demonstrados na Figura 6.7. Em baixas velocidades (gráfico a), três grupos podem ser observados de acordo com o deslocamento máximo atingido.

O primeiro, com baixo deslocamento (argamassas K, Q e S), é caracterizado pela dificuldade de fluxo e manifestação do estágio de enrijecimento por deformação (*strain-hardening* – Capítulo 3), conforme as curvas completas de squeeze-flow no Apêndice B. Estas apresentam perfil passando direto do estágio inicial (deformação elástica) para o estágio de enrijecimento por deformação, sendo que as cargas aumentam muito para pequenos deslocamentos e a deformação plástica não ocorre. O aumento intenso das cargas é causado por altos níveis de atrito entre os agregados e pela ocorrência de segregação. Argamassas com esse comportamento tendem a ser de difícil aplicação.

No grupo com deslocamento intermediário (entre 2,5 e 6mm), as argamassas apresentam significativa deformação plástica (ou fluxo viscoso) antes de entrarem em *strain-hardening* e atingirem o valor de carga máxima.

Já os materiais com as maiores deformações, apresentam comportamento predominantemente de deformação plástica e com valores baixos de carga (na maioria dos casos), só ocorrendo a inversão para o terceiro estágio praticamente quando os agregados começam a ser comprimidos entre as placas, visto que acima de 7mm de deslocamento (significa espessura de 3mm restando na amostra) restam poucas camadas de agregado (depende da granulometria da argamassa), sendo uma situação extrema.

Quando submetidas a maiores velocidades de deslocamento (Figura 6.7b e c), as argamassas são menos suscetíveis à segregação da pasta através da estrutura formada pelos agregados (Capítulo 3) e fluem mais facilmente. Como resultado as deformações máximas atingidas são maiores ou os valores de carga na deformação máxima são menores, fazendo que as curvas obtidas em 1 e 3mm/s sejam deslocadas gradualmente em relação as de 0,1mm/s. Essa variação é um indicativo da tendência à separação de fases conforme discutido no Capítulo 3.

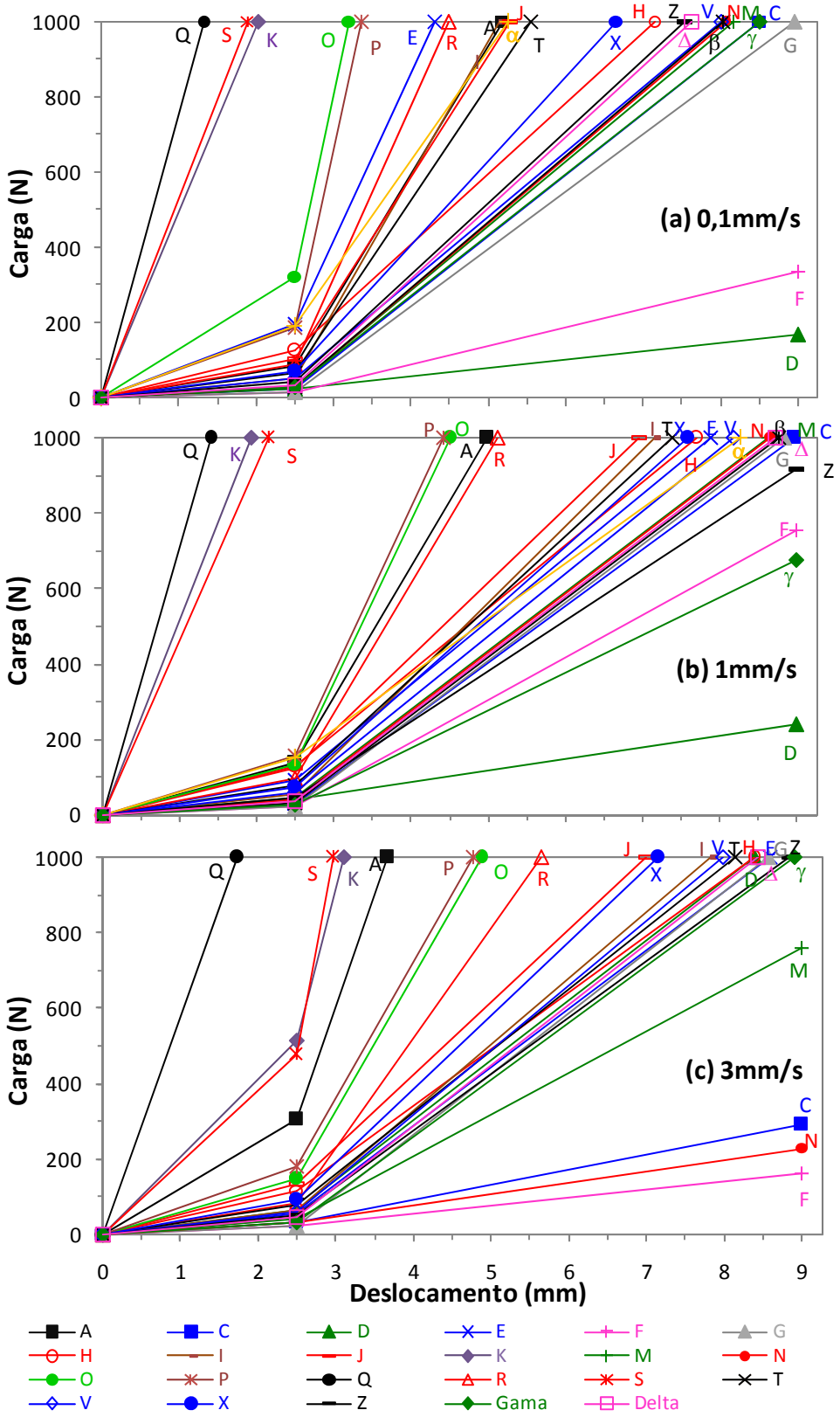


Figura 6.7 - Resultados de squeeze-flow das argamassas brasileiras ensaiadas em três velocidades distintas: (a) 0,1mm/s; (b)1mm/s; (c) 3mm/s. São plotados apenas os valores de carga em 2,5mm de deslocamento e de carga máxima.

Este efeito pode ser melhor observado através da Figura 6.8, que ilustra a variação de deslocamento máximo em 1 e 3mm/s em relação a 0,1mm/s. Os valores são plotados em função do próprio deslocamento para possibilitar a visualização conjunta do aumento relativo (%) e em que faixa de deslocamento ocorreu. Nota-se que a argamassa E dobrou o deslocamento, saindo de aproximadamente 4mm a 0,1mm/s chegando quase até a deformação máxima programada de 9mm a 3mm/s. De forma geral as argamassas com baixo e médio deslocamentos a 0,1mm/s (pontos no eixo x) apresentaram as maiores suscetibilidades à segregação. Por outro lado, o grupo de materiais de fácil deformação, apresentou os menores valores de aumento relativo de deslocamento, uma vez que as curvas de squeeze-flow dessas argamassas em diferentes velocidades não apresentam diferenças (conforme Apêndice B) durante o estágio de deformação plástica, diferenciando-se apenas em deslocamentos muito elevados.

Os valores negativos das argamassas A e G indicam que o deslocamento máximo diminuiu com o aumento da velocidade. São duas as possíveis causas para este comportamento: (1) erros durante a realização do teste, seja devido à demora entre os ensaios nas diferentes velocidades (ordem de ensaio 0,1, 1 e 3mm/s) e conseqüente aumento da viscosidade da pasta em decorrência da consolidação, ou por problemas no posicionamento inicial do punção (encosto); e (2) que este comportamento seja de fato a resposta reológica do material frente ao aumento de velocidade de solicitação, principalmente em materiais nos quais segregação é pequena ou inexistente (POITOU; RACINEUX, 2001).

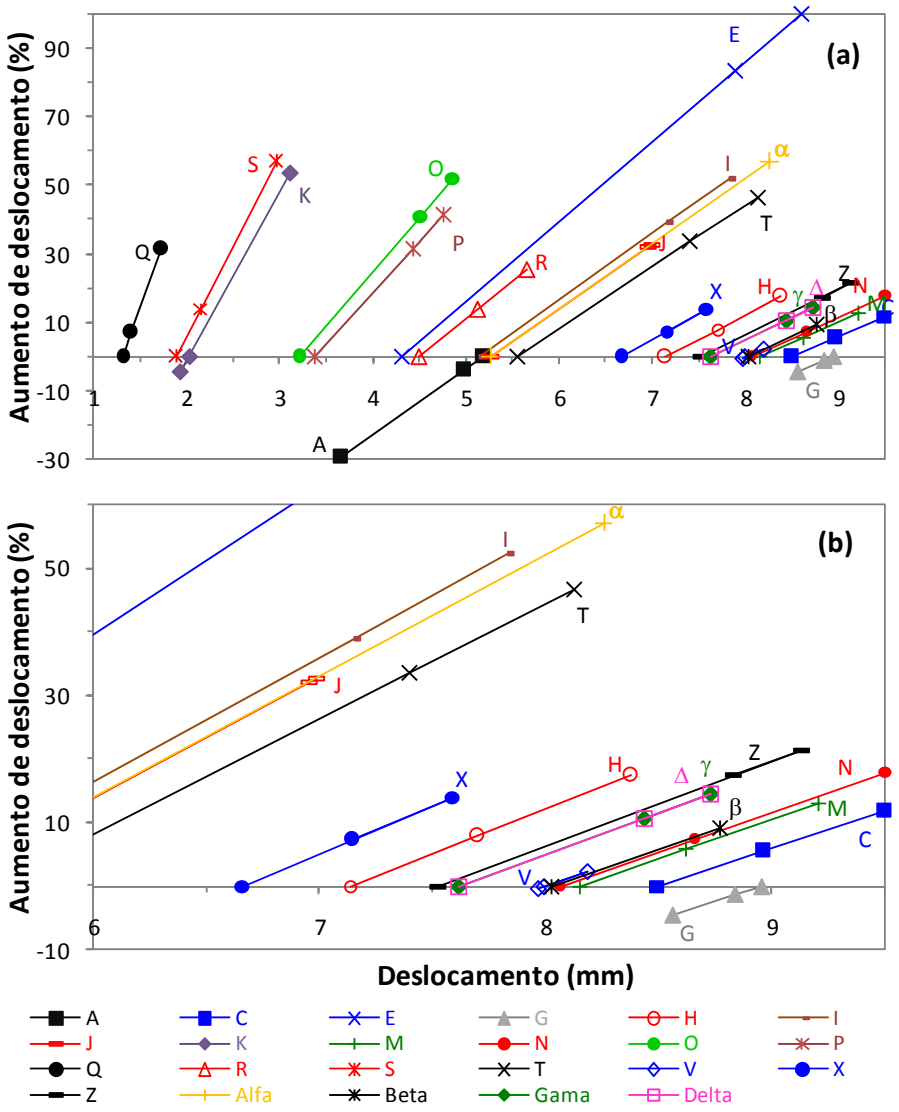


Figura 6.8 - Aumento de deslocamento máximo das argamassas brasileiras testadas a 1 e 3mm/s em relação ao deslocamento obtido a 0,1mm/s. (a) Escala total; (b) Ampliação da região de grande deslocamento.

Já os produtos europeus apresentaram deslocamentos intermediários e grandes quando submetidos ao squeeze-flow em 0,1mm/s (Figura 6.9), sendo que o menor deslocamento máximo atingido foi próximo de 4mm (Eur5). O aumento de velocidade do teste nas argamassas européias teve efeito similar ao observado nos produtos nacionais: as argamassas fluíram mais facilmente em decorrência da menor incidência de segregação. Os resultados de aumento relativo de deslocamento ilustrados na Figura 6.10 sugerem que as argamassas Eur5, Eur6 e Eur7 são significativamente influenciadas pela velocidade de deslocamento.

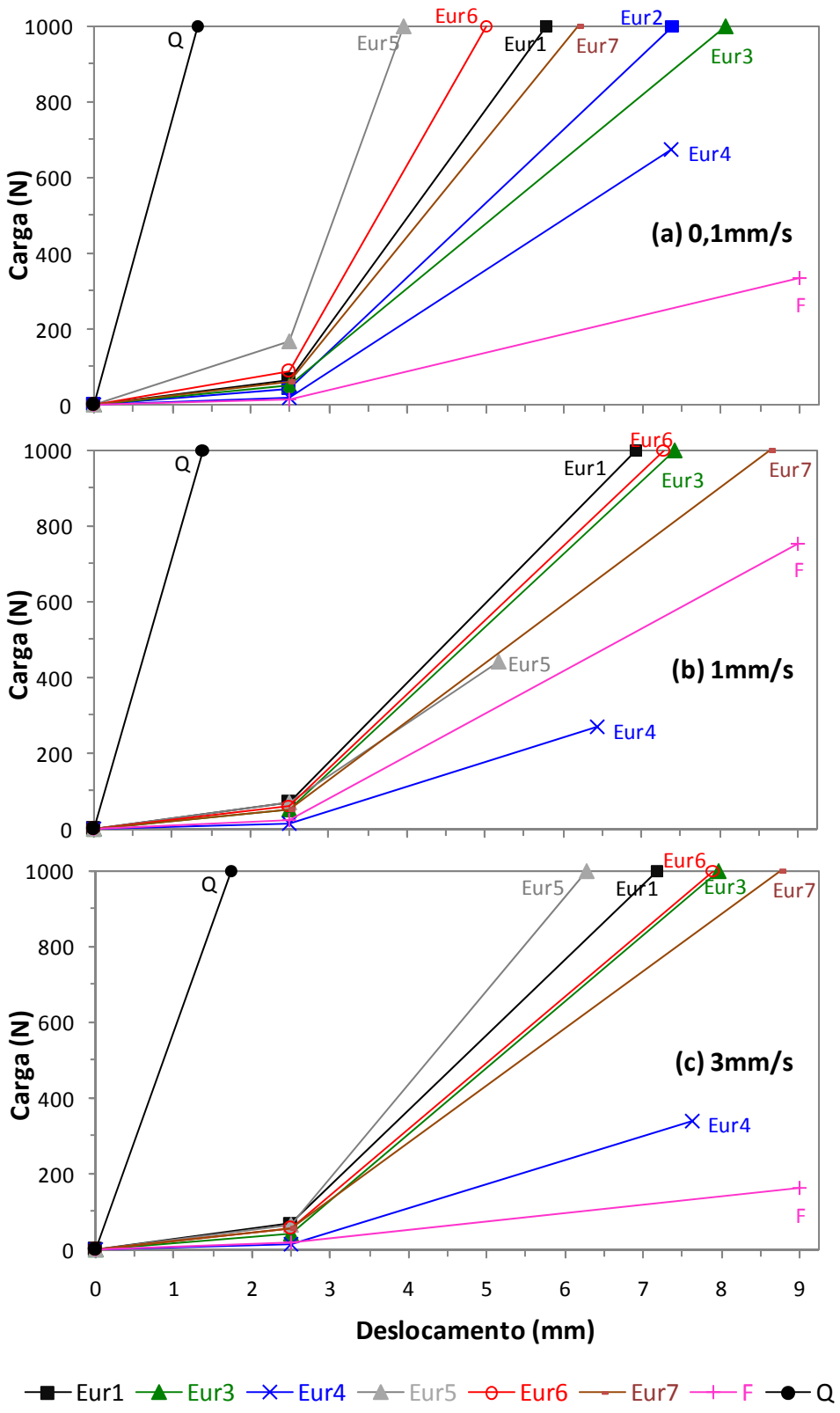


Figura 6.9 - Resultados de squeeze-flow das argamassas européias ensaiadas em três velocidades distintas: (a) 0,1mm/s; (b)1mm/s; (c) 3mm/s. São plotados apenas os valores de carga em 2,5mm de deslocamento e de carga máxima. Os resultados dos produtos F e Q (nacionais) são também demonstrados como referência para comparação.

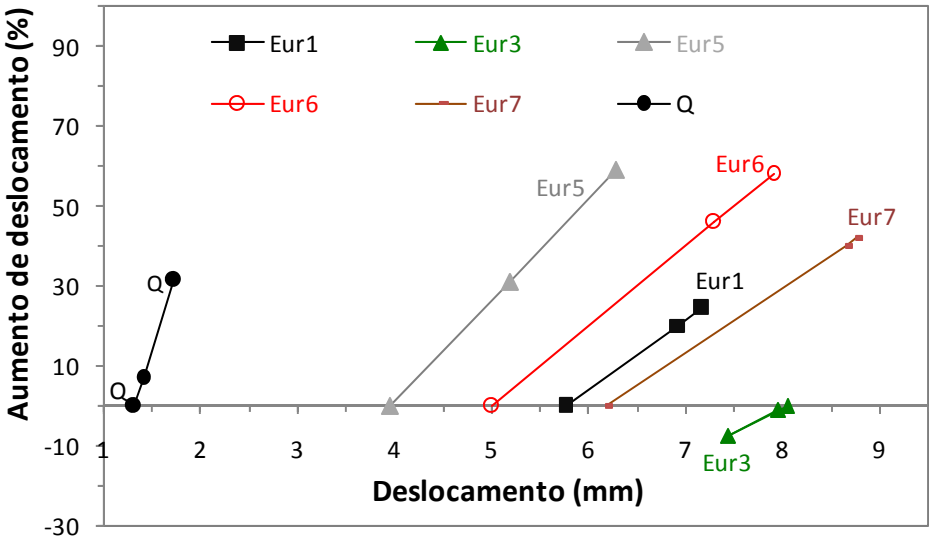


Figura 6.10 - Aumento de deslocamento máximo das argamassas européias testadas a 1 e 3mm/s em relação ao deslocamento obtido a 0,1mm/s.

De acordo com os resultados demonstrados, a avaliação do comportamento reológico por squeeze-flow na velocidade de 0,1mm/s é mais agressiva por intensificar a ocorrência de segregação. Portanto, os valores de deslocamento máximo nessa velocidade foram escolhidos para serem relacionados com as características das formulações no estado fluido, e fornecerem base para a compreensão dos fatores que governam o fluxo das argamassas sob squeeze-flow.

Um dos principais parâmetros de formulação tradicionalmente utilizados é a relação água / materiais secos. Contudo, como ilustrado na Figura 6.11, o mesmo não demonstrou nenhuma relação com os deslocamentos máximos obtidos por squeeze-flow, tendo em vista que não considera o teor de ar incorporado.

Por sua vez, o comportamento reológico apresentou uma clara tendência em função do o teor de ar, sendo que quanto maior o teor, menores são os esforços para deformação da argamassa e, conseqüentemente, maiores os deslocamentos máximos atingidos (Figura 6.12). O ar atua na pasta, aumenta seu volume e afasta os agregados (reduzindo o atrito entre eles); também muda algumas características, como aumento de coesão da pasta e redução da tendência à segregação. Este último fato pode ser confirmado através de uma rápida comparação entre a Figura 6.8b e a Figura 6.5.

A somatória dos fluidos (água + ar) apresentou relação similar a do ar com os resultados de squeeze-flow (Figura 6.13). Cada uma das fases tem características (como compressibilidade e interação com os finos, por exemplo) e funções distintas na formulação,

mas ambas colaboram para o afastamento dos agregados na microestrutura da argamassa fresca.

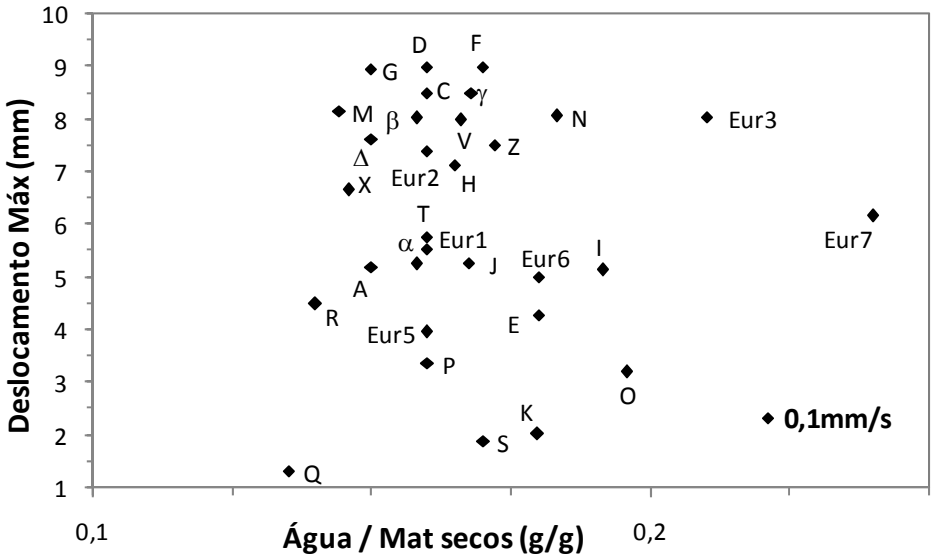


Figura 6.11 - Deslocamento máximo no squeeze-flow a 0,1mm/s em função da relação água / materiais secos em massa.

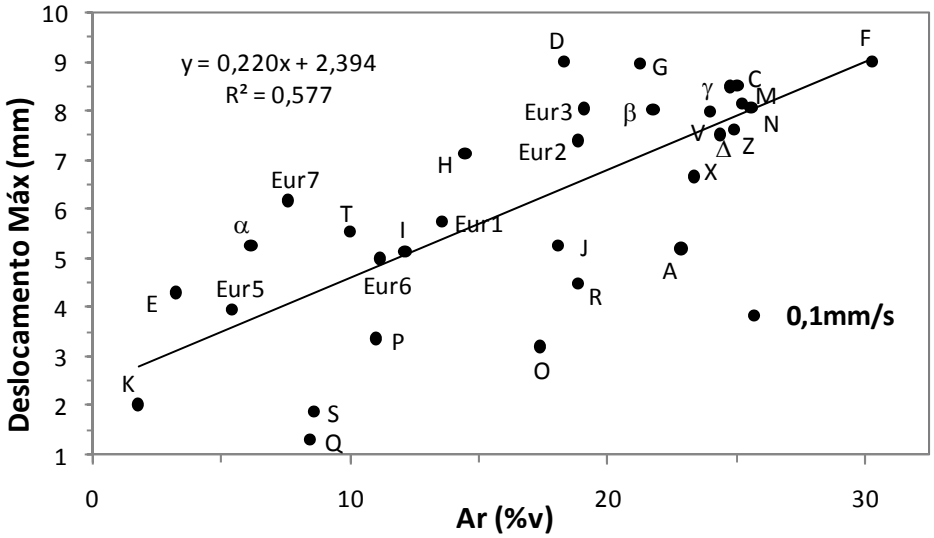


Figura 6.12 - Deslocamento máximo no squeeze-flow a 0,1mm/s em função do teor de ar das argamassas frescas.

A pasta é composta pelos fluidos mencionados aliados aos finos da composição, formando a suspensão concentrada que é a fase contínua do sistema. Coerentemente, o efeito do aumento da pasta no comportamento reológico (Figura 6.14) é o mesmo do que o discutido para o ar e água+ar. Entretanto, apesar da tendência geral observada nos três casos, verifica-se também que há uma dispersão dos dados. Ou seja, argamassas com teores de fases similares,

mas com comportamentos distintos. Este conjunto de resultados reforça a idéia de que o comportamento reológico é determinado não só pela quantidade, mas também pelas características das fases pasta e agregados.

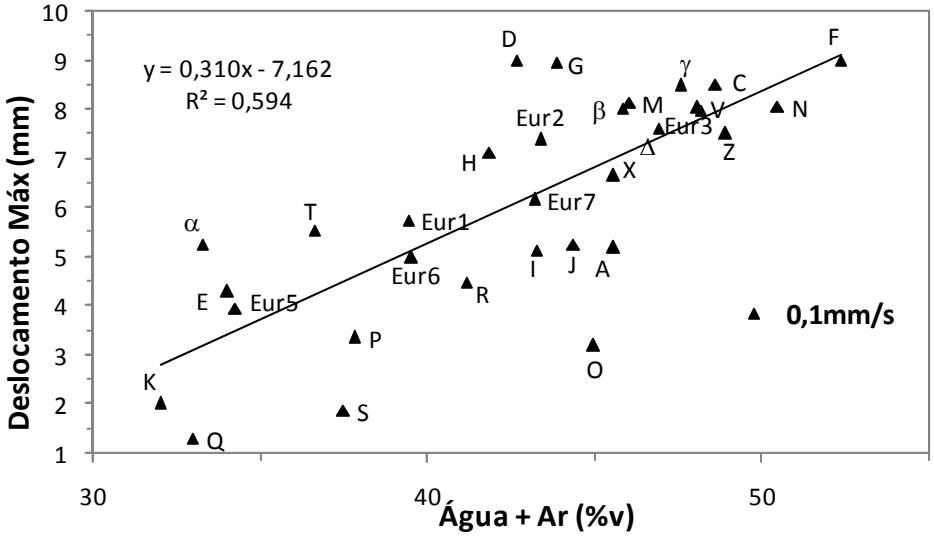


Figura 6.13 - Deslocamento máximo no squeeze-flow a 0,1mm/s em função do teor de água + ar das argamassas frescas.

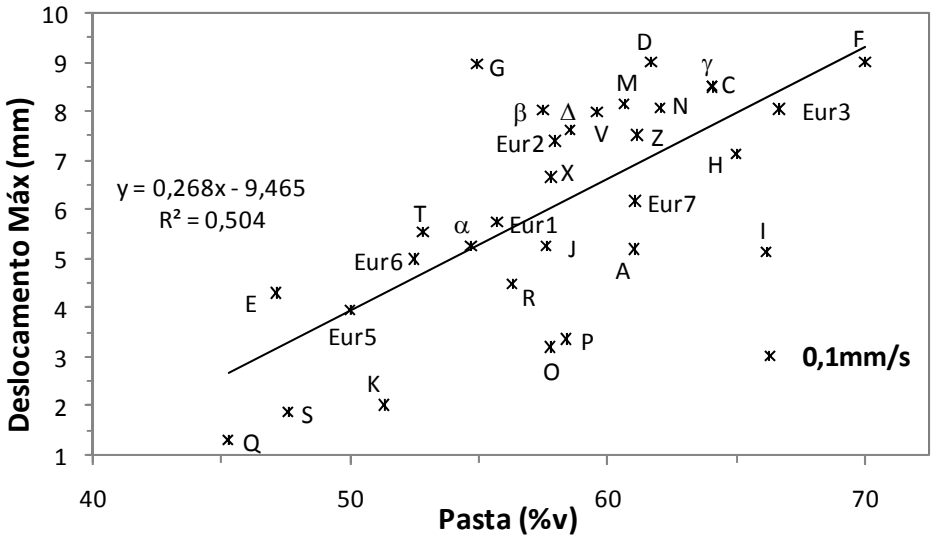


Figura 6.14 - Deslocamento máximo no squeeze-flow a 0,1mm/s em função do teor de pasta (finos + água + ar) das argamassas frescas.

6.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Todas as argamassas testadas através de reometria rotacional apresentaram tensão de escoamento, visto que em aplicações de revestimento o material deve suportar seu próprio peso até uma determinada espessura, permanecendo adequadamente na parede até que se consolide. O valor equivalente à tensão de escoamento (torque de escoamento) foi muito similar para a grande maioria das argamassas (entre 1 e 2N.m), com exceção dos produtos E, K e S com valores ao redor de 5N.m.

O comportamento pseudoplástico (redução da viscosidade com o aumento da taxa) foi predominante nos materiais sob fluxo nos ciclos de cisalhamento. Entretanto, tais resultados devem ser considerados com ressalvas. A combinação da geometria e programa de rotações utilizados com as características das argamassas (presença de aditivo incorporador de ar) fez que ocorresse uma intensa incorporação de ar durante os ensaios. Esta constatação só foi feita após a conclusão dos testes descritos (através de resultados não publicados até o momento), visto que foram os primeiros realizados em argamassas utilizando o reômetro do PCC-USP. Logo, esta classe de material necessita de procedimento diferenciado para avaliação com varredura de taxas de cisalhamento (rotação), empregando apenas aceleração (ou desaceleração) e patamares curtos em cada rotação, buscando a menor incorporação de ar possível durante o teste.

Os 32 produtos preparados em argamassadeira de laboratório apresentaram teores de ar bastante variáveis, desde quase nulo até 30%. No caso das argamassas nacionais, metade apresentou teor de ar superior a 20%, enquanto as européias não ultrapassaram este valor. Com exceção do teor de ar, as demais características médias de cada grupo foram similares, o que também ocorreu no estado anidro, conforme descrito no Capítulo 4.

As argamassas tiveram diversos comportamentos sob solicitações de squeeze-flow. No geral, os materiais com menores teores de fluidos e, conseqüentemente de pasta, foram mais difíceis de serem deformados, resultando em menores deslocamentos máximos. O teor de ar reduz a suscetibilidade à segregação de fases, indiretamente indicada pela variação de deslocamento máximo em função do aumento de velocidade.

7 CONCEITOS DE EMPACOTAMENTO E DISTÂNCIA DE SEPARAÇÃO DE PARTÍCULAS

As argamassas são formadas essencialmente de matérias-primas particuladas e, considerando o modelo microestrutural-reológico descrito no Capítulo 2, a forma como estas se dispõem espacialmente e se movimentam relativamente entre si têm influência nas características de fluxo do sistema. Sob esta ótica e frente aos resultados apresentados nos capítulos anteriores, dois fatores são indicados como principais no comportamento reológico das argamassas em squeeze-flow: a tendência à separação de fases e a distância entre os agregados. O primeiro depende basicamente da viscosidade da pasta e da permeabilidade do empacotamento formado pelos agregados (TOUTOU; ROUSSEL; LANOS, 2005). Já o segundo é definido pela quantidade de pasta em relação à de agregados e, também, pelo empacotamento destes.

7.1 OBJETIVO

Assim, o foco deste capítulo é a aplicação dos conceitos de empacotamento e distância de separação de partículas para a análise das distribuições granulométricas das argamassas e interpretação dos resultados reológicos obtidos até esta etapa.

7.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

7.2.1 Empacotamento de partículas

O empacotamento de partículas pode ser maximizado através da correta seleção dos diâmetros das partículas e de suas respectivas quantidades, fazendo que os espaços vazios sejam preenchidos com partículas de tamanho adequado (menores) e assim sucessivamente. Um dos modelos mais aceitos é o de Alfred, que considera um tamanho mínimo de partícula na distribuição, sendo mais próximo da realidade (OLIVEIRA et al., 2000). Este foi desenvolvido a partir do modelo de Andreasen culminando na Eq. 7.1, que se baseia na relação do tamanho das partículas, considerando-as maciças e esféricas, em função de seu

diâmetro D_P e do volume total de partículas menores que D_P necessário para preencher os vazios remanescentes:

$$CPFT = \left(\frac{D_P{}^q - D_S{}^q}{D_L{}^q - D_S{}^q} \right) \times 100\% \qquad \text{Equação (7.1)}$$

Onde: CPFT (*cumulative percent finer than*) é o volume percentual de partículas de diâmetro menor que D_P, D_L é o maior diâmetro contido na distribuição e q é o coeficiente de empacotamento (OLIVEIRA et al., 2000). O valor de máximo empacotamento teórico é 0,37.

Um dos fatores do material que pode alterar a condição de empacotamento é a morfologia das partículas (forma), o que em argamassas pode variar significativamente segundo (CORTES et al., 2008) e como demonstrado no Capítulo 4, onde foi constatado que os produtos podem conter areia de rio (com morfologia esférica) ou de rocha britada (irregular). Quanto menos esféricas forem as partículas menor será a densidade ou empacotamento de uma distribuição que as contenha. Já das variáveis de processamento, a técnica de compactação (prensagem, colagem de barbotina, vibração, etc) exerce significativa influência no empacotamento, como verificado em cerâmicas e concretos refratários (OLIVEIRA et al., 2000; PILEGGI, 2001).

7.2.2 Distância de separação de partículas: IPS e MPT

Admitindo que numa suspensão a água (ou fluido) adicionada primeiramente recobre a superfície das partículas para depois preencher o volume de vazios deixado pelo empacotamento das mesmas. Somente a partir deste volume é que o fluido separa as partículas evitando o contato, conforme ilustrado na Figura 7.1.

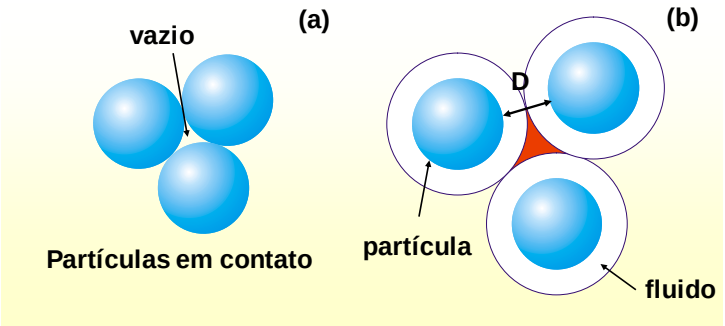


Figura 7.1 – Ilustração esquemática: (a) Partículas em contato; (b) Partículas separadas por uma distância D em decorrência da adição de fluido em volume suficiente para recobrir a superfície, preencher os vazios deixados pelo empacotamento e, então, afastá-las (PILEGGI, 2001).

A distância de separação de partículas numa suspensão pode ser calculada através de modelo teórico denominado IPS (*Interparticle Separation Distance*) (FUNK; DINGER, 1994), que considera o efeito da distribuição granulométrica e, ainda, que as partículas ficam em contato quando o teor de líquido for menor que o volume de poros do sistema (PILEGGI, 2001), sendo expressa como segue:

$$IPS = \frac{2}{VSA} \times \left[\frac{1}{V_s} - \left(\frac{1}{1 - P_{of}} \right) \right] \qquad \text{Equação (7.2)}$$

Onde: VSA é a área superficial volumétrica (m^2/cm^3), calculada a partir do produto entre a densidade real e a área superficial específica; V_S é a fração volumétrica de sólidos; P_{of} é a fração de poros no sistema quando todas as partículas estão em contato na condição de máximo empacotamento.

O IPS influencia significativamente o comportamento reológico de suspensões, sendo que apresenta uma relação direta com a fluidez (OLIVEIRA et al., 2000; PILEGGI, 2001). Quanto menor a porosidade do sistema, ajustada pela distribuição granulométrica, maior o IPS da suspensão (considerando área e concentração constantes), pois "sobra" mais líquido para efetivamente separar as partículas. A área superficial atua de maneira contrária, sendo que quanto maior seu valor, mais líquido é necessário para recobrir as partículas, assim o IPS e a fluidez resultantes são menores. Este conceito é particularmente aplicável às suspensões de partículas finas (como cimento, cal, adições e água) onde as forças superficiais predominam.

Em materiais como concretos e argamassas, o comportamento reológico é bastante influenciado pelo efeito dos agregados, e pode ser analogamente avaliado através da distância de separação entre estas partículas. Entretanto, o fluido que as separa nestes materiais é a pasta e a distância média pode ser calculada através do parâmetro de espessura máxima de pasta, MPT (*Maximum Paste Thickness*), definido por (POWERS, 1968; HU; LARRARD, 1995):

$$MPT = \frac{2}{VSA_g} \times \left[\frac{1}{V_{Sg}} - \left(\frac{1}{1 - P_{ofg}} \right) \right] \qquad \text{Equação (7.3)}$$

Onde: VSA_g é a área superficial volumétrica dos grossos (m^2/cm^3); V_{Sg} é a fração volumétrica de grossos no sistema; P_{ofg} é a porosidade da distribuição das partículas grossas no concreto ou argamassa.

Quanto maior for a distância de separação entre as partículas que compõem o sistema, maior a fluidez resultante. Assim, de forma similar ao IPS para as suspensões, o MPT e a fluidez apresentam uma relação direta em concretos (BONADIA et al., 1999).

É importante ressaltar o efeito do empacotamento no comportamento reológico desses materiais. Considerando a distribuição granulométrica completa das argamassas e concretos, valores de q que proporcionam elevado empacotamento, também levam a formulações de baixa fluidez devido aos altos teores de agregados. Entretanto, um bom empacotamento dos agregados gera baixa porosidade e, de acordo com a Equação 7.3, maiores MPTs, pois menos pasta é consumida para preencher os vazios entre os agregados e, portanto, "sobra" mais pasta para afastá-los.

A utilização desta abordagem para a interpretação dos resultados de caracterização reológica de argamassas é mais complexa, visto que consideráveis teores de ar estão presentes nesses materiais. Por ser um fluido compressível, e formar uma fase instável (já que as bolhas podem colapsar), exerce uma influencia não totalmente esclarecida, principalmente sobre a matriz. Isto porque em relação aos agregados, o ar atua como pasta, aumentando a sua quantidade, o que afasta ainda mais os agregados (aumentando MPT). Entretanto, na pasta o ar não fica como um fluido contínuo espalhado por todo o volume como a água; ele fica separado em regiões definidas (bolhas) sendo que as partículas finas ficam na interface ar-pasta das bolhas (STRUBLE; JIANG, 2004). A complexidade do problema está no fato do ar ser um fluido presente na pasta, mas que não afasta as partículas finas na suspensão.

7.3 RESULTADOS

Considerando que nas argamassas a pasta primeiramente preenche os vazios deixados pelo empacotamento de agregados e em seguida, se em quantidade suficiente, afasta os mesmos, a determinação da porosidade da distribuição dos agregados é importante visando o consumo de pasta. A quantidade de pasta necessária tem impacto não só no comportamento reológico (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2007) e propriedades no estado endurecido (CORTES et al., 2008), mas também no custo do produto. Por estas razões, a porosidade

teórica deixada pelos vazios entre os agregados das distribuições das argamassas ilustradas nas Figuras 4.1 e 4.2 foi calculada através de modelo de empacotamento de partículas de Westman e Hugill (FUNK; DINGER, 1994), utilizando uma simplificação que considera as partículas perfeitamente esféricas. Os valores (% em volume) indicados ao lado da legenda das argamassas nas figuras citadas são novamente demonstrados na Figura 7.2.

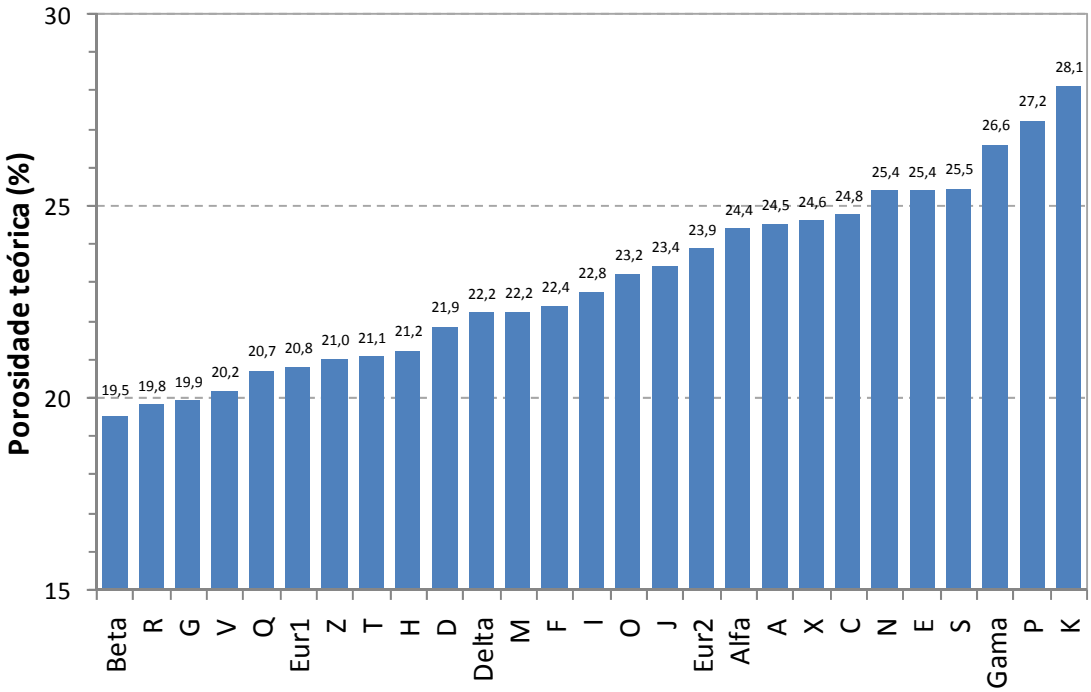


Figura 7.2 - Porosidade teórica do empacotamento dos agregados nas argamassas.

As composições em que a porosidade do empacotamento de agregados é baixa caracterizam-se por serem abertas (com maior extensão), com muitas partículas de variados diâmetros e com populações significativas acima de 1mm (Figura 4.1). Gradualmente com a redução da extensão da distribuição granulométrica dos agregados ocorre o aumento da porosidade teórica (Figuras 4.1 e 4.2). Culminando, com as maiores porosidades dos agregados calculadas para os produtos E, S, Gama, P e K, que se caracterizam por distribuições de agregados bem estreitas e concentradas em valores abaixo de 1mm (com exceção de Gama).

A utilização de uma distribuição de agregados como do produto Beta em comparação à da argamassa K, resulta em uma diferença direta no consumo de pasta de 8,6%. Ou seja, é um volume que ao invés de ser usado para preencher vazios do empacotamento, pode ser empregado para melhorar as propriedades reológicas (afastando os agregados se necessário) ou ainda ser economizado (redução do teor de finos). A redução no teor de pasta necessária

não só tem impacto financeiro, mas também na ocorrência de patologias, uma vez que reduzindo o teor de água, diminui também a retração do revestimento endurecido.

Os mesmos conceitos de empacotamento valem para os finos e, também, para a argamassa como um todo. Considerando a adição das partículas finas às formulações, preenchendo os vazios deixados na estrutura formada pelo empacotamento dos agregados, a porosidade total teórica das argamassas anidras é menor do que a do empacotamento de agregados. A eficiência da distribuição de finos na redução da porosidade do sistema todo é demonstrada na Figura 7.3, como a porcentagem de redução de porosidade do sistema em relação à de agregados. Nota-se que o empacotamento da argamassa G é muito bom, sendo que os finos deste produto (com significativa quantidade de partículas abaixo de 10μm) causaram a redução de 55% em relação à porosidade dos agregados, que já era uma das mais baixas dos produtos avaliados.

No entanto, a modificação de distribuição granulométrica dos finos nas argamassas é mais complicada, pois na fração fina a granulometria tem outras implicações (consumo de aditivos e de água, reatividade, aglomeração, etc.) devido à predominância de forças de superfície e das funções que exerce no desenvolvimento da resistência e da microestrutura da argamassa.

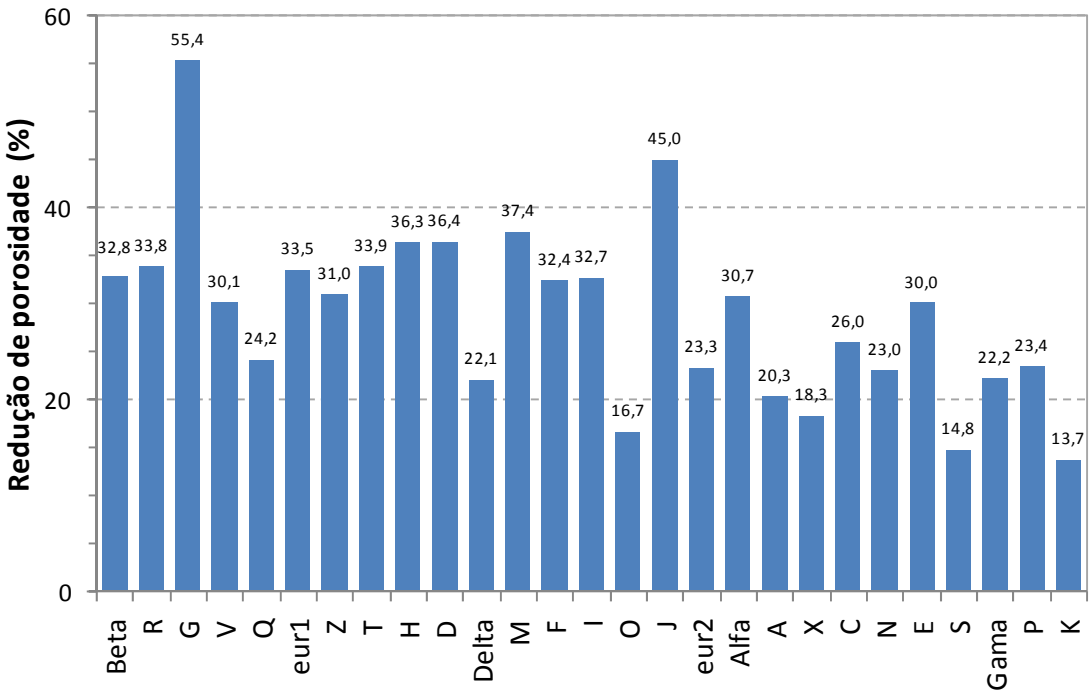


Figura 7.3 - Redução da porosidade teórica do sistema em relação à do empacotamento de agregados.

O IPS poderia ser relacionado à viscosidade das pastas nas argamassas. Entretanto, a aplicação do conceito de IPS em argamassas precisa ser feita com cautela, face à complexidade introduzida pelo ar, e como ele atua em relação à distância de separação das partículas finas. Além disso, já foi demonstrado que o fator mais importante para comportamento reológico de argamassas sob squeeze-flow é o atrito entre os agregados.

Portanto, a partir dos valores de porosidade dos agregados, área superficial e teores de água e de ar (Capítulo 4) foram calculados os valores de MPT para diversos materiais avaliados neste projeto, com o objetivo de relacionar este parâmetro da microestrutura da argamassa fresca com os resultados de squeeze-flow.

Primeiro, é feita uma análise dos valores de carga em deslocamento de 2,5mm (25% de deformação em relação à altura total da amostra) em função da distância de separação entre os agregados, conforme Figura 7.4.

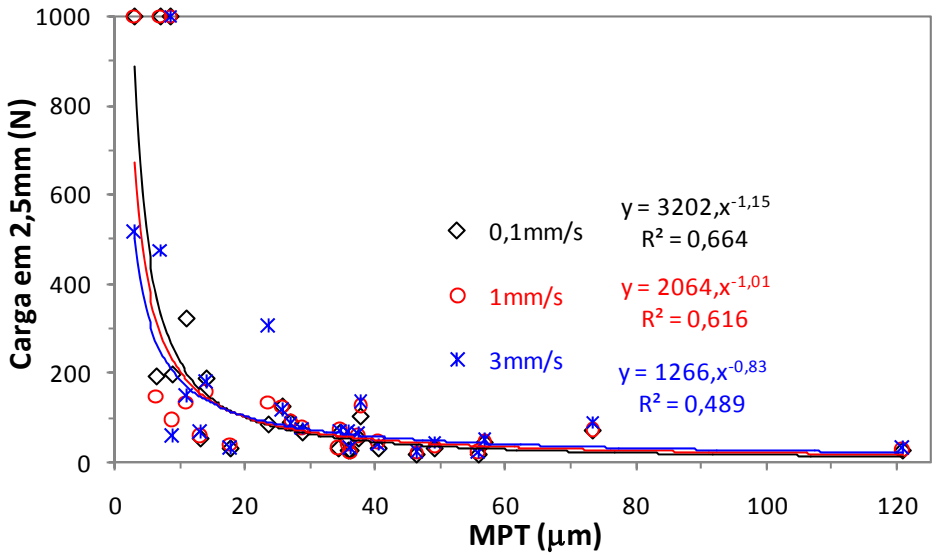


Figura 7.4 - Relação entre as cargas de squeeze-flow em 2,5mm de deformação (obtidas a 0,1, 1 e 3mm/s) com os valores de MPT das argamassas fluidas.

A tendência geral indica que: quanto maior a distância de separação, mais fácil é o fluxo dos materiais. Verifica-se que para valores de MPT menores que 20µm as cargas sobem intensamente, pois maior é a interferência e o atrito entre os agregados; enquanto acima desta distância os valores de carga tendem a cair suavemente. A correlação é melhor em baixa velocidade, fato coerente visto que é a situação na qual o atrito entre os agregados é mais marcante. Quando ocorre a segregação agregados-pasta, a região central da amostra fica com uma concentração maior de agregados e, conseqüentemente, o MPT local é reduzido. Diminuindo o MPT, o atrito entre os agregados tem maior probabilidade de ocorrer causando maior dificuldade de a argamassa fluir.

Análise análoga pode ser realizada através da Figura 7.5, mas considerando uma situação mais agressiva: o deslocamento máximo atingido. Contudo, os resultados são similares aos da análise em 2,5mm de deslocamento.

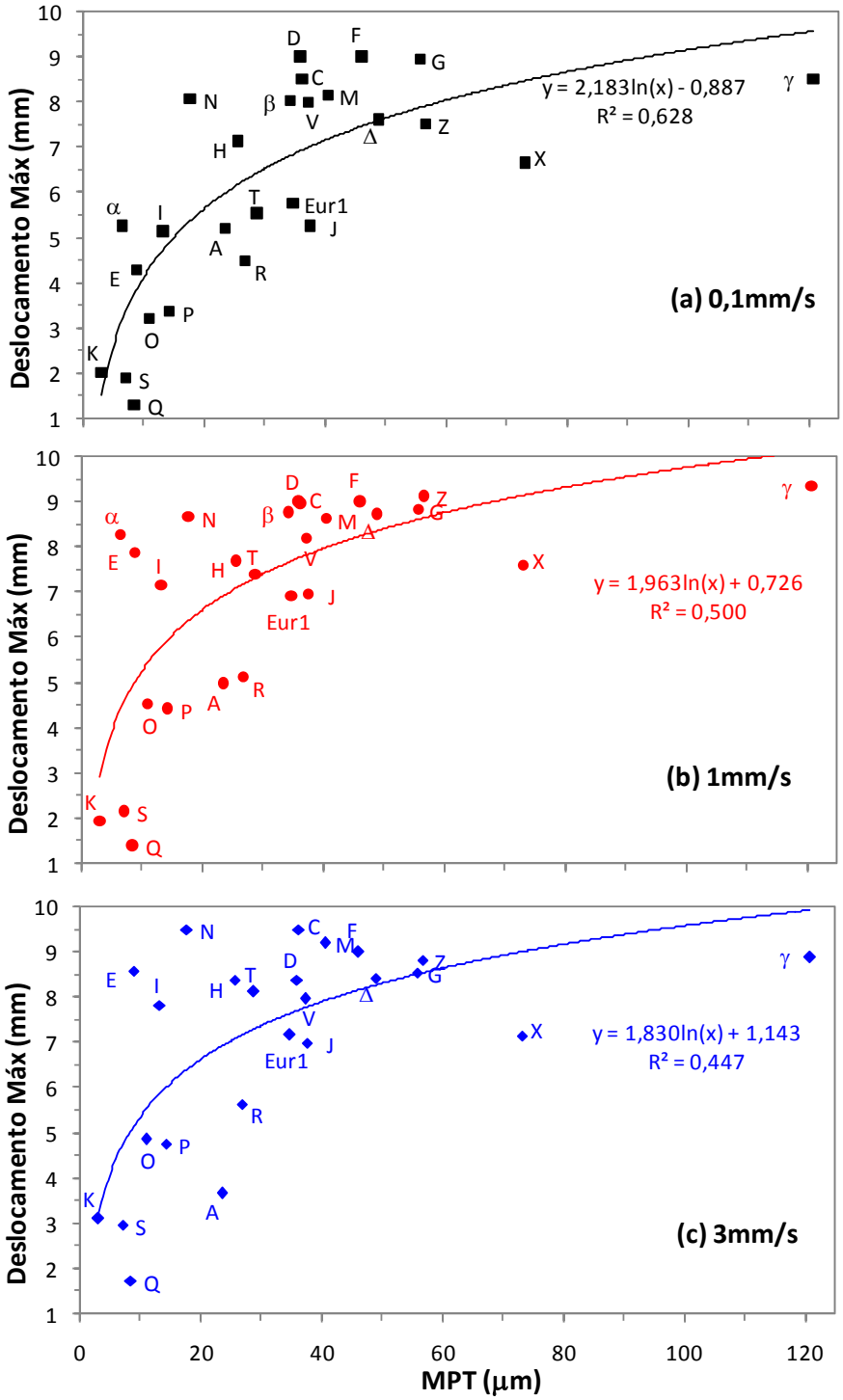


Figura 7.5 - Relação entre o deslocamento máximo no squeeze-flow e os valores de MPT das argamassas fluidas. (a) 0,1mm/s; (b) 1mm/s; (c) 3mm/s.

Em ambos os casos há uma dispersão dos resultados, indicando que esta faixa (ou “nuvem”) onde os resultados se concentram, representa a possibilidade de projetar formulações com o mesmo comportamento reológico desejado, mas com MPTs diferentes. Isto porque o MPT tem significativa influência sobre o comportamento de squeeze-flow, mas é apenas uma das componentes envolvidas no fenômeno. Por exemplo, quando a distância de separação é suficiente para manter os níveis de atrito baixos, os fatores que provavelmente governam o comportamento reológico são a característica da pasta (viscosidade) e a tendência à segregação. Ou ainda, é possível obter pequenas distâncias entre os agregados e resultar em argamassas fluidas, desde que a pasta tenha capacidade de lubrificação suficiente para evitar a interação das partículas grossas. Além disso, é possível obter o mesmo MPT, mas com características de formulação totalmente diferentes (teores de agregados e pasta, distribuição de fases na pasta, etc.).

7.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo analisou as distribuições granulométricas das argamassas do ponto de vista de formulação, considerando o empacotamento das mesmas. Os maiores empacotamentos dos agregados ocorrem nas distribuições que são mais abertas, com grande extensão granulométrica e muitas partículas de variados diâmetros, resultando em baixas porosidades. Por outro lado, as distribuições estreitas com pico intenso (muitas partículas concentradas em poucos diâmetros) resultam em altas porosidades. Assumindo o modelo microestrutural-reológico, conclui-se que: (1) o consumo de pasta está diretamente relacionado com a porosidade do empacotamento das partículas grossas e, (2) a distância média de separação entre os agregados (MPT) é favorecida pela otimização do empacotamento (redução na porosidade).

A etapa também estabeleceu a relação entre o comportamento reológico das argamassas, em solicitações de squeeze-flow, com o MPT da microestrutura fluida. Coerentemente, a tendência geral é: quanto maior o MPT, mais fácil o fluxo do material.

Do ponto de vista tecnológico, temos que a melhora do empacotamento permite um aproveitamento mais efetivo da pasta (para afastar os agregados) ou mesmo na redução do consumo de finos e água nas formulações, sem comprometer o comportamento reológico das mesmas. Além disso, um bom empacotamento também tende a reduzir a permeabilidade da

estrutura granular, dificultando a movimentação relativa pasta-agregados e, conseqüentemente, a separação de fases.

8 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO DE ARGAMASSAS DO MERCADO

As propriedades das argamassas no estado endurecido são o que, de fato, definem o desempenho dos revestimentos em uso. Na estrutura da tese e, portanto, no método de formulação, o módulo de elasticidade, a resistência mecânica e a permeabilidade são considerados como requisitos para garantir o desempenho das argamassas endurecidas.

8.1 OBJETIVO

O principal foco desta etapa é determinar a relação entre tais propriedades com as características das argamassas no estado fresco, visto que as últimas têm substancial influência no comportamento reológico e, portanto, na qualidade do revestimento aplicado.

8.2 EXPERIMENTAL

8.2.1 Mistura

Todas as amostras ensaiadas nesta etapa foram preparadas de acordo com a mistura mecânica em argamassadeira de laboratório com adição de água de forma fracionada (MecAF), descrita no Capítulo 5.

8.2.2 Cura

A cura das amostras moldadas foi realizada em condição controlada (90%UR e 23°C) por 28 dias. Após, este período permaneceram em câmara seca por 7 dias e depois, para garantir totalmente a secagem, permaneceram mais 2 dias em estufa a 50°C.

8.2.3 Porosidade

Cinco metades de cada composição dos corpos-de-prova utilizados para avaliação de resistência mecânica (8.2.5) foram saturadas com água sob vácuo e a densidade aparente e as porosidades aparente e total foram determinadas pelo princípio de Arquimedes.

8.2.4 Módulo de elasticidade

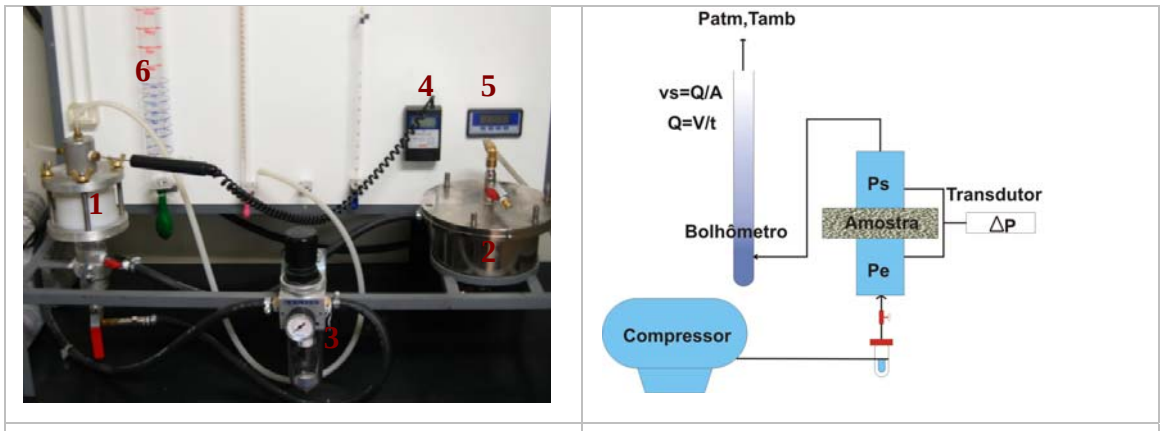
Nove corpos-de-prova cilíndricos (50mm diâmetro por 60mm de altura) para cada composição foram moldados através de preenchimento em 3 camadas e aplicação de 10 golpes com soquete a cada camada aplicada. Após os procedimentos de cura e secagem acima descritos, as amostras foram ensaiadas através do método de ultra-som (equipamento Pundit) para determinação do módulo de elasticidade, conforme descrito por (MONTE et al., 2007).

8.2.5 Resistência à tração

A resistência à tração por compressão diametral foi medida nas mesmas amostras utilizadas para os ensaios de módulo de elasticidade. O ensaio é baseado na norma ASTM 496C/ 496M-04 (mas em amostras de menores dimensões) e foi executado utilizando uma INSTRON (modelo 5569) com célula de carga de 50kN e controle por carga (taxa de carregamento utilizada 0,833MPa/min).

8.2.6 Permeabilidade ao ar

Além das propriedades mecânicas, a permeabilidade é o outro fator bastante relevante para o desempenho das argamassas, visto que esta determina a facilidade de percolação de fluidos através do revestimento. O permeâmetro a ar para concretos e argamassas do Lab. de Microestrutura (PCC-USP) descrito na Figura 8.1, foi previamente utilizado com sucesso para avaliação de argamassas de revestimento (QUARCIONI et al., 2007). Na presente pesquisa, foram moldados 3 corpos-de-prova cilíndricos (7,2cm de diâmetro por 2,2cm de altura) através de preenchimento em 2 camadas e aplicação de 10 golpes com soquete a cada camada aplicada.



(a) (b)

Figura 8.1 - (a) Permeâmetro para argamassas e concretos (PCC-USP): 1 – Porta-amostras para argamassas; 2 – Porta-amostras para concreto; 3 – Manômetro com filtro; 4 – Medidor de temperatura; 5 – Display de medida de pressão; 6 – Bolhômetro para medida de vazão. (b) Ilustração esquemática do equipamento: Pe – pressão de entrada; Ps – pressão de saída.

8.3 RESULTADOS

8.3.1 Porosidade

A porosidade total é função do teor de ar incorporado no estado fresco (considerando este constante desde a medida até a consolidação) e da quantidade de água presente. Como no desenvolvimento microestrutural das argamassas uma pequena parcela da água da mistura é combinada quimicamente para formação das fases hidratadas com o cimento. Portanto, porosidade total de uma argamassa é igual à soma dos volumes de ar e da água não combinada quimicamente.

Além disso, a fração de vazios na microestrutura tem significativo efeito sobre as principais propriedades de sólidos porosos como as argamassas endurecidas.

Os resultados de porosidade total das amostras endurecidas (medida pelo método de Arquimedes) em função do teor de água + ar nas argamassas frescas são ilustrados na Figura 8.2. Como esperado, observa-se uma excelente correlação entre os dois parâmetros. O ponto referente à argamassa O, está indicado em vermelho e não foi incluído no ajuste matemático, visto que aparenta ter ocorrido algum problema na medida de porosidade.

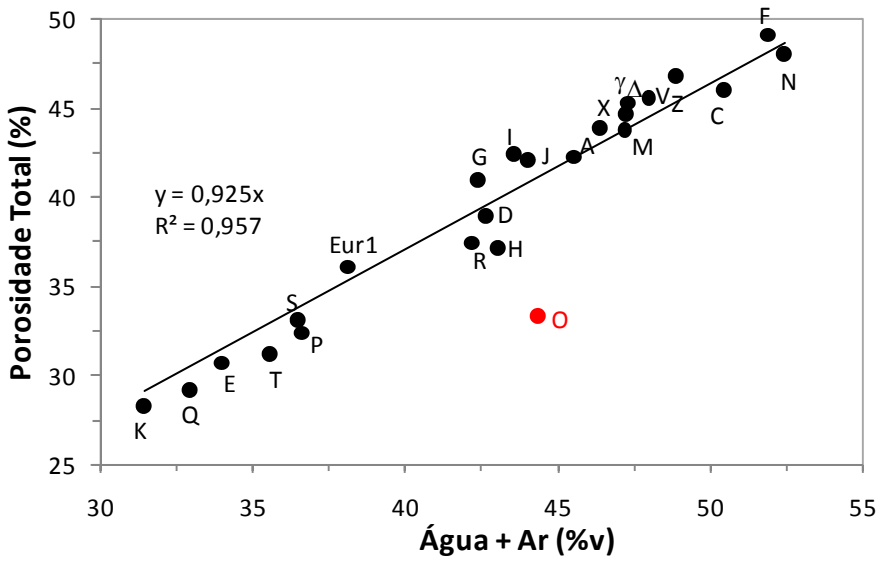


Figura 8.2 - Porosidade total das argamassas endurecidas em função do teor de água + ar das argamassas no estado fluido. Média dos coeficientes de variação igual a 2%.

8.3.2 Módulo de elasticidade

A capacidade de deformação (ou rigidez) da argamassa é importante para o desempenho do revestimento, pois este deve ser capaz acompanhar variações dimensionais de diferentes naturezas que ocorrem na edificação, de forma a evitar a formação de defeitos (fissuras, trincas e falhas de interface) que possam comprometer a aderência entre o revestimento e a base ou a estanqueidade do sistema de vedação.

Os resultados de módulo de elasticidade das argamassas em função da porosidade total são demonstrados na Figura 8.3. Como o módulo de elasticidade depende da densidade do material e esta, por sua vez, depende da porosidade total da argamassa, a correlação entre os parâmetros plotados é muito boa. Os valores dos produtos K, E e O (indicados em vermelho) não foram incluídos no ajuste matemático, pois estão claramente fora da relação encontrada para os outros 21 materiais testados. A argamassa O pelos prováveis problemas na determinação da porosidade, enquanto os materiais K e E devem conter em sua formulação materiais (agregados e finos) de módulo bem inferior aos demais, visto que o módulo de elasticidade da argamassa é regido pela lei de misturas e, portanto, depende da fração volumétrica e do módulo de cada material componente do sistema.

Isto implica na possibilidade de projetar o módulo de elasticidade das composições baseado nos teores de água e ar da argamassa fresca e do módulo (ou densidade) das frações sólidas (agregados e pasta endurecida).

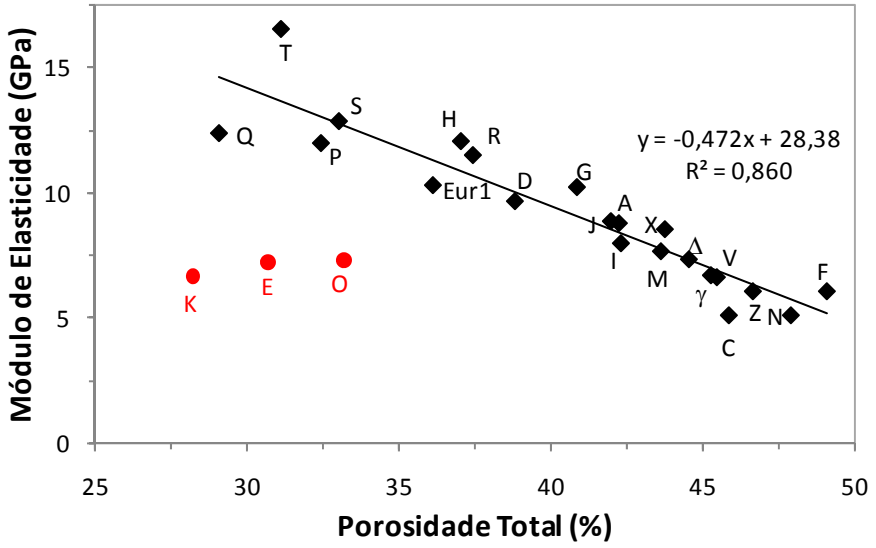


Figura 8.3 - Módulo de elasticidade em função da porosidade total das argamassas endurecidas. Média dos coeficientes de variação igual a 4%.

8.3.3 Resistência à tração

As argamassas de revestimento (como o nome já diz) não têm função estrutural e, por isso, a resistência mecânica poderia ser encarada como parâmetro secundário no desempenho do revestimento. Porém, como definido por (ANTUNES, 2005), a resistência à tração da argamassa é uma das componentes que definem a resistência de aderência à tração. A resistência à tração da argamassa representa o máximo valor que a resistência de aderência pode atingir, visto que os macro-defeitos na interface argamassa-substrato são os responsáveis pelos menores valores comumente observados para a aderência. Ou seja, a resistência à tração da argamassa pode ser considerada como a máxima aderência potencial que o sistema pode atingir (ANTUNES, 2005).

Os resultados de resistência à tração na compressão diametral são ilustrados na Figura 8.4 em função da porosidade total das argamassas. A tendência observada é: quanto maior a porosidade, menor a resistência. Entretanto, neste caso a relação entre os parâmetros não é tão significativa quanto nos casos anteriores, pois a resistência à tração de materiais frágeis depende do tamanho e da geometria do defeito crítico, local no qual ocorre amplificação das tensões e inicia-se a propagação catastrófica da trinca (CALLISTER, 2002). Além disso, a argamassa também pode ser considerada um material compósito (formado por agregados e pasta cimentícea) a resistência da fase contínua (matriz) têm influência na resistência à tração do sistema. A resistência mecânica da pasta é certamente influenciada pelo teor, tipo,

granulometria e composição química do componente principal que, na grande maioria dos casos é o cimento. No caso das argamassas E e K, é possível que tenham pouca ou nenhuma adição de cimento, podendo utilizar cal hidráulica ou pozzolanas como material ligante.

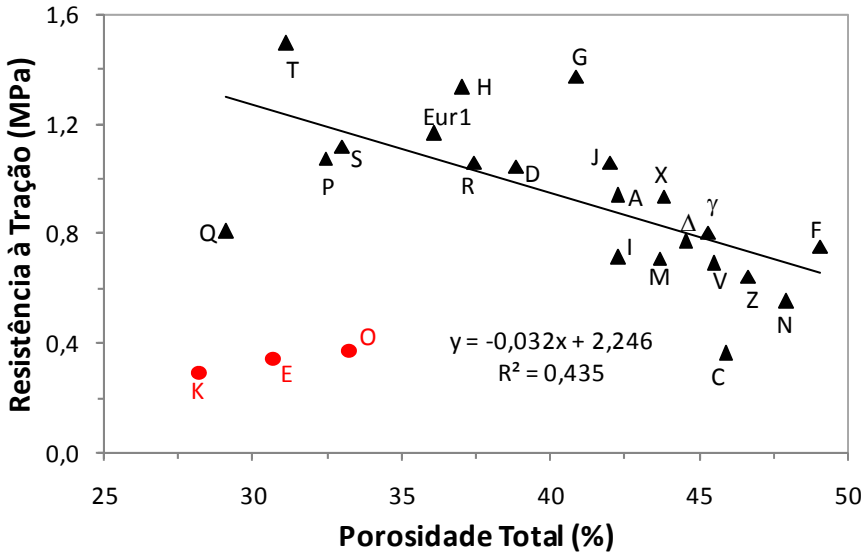


Figura 8.4 – Resistência à tração por compressão diametral em função da porosidade total das argamassas endurecidas. Média dos coeficientes de variação igual a 14%.

8.3.4 Permeabilidade

Como parte do sistema de vedação das edificações, os revestimentos de argamassa têm como uma das principais funções proteger os componentes internos da ação de agentes agressivos que possam reduzir a durabilidade dos materiais.

A permeabilidade determina a taxa de penetração de fluidos (ar, água, líquidos, gases ou vapores) em materiais porosos decorrentes da ação de gradientes de pressão. Esta propriedade está vinculada a diversos fatores, como: proporção de mistura, natureza química dos constituintes, distribuição granulométrica (INNOCENTINI et al., 2001, 2003), ação de materiais ligantes (CARDOSO et al., 2004), efeito das condições de aplicação (DUAILIBE; CAVANI; OLIVEIRA, 2005) e de processos de envelhecimento.

A equação de Forchheimer (Eq. 8.1) indica que a relação entre a queda de pressão e a velocidade do fluido (v_s) é parabólica, considerando a viscosidade (μ) e a densidade do fluido (ρ), como segue (INNOCENTINI; PANDOLFELLI, 1999):

$$\frac{P_e^2 - P_s^2}{2PL} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2$$

Equação 8.1

Onde: P_e e P_s são respectivamente a pressão na entrada e na saída da amostra sob ensaio. A pressão P corresponde à pressão na qual os parâmetros v_s, ρ e μ foram medidos ou calculados. k_1 é a constante de permeabilidade Darciana e k_2 a constante não-Darciana.

Nesta equação, o termo associado à constante k_1 representa os efeitos viscosos da interação fluido-sólido, enquanto o termo associado à k_2 representa os efeitos cinéticos causados pela tortuosidade do meio que se manifestam em maiores velocidades de escoamento (INNOCENTINI; PANDOLFELLI, 1999). Desta forma, o parâmetro k_2 é mais sensível às variações microestruturais, sendo um interessante indicativo da tortuosidade da microestrutura das argamassas.

Os resultados das constantes de permeabilidade k_1 e k_2 em função da porosidade total são demonstrados na Figura 8.5 (a) e (b), respectivamente.

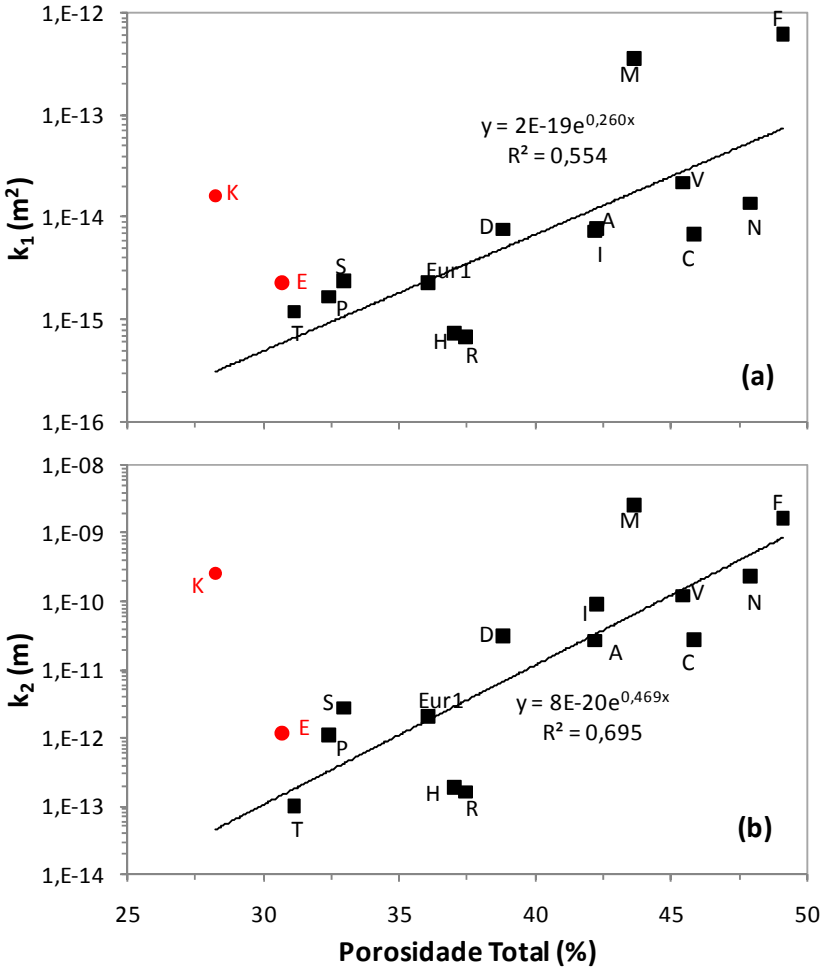


Figura 8.5 - Constantes de permeabilidade (a) k_1 e (b) k_2 em função da porosidade total das argamassas. Média dos coeficientes de variação igual a 17% para k_1 e 34% para k_2.

Os valores de permeabilidade são maiores à medida que a porosidade das argamassas aumenta, visto que há menos material para dificultar a permeação do fluido pelo sólido. A

variação entre os valores mínimo e máximo de 3 ordens de grandeza em k_1 e de até 4 ordens de grandeza em k_2 é muito significativa, provavelmente representando revestimentos com desempenho em uso, referente à penetração de fluidos, totalmente distintos.

8.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

De modo similar ao mapeamento das características reológicas efetuado no Capítulo 6, na presente etapa foram avaliadas as principais propriedades das argamassas em relação ao desempenho no estado endurecido, e a associação destas com a porosidade total.

O principal desafio método de formulação é que seja capaz de projetar argamassas que conciliem comportamento reológico adequado para o tipo de aplicação, com propriedades no estado endurecido que atendam as solicitações a que são destinadas. As consistentes relações entre as características no estado fresco (teores de fases e MPT) com o comportamento reológico das argamassas (obtidas nos Capítulos 6 e 7), aliadas aos resultados demonstrados no presente capítulo, que associam a porosidade total (e conseqüentemente os teores de água + ar) com as propriedades finais relevantes, são de fundamental importância para que se possa prever (com relativa confiança), tanto o comportamento reológico quanto as propriedades no estado endurecido das argamassas baseado apenas nas características de formulação dos materiais.

9 AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE ARGAMASSAS POR PEDREIROS

Frente a todas as informações expostas até esta etapa da pesquisa, temos que a formulação da argamassa deve considerar um bom empacotamento de agregados para possibilitar a utilização otimizada da quantidade de pasta, a redução da segregação de fases e culminar com a obtenção de argamassas fluidas. Foi estabelecida a relação entre o comportamento reológico em squeeze-flow com as características das argamassas no estado fresco (distribuição de fases e MPT). Também foi determinada a associação destas com as propriedades no estado endurecido, através das relações entre (1) o teor de água + ar com a porosidade total no estado endurecido e (2) entre a porosidade total com as propriedades finais mais relevantes (Capítulo 8). Desta forma, permitindo a previsão do comportamento reológico, bem como, das propriedades no estado endurecido baseadas nas características da formulação.

Entretanto, não se sabe precisamente quais as implicações dos comportamentos obtidos no squeeze-flow sobre o desempenho real das argamassas durante a aplicação. Esta é uma informação de suma importância para a finalização do desenvolvimento do método, visto que o objetivo é obter qualidade com produtividade na aplicação.

9.1 OBJETIVO

Portanto, o foco deste capítulo é correlacionar os resultados das curvas de squeeze-flow com a avaliação da aplicabilidade manual das argamassas por pedreiros. Ou seja, possibilitar que os resultados de squeeze-flow tenham significado mais preciso com as situações práticas.

9.2 EXPERIMENTAL

9.2.1 Materiais

Paredes

Foram construídas 5 paredes sobre pórticos de concreto com blocos cerâmicos de vedação Seleta e aplicação de chapisco industrializado sobre às superfícies, conforme a Figura 9.1.

Argamassas

Seis argamassas de revestimento (denominadas 1 – 6) foram escolhidas baseadas nos resultados do Capítulo 6, por apresentaram comportamento sob squeeze-flow distintos.

9.2.2 Mistura

As argamassas foram preparadas em argamassadeira Consolid de eixo horizontal com teor de água indicado pelo fabricante. O tempo de mistura variou entre 2 e 3 minutos dependendo da argamassa.

9.2.3 Pedreiros

Três pedreiros (denominados A, B e C) com reconhecida experiência foram contratados para aplicar aproximadamente 1m^2 de cada argamassa e realizar a avaliação do comportamento das mesmas. Cada pedreiro aplicou as 6 argamassas em 2 ou 3 dias de trabalho distintos. A ordem de aplicação das argamassas de cada pedreiro foi distinta, conforme Apêndice C.

9.2.4 Avaliação empírica

Foi elaborado um questionário (Apêndice C) no intuito de padronizar a forma de avaliação. O documento foi baseado nos questionários de avaliação empírica utilizados em pesquisas prévias (ANTUNES, 2005; SILVA, 2006).

9.2.5 Ensaios

Simultaneamente à aplicação, foi determinada a densidade aparente e teor de ar das argamassas. Foram realizados ensaios de squeeze-flow nas mesmas condições descritas no Capítulo 6. Amostras para compressão diametral e determinação da porosidade foram

moldadas, curadas e ensaiadas de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 8. Por fim, 56 dias após a aplicação foram realizados testes de resistência de aderência à tração.

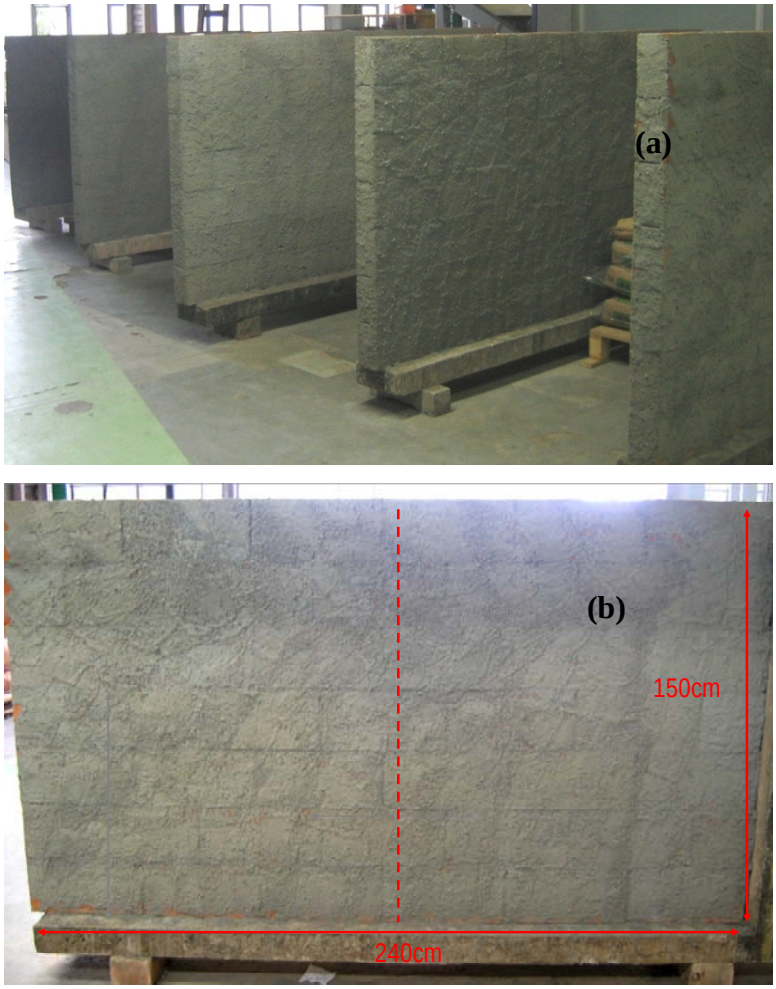


Figura 9.1 - (a) Visão geral dos 5 pórticos prontos para serem utilizados. (b) Detalhes do pórtico com chapisco aplicado.

9.3 RESULTADOS

As distribuições de fases das argamassas no estado fresco em função do aplicador (pedreiro) são demonstradas na Figura 9.2. Nota-se que as argamassas 1 e 6 possuem baixos teores de ar e mais de 50% de agregados. A argamassa 5 apresentou teor de ar pouco acima de 20% e destacou-se pela repetibilidade no teor de ar resultante entre diferentes bateladas. Já, as argamassas 2, 3 e 4, caracterizam-se por teor de ar médio entre 15 e 20%, mas com uma variação entre bateladas perceptível.

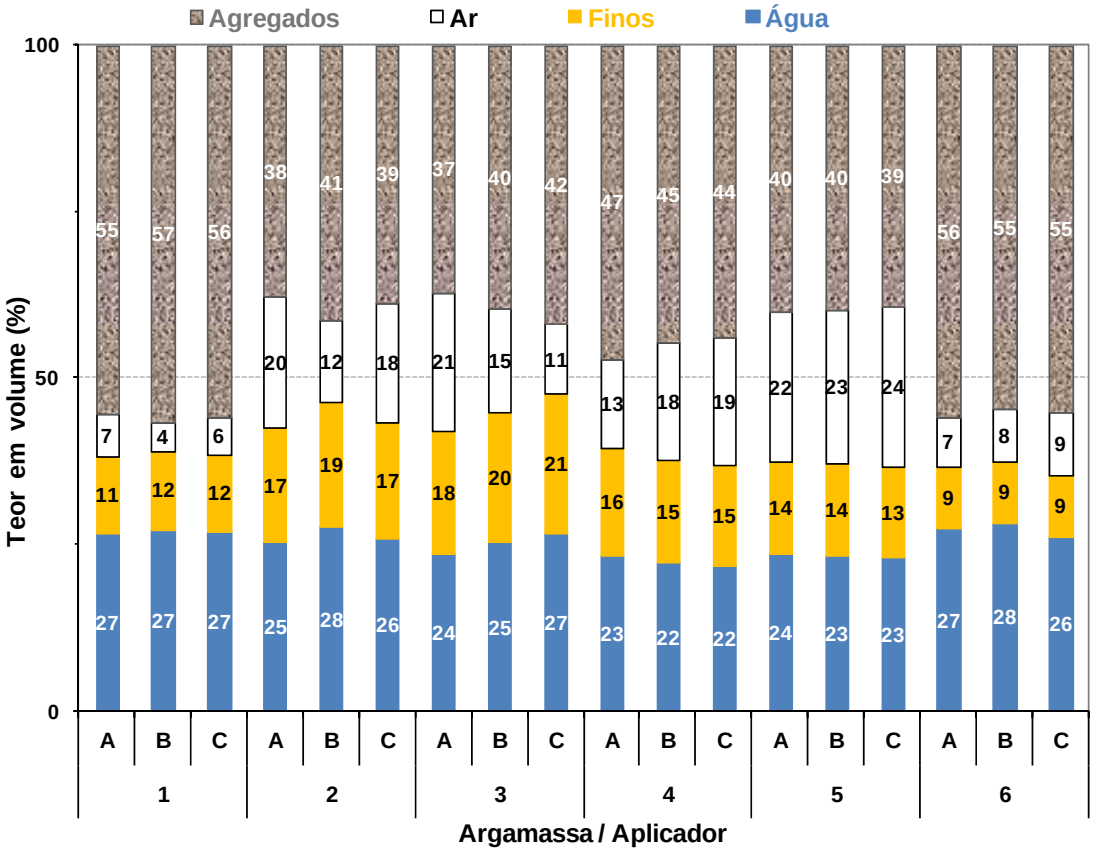


Figura 9.2 - Teor de fases em volume das argamassas frescas.

Os comportamentos de squeeze-flow das argamassas em questão são ilustrados na Figura 9.3. Em baixa velocidade (0,1mm/s) as argamassas 1 e 6 logo apresentaram a inversão para o estágio de *strain-hardening*, resultando em baixos deslocamentos. Nos demais materiais predominou o comportamento de deformação plástica, sendo que todos atingiram altos valores de deslocamento. Destaque para o produto 4, em que a deformação plástica ocorre com maiores níveis de carga do que 2, 3 e 5.

O comportamento dessas argamassas não foi influenciado pelo aumento da velocidade de deslocamento, indicando materiais com pouca suscetibilidade à segregação. Por outro lado, o material 1 praticamente dobrou de deslocamento máximo com o aumento da velocidade de deslocamento de 0,1 para 3mm/s, sugerindo alta suscetibilidade à segregação. O mesmo ocorreu para a argamassa 6, mas em deslocamentos menores.

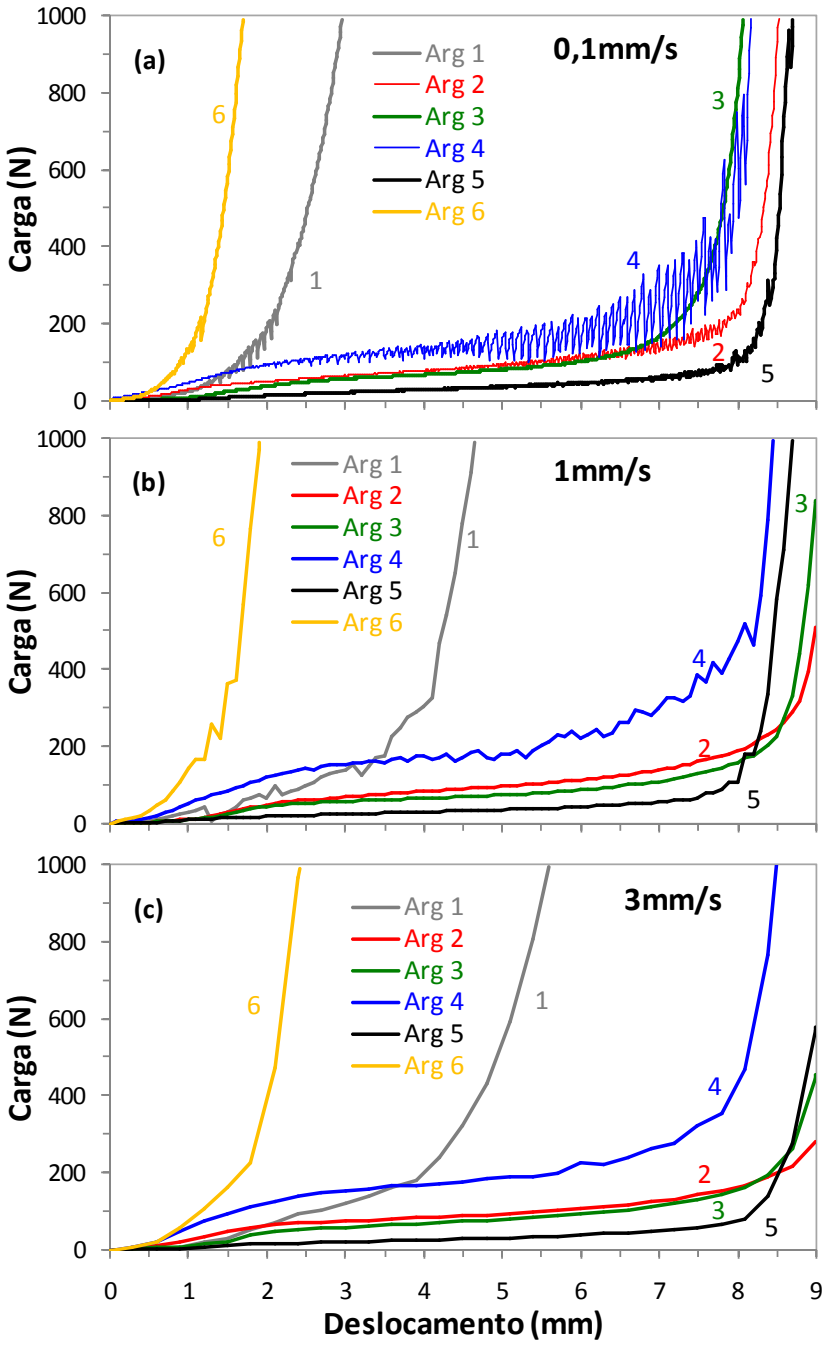


Figura 9.3 - Resultados de squeeze-flow das argamassas ensaiadas em três velocidades distintas: (a) 0,1mm/s; (b)1mm/s; (c) 3mm/s.

Na Tabela 9.1 é demonstrado o resumo da avaliação das argamassas detalhando os quesitos da etapa de aplicação para facilitar a relação com os resultados de squeeze-flow. Já a Tabela 9.2 resume os resultados referentes a todas as etapas avaliadas. As fichas completas da avaliação empírica de cada argamassa constam do Apêndice C.

Percebe-se que as argamassas 2, 4 e 5 foram bem avaliadas em relação às questões de espalhamento na parede e aperto. Com destaque para a argamassa 2 que foi a única a receber a máxima classificação possível no quesito aperto, o qual o squeeze-flow tem maior relação

em função da similaridade de solicitação. As argamassas 4 e 5 também foram bem classificadas neste quesito e, ainda, foram as melhores avaliadas na etapa de aplicação como um todo, visto que o espalhamento destas na parede foi muito bom. Os resultados de squeeze-flow das argamassas 2, 4 e 5 apresentaram altos deslocamentos mas com níveis de carga distintos. As argamassas 1 e 6, caracterizadas por altas cargas de squeeze-flow mesmo em pequenos deslocamentos não foram tão bem avaliadas (especialmente a 6), devido a maior dificuldade de deformação. Entretanto, vale ressaltar que a avaliação depende muito do gosto do pedreiro, o que resulta em certa dispersão dos resultados, especialmente da argamassa 1.

Tabela 9.1 - Resumo da avaliação empírica das argamassas pelos 3 pedreiros, exibindo com detalhamento os quesitos referentes à etapa de aplicação. Códigos de classificação: ✕= Ruim; □ = Regular; ☺ = Boa; ⑩ = Ótima.

	Argamassa					
	1	2	3	4	5	6
Aplicação	□☺⑩	☺□☺	✕✕✕	⑩☺☺	☺⑩⑩	☺✕✕
Espalhamento	✕□⑩	☺□⑩	☺□✕	⑩☺☺	⑩☺☺	✕✕□
Aperto	☺□⑩	⑩⑩⑩	□☺✕	☺☺☺	⑩☺☺	☺□✕
Espessura (cm)	7	6	2,5	10	7	7
Espera (min)	35	160	160	70	180	35
Produtividade (m^2/dia)	30	20-25	5-10	40	35-40	30
Avaliação Geral	☺☺⑩	☺□□	✕✕✕	☺⑩⑩	☺☺⑩	□✕□

Tabela 9.2 - Resumo da avaliação empírica das argamassas considerando todas as etapas avaliadas. Códigos de classificação: ✕= Ruim; □ = Regular; ☺ = Boa; ⑩ = Ótima.

	Argamassa					
	1	2	3	4	5	6
Aplicação	□☺⑩	☺□☺	✕✕✕	⑩☺☺	☺⑩⑩	☺✕✕
Acabamento	☺☺⑩	☺□□	✕✕✕	□☺☺	⑩☺☺	⑩☺☺
Qualidade final	⑩☺⑩	☺☺□	□□☺	⑩⑩☺	⑩☺⑩	□✕□
Produtividade	⑩☺⑩	☺□□	✕✕✕	☺⑩⑩	⑩⑩⑩	□□⑩
Avaliação Geral	☺☺⑩	☺□□	✕✕✕	☺⑩⑩	☺☺⑩	□✕□

Um fato interessante em relação à etapa de aplicação e sua relação com o comportamento de squeeze-flow, é a avaliação da argamassa 3. Apesar do ensaio reológico classificá-la como de fácil deformação, os pedreiros foram unânimes em achar o

comportamento dela ruim. Todas as explicações convergiram para o fato da argamassa grudar demais na colher, mas não segurar na parede, resultando também na menor espessura máxima possível de camada aplicada (a qual foi efetivamente medida). Este comportamento não identificado pelo tipo de ensaio aplicado sugere que o procedimento de puxada da argamassa após o aperto efetuado pelo squeeze-flow é importante para avaliar a questão de adesão na ferramenta. Tal procedimento já foi utilizado com sucesso para avaliar a adesão de argamassas colantes (PÓVOAS, 2005).

Os resultados completos da avaliação empírica, das propriedades no estado endurecido e da resistência de aderência encontram-se no Apêndice C.

9.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Na avaliação geral, todas as argamassas foram aplicáveis, mas apresentaram diferenças significativas principalmente em relação à produtividade esperada. As argamassas 3 e 6 receberam as piores classificações, enquanto os produtos 4 e 5 foram considerados os melhores.

O squeeze-flow apresentou boa relação com a etapa de aplicação das argamassas, principalmente com os quesitos de espalhamento e aperto contra o substrato, mas a adesão da argamassa na colher tem influência na opinião dos pedreiros. Tal resultado sugere que o squeeze-flow seja também utilizado para avaliar a adesão, através da puxada da argamassa após a deformação inicial.

10 DIRETRIZES DE FORMULAÇÃO

Um aspecto muito claro que surge da análise dos resultados e discussões desenvolvidos no decorrer desse trabalho, é que o uso combinado de técnicas de caracterização precisas (convencionais ou inovadoras) e a aplicação de conceitos de ciência de materiais, possibilitaram um elevado nível de compreensão do comportamento das argamassas no estado fresco e no endurecido.

O sucesso obtido na aplicação desta abordagem de análise neste trabalho permite inferir que a mesma também poderia ser empregada no processo de formulação de novas composições. De fato, é descrita a seguir a proposta de um novo método que emprega abordagem de ciência de materiais para solução de problemas práticos de formulação de argamassas:

1) **1º Passo: Definição da argamassa "Alvo"**
    a. Função a ser cumprida pela argamassa;
    b. Determinação dos procedimentos de mistura, transporte, aplicação e acabamento;
    c. Condições ambientais na aplicação;
    d. Nível de exigência e tolerância.
    e. Custo máximo;
2) **Determinação dos parâmetros de desempenho**
    a. Estado fresco: especificar o comportamento reológico adequado aos procedimentos de mistura, transporte, aplicação e acabamento da argamassa alvo, levando-se em conta as condições ambientais durante a aplicação;
    b. Estado endurecido: especificar níveis de desempenho para as propriedades mecânicas e físicas que atendam as demandas funcionais da argamassa alvo, especificamente, módulo de elasticidade, resistência mecânica e permeabilidade;
3) **Planejamento do conceito da formulação**
    a. Definição do conceito granulométrico mais adequado às características reológicas (mistura, transporte e lançamento) da aplicação;
    b. Especificação do valor de MPT indicado para atender as demandas reológicas da aplicação sobre "Squeeze flow"

c. Determinação do nível de porosidade final (calculado a partir do teor de água e ar) que resulte nas características físicas especificadas;

4) Matérias-primas (MP´s)

a. MP´s inorgânicas: disponibilidade local, composição química, características físicas (distribuição granulométrica, área específica, densidade, morfologia), custo;

b. Aditivos: ação específica em relação ao comportamento reológico especificado; ação específica em relação ao desempenho sobre as características físicas no estado endurecido;

5) Formulação e validação das argamassas

a. À partir das MP´se selecionadas e do conceito granulométrico definido, inicia-se o processo de formulação até que obtenha o MPT desejado com os teores de água, ar e custos especificados.

b. Validação reológica: a composição formulada deve ser submetida aos ensaios reológicos descritos neste trabalho: a) reometria de mistura; b) reometria rotacional; c) squeeze flow;

c. Validação física no estado endurecido: a composição formulada deve ser submetida aos ensaios físicos descritos neste trabalho: a) resistência mecânica; b) módulo de elasticidade; c) permeabilidade

d. A análise dos resultados desta tese permite inferir que a argamassa formulada deve atender as demandas especificadas. Caso isso não ocorra, alguns procedimentos devem ser analisados:

   i. precisão na caracterização das MP´s;
   ii. precisão na realização dos procedimentos experimentais de mistura,
   iii. qualidade de moldagem dos copos de prova;

e. Caso a precisão desses procedimentos esteja adequada, eventuais discrepâncias entre o desempenho previsto e o obtido da argamassa formulada poderão estar associadas com os aditivos empregados na formulação, ou com fatores ligados à composição química das MP´s. Nesse caso, devem ser realizados estudos que avaliem a cinética de hidratação do cimento frente aos aditivos empregados através de ensaios como calorimetria isotérmica de condução e análise termogravimétrica.

6) Aplicação e avaliação das argamassas

a. Sendo aprovada na etapa de formulação e validação, a argamassa deverá ser aplicada em campo nas condições reais para qual foi formulada;
b. As argamassas preparadas para os testes de campo deverão ser submetidas aos mesmos ensaios realizados na etapa de validação da formulação;
c. Discrepâncias de comportamento entre a argamassa formulada e a aplicada deverão ser analisadas em relação ao nível de exigência e tolerância definido como alvo.

11 CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas da pesquisa foram:

- O método de squeeze-flow é uma ferramenta poderosa para avaliação de argamassas. Capaz de identificar alterações nas argamassas fluidas em função do tipo de mistura aplicado. O procedimento para mistura de argamassas em laboratório prescrito em norma é ineficiente e precisa ser revisto.
- Determinação da influência das principais variáveis experimentais no squeeze-flow: (a) velocidade de deslocamento – baixas velocidades promovem separação de fases, enquanto altas velocidades fluxo homogêneo; (b) relação D/h – maiores valores favorecem a ocorrência de cisalhamento, não sendo possível a comparação entre ensaios com diâmetros diferentes; (c) rugosidade - promove maior cisalhamento e separação de fases.
- Desenvolvimento de método efeitvo para quantificação da separação de fases, fenômeno com efeito determinante no comportamento reológico em squeeze-flow.
- Importância da correta caracterização física dos materiais para o entendimento dos fatores que governam o comportamento reológico e propriedades finais de argamassas.
- Produtos de revestimento nacionais apresentam uma grande variedade de características de formulação. As características médias das argamassas brasileira e européia são muito similares.
- Teor de ar incorporado exerce substancial influência no comportamento de mistura, reológico sob cisalhamento rotacional e squeeze-flow e, também nas propriedades finais das argamassas.
- Argamassas com aditivo incorporador de ar precisam de programas de mistura e ciclos de cisalhamento que evitem a incorporação excessiva de ar. Nestes casos sugere-se utilizar procedimentos de mistura rápidos e ensaios de cisalhamento com patamares curtos em cada rotação.
- Criação do banco de dados inédito com mais de 30 argamassas nacionais e européias permitiu o mapeamento do comportamento reológico e propriedades finais dos produtos de revestimento. Distribuição de fases, MPT e separação de fases são os

parâmetros que determinam o comportamento reológico em solicitações de squeeze-flow.

- Teor de água + ar no estado fresco determina a porosidade total das argamassas endurecidas, que por sua vez determina com excelente relação o módulo de elasticidade e a permeabilidade. As relações estabelecidas experimentalmente permitem a previsão das propriedades no estado endurecido a partir das características no estado fluido com boa confiabilidade.
- A otimização do empacotamento de agregados permite um melhor aproveitamento da pasta para promover argamassas com comportamento reológico mais adequado à aplicação ou com menor consumo de finos e água.
- Squeeze-flow tem boa relação com a percepção do pedreiro, principalmente, nas etapas de lançamento e aperto. Argamassas de difícil deformação no squeeze-flow necessitam de maior esforço da mão-de-obra durante a aplicação, resultando em menor produtividade. O método deve também ser usado para avaliar a adesão da argamassa na ferramenta através da puxada após o ensaio comum de esmagamento, visto que este é um fator que dificulta a aplicação manual.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, R. P. N**. Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. São Paulo, 2005. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP.

ANTUNES, R. P. N.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Influência da seqüência de mistura nas propriedades reológicas de argamassas avaliada por squeeze-flow.** Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas,VI, In: Anais, ANTAC, Florianópolis, 2005. p 158-179.

BANFILL P. F. G. **Rheology of fresh cement and concrete**. Rheology Reviews, 2006, 61-130.

BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh mortar – a review**. *In*: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, VI. ANAIS, Florianópolis, ANTAC, 2005. p. 73-82.

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

BONADIA, P. et al. **Applying MPT principle to high-alumina castables.** Amer. Ceram. Soc. Bull. v.78, n3, p 57-60, 1999.

BROWER, L. E.; FERRARIS, C. F. **Comparison of concrete rheometers.** Concrete International, vol. 25, nº 8, p. 41 – 47, August 2003.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais**: uma introdução, 5ª Ed., LCT – Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2002. 589 p.

CAMPANELLA, O. H.; PELEG, M. **Squeezing flow viscosimetry of peanut butter.** Journal of Food Science 52 (1), p. 180-184, 1987.

CARDOSO, F. A.; AGOPYAN, A.K; CARBONE, C.; JOHN, V.M.; PILEGGI, R.G. **Squeeze flow as a tool for developing optimized gypsum plasters.** Construction and Building Materials 23 (2009a) p. 1349–1353.

CARDOSO, F. A.; INNOCENTINI, M. D. M.; AKIYOSHI, M. M.; PANDOLFELLI, V. C. **Effect of curing time on the properties of CAC bonded refractory castables**. Journal of the European Ceramic Society, v. 24, p. 2073–2078, 2004.

CARDOSO, F. A.; LOFRANO, F. C.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R.G. **Influence of plate roughness on phase segregation and rheological behavior of mortars by squeeze-flow.** Resumo In: British Society of Rheology – Midwinter Meeting 08: Microstructure and Rheology (Leeds, 15-16 Dec 2008).

CARDOSO, F. A.; MENDES, T. M.; CAMPORA, F. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Caracterização Física de Argamassas de Revestimento do Mercado Nacional.** SBTA, (2009b).

CARDOSO, F.A.; JOHN, V.M.; PILEGGI, R.G. **Rheological behavior of mortars under different squeezing rates.** Submetido à publicação na revista Cement and Concrete Research (2007).

CARDOSO, F.A.; PILEGGI, R.G.; JOHN, V.M. **Caracterização reológica de argamassas através do método de squeeze-flow.** Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VI, In: Anais, ANTAC, Florianópolis p 121-143, 2005.

CAVANI, G.R.; ANTUNES; R.P.N.; JOHN; V.M. **Influência do teor de ar incorporado na trabalhabilidade de argamassas mistas.** *In:* Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, II. *In:* Anais, Salvador, ANTAC, Salvador, 1997. p. 110-119.

COLLOMB, J.; CHAARI, F.; CHAOUCHE, M. **Squeeze flow of concentrated suspensions of spheres in Newtonian and shear-thinning fluids.** J. Rheol. 48 (2004) 405-416.

CONSITRA. Disponível em : <www.abcp.org.br/consitra_realidade.htm>. Acesso em: 10 jul. 2004.

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.

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.

DELHAYE, N.; POITOU, A.; CHAOUCHE, M. **Squeeze flow of highly concentrated suspensions of spheres.** J. Non-Newtonian Fluid Mech. 94 (2000) 67-74.

DUAILIBE, R. P.; CAVANI, G. R.; OLIVEIRA, M. C. B. **Influência do tipo de projeção da argamassa na resistência de aderência à tração e permeabilidade à água.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. Anais. Florianópolis: ANTAC, 2005.

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

ESTELLÉ, P.; LANOS, C. **Squeeze flow of Bingham fluids under slip with friction boundary condition.** Rheology Acta 46, p. 397-404, 2007.

ESTELLÉ, P.; LANOS, C.; PERROT, A.; SERVAIS, C. **Slipping zone location in squeeze flow.** Rheology Acta 45, p. 444-448, 2006.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive process control of crowded particulate suspensions applied to ceramic manufacturing.** London, Kluwer Academic Publishers, 1994, 786p.

GLATTHOR, A.; SCHWEIZER, D. **Rheological Lab Testing of Building Formulations**. ConChem Conference, Düsseldorf, 1994, http://www.baustoffchemie.de/en/rheology, Acesso em: 03 abr. 2004.

GOMES, A.O.; NEVES, C.M.M. **Proposta de método de dosagem racional de argamassas contendo argilominerais**. Ambiente Construído, Porto Alegre, ANTAC, v. 2, n. 2, 2002,p. 19-30.

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

HU, C.; LARRARD, F. **Rheological testing and modelling of fresh high performance concrete.** Materials and Structures, v. 28, p. 1-7, 1995.

INNOCENTINI, M. D. M..; PILEGGI, R. G.; STUDART, A. R.; PANDOLFELLI, V. C. **PSD effect on the permeability of refractory castables.** American Ceramic Society Bulletin, 80 [5] 31-36 (2001).

INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C. **Considerações sobre a estimativa da permeabilidade em concretos refratários através das equações de Darcy e de Forchheimer.** Cerâmica, v. 45, n. 292/293, p. 61-67, 1999

INNOCENTINI, M. D. M.; PILEGGI, R. G.; RAMAL JR, F.T.; PANDOLFELLI, V. C. **Permeability and drying behavior of PSD-designed refractory castables**. American Ceramic Society Bulletin 82 [7] 1-6 (2003).

KOEHLER, E. P.; FOWLER D. W. **Summary of concrete workability test methods**. ICAR Report 105.1 International Center of Aggregates Research, Austin, 2003.

KOLENDA F.; RETANA, P.; RACINEUX, G.; POITOU, A. **Identification of rheological parameters by the squeezing test**. Powder Technology**,** v. 130, 2003, p. 56– 62.

LOFRANO, F. C.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Influência da rugosidade das placas na caracterização reológica de argamassas por squeeze-flow.** In: anais eletrônicos do VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas (VIII SBTA), Curitiba (2009).

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

MIN, B. H.; ERWIN, L.; JENNINGS, H. M. **Rheological behavior of fresh cement paste as measured by squeeze flow.** Journal of Materials Science 29, p. 1374-1381, 1994.

MONTE, R.; ALMEIDA, V.; KUDO, E. K.; BARROS, M. M. S. B.; JOHN, V. M. **Módulo de elasticidade dinâmico: comparação entre a velocidade da onda ultrassônica e freqüência ressonante.** In: anais eletrônicos do VII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas (VII SBTA), Recife (2007).

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico**. Fazendo Arte Editorial, 2000. 195 p.

ÖZKAN, N.; OYSU, C.;BRISCOE, B. J.; AYDIN, I. **Rheological Analysis of Ceramic Pastes.** Journal of the European Ceramic Society, v. 19, 1999, p. 2883-2891.

PILEGGI, R.G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. São Carlos, 2001. 187p Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.

PILEGGI, R.G.; BETIOLI, A. M.; CARDOSO, F.A.; JOHN, V. M. **Extended rheological characterization of cement pastes: Squeeze flow plus rotational rheometry** – aceito para publicação no 12th International Congress on the Chemistry of Cement a ser realizado em Montréal (Canadá) no período de 8 a 13 de julho de 2007.

PILEGGI, R.G.; STUDART, A.R.; GALLO, J.; PANDOLFELLI, V.C. **How mixing affects the rheology of refractory castables, Parts I and II.** American Ceramic Society Bulletin. v. 80 (6) p. 27-31, (7) p. 38-42, 2001.

POITOU, A.; RACINEUX, G. **A squeezing experiment showing binder migration in concentrated suspensions.** Journal of Rheology 45 (3), p. 609-625, 2001.

PÓVOAS, Y. V. **Avaliação da formação de "película" na argamassa colante e sua influência na adesão**. São Paulo, 2005. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP.

POWERS, T.C. **The properties of fresh concrete.** New York, John Wiley, 1968. 664 p.

QUARCIONI, V. A.; CINCOTTO, M. A.; CARDOSO, F. A.; GUILGE, M. S.; INNOCENTINI, M. D. M. **Aplicação do método de ensaio de permeabilidade ao ar em argamassas moldadas em laboratório.** In: anais eletrônicos do VII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas (VII SBTA), Recife (2007).

QUIROGA, P. N.; FOWLER, D. W. **The Effects of Aggregates Characteristics on The Performance of Portland Cement Concrete.** Research Report ICAR – 104-1F International Center for Aggregates Research. The University of Texas at Austin. 2004.

RIXOM R.; MAILVAGANAM, N. **Chemical admixtures for concrete,** 3ª Ed. E & FN Spon, Londres, 1999.

SCRIVENER, K.L. **The Microestructure of Concrete.** In: Materials Science of Concrete I. The American Ceramic Society, Inc. Westerville, 1989.

SELMO, S.M.S. **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachada de edifícios**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1989, 187p (Dissertação de Mestrado).

SILVA, R. P. **Argamassas com adição de fibras de polipropileno - estudo do comportamento reológico e mecânico.** São Paulo, 2006. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP.

STEFFE, J. F. **Rheological methods in food process engineering.** Freeman Press, USA, 1996.

STRUBLE, L. J.; JIANG, Q. **Effects of Air Entrainment on Rheology.** ACI Materials Journal. 101 (6), p 448-456, 2004.

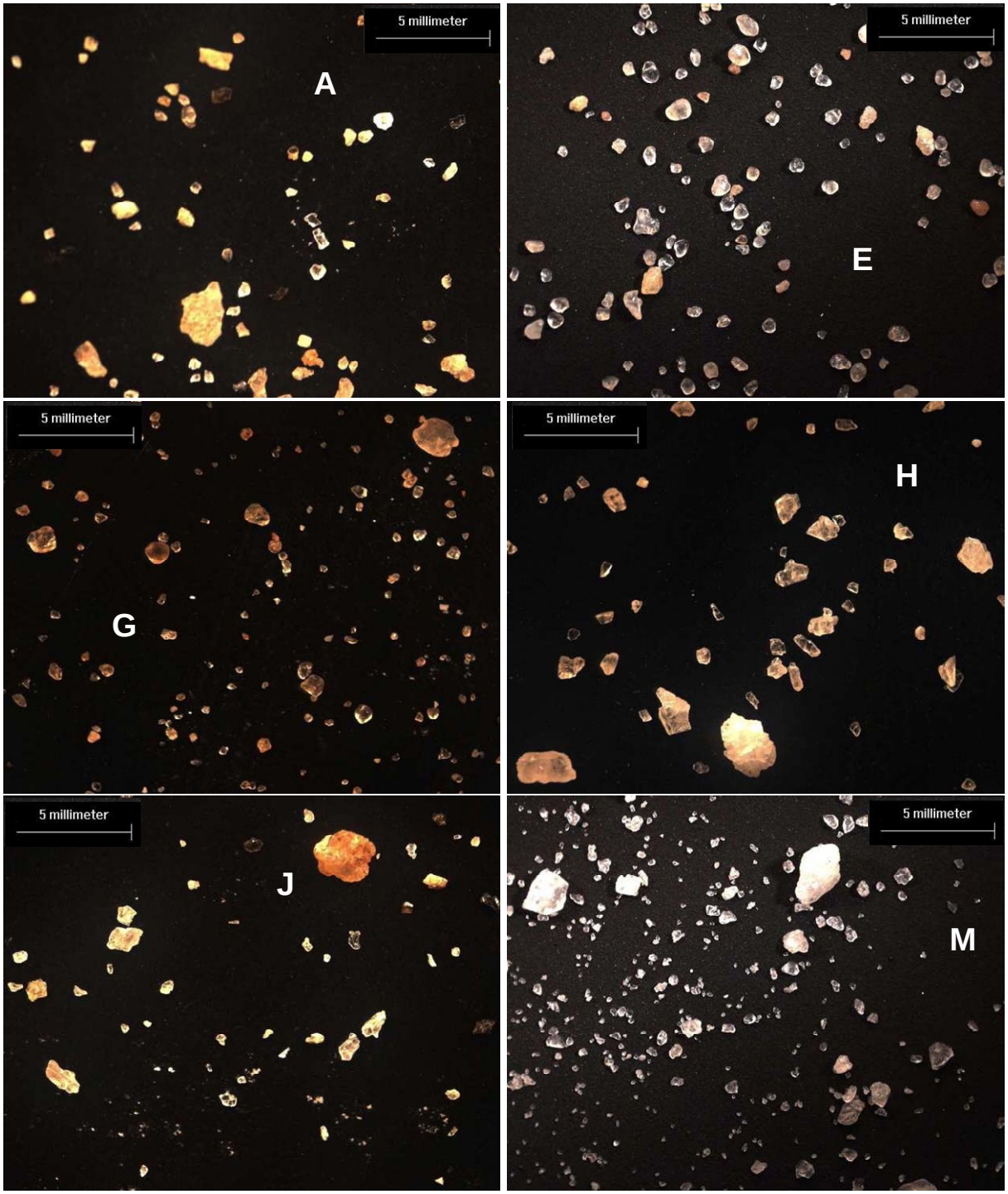
TOUTOU, Z.; ROUSSEL, N.; LANOS, C. **The squeezing test: a tool to identify firm cement-based material's rheological behaviour and evaluate their extrusion ability.** Cement and Concrete Research, 35, 2005. p. 1891– 1899.

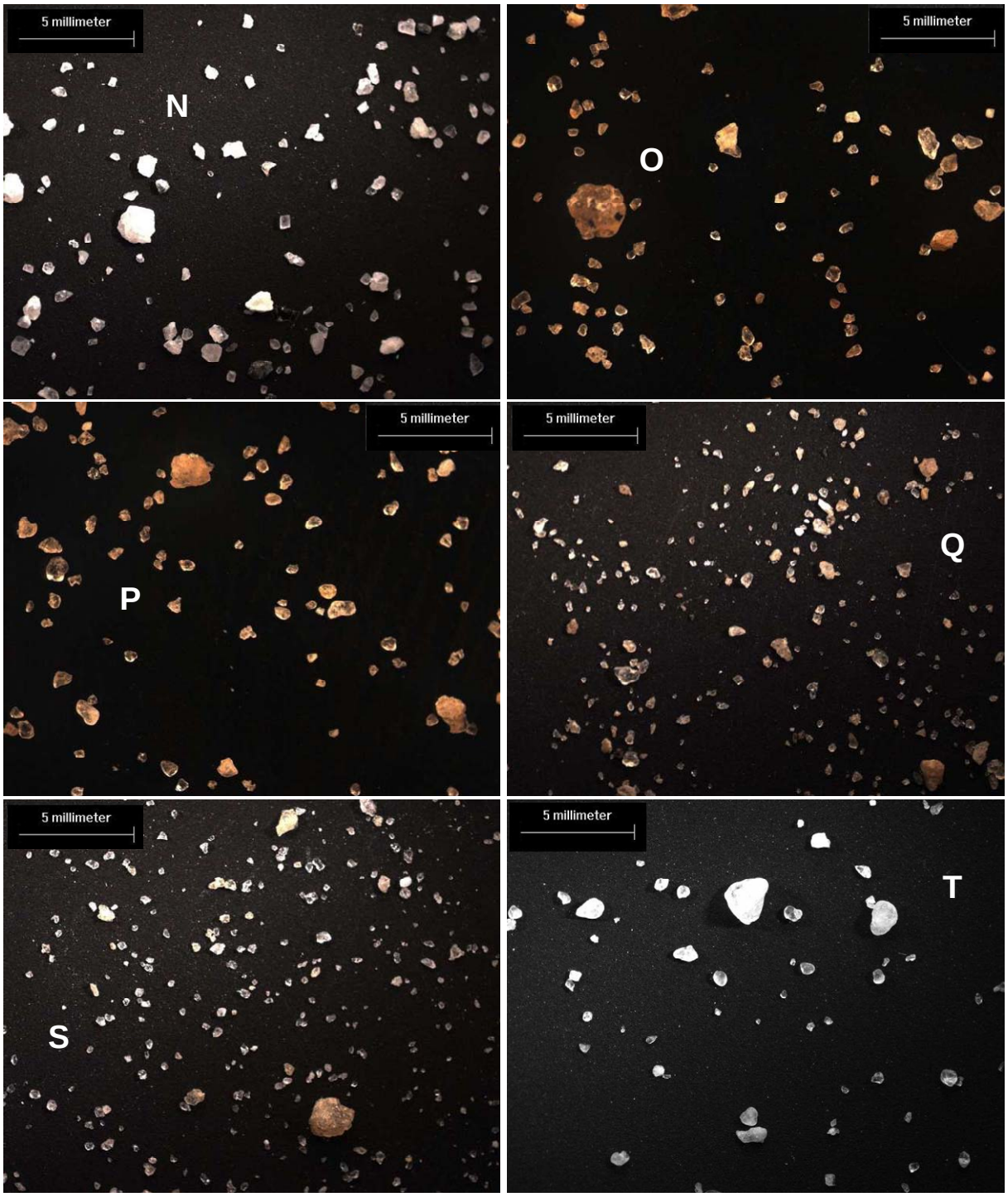
WILLIAMS, D.A.; SAAK, A.W.; JENNINGS, H.M. **The Influence of Mixing on the Rheology of Fresh Cement Paste**. Cement and Concrete Research. v. 29, p 1491-96, 1999.

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

APÊNDICE A

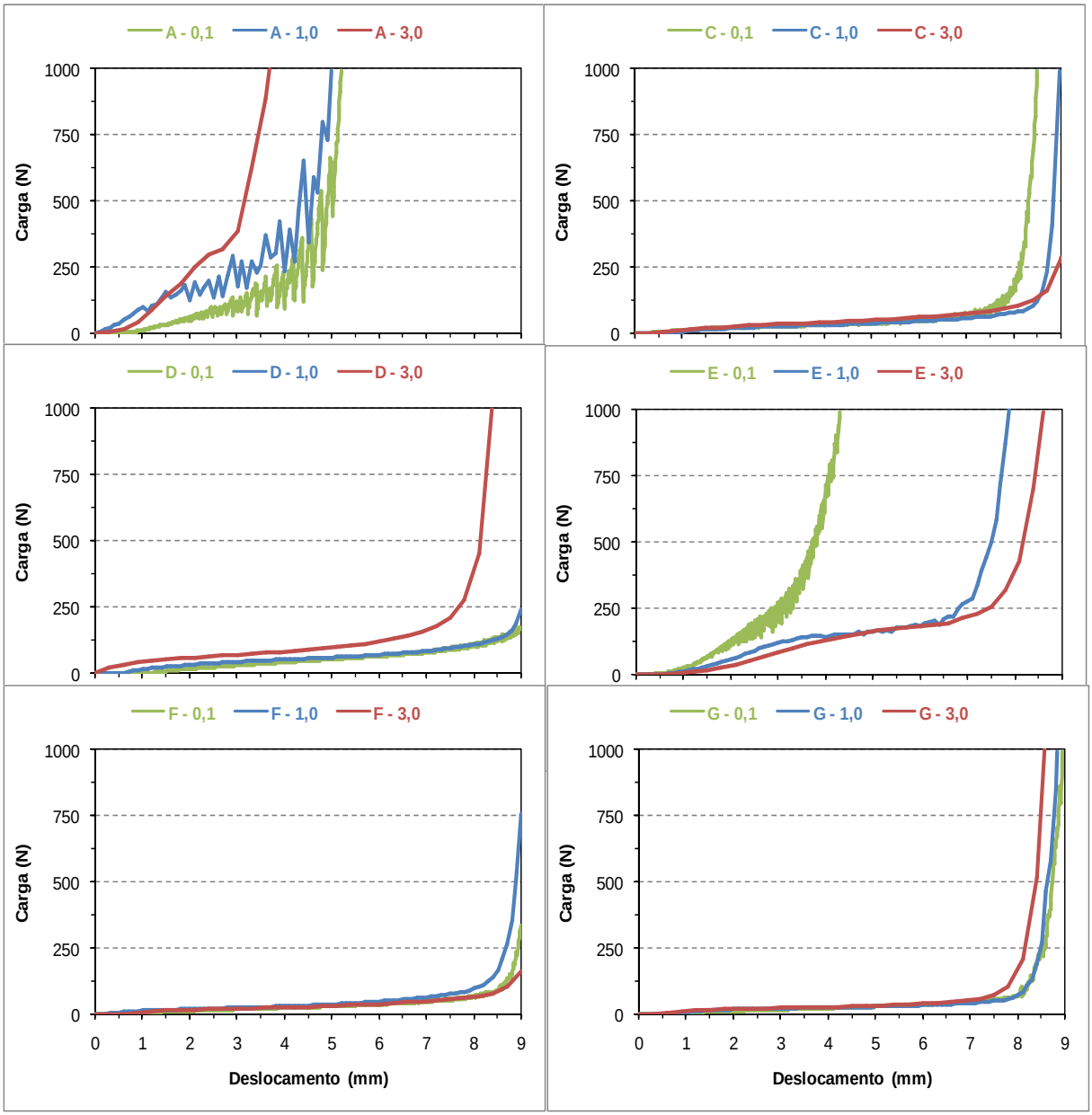
Fotos dos agregados

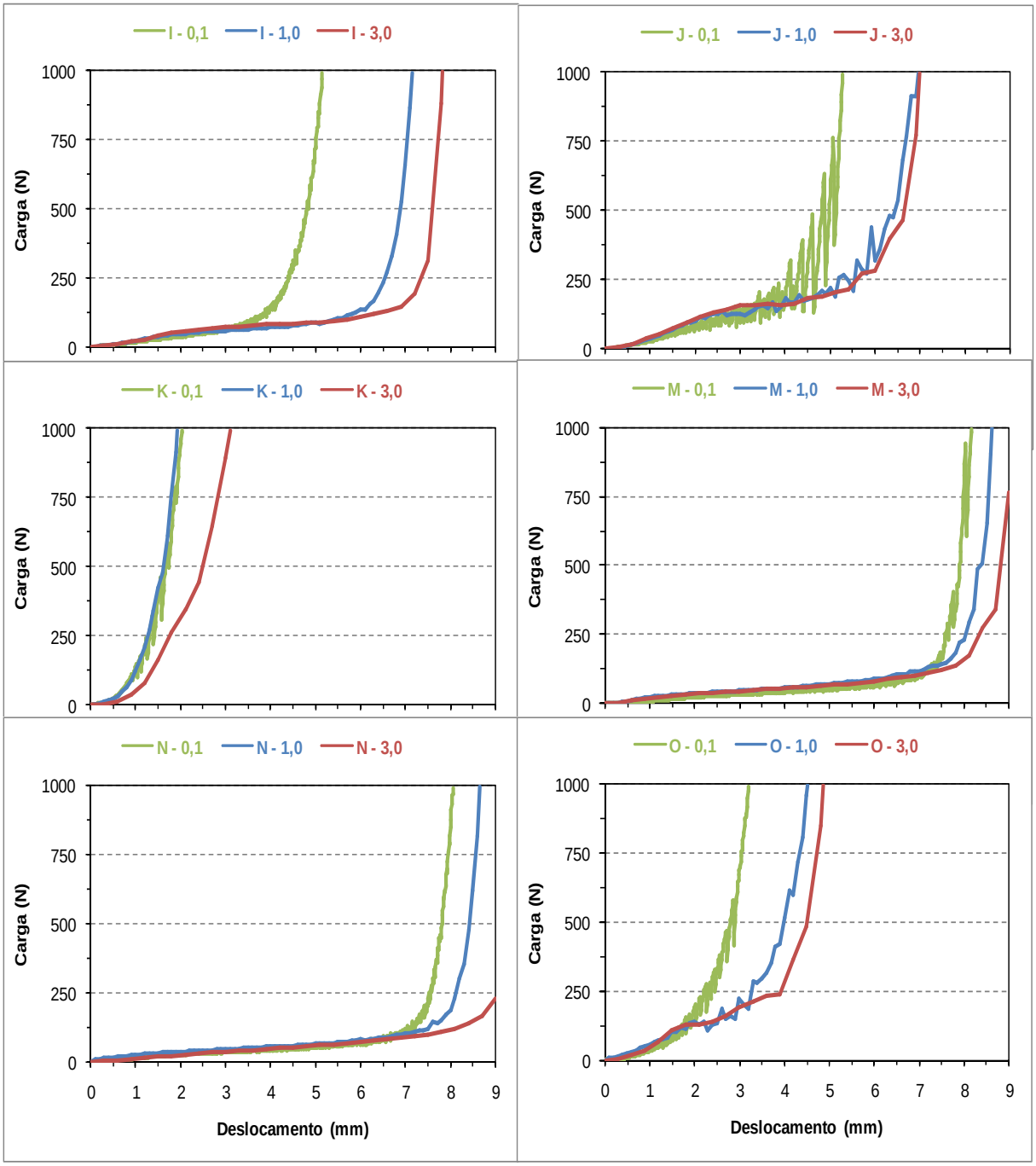


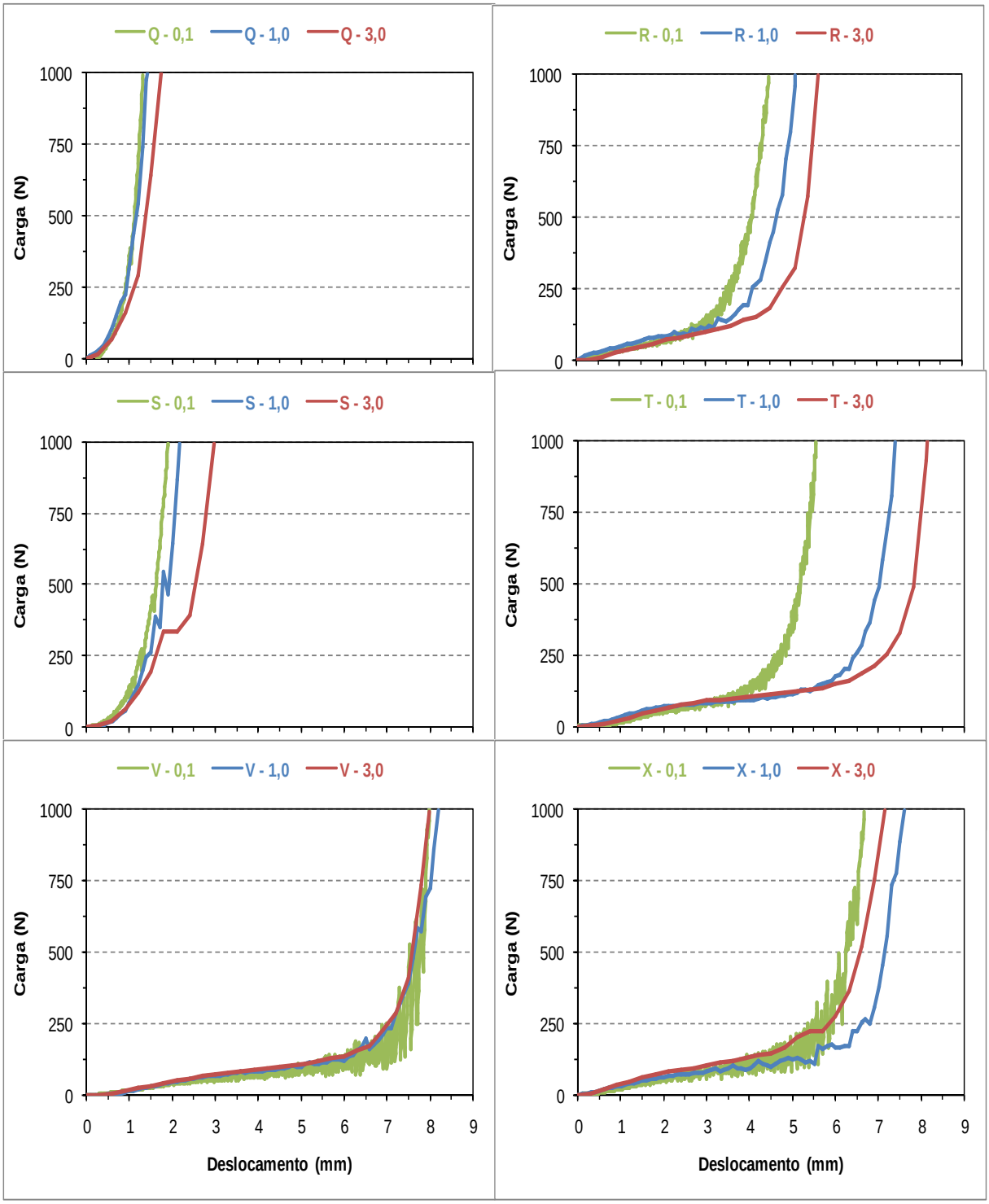

5 millimeter
N
5 millimeter
O
5 millimeter
P
5 millimeter
Q
5 millimeter
S
5 millimeter
T

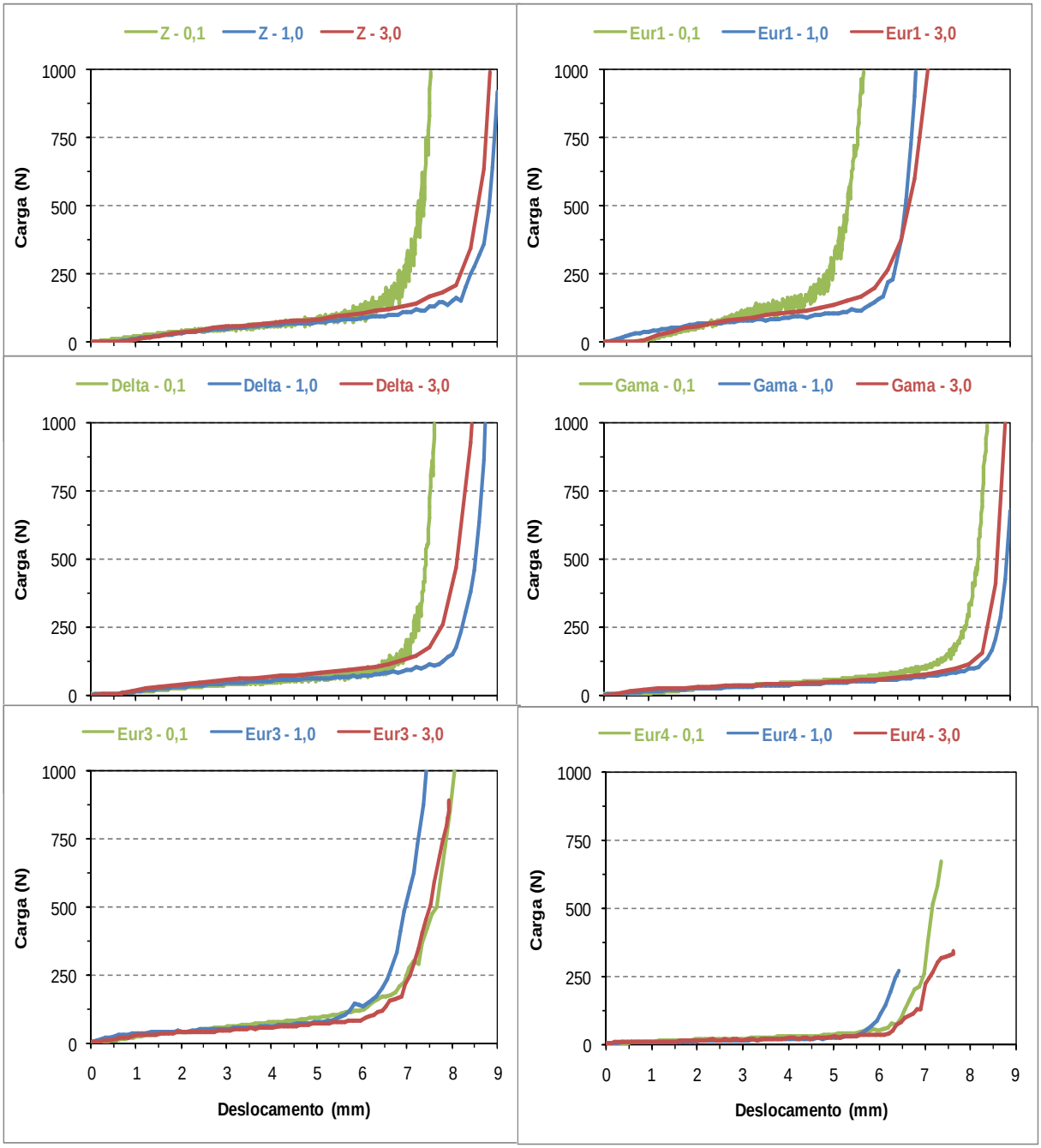
APÊNDICE B

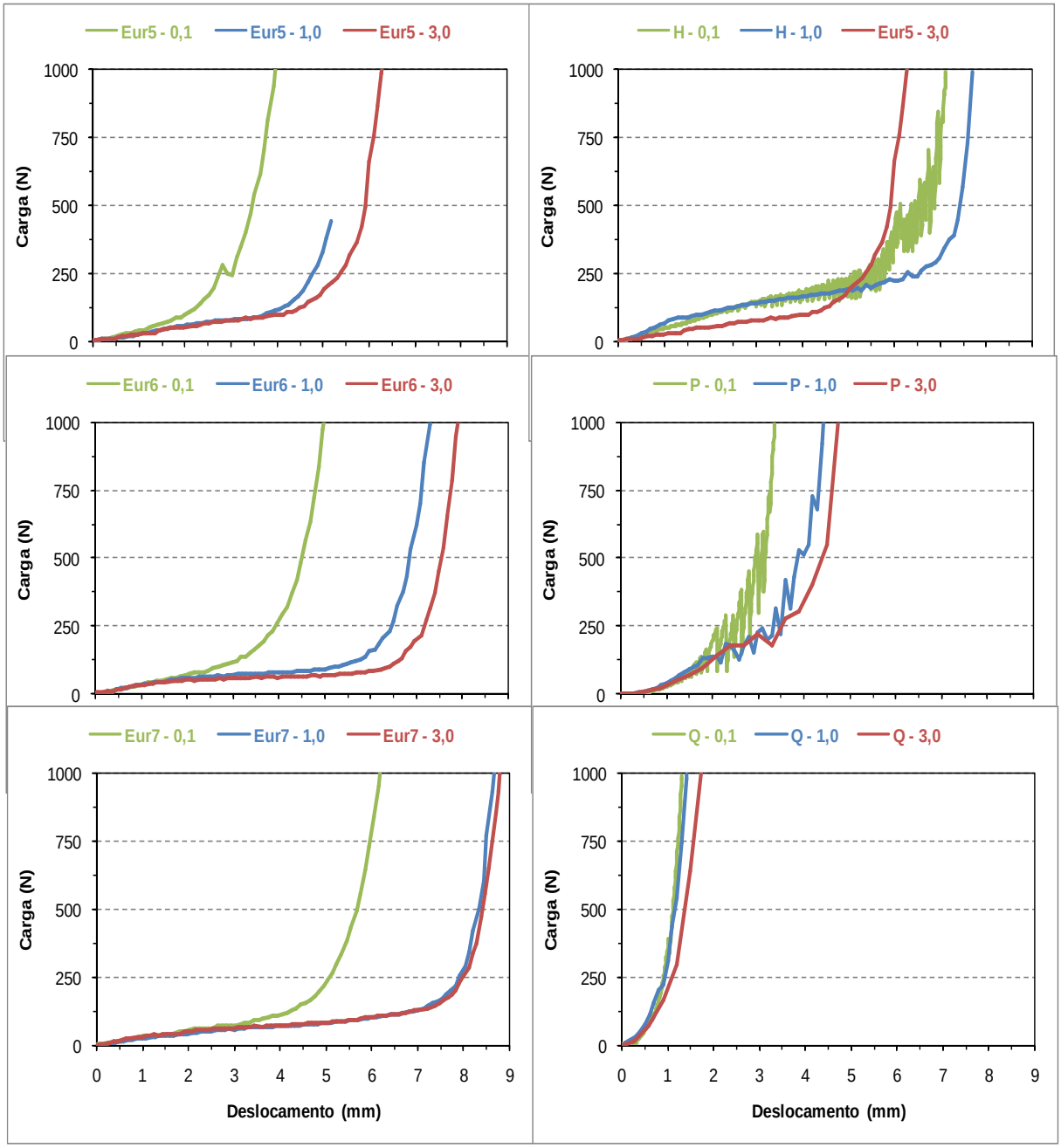
Resultados de squeeze-flow.




I - 0,1
I - 1,0
I - 3,0
J - 0,1
J - 1,0
J - 3,0
K - 0,1
K - 1,0
K - 3,0
M - 0,1
M - 1,0
M - 3,0
N - 0,1
N - 1,0
N - 3,0
O - 0,1
O - 1,0
O - 3,0
Carga (N)
0
250
500
750
1000
Deslocamento (mm)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9


Q - 0,1
Q - 1,0
Q - 3,0
R - 0,1
R - 1,0
R - 3,0
S - 0,1
S - 1,0
S - 3,0
T - 0,1
T - 1,0
T - 3,0
V - 0,1
V - 1,0
V - 3,0
X - 0,1
X - 1,0
X - 3,0
Carga (N)
0
250
500
750
1000
Deslocamento (mm)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9


Z - 0,1
Z - 1,0
Z - 3,0
Eur1 - 0,1
Eur1 - 1,0
Eur1 - 3,0
Delta - 0,1
Delta - 1,0
Delta - 3,0
Gama - 0,1
Gama - 1,0
Gama - 3,0
Eur3 - 0,1
Eur3 - 1,0
Eur3 - 3,0
Eur4 - 0,1
Eur4 - 1,0
Eur4 - 3,0
Carga (N)
0
250
500
750
1000
Deslocamento (mm)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9


Eur5 - 0,1
Eur5 - 1,0
Eur5 - 3,0
H - 0,1
H - 1,0
Eur5 - 3,0
Eur6 - 0,1
Eur6 - 1,0
Eur6 - 3,0
P - 0,1
P - 1,0
P - 3,0
Eur7 - 0,1
Eur7 - 1,0
Eur7 - 3,0
Q - 0,1
Q - 1,0
Q - 3,0
Carga (N)
0
250
500
750
1000
Deslocamento (mm)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9

APÊNDICE C

Dados da avaliação da aplicabilidade por pedreiros

Ficha de avaliação da aplicabilidade de argamassas

Data	Aplicador	Argamassa	T (°C)	UR (%)

Questionário

Fase 1 – homogeneidade e estabilidade após mistura

P1 – A argamassa parece bem misturada?

P2 - Durante o transporte há exsudação de água? A argamassa mudou?

Avaliação em relação à mistura

Ruim	Regular	Boa	Ótima
✯	✯✯	✯✯✯	✯✯✯✯

Fase 2 – aplicação

P3 – Argamassa deixa penetrar facilmente a colher?

P4 – A liga da argamassa é adequada para aplicação?

P5 – Tempo de aplicação (para preencher a área delimitada 120x100cm)?

R5 – Hora início = ; Hora fim = ; Tempo +

P6 – O lançamento do material é fácil? Argamassa leve ou pesada?

P7 – Argamassa ao ser lançada adere à colher?

P8 – Houve adesão inicial na parede? Muita reflexão?

P9 – Argamassa distribui-se facilmente na parede?

P10 – O aperto após a aplicação é fácil ou difícil? Como é feito?

P11 – Foi possível aplicar 3cm de revestimento? Por quê?

Avaliação em relação à aplicação

Ruim	Regular	Boa	Ótima
☆	☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆

Fase 3 – acabamento

P12 – Tempo para sarrafeamento considerando o início da aplicação?

R12– Início aplicação = (h:min); Início sarrafeamento = ; Fim sarrafeamento = -

P13 – A argamassa permite ser facilmente sarrafeada? Existe alguma dificuldade? Qual?

P14 – Tempo para desempeno?

R14 – Início desempeno = 15:03 (h:min); Fim desempeno = ;

P15 – A argamassa permite o deslizamento da desempenadeira? O acabamento é rápido e fácil? Precisou borrifar água?

P16 – Como ficou a superfície?

Avaliação global

P17 – O que você achou da argamassa?

P18 – Você faria alguma modificação? Qual?

P19 – Essa argamassa proporciona qual ritmo de trabalho? Rende quantos metros por dia?

P20 – O revestimento aplicado ficou bom?

P22 – Qual característica positiva da argamassa? E negativa?

Fichas de resposta

Argamassa 1	Aplicador **A**	**B**	**C**
Homogênea	sim	sim	sim
Exsudação	não	sim	sim
Liga	☆ Pouca	☆ Pouca	☆☆☆
Leve / Pesada	Pesada	Média	Leve
Aplicação	☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
Gruda colher	não	não	não
Lançamento	☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Adesão parede	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Reflexão	☆☆	☆	☆☆
Espalhamento	☆	☆☆	☆☆☆☆
Aperto	☆☆☆	☆☆	☆☆☆☆
Espessura Máx.	6,5cm	6,5cm	8,5cm
Tempo de espera	30min	35min	41min
Acabamento	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
Sarrafeamento	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Desempeno	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
Superfície	☆☆☆	☆☆	☆☆☆☆
Qualidade final	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
Produtividade	☆☆☆☆ 35m^2/dia	☆☆☆ 30m^2/dia	☆☆☆☆ 40m^2/dia
Avaliação Geral	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
Características Positivas	Boa adesão; fácil sarrafear/desempenar; bom acabamento	Fácil de sarrafear e desempenar	Puxa rápido e desliza bem
Características Negativas	Pesada p/ aplicar	Não espalha muito	

Argamassa 2	Aplicador **A**	**B**	**C**
Homogênea	sim	sim	não
Exsudação	não	não	não
Liga	☆ Muita liga	☆ Borrachenta	☆☆☆
Leve / Pesada	Leve	Pesada	Leve
Aplicação	☆☆☆	☆☆	☆☆☆
Gruda colher	sim	sim	não
Lançamento	☆☆☆	☆☆	☆☆☆
Adesão parede	☆☆☆	☆☆	☆☆☆
Reflexão	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Espalhamento	☆☆☆	☆☆	☆☆☆☆
Aperto	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
Espessura Máx.	6,5cm	6,0cm	6,0cm
Tempo de espera	180min		*80min
Acabamento	☆☆☆	☆☆	☆☆
Sarrafeamento	☆☆☆	☆☆	☆
Desempeno	☆☆ Lento, gruda na desempenadeira	☆☆☆	☆☆
Superfície	☆☆	☆☆	☆☆☆
Qualidade final	☆☆☆	☆☆☆	☆☆
Produtividade	☆☆☆ 30m^2/dia	☆☆ 20m^2/dia	☆☆ 15m^2/dia
Avaliação Geral	☆☆☆	☆☆	☆☆
Características Positivas	Fácil sarrafear; bom acabamento	Fácil de desempenar	Boa p/ chapar; aperto fácil;
Características Negativas	Gruda na colher e desempenadeira	Muita retenção de água; muita liga	Grossa, áspera; *Não esperou puxar

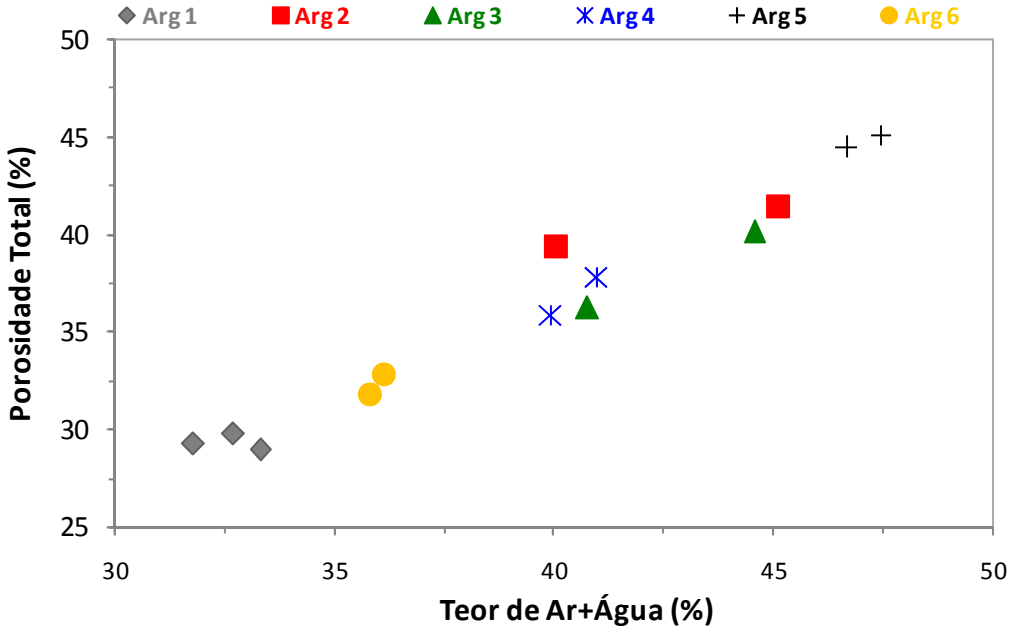
Argamassa 3	Aplicador **A**	**B**	**C**
Homogênea	não	sim	sim
Exsudação	não	não	não
Liga	☆ Muita liga	☆ Muita retenção	☆ Muita liga
Leve / Pesada	Leve	Pesada	Pesada
Aplicação	☆	☆	☆
Gruda colher	sim	sim	sim
Lançamento	☆ Leve, mas grudenta	☆	☆ Pesada porque gruda
Adesão parede	☆☆	☆☆	☆
Reflexão	☆☆☆	☆☆	☆☆
Espalhamento	☆☆☆	☆☆	☆
Aperto	☆☆ Difícil porque gruda	☆☆☆	☆ Precisa de força e não desliza
Espessura Máx.	2,5cm	2,5cm	2,5cm
Tempo de espera	157min	180min	110min*
Acabamento	☆	☆	☆
Sarrafeamento	☆	☆ Cola na régua	☆
Desempeno	☆☆ Lento, gruda na desempenadeira	☆	☆☆
Superfície	☆	☆	☆☆
Qualidade final	☆☆	☆☆	☆☆☆
Produtividade	☆ >10m^2/dia	☆ >10m^2/dia	☆ 10m^2/dia
Avaliação Geral	☆	☆	☆
Características Positivas	Nada	Nada	
Características Negativas	Grudenta p/ lançar, sarrafear e desempenar	Muita liga; ruim de sarrafear; tempo de espera longo	Grudenta p/ lançar, sarrafear; tempo de espera longo; *Não esperou puxar

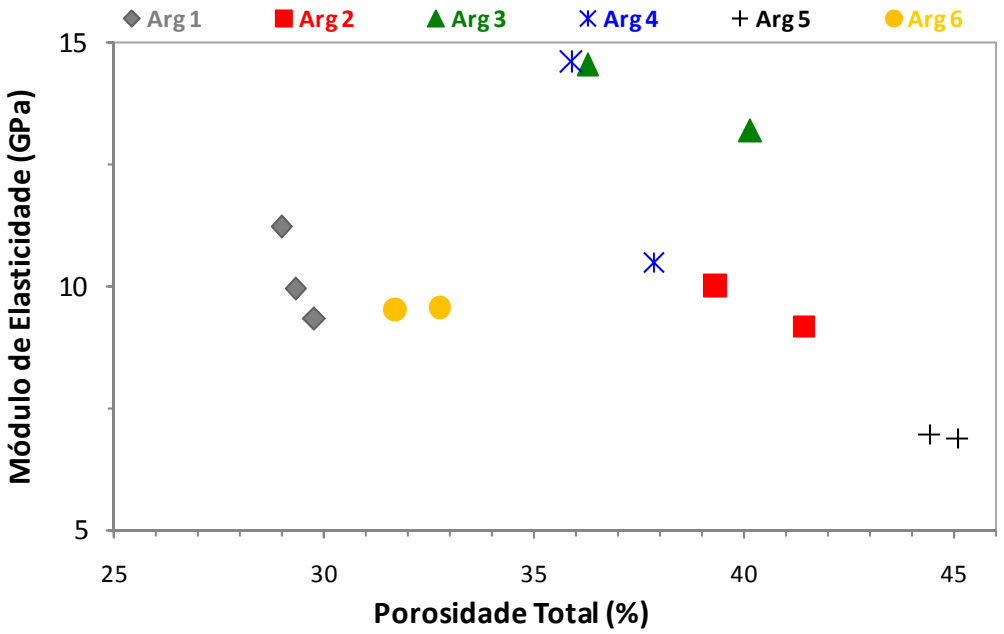
Argamassa 4	Aplicador **A**	**B**	**C**
Homogênea	não	sim	sim
Exsudação	não	não	não
Liga	☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
Leve / Pesada	Leve	Leve	Média (ideal)
Aplicação	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Gruda colher	não	não	não
Lançamento	☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
Adesão parede	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Reflexão	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
Espalhamento	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Aperto	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Espessura Máx.	11,5cm	>9,5cm	8,5cm
Tempo de espera	85min	70min	65min
Acabamento	☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Sarrafeamento	☆ Dura, difícil	☆☆☆	☆☆ Adicionou água
Desempeno	☆☆ Gruda	☆☆☆	☆☆☆
Superfície	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆
Qualidade final	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆
Produtividade	☆☆☆ 30m^2/dia	☆☆☆☆ 35-40m^2/dia	☆☆☆☆ 40m^2/dia
Avaliação Geral	☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
Características Positivas	Fácil de chapar; espessura grossa; acabamento ótimo	Tudo	Puxa rápido
Características Negativas	Difícil de sarrafear; gruda p/ desempenar	Nada	Nada

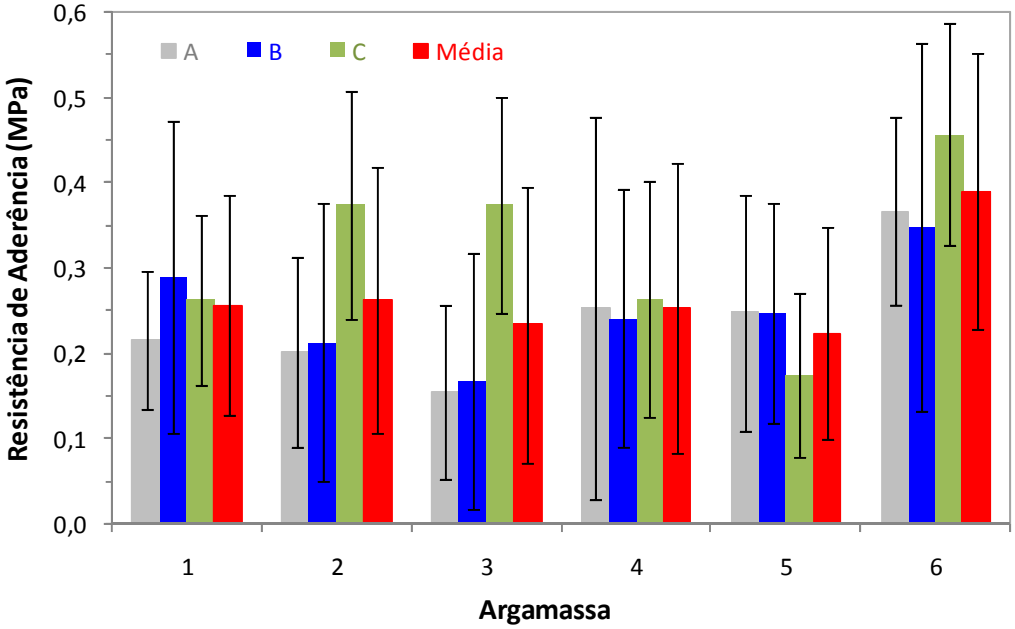
Argamassa 5	Aplicador **A**	**B**	**C**
Homogênea	sim	sim	sim
Exsudação	não	não	não
Liga	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Leve / Pesada	Leve	Leve	Média
Aplicação	☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
Gruda colher	sim	não	sim
Lançamento	☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Adesão parede	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆
Reflexão	☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
Espalhamento	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Aperto	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Espessura Máx.	6,5cm		8,0cm
Tempo de espera	210min	182min	36min
Acabamento	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Sarrafeamento	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Desempeno	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
Superfície	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Qualidade final	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
Produtividade	☆☆☆☆ 35m^2/dia	☆☆☆☆ 35m^2/dia	☆☆☆☆ 40m^2/dia
Avaliação Geral	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
Características Positivas	Fácil de sarrafear e desempenar	Boa p/ chapar e desempenar; bom tempo de espera	Espalha e adere bem; pouco rebote
Características Negativas	Um pouco mole; p/ chapar foi ruim	Muito plástica	Gruda um pouco na colher

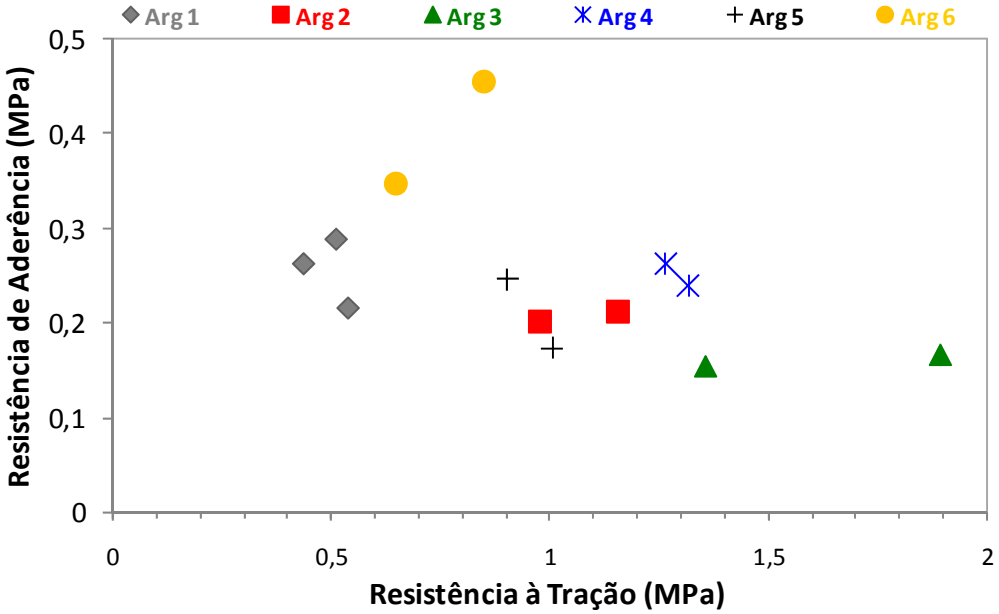
Argamassa 6	Aplicador **A**	**B**	**C**
Homogênea	sim	sim	sim
Exsudação	sim	sim	sim
Liga	☆ Pouca	☆ Pouca	☆ Pouca
Leve / Pesada	Pesada	Pesada	Leve
Aplicação	☆☆☆	☆	☆
Gruda colher	não	não	não
Lançamento	☆☆	☆☆	☆☆☆
Adesão parede	☆☆☆	☆☆☆	☆☆
Reflexão	☆☆	☆	☆
Espalhamento	☆	☆	☆☆
Aperto	☆☆☆	☆☆	☆
Espessura Máx.			7,0cm
Tempo de espera	35min	44min	30min
Acabamento	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Sarrafeamento	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆
Desempeno	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Superfície	☆☆	☆	☆
Qualidade final	☆☆	☆	☆☆
Produtividade	☆☆ $25m^2$/dia	☆☆ $25m^2$/dia	☆☆☆☆ $40m^2$/dia
Avaliação Geral	☆☆	☆	☆☆
Características Positivas	Fácil de sarrafear e desempenar	Fácil de sarrafear e desempenar	Seca rápido
Características Negativas	Sem liga; não agüenta espessura grossa; não espalha; puxa rápido	Sem liga; pesada; muita reflexão; não espalha; puxa rápido	Acabamento ruim

Propriedades mecânicas






0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,0
A
B
C
Média
Resistência de Aderência (MPa)
1
2
3
4
5
6
Argamassa


Arg 1
Arg 2
Arg 3
Arg 4
Arg 5
Arg 6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
Resistência de Aderência (MPa)
0
0,5
1
1,5
2
Resistência à Tração (MPa)